DIGITALES ARCHIV

ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
ZBW – Leibniz Information Centre for Economics

Marscheider-Weidemann, Frank

Book

Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021 : Auftragsstudie

Provided in Cooperation with:
DERA - Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin

Reference: Marscheider-Weidemann, Frank (2021). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021 : Auftragsstudie. Datenstand: Mai 2021; Aktualisierung im August 2021. Berlin : DERA. https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-50.pdf?__blob=publicationFile&v=4.

This Version is available at:
http://hdl.handle.net/11159/7650

Kontakt/Contact
ZBW – Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft/Leibniz Information Centre for Economics
Düsternbrooker Weg 120
24105 Kiel (Germany)
E-Mail: *rights[at]zbw.eu*
https://www.zbw.eu/econis-archiv/

Standard-Nutzungsbedingungen:
Dieses Dokument darf zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen. Sofern für das Dokument eine Open-Content-Lizenz verwendet wurde, so gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

https://zbw.eu/econis-archiv/termsofuse

Terms of use:
This document may be saved and copied for your personal and scholarly purposes. You are not to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public. If the document is made available under a Creative Commons Licence you may exercise further usage rights as specified in the licence.

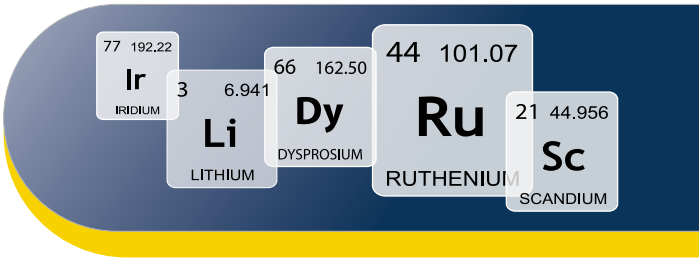
ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Deutsche Rohstoffagentur
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

50 DERA Rohstoffinformationen





Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021

»Auftragsstudie«

Impressum

Editor: Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Wilhelmstraße 25 – 30
13593 Berlin
Tel.: +49 30 36993 226
dera@bgr.de
www.deutsche-rohstoffagentur.de

Autoren: Frank Marscheider-Weidemann, Sabine Langkau, Elisabeth Eberling, Lorenz Erdmann, Michael Haendel, Michael Krail, Antonia Loibl, Christoph Neef, Marius Neuwirth, Leon Rostek, Saeideh Shirinzadeh, Denis Stijepic, Luis Tercero Espinoza
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Str. 48
76139 Karlsruhe

Sarah-Jane Baur, Mathilde Billaud, Otmar Deubzer, Franziska Maisel, Max Marwede, Jana Rückschloss, Max Tippner
Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM
Gustav-Meyer-Allee 25, Gebäude 17/3
13355 Berlin

Kontakt DERA: Ulrike Dorner | ulrike.dorner@bgr.de
Viktoriya Tremareva | viktoriya.tremareva@bgr.de

Layout: deckermedia GbR

Datenstand: Mai 2021; Aktualisierung im August 2021

Titelbilder: © BGR

Zitierhinweis: Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Baur, S.-J.; Billaud, M.; Deubzer, O.; Eberling, E.; Erdmann, L.; Haendel, M.; Krail, M.; Loibl, A.; Maisel, F.; Marwede, M.; Neef, C.; Neuwirth, M.; Rostek, L.; Rückschloss, J.; Shirinzadeh, S.; Stijepic, D.; Tercero Espinoza, L.; Tippner, M. (2021): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. – DERA Rohstoffinformationen 50: 366 S., Berlin.

ISBN: 978-3-948532-46-8 (Druckversion)
ISBN: 978-3-948532-47-5 (PDF)
ISSN: 2193-5319

Berlin, 2021

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ist eine technisch-wissenschaftliche Oberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Fraunhofer ISI

Fraunhofer IZM

Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021

»Auftragsstudie«

Im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin

Vorwort

Mineralische Rohstoffe sind für die industrielle Wertschöpfung, den technologischen Fortschritt und den Erhalt unseres Wohlstands unverzichtbar. Sie leisten einen wichtigen Beitrag für den zukünftigen Wandel unserer Gesellschaft auf allen Ebenen der Ökonomie, Ökologie und der soziokulturellen Entwicklung.

Mit Bezug auf die Rohstoffstrategie der Bundesregierung aus den Jahren 2010 und 2020 und ihren darin vereinbarten Maßnahmen zur Erhöhung der Versorgungssicherheit führt die Deutsche Rohstoffagentur (DERA) ein Monitoring potenziell kritischer mineralischer Rohstoffe durch, ohne die der technologische Fortschritt unserer Wirtschaft nicht möglich wäre. Der vorliegende Bericht des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI und des Fraunhofer-Instituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM ist Teil des DERA-Rohstoffmonitorings und wurde im Auftrag der DERA erstellt.

Das Ziel des DERA-Rohstoffmonitorings besteht darin, die Wirtschaft und die Politik über aktuelle Nachfrage-, Angebots- und Preistrends bei primären mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten der ersten Wertschöpfungsstufen zu informieren. Kritische Entwicklungen auf den internationalen Rohstoffmärkten können dadurch frühzeitig erkannt und mögliche Ausweichstrategien in den Unternehmen entwickelt werden.

Für das Monitoring der „Rohstoffnachfrage“ findet in der Studie ein Screening der Rohstoffbedarfe aus Schlüssel- und Zukunftstechnologien statt. Im Mittelpunkt steht die Frage, bei welchen Rohstoffen mögliche Nachfrageschübe aufgrund zukünftiger Technologieentwicklungen in den nächsten 20 Jahren zu erwarten sind. Unerwartete Nachfrageschübe aufgrund technologischer Veränderungen im Markt können einen erheblichen Einfluss auf zukünftige Rohstoffpreis- und Lieferrisiken haben. Daher wird die Studie alle fünf Jahre in engem Austausch mit der deutschen Wirtschaft aktualisiert.



Dr. Peter Buchholz

Leiter
Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 3

Abbildungsverzeichnis 9

Tabellenverzeichnis 14

Zusammenfassung 20

Executive Summary 23

1 Rahmenszenarien zur globalen sozioökonomischen Entwicklung 26

1.1 Hintergrund: Die Shared Socioeconomic Pathways 26

1.1.1 Auswahl einiger SSPs als Rahmenszenarien für die Studie Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021 27

1.1.2 Übersichten zu den ausgewählten SSPs 28

1.1.3 Zusätzliche Annahmen zur Klimapolitik 29

1.2 Energieszenarien 29

1.3 Mobilitätsszenarien 30

1.3.1 Entwicklung der Fahrzeugmärkte 31

1.3.2 Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen 34

1.4 Digitalisierungsszenarien 37

1.4.1 Grundverständnis: Die Digitale Transformation und ihre Technologieimpulse auf die Rohstoffnachfrage 37

1.4.2 Historische Trends und vorhandene Zukunftsszenarien 39

1.4.3 Szenarien zur Entwicklung von Digitalisierung und Datenmengen in SSP1, 2 und 5 47

1.5 Diffusionsszenarien 50

2 Auswahl der Zukunftstechnologien 54

3 Technologiesynopsen 58

3.1 Cluster: Mobilität, Luft- und Raumfahrt 58

3.1.1 Pkw-Leichtbau 58

3.1.2 Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge 63

3.1.3 Legierungen für den Airframe-Leichtbau 68

3.1.4 Automatisches Pilotieren von Kraftfahrzeugen 73

3.1.5 Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL) 82

3.1.6 Superlegierungen 90

3.1.7 Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher (für mobile Anwendungen) 96

3.1.8 Feststoffbatterie 103

3.2 Cluster: Digitalisierung und Industrie 4.0 109

3.2.1 Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik 109

3.2.2 Quantencomputer 115

3.2.3 Optoelektronik/Photonik 120

3.2.4 Mikroelektronische Kondensatoren 128

3.2.5 Radiofrequenz-Mikrochips 132

3.2.6 Industrielle Robotik und Industrie 4.0 144
3.2.7 Additive Fertigung von Metallbauteilen („3D-Drucker“) 153
3.2.8 Geräte im Internet der Dinge (IoT) 159
3.3 Cluster: Energietechnologien und Dekarbonisierung 164
3.3.1 Thermoelektrische Generatoren 164
3.3.2 Dünnschicht-Photovoltaik 167
3.3.3 Wasser-Elektrolyse 178
3.3.4 Direct-Air Capture (DAC) 184
3.3.5 SOFC-Stationäre Brennstoffzelle 189
3.3.6 CCS – Carbon Capture and Storage 194
3.3.7 Redox-Flow-Speicher 202
3.3.8 Windkraftanlagen 206
3.3.9 Hochleistungs-Permanentmagnete 215
3.3.10 Synthetische Kraftstoffe 221
3.4 Cluster: Kreislauf- und Wasserwirtschaft 225
3.4.1 Meerwasserentsalzung 225
3.4.2 Rohstoffliches Recycling (von Kunststoffen) 230
3.5 Cluster: Strom- und Datennetzwerke 235
3.5.1 Ausbau Stromnetz 235
3.5.2 Glasfaserkabel 242
3.5.3 5G (6G) 247
3.5.4 Rechenzentren 254
3.5.5 Induktive Übertragung elektrischer Energie 268
4 Rohstoffsynopsen 274
4.1 Gallium 274
4.1.1 Eigenschaften 274
4.1.2 Vorkommen und Produktion 274
4.1.3 Verwendungen 275
4.1.4 Galliumbedarf 2040 275
4.2 Germanium 276
4.2.1 Eigenschaften 276
4.2.2 Vorkommen und Produktion 276
4.2.3 Verwendungen 277
4.2.4 Germaniumbedarf 2040 277
4.3 Graphit 278
4.3.1 Eigenschaften 278
4.3.2 Vorkommen und Produktion 279
4.3.3 Verwendungen 280
4.3.4 Graphitbedarf 2040 280

4.4 Indium 281
4.4.1 Eigenschaften 281
4.4.2 Vorkommen und Produktion 281
4.4.3 Verwendungen 282
4.4.4 Indiumbedarf 2040 283
4.5 Kobalt 283
4.5.1 Eigenschaften 283
4.5.2 Vorkommen und Produktion 284
4.5.3 Verwendungen 285
4.5.4 Kobaltbedarf 2040 285
4.6 Kupfer 286
4.6.1 Eigenschaften 287
4.6.2 Vorkommen und Produktion 287
4.6.3 Verwendungen 288
4.6.4 Kupferbedarf 2040 288
4.7 Lithium 290
4.7.1 Eigenschaften 290
4.7.2 Vorkommen und Produktion 290
4.7.3 Verwendungen 291
4.7.4 Lithiumbedarf 2040 291
4.8 PGM (Ruthenium, Iridium, Platin) 292
4.8.1 Eigenschaften 292
4.8.2 Vorkommen und Produktion 293
4.8.3 Verwendungen 294
4.8.4 PGM-Bedarf 2040 294
4.9 Rhenium 297
4.9.1 Eigenschaften 297
4.9.2 Vorkommen und Produktion 297
4.9.3 Verwendungen 298
4.9.4 Rheniumbedarf 2040 298
4.10 Scandium 299
4.10.1 Eigenschaften 299
4.10.2 Vorkommen und Produktion 299
4.10.3 Verwendungen 300
4.10.4 Scandiumbedarf 2040 301
4.11 Seltenerdmetalle 301
4.11.1 Eigenschaften 302
4.11.2 Vorkommen und Produktion 302
4.11.3 Verwendungen 304
4.11.4 Bedarf der Seltenerdmetalle 2040 305

4.12 Tantal 308
4.12.1 Eigenschaften 308
4.12.2 Vorkommen und Produktion 308
4.12.3 Verwendungen 309
4.12.4 Tantalbedarf 2040 309
4.13 Titan 310
4.13.1 Eigenschaften 310
4.13.2 Vorkommen und Produktion 310
4.13.3 Verwendungen 312
4.13.4 Titanbedarf 2040 312
4.14 Vanadium 313
4.14.1 Eigenschaften 313
4.14.2 Vorkommen und Produktion 313
4.14.3 Verwendungen 314
4.14.4 Vanadiumbedarf 2040 314
5 Schlussfolgerungen 316
6 Literaturverzeichnis 321
7 Abkürzungen und Glossar 361

Abbildungsverzeichnis

Abb. 0.1: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien für das Jahr 2018 und in den drei Szenarien für das Jahr 2040 im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2018 21

Abb. 0.2: Demand for different raw materials for selected emerging technologies for the year 2018 and in the three scenarios for the year 2040 as compared to the primary production of the respective raw materials in 2018 24

Abb. 1.1: Die fünf Shared Socioeconomic Pathways 26

Abb. 1.2: Endenergiebedarf der drei ausgewählten SSP-Szenarien 30

Abb. 1.3: Entwicklung der globalen Neuzulassungszahlen seit 2005 (linke Skala) und des globalen BIP (rechte Skala) 31

Abb. 1.4: Prognostizierte Entwicklung der Fahrzeugmärkte und Vergleich zum Wachstum des BIP aus den SSP-Szenarien 32

Abb. 1.5: Marktanteile der unterschiedlichen Fahrzeugkategorien in den Szenarien SSP1, 2 und 5 für 2030 und 2040 33

Abb. 1.6: Entwicklung der Neuzulassungszahlen für BEV-Fahrzeuge der Kategorie Mini seit 2010 sowie minimaler und maximaler Modellfit 35

Abb. 1.7: Schematische Darstellung des Bass-Diffusionsmodells mit dynamischer Wachstumsgrenze 35

Abb. 1.8: Marktanteile der Antriebstechnologien Elektro (BEV, PHEV), Brennstoffzelle (FCEV) und Verbrenner (ICE und HEV) in den Szenarien SSP1, 2 und 5 für die Jahre 2030 und 2040 36

Abb. 1.9: Marktanteile und -größen der unterschiedlichen Antriebstechnologien im SSP1-Szenario bis 2040 für Pkw und Nfz 36

Abb. 1.10: Verständnis des Systems Digitalisierung mit Fokus auf den Rohstoffbedarf 38

Abb. 1.11: Wachstum der übertragenen Datenmengen (a) historisch; (b), (c) historisch + Szenarien 49

Abb. 1.12: Diffusion einer Technologie gemäß Sättigungsmodell 51

Abb. 1.13: Zeitliche Entwicklung der Verkaufszahlen für unterschiedliche Lebensdauern 52

Abb. 2.1: Schematische Übersicht über den Cluster Mobilität, Luft- und Raumfahrt 55

Abb. 2.2: Schematische Übersicht über den Cluster Digitalisierung und Industrie 4.0 56

Abb. 2.3: Schematische Übersicht über die Energietechnologien und Dekarbonisierung 57

Abb. 3.1: Mögliche Anwendungsbereiche von Tailored Blanks 60

Abb. 3.2: Schematische Darstellung des Airframes eines Passagierflugzeugs, bestehend aus Rumpf, Tragflächen, Triebwerksgondel, Verkleidung, Heck und Fahrgestell 68

Abb. 3.3: Verbundwerkstoffanteil im Airframe aktueller Flugzeugmodelle von Airbus und Boeing und die entsprechende Anzahl an ausgelieferten Flugzeugen im Jahr 2018 70

Abb. 3.4: Angenommene Flugzeuglieferungen bis 2040 im SSP2-Szenario 71

Abb. 3.5: Beispiel für die Sensoren eines hochautomatisierten Serienfahrzeugs 76

Abb. 3.6: Vollautomatisiertes Testfahrzeug mit LiDAR-Technologie 77

Abb. 3.7: Weltweite Neuzulassungen an automatisierten Pkw der Stufen 2 bis 5 79

Abb. 3.8: Weltweite Neuzulassungen an automatisierten Nutzfahrzeugen der Stufen 2 bis 5 80

Abb. 3.9: Unbemanntes 3D-Luftfahrzeug zum Ausbringen von Pflanzenschutzmittel 83

Abb. 3.10: Ausgewählte Anwendungsszenarien für bemannte 3D-Mobilität 84

Abb. 3.11: Superlegierungen nach letzter Verwendung 2012 91

Abb. 3.12: Strahltriebwerk 92

Abb. 3.13: Materialentwicklung im Strahltriebwerksbau 94
Abb. 3.14: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie 97
Abb. 3.15: Aufbau der Batteriepacks für elektronische Anwendungen 98
Abb. 3.16: Abschätzung der Anteile der Kathodenmaterialien bis 2040 100
Abb. 3.17: Schematische Darstellung des Aufbaus konventioneller LIB (links) und Feststoffbatteriezellen (rechts) 104
Abb. 3.18: Schematischer Aufbau eines LC-Displays 110
Abb. 3.19: Schematischer Aufbau eines OLED, a) Down-Emitting Stack, b) Up-Emitting Stack 110
Abb. 3.20: Szenario A – Flachbildschirmgesamtfläche mit LCD und OLED Verteilung 111
Abb. 3.21: Szenario B – Flachbildschirmgesamtfläche mit LCD- und OLED-Verteilung 112
Abb. 3.22: Das Wachstum der Zahl der Qubits 118
Abb. 3.23: Vergleich ausgewählter Marktgrößenprognosen und -projektionen für den globalen Quantencomputermarkt von 2017 bis 2030 (in Millionen US-Dollar) 119
Abb. 3.24: Prinzip der optischen Kommunikation 121
Abb. 3.25: Links: Abbildung eines optischen Transceiver von Broadcom, rechts: Schema zur Beschreibung der Hauptkomponenten eines optischen Transceivers von Murata 121
Abb. 3.26: Vergleich in der Funktionsweise von VCSEL- und EEL-Lasern 122
Abb. 3.27: Struktur eines verteilten Bragg-Reflektors (DBR) 123
Abb. 3.28: PIN-Photodiodenstruktur 123
Abb. 3.29: Wachstum des weltweiten Datenverkehrs in Rechenzentren (Zettabytes pro Jahr) laut CISCO und Trend, der für die Prognose bis 2040 verwendet wurde 125
Abb. 3.30: Markt für GaAs-Wafer in verkauften Einheiten 126
Abb. 3.31: Markt für InP-Wafer in verkauften Einheiten 126
Abb. 3.32: Applikationsbeispiele verschiedener Kondensatortechnologien 129
Abb. 3.33: Aufbau eines tantal-/niobbasierten Elektrolytkondensators 129
Abb. 3.34: Aufbau eines keramischen Vielschichtkondensators MLCC 130
Abb. 3.35: Anwendungen der RF-Kommunikation 133
Abb. 3.36: Vereinfachtes Modell der terrestischen drahtlosen RF Kommunikation 133
Abb. 3.37: Liste der Substrate, die für die Hauptkomponenten von RF-Geräten verwendet werden 135
Abb. 3.38: Schema eines HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) auf einem GaAs-Substrat 135
Abb. 3.39: Querschnitt eines InP-HEMT-Gerätes 136
Abb. 3.40: Querschnittsansicht von SiGe-Schichten unterschiedlicher molarer Verhältnisse auf einem Siliziumwafer 136
Abb. 3.41: Piezoelektrik-auf-Insulator (POI) smart cut ™ Prozessschema von SOITEC 137
Abb. 3.42: Markt für GaAs-Wafer (Szenario ohne Integration in Siliziumtechnologie) in Tausenden verkaufter Einheiten 141
Abb. 3.43: Markt für $LiTaO_3$-Wafer in tausenden verkaufter Einheiten 141
Abb. 3.44: Markt für $LiNbO_3$-Wafer in tausenden verkaufter Einheiten 142
Abb. 3.45: Entwicklung des Galliumbedarfes für RF-Chips 142
Abb. 3.46: Auslösende Technologien der verschiedenen industriellen Revolutionen 145
Abb. 3.47: Roboter: ein Überblick über Rohstoffe, verarbeitete Materialien und Komponenten 147
Abb. 3.48: Relevante Rohstoffe in Robotern 147
Abb. 3.49: Umsatz mit Industrierobotern weltweit in den Jahren von 2018 bis 2025 (in Mrd. USD) 150
Abb. 3.50: Umsatzprognose mit Industrierobotern weltweit in den Jahren 2016 bis 2024 (in Mrd. USD) 150

Abb. 3.51: Phasen der additiven Fertigung 154
Abb. 3.52: Referenzmodell für die IoT-Architektur 159
Abb. 3.53: Aufbau eines thermoelektrischen Generators 165
Abb. 3.54: Überblick über die verschiedenen Dünnschichttechnologien 168
Abb. 3.55: Marktanteil der verschiedenen Dünnschicht-Zelltypen am gesamten PV-Markt mit einer globalen PV Gesamtproduktion von 102 GWp im Jahr 2018 169
Abb. 3.56: Aufbau einer Solarzelle aus amorphem Silizium 169
Abb. 3.57: Aufbau einer GaAs-Zelle 170
Abb. 3.58: a) Substrat- und b) Superstrat-Aufbau von Chalcogenid-Solarzellen (CdTe, CIGS) 171
Abb. 3.59: Zusammensetzung eines Dünnschicht PV-Moduls 173
Abb. 3.60: Aufbau und Funktion einer PEMEL 179
Abb. 3.61: Elektrolyseur-Zubau 180
Abb. 3.62: Produktion und Aufbau des Bestandes an Elektrolyseuren für die Szenarien SSP5, SSP2-26 und SSP1-19 181
Abb. 3.63: Direct-Air Capture Anlage 185
Abb. 3.64: Chemische Prozessführung der beiden Kreisläufe des Absorptionsverfahrens für Direct-Air Capture 186
Abb. 3.65: Dauerhafte Speicherung von CO_2 durch Mineralisierung in geeigneter geologischer Lagerstätte 186
Abb. 3.66: Aufbau und Funktion einer Festoxid-Brennstoffzelle 189
Abb. 3.67: Aufbau und Funktion einer tubularen Festoxid-Brennstoffzelle 190
Abb. 3.68: Produktion von SOFC-Anlagen 191
Abb. 3.69: Produktion und Aufbau des Bestandes an installierter SOFC-Leistung für die Szenarien SSP5, SSP2-26 und SSP1-19 191
Abb. 3.70: Entwicklungsstadien der CCS-Systemkomponenten 195
Abb. 3.71: Schematische Darstellung der drei Carbon-Capture-Verfahren 196
Abb. 3.72: Ablauf des Chemical-Looping-Verfahrens 197
Abb. 3.73: Globale CCS Projekte 198
Abb. 3.74: Leistung der Kraftwerke mit CCS in GW 200
Abb. 3.75: Aufbau und Funktion einer Redox-Flow-Batterie 202
Abb. 3.76: Komponenten einer Windkraftanlage (links) sowie die Dimension einer Windkraftanlage mit einem Pkw als Größenvergleich (rechts) 207
Abb. 3.77: Materialbedarf einer Windkraftanlage 209
Abb. 3.78: Marktanteile der Technologievarianten in 2018 213
Abb. 3.79: Annahmen der Technologieanteile im Jahr 2040 für weltweit neu gebaute WKA in den unterschiedlichen Szenarien (Onshore und Offshore inkl. Repowering) 213
Abb. 3.80: Hysteresekurve eines Permanentmagneten: B: Magnetische Flussdichte, H: Magnetische Feldstärke, BR: Remanenz, HC: Koerzitivfeldstärke 216
Abb. 3.81: Lenkungsmotor eines Pkw 218
Abb. 3.82: Möglichkeiten zur Erzeugung von PtL 222
Abb. 3.83: Verfahrensschema der bedeutendsten Meerwasserentsalzungsverfahren 225
Abb. 3.84: Trends in der globalen Meerwasserentsalzung nach (a) Anzahl und Kapazität der gesamten und in Betrieb befindlichen Entsalzungsanlagen und (b) Betriebskapazität nach Entsalzungstechnologie 226

Abb. 3.85: Abschätzung der kumulierten globalen Meerwasserentsalzungskapazität in Mio. m^3 pro Tag 229
Abb. 3.86: Mögliche Kreisläufe für Kohlenstoff in der Chemischen Industrie 231
Abb. 3.87: Anlagenschema des Hamburger Pyrolyseverfahrens 232
Abb. 3.88: Kunststoffverbleib im System Change-Szenario 234
Abb. 3.89: Schematische Darstellung des Stromnetzes in Deutschland 236
Abb. 3.90: Stahlverstärktes Aluminiumseil 238
Abb. 3.91: Donaumast mit zwei 110 kV Stromkreisen (links und rechts jeweils mit drei an Isolatoren hängenden Leiterseilen) und einem Erdseil auf der Mastspitze 238
Abb. 3.92: Erwarteter Bedarf an elektrischer Energie nach den SSP-Szenarien des IPCC 241
Abb. 3.93: Aufbau und Funktion eines Glasfaserkabels 243
Abb. 3.94: Jährlich global zugebaute Mio. km Glasfaserkabel 245
Abb. 3.95: Vergangene und geplante Bandkapazitäten des LTO-Standards 255
Abb. 3.96: Darstellung der verschiedenen Datenwachstumsszenarien bis 2040 259
Abb. 3.97: Vergleich der Datenmengen in den verschiedenen Szenarien 2018 und 2040 260
Abb. 3.98: Vergleich der Szenarien für HDD-Festplatten 261
Abb. 3.99: Szenarienvergleich für SSD-Festplatten 262
Abb. 3.100: Szenarienvergleich für Magnetbänder 262
Abb. 3.101: Speichermedienverteilung 2018 und 2040 263
Abb. 3.102: Speichermedienverteilung gesamt 2018 und 2040 263
Abb. 3.103: Siliziumbedarf in Tonnen für SSDs nach Szenario und Jahr 266
Abb. 3.104: Induktionsprinzip 269
Abb. 3.105: Komponenten eines kabellosen Systems zur Übertragung elektrischer Energie 269
Abb. 3.106: Gesamtkostenvergleich von Bussen mit konduktivem und induktivem Ladegerät pro gefahrenem Kilometer 271
Abb. 4.1: Primärproduktion 2018 und Bedarf von Gallium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 276
Abb. 4.2: Produktion 2018 und Bedarf von Germanium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 278
Abb. 4.3: Produktion 2018 und Bedarf von Graphit für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 281
Abb. 4.4: Produktion 2018 und Bedarf von Indium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 283
Abb. 4.5: Raffinadeproduktion 2018 und Bedarf von Kobalt für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 286
Abb. 4.6: Raffinadeproduktion 2018 und Bedarf von Kupfer für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 289
Abb. 4.7: Produktion 2018 und Bedarf von Lithium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 292
Abb. 4.8: Produktion 2018 und Bedarf von Ruthenium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 296
Abb. 4.9: Produktion 2018 und Bedarf von Iridium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 296
Abb. 4.10: Produktion 2018 und Bedarf von Platin für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 296
Abb. 4.11: Produktion 2018 und Bedarf von Rhenium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 299
Abb. 4.12: Produktion 2018 und Bedarf von Scandium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 301
Abb. 4.13: Produktion 2018 und Bedarf von Lanthan für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 306
Abb. 4.14: Produktion 2018 und Bedarf von Neodym/Praseodym für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 307
Abb. 4.15: Produktion 2018 und Bedarf von Yttrium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 307

Abb. 4.16: Produktion 2018 und Bedarf von Dysprosium/Terbium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 307
Abb. 4.17: Bergwerksproduktion 2018 und Bedarf von Tantal für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 310
Abb. 4.18: Raffinadeproduktion (Titanmetall) 2018 und Bedarf von Titan für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 313
Abb. 4.19: Bergwerksproduktion 2018 und Bedarf von Vanadium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040 315
Abb. 5.1: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien für das Jahr 2018 und im SSP1 im Jahr 2040 im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2018 317
Abb. 5.2: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien für das Jahr 2018 und im SSP2 im Jahr 2040 im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2018 318
Abb. 5.3: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien für das Jahr 2018 und im SSP5 im Jahr 2040 im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2018 319

Tabellenverzeichnis

Tab. 0.1: Globaler Rohstoffbedarf als Verhältnis zur Produktion 2018 für die analysierten 33 Zukunftstechnologien 22

Tab. 0.2: Global raw material demand as a ratio of production in 2018 for the 33 future technologies analyzed 25

Tab. 1.1: Bevölkerungsentwicklung in SSP1, 2 und 5 28

Tab. 1.2: Entwicklung von Wirtschaft und Technologie in SSP1, 2 und 5 28

Tab. 1.3: Entwicklung von Politik und Umwelt in SSP1, 2 und 5 29

Tab. 1.4: Modellierungsparameter zur Abbildung der SSP-Szenarien als Fahrzeugmärkte sowie zur Beschreibung der Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen 33

Tab. 1.5: Fahrzeugmärkte nach Fahrzeugkategorien für die Szenarien SSP1, 2 und 5 34

Tab. 1.6: Neuzulassungszahlen nach Antriebstechnologien im Szenario SSP1 36

Tab. 1.7: Neuzulassungszahlen nach Antriebstechnologien im Szenario SSP2 37

Tab. 1.8: Neuzulassungszahlen nach Antriebstechnologien im Szenario SSP5 37

Tab. 1.9: Annahmen zur Entwicklung digitaler Technologien 48

Tab. 3.1: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Tailored Blanks 62

Tab. 3.2: Magnetmasse pro Motor in kg bei verschiedenen Antriebstechnologien und Fahrzeugsegmenten 64

Tab. 3.3: Marktanteile verschiedener Motortechnologien in unterschiedlichen Preissegmenten in 2040 66

Tab. 3.4: Szenarien für die Entwicklung des Dy-Anteils in NdFeB-Magneten für Motoren von E-Pkw (Dy-Anteil 2014) 66

Tab. 3.5: Spezifischer Kupferbedarf für verschiedene Elektromotoren in kg/kW 67

Tab. 3.6: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge in t 67

Tab. 3.7: Legierungsbestandteile einiger kommerziell erhältlicher Aluminium-Lithium-Legierungen 69

Tab. 3.8: Annahmen zur Airframezusammensetzung (Anteile an Aluminiumlegierungen, Stahl, Titan und Titanlegierungen sowie Verbundwerkstoffe im Jahr 2040) 72

Tab. 3.9: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe für Airframe-Leichtbau-Legierungen in t 72

Tab. 3.10: Fahrerunterstützungs- und Assistenzsysteme 75

Tab. 3.11: Durchschnittliche Anzahl der benötigten Systemkomponenten 76

Tab. 3.12: Annahmen zur Abschätzung des Rohstoffbedarfs 80

Tab. 3.13: Gewichtsanteile der Rohstoffe im Nd:YAG-Festkörper-Laser 81

Tab. 3.14: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe für Laserscanner zum automatischen Pilotieren von Kraftfahrzeugen in t 81

Tab. 3.15: Rohstoffe in unbemannten eVTOL-Luftfahrzeugen 85

Tab. 3.16: Projektionen des Verkehrsaufkommens von eVTOL-Luftfahrzeugen in verschiedenen Studien 87

Tab. 3.17: Annahmen zur Gewichtsverteilung der Komponenten in eVTOL-Luftfahrzeugen in kg 88

Tab. 3.18: Annahmen zur Anzahl und zur Effizienz von eVTOL-Luftfahrzeuge unter den Bedingungen ausgewählter SSP-Szenarien 89

Tab. 3.19: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für 3D-Luftfahrzeuge in t 89

Tab. 3.20: Durchschnittliche Zusammensetzung von Nickelbasis-Superlegierungen 92

Tab. 3.21: Durchschnittliche Zusammensetzung von Kobaltbasis-Superlegierungen 93
Tab. 3.22: Zusammensetzung einer warmfesten Titanlegierung 93
Tab. 3.23: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe für Superlegierungen in t 95
Tab. 3.24: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe in t; unter der Annahme, dass sich Ruthenium und Rhenium in Superlegerungen durchsetzen 96
Tab. 3.25: Leistungsmerkmale verschiedener Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien 98
Tab. 3.26: Spezifische Metallmengen in Batteriekathoden [kg/kWh] 99
Tab. 3.27: Batteriegrößen nach Antriebstechnologie und Größensegment in kWh (Werte gerundet) 101
Tab. 3.28: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher in t 101
Tab. 3.29: Recyclinganlagen für LIB weltweit 102
Tab. 3.30: Auswahl in der Forschung untersuchter keramischer Feststoffelektrolyte der Klassen „Phosphate“, „Oxide“ und „Sulfide“ 104
Tab. 3.31: Vergleich von SCE, SPE und Flüssigelektrolytbatteriezellen und Parameter für die Berechnung des Rohstoffbedarfs 106
Tab. 3.32: Marktgrößen für Feststoffbatterien im Elektromobilitätsbereich in 2040 für unterschiedliche SSP-Szenarien 107
Tab. 3.33: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Feststoffbatteriezellen in Elektromobilitätsanwendungen in t 108
Tab. 3.34: Verkaufte Displayfäche OLED und LCD 112
Tab. 3.35: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Indium in der Displaytechnik in t 113
Tab. 3.36: Globale Produktion und ermittelte Bedarfe an Kupfer für Quantencomputer in t 120
Tab. 3.37: Menge von Ga, As, In und P pro Wafer (Bruttobedarf) 124
Tab. 3.38: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe für GaAs und InP für den optischen Transceivermarkt in t 127
Tab. 3.39: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Mikroelektronische Kondensatoren in t 132
Tab. 3.40: Menge von Ga, As, In und P pro Wafer für die RF-Anwendung (Bruttobedarf) 138
Tab. 3.41: Menge von Li, Nb und Ta pro Keramikwafer (Nettoanteil) 138
Tab. 3.42: Menge von Ga pro Wafer für die RF-Anwendung (Bruttobedarf) 139
Tab. 3.43: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für GaAs, $LiTaO_3$ und $LiNbO_3$ Wafer in t 143
Tab. 3.44: Umsatzentwicklung Industrieroboter weltweit bis 2040 151
Tab. 3.45: Rohstoffe für die additive Fertigung 155
Tab. 3.46: Materialzusammensetzung von ausgewählten Metalllegierungen für die additive Fertigung [Gew.-%] 155
Tab. 3.47: Annahmen für den zukünftigen Rohstoffbedarf unter den Bedingungen ausgewählter SSP-Szenarien 158
Tab. 3.48: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für additive Fertigung in Luftfahrt und Medizintechnik in t 158
Tab. 3.49: Basiskonfiguration des IoT 161
Tab. 3.50: Rohstoffbedarf für verschiedene Speichertechnologien im IoT in t/ZB 162
Tab. 3.51: Thermoelektrische Eigenschaften von Isolatoren, Metallen und Halbleitern bei Raumtemperatur 164

Tab. 3.52: Produktionsspezifischer Rohstoffbedarf abhängig von Absorberschichtdicke, Wirkungsgrad und Materialineffizienz 174
Tab. 3.53: Jährliche Installation von CdTe- und CIGS-Solarmodulen in Megawatt Peak in den Szenarien SSP1-19 und SSP2-26 175
Tab. 3.54: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Dünnschicht-PV in t 176
Tab. 3.55: Spezifische Rohstoffbedarfe für die Wasserelektrolyseure in g/kW 182
Tab. 3.56: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Wasserelektrolyseure in t 183
Tab. 3.57: Materialbedarf von DAC-Anlagen nach dem Absorptionsverfahren mit einer Kapazität von 1 Mt CO_2/a 187
Tab. 3.58: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für DAC-Anlagen nach dem Absorptionsverfahren in t 188
Tab. 3.59: Spezifische Rohstoffbedarfe für die SOFC in g/kW 192
Tab. 3.60: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für stationäre SOFC-Systeme in t 193
Tab. 3.61: Menge an Legierungselementen für CCS-Technologien in kg/MW_{el} 199
Tab. 3.62: Materialien für CO_2-Abscheidungsmethoden 199
Tab. 3.63: Stromerzeugung mit CCS für das Jahr 2040 in den ausgewählten SSPs 200
Tab. 3.64: Im Jahr 2040 neu zu installierende CCS-Kapazitäten für Kraftwerke [GW] 200
Tab. 3.65: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für CCS in t 201
Tab. 3.66: Typische technische Parameter einer Vanadium-RFB 203
Tab. 3.67: Durchschnittlicher Rohstoffbedarf einer V-RFB 204
Tab. 3.68: Rohstoffbedarfe für Redox-Flow-Batterien 206
Tab. 3.69: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für Redox-Flow-Batterien in t 206
Tab. 3.70: Verschiedene Antriebstechnologien, die derzeit in WKA im Einsatz sind (schwarz) oder für WKA entwickelt werden (blau) 208
Tab. 3.71: Materialbedarf für Windkraftanlagen in t/MW 210
Tab. 3.72: Bedarf an Seltenen Erden für Windkraftanlagen in t/GW 210
Tab. 3.73: Szenarien für die Energieerzeugung und installierte Leistung von Windenergie-anlagen 211
Tab. 3.74: Im Jahr 2040 zugebaute Leistung von WKA aufgrund von Kapazitätszuwachs und Repowering in [GW/a] 212
Tab. 3.75: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe für WKA in t 214
Tab. 3.76: Globale Produktion und ermittelte Bedarfe an Seltenen Erden für WKA in t 214
Tab. 3.77: Globale Produktion und ermittelter Neodymbedarf für Magnetanwendungen in der Kosumentenelektronik in t 220
Tab. 3.78: Zusammensetzung eines Fischer-Tropsch-Katalysators von Johnson Matthey 223
Tab. 3.79: Entwicklung der Produktion der synthetischen Kraftstoffe in den verschiedenen Szenarien 223
Tab. 3.80: Kumulierte und jährliche Produktionsmengen für XtL im Jahr 2040 224
Tab. 3.81: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für synthetische Kraftstoffe in t 224
Tab. 3.82: Werkstoffe für Meerwasserentsalzungsanlagen 227
Tab. 3.83: Rohstoffbedarf für UO-Meerwasserentsalzungsanlagen 228
Tab. 3.84: Rohstoffbedarf für thermische Meerwasserentsalzungsanlagen 228
Tab. 3.85: Neu errichtete Meerwasserentsalzungsanlagen 2040 229

Tab. 3.86: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für die Meerwasserentsalzung in t 230
Tab. 3.87: Beispiele rohstofflicher Recyclingverfahren 233
Tab. 3.88: Rohstoffbedarf für die Modis MIDI-Anlage 233
Tab. 3.89: Werkstoffe für Pyrolyseanlagen 233
Tab. 3.90: Spezifische Werkstoffe für eine Pyrolyseanlagen mit 6.000 t/a Kapazität 234
Tab. 3.91: Für die Szenarien angenommenen Kunststoffabfallmengen in Mio. t 235
Tab. 3.92: Globale Produktion und ermittelter Rohstoffbedarf für das rohstoffliche Recycling von Kunststoffen in t 235
Tab. 3.93: Leistungskilometerspezifische Materialbedarfe für das Stromnetz in Deutschland 239
Tab. 3.94: Materialbedarf für HGÜ-Freileitungen oder Kabel 240
Tab. 3.95: Globale Produktion und ermittelter Kupferbedarf für Übertragungs- und Verteilnetze in t 241
Tab. 3.96: Globale Produktion und ermittelter Germaniumbedarf für Glasfaserkabel in t 246
Tab. 3.97: Vergleich typischer Latenzzeiten und Datenraten verschiedener Mobilfunkgenerationen 247
Tab. 3.98: Für Mobilfunk in Deutschland genutzte Frequenzbereiche 247
Tab. 3.99: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe GaAs-basierter Verstärker in Frequenzfiltern in t 252
Tab. 3.100: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe für optische Transceiver für 5G/6G in t 252
Tab. 3.101: Galliumbedarf 2040 für GaN-Verstärker in Basisstationen 253
Tab. 3.102: Anzahl Speichermedien nach Szenarien aufgeteilt 264
Tab. 3.103: Rohstoffbedarf von HDDs nach Szenarien und Jahr in t 265
Tab. 3.104: Rohstoffbedarf von SSDs nach Szenarien und Jahr in t 266
Tab. 3.105: Globale Produktion und ermittelte Rohstoffbedarfe für Speichermedien in Rechenzentren in t 267
Tab. 3.106: Globale Produktion und ermittelter Kupferbedarf von Ladesystemen für Elektrofahrzeuge in t 272
Tab. 4.1: Eigenschaften von Gallium 274
Tab. 4.2: Versorgungssituation bei Gallium 2010, 2013 und 2018 274
Tab. 4.3: Verwendung von Gallium in der EU 275
Tab. 4.4: Galliumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 275
Tab. 4.5: Eigenschaften von Germanium 276
Tab. 4.6: Versorgungssituation bei Germanium 2010, 2013 und 2018 277
Tab. 4.7: Weltweite Verwendung von Germanium 277
Tab. 4.8: Germaniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 278
Tab. 4.9: Eigenschaften von Graphit 279
Tab. 4.10: Versorgungssituation bei Graphit 2010, 2013 und 2018 279
Tab. 4.11: Weltweite Verwendung von natürlichem Graphit 280
Tab. 4.12: Graphitbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 281
Tab. 4.13: Eigenschaften von Indium 281
Tab. 4.14: Versorgungssituation bei Indium 2010, 2013 und 2018 282
Tab. 4.15: Verwendung von Indium in der EU 282
Tab. 4.16: Indiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 283

Tab. 4.17: Eigenschaften von Kobalt 284
Tab. 4.18: Versorgungssituation bei Kobalt 2010, 2013 und 2018 284
Tab. 4.19: Weltweite Verwendung von Kobalt 285
Tab. 4.20: Kobaltbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 286
Tab. 4.21: Eigenschaften von Kupfer 287
Tab. 4.22: Versorgungssituation bei Kupfer 2010, 2013 und 2018 287
Tab. 4.23: Weltweite Verwendung von Kupfer 288
Tab. 4.24: Kupferbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 289
Tab. 4.25: Eigenschaften von Lithium 290
Tab. 4.26: Versorgungssituation bei Lithium 2010, 2013 und 2018 290
Tab. 4.27: Weltweite Verwendung von Lithium 2010, 2013, 2019 291
Tab. 4.28: Lithiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 292
Tab. 4.29: Eigenschaften von Ruthenium, Iridium und Platin 293
Tab. 4.30: Versorgungssituation bei PGM 2010, 2013 und 2018 293
Tab. 4.31: Weltweite Verwendung von Ruthenium, Iridium und Platin 2019 294
Tab. 4.32: Rutheniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 295
Tab. 4.33: Iridiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 295
Tab. 4.34: Platinbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 295
Tab. 4.35: Eigenschaften von Rhenium 297
Tab. 4.36: Versorgungssituation bei Rhenium 2010, 2013 und 2018 297
Tab. 4.37: Verwendung von Rhenium in der EU 298
Tab. 4.38: Rheniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 298
Tab. 4.39: Eigenschaften von Scandium 299
Tab. 4.40: Versorgungssituation bei Scandium 2010, 2013 und 2018 300
Tab. 4.41: Verwendung von Scandium 2017 300
Tab. 4.42: Scandiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien [in t Sc] 301
Tab. 4.43: Eigenschaften von ausgewählten Leichten Seltenerdmetallen 302
Tab. 4.44: Eigenschaften von ausgewählten Schweren Seltenerdmetallen 302
Tab. 4.45: Versorgungssituation bei Seltenerdmetallen 2010, 2013 und 2018 304
Tab. 4.46: Weltweite Verwendung von Seltenerdmetallen 2018 305
Tab. 4.47: Bedarf von Lanthan für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 305
Tab. 4.48: Bedarf Leichter Seltenerdmetalle (Neodym, Praseodym) für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 305
Tab. 4.49: Bedarf von Yttrium für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 306
Tab. 4.50: Bedarf Schwerer Seltenerdmetalle (Dysprosium, Terbium) für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 306
Tab. 4.51: Eigenschaften von Tantal 308
Tab. 4.52: Versorgungssituation bei Tantal 2010, 2013 und 2018 308
Tab. 4.53: Weltweite Verwendung von Tantal 309
Tab. 4.54: Tantalbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 309
Tab. 4.55: Eigenschaften von Titan 310
Tab. 4.56: Versorgungssituation bei Titan 2010, 2013 und 2018 311
Tab. 4.57: Verwendung von Titan in der EU 312
Tab. 4.58: Titanbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 312

Tab. 4.59: Eigenschaften von Vanadium 313
Tab. 4.60: Versorgungssituation bei Vanadium 2010, 2013 und 2018 314
Tab. 4.61: Weltweite Verwendung von Vanadium 314
Tab. 4.62: Vanadiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t 315

Zusammenfassung

Zukunftstechnologien können einerseits Effizienzsteigerungen in bestehenden Systemen, andererseits aber auch potenziell ganz neue Technologiesysteme ermöglichen. Sie können damit revolutionäre Innovationsschübe über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren auslösen. Der technologische Wandel kann sich jedoch signifikant auf die Nachfrage nach einzelnen mineralischen Rohstoffen auswirken. Für die Untersuchung der Nachfrageimpulse von Zukunftstechnologien wurde 2009 die Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien" im Auftrag des BMWi erstellt (Angerer et al. 2009). Diese und die Folgestudie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016" im Auftrag der DERA führten dazu, die erheblichen Wissensdefizite hinsichtlich des Rohstoffbedarfs für Zukunftstechnologien zu mildern (Marscheider-Weidemann et al. 2016). Da die Innovationsgeschwindigkeit beständig zunimmt, erfolgte mit der vorliegenden Studie eine Aktualisierung des Wissenstands zum Rohstoffbedarf des technologischen Wandels.

Im Gegensatz zu den Vorgängerstudien, bei denen Zukunftstechnologien einzelnen Branchen zugeordnet waren, sind die in dieser Studie betrachteten 33 Technologien nach Clustern dargestellt. Die Cluster sind „Mobilität, Luft- und Raumfahrt", „Digitalisierung und Industrie 4.0", „Energietechnologien und Dekarbonisierung", „Kreislauf- und Wasserwirtschaft" sowie „Strom- und Datennetzwerke". In den Clustern werden auch Technologien untersucht, die keine Zukunftstechnologien aber wesentlich für die Cluster sind, wie z. B. der Ausbau von Stromnetzen.

Um die zukünftige Entwicklung der verschiedenen Technologien möglichst konsistent abbilden zu können, werden als Rahmenszenarien die Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) genutzt, die im Rahmen des 5. Sachstandsberichts des Weltklimarates (IPCC) für klimapolitische Fragestellungen erstellt wurden (Kriegler et al. 2012). Für die ausgewählten Szenarien SSP1 (Nachhaltigkeit), SSP2 (Mittelweg) und SSP5 (Fossiler Pfad) werden die Narrative für die einzelnen Cluster ergänzt und mit Zahlen hinterlegt, sofern diese nicht direkt aus der SSP-Datenbank des International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA o. J.) entnommen werden konnten.

Wie bei den Vorgängerstudien hängen die Ergebnisse sehr von den untersuchten Technologien und ihrer Marktdiffusion ab. Für elf Metalle könnte der Bedarf für die betrachteten Zukunftstechnologien im Jahr 2040 in der Größenordnung der Produktion 2018 oder darüber liegen, siehe Abb. 0.1. In der Abbildung ist aber auch ablesbar, dass der Bedarf zum Teil stark von den Szenarien abhängt (vergleiche Ergebnisdarstellung in Kapitel 5). So ist der Bedarf im SSP1 (Nachhaltigkeit) z. B. bei Scandium aufgrund des Einsatzes von Wasserstofftechnologien oder bei Lithium aufgrund des höheren Bedarfs in der Elektromobilität sehr hoch, während die Rohstoffnachfrage dieser beiden Metalle im SSP5 (Fossiler Pfad) unterhalb der Produktionsmenge 2018 liegt. Auf der anderen Seite liegen die Bedarfe für Ruthenium und Platin im SSP5 besonders hoch, da in diesem Szenario im Jahr 2040 große Datenmengen und Speicherkapazitäten in Rechenzentren angenommen werden. Die für die Rohstoffe jeweils wichtigsten Zukunftstechnologien mit den größten Bedarfen sind in Tab. 0.1 dargestellt. Der über die betrachteten Zukunftstechnologien hinaus bestehende Rohstoffbedarf ist nicht berücksichtigt.

Die für die SSPs dargestellten Zahlen stellen keine prognostizierten Werte dar, sondern veranschaulichen verschiedene nach aktuellem Erkenntnisstand realistisch erscheinende Entwicklungsmöglichkeiten. Zentrales Anliegen dieser Studie ist die Identifizierung relevanter Technologie- und Rohstofffelder, um weiterführende Arbeiten zu motivieren, welche sich einerseits intensiver mit den Herausforderungen der einzelnen Technologien und Rohstoffen beschäftigen und andererseits konkrete Maßnahmen erarbeiten bzw. weiterentwickeln. Zur Sicherung der Rohstoffversorgung für die Wirtschaft kommen generell die folgenden bekannten Maßnahmen in Betracht:

– Ausbau und Effizienzsteigerung von Erzabbau bzw. Metallgewinnung,
– Substitution auf Material- und Technologieebene,
– Ressourceneffizienz in Produktion und Anwendung,
– Recycling, gewährleistet durch recyclinggerechtes Design, Rückführungsstrategien und effiziente Recyclingtechnologien.

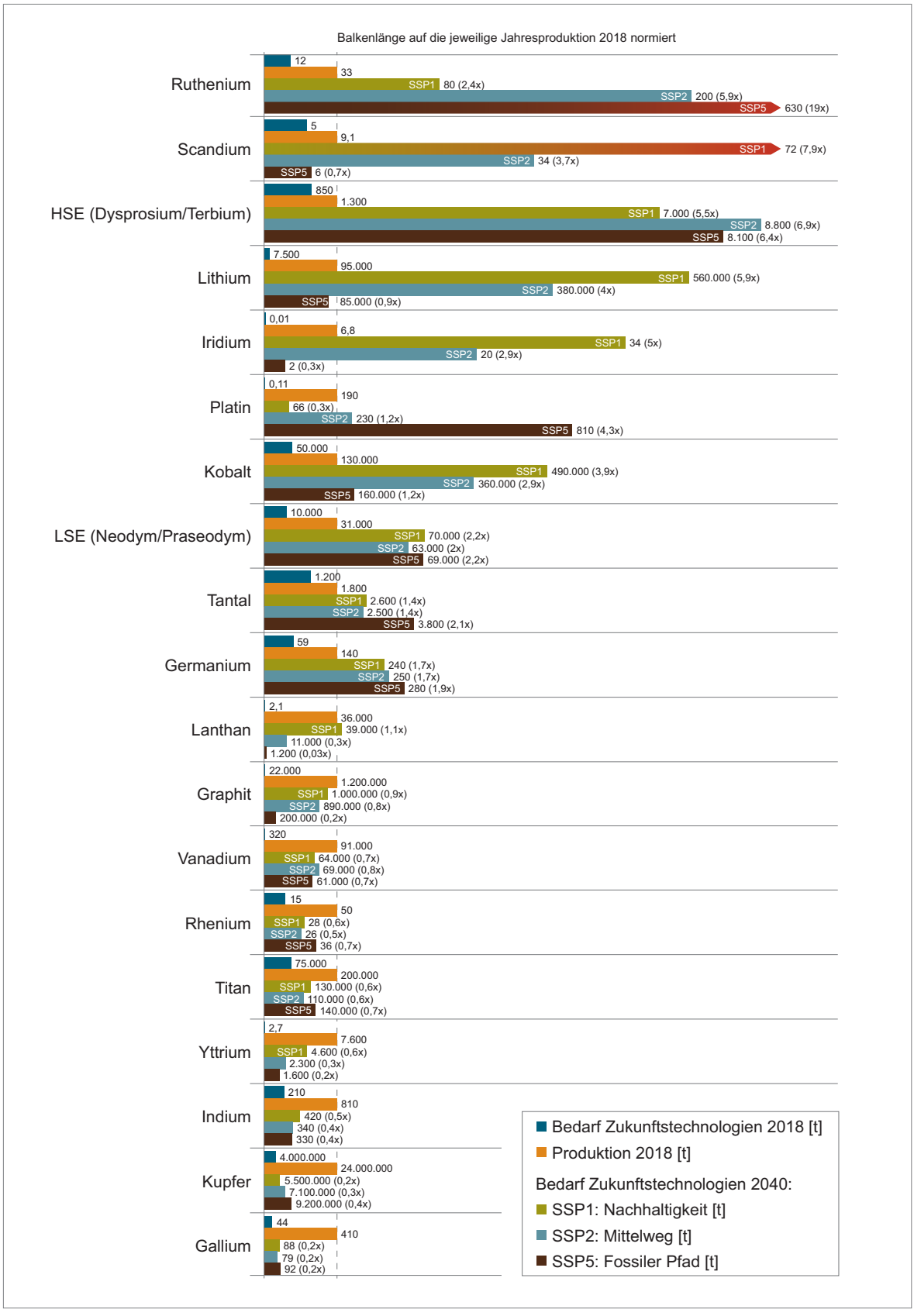


Abb. 0.1: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien für das Jahr 2018 und in den drei Szenarien für das Jahr 2040 im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2018

Welche Möglichkeiten zur Rohstoffsicherung bestehen, sollte inhärenter Bestandteil der Grundüberlegungen bei der Entwicklung neuer Technologien sein. Aktuelle Rohstoffpreise sind abhängig von vielen Faktoren und kein Maß für die langfristige physische oder ökonomische Verfügbarkeit eines Rohstoffs. Sie sollten daher nicht allein Basis langfristiger, zukunftsrelevanter Entscheidungen sein.

Tab. 0.1: Globaler Rohstoffbedarf als Verhältnis zur Produktion 2018 für die analysierten 33 Zukunftstechnologien

Rohstoff	$Bedarf_{2018}$ / $Produktion_{2018}$	$Bedarf_{2040}$ / $Produktion_{2018}$			Zukunftstechnologien mit großem Bedarf
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad	
Ruthenium	0,4	2,4	5,9	19	Rechenzentren, Superlegierungen, Synthetische Kraftstoffe
Scandium	0,5	7,9	3,7	0,7	SOFC-Stationäre Brennstoffzelle, Wasser-Elektrolyse
HSE	0,6	5,5	6,9	6,4	Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge, Windkraftanlagen
Lithium	0,1	5,9	4	0,9	Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher, Feststoffbatterie, Legierungen für den Airframe-Leichtbau
Iridium	0	5,0	2,9	0,3	Wasser-Elektrolyse
Platin	0	0,3	1,2	4,3	Rechenzentren
Kobalt	0,4	3,9	2,9	1,2	Superlegierungen, Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher, Feststoffbatterie
LSE	0,3	2,2	2	2,2	Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge, Windkraftanlagen, Hochleistungs-Permanentmagnete, Rechenzentren
Tantal	0,7	1,4	1,4	2,1	Superlegierungen, Mikroelektronische Kondensatoren, Radiofrequenz-Mikrochips, Rechenzentren
Germanium	0,4	1,7	1,7	1,9	Glasfaserkabel
Lanthan	0	1,1	0,3	0,03	Feststoffbatterie, Wasser-Elektrolyse, SOFC-Stationäre Brennstoffzelle
Vanadium	0	0,7	0,8	0,7	CCS – Carbon Capture and Storage, Redox-Flow-Speicher
Rhenium	0,1	0,6	0,5	0,7	Superlegierungen
Titan	0,3	0,6	0,6	0,7	Legierungen für den Airframe-Leichtbau, Superlegierungen, Feststoffbatterie, Additive Fertigung von Metallbauteilen („3D-Drucker“), Wasser-Elektrolyse, Meerwasserentsalzung
Yttrium	0	0,6	0,3	0,2	Automatisches Pilotieren von Kraftfahrzeugen, Wasser-Elektrolyse, SOFC-Stationäre Brennstoffzelle
Graphit	0	0,9	0,8	0,2	Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher
Indium	0,3	0,5	0,4	0,4	Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik, Optoelektronik/Photonik, Dünnschicht-Photovoltaik
Kupfer	0,2	0,2	0,3	0,4	Ausbau Stromnetz, Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge, Windkraftanlagen, Feststoffbatterie, Wasser-Elektrolyse
Gallium	0,1	0,2	0,2	0,2	Radiofrequenz-Mikrochips, Dünnschicht-Photovoltaik

Executive Summary

While emerging technologies have the potential to improve efficiency in existing systems, they can also potentially enable all new technology systems. They can thus trigger revolutionary innovation impulses beyond the boundaries of individual economic sectors. However, technological change can have a significant impact on the demand for individual mineral raw materials. The study “Raw materials for emerging technologies” was commissioned by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) in 2009 to investigate the demand impulses of future technologies (Angerer et al. 2009). Together with a follow-up study commissioned by DERA and published in 2016, results helped bridge considerable knowledge gaps with regard to raw material demand for emerging technologies (Marscheider-Weidemann et al. 2016). With innovation constantly accelerating, the present study updates the state of knowledge on the mineral raw material requirements of technological change.

In contrast to the previous studies in which emerging technologies were assigned to industrial branches, the 33 technologies in this study are presented according to clusters. The clusters are “mobility and aerospace”, “digitization and Industry 4.0”, “energy technologies and decarbonization”, “recycling and water management”, and “power and data networks”. Therefore, the clusters also examine technologies that are not emerging technologies, but are essential for the clusters like electricity networks.

In order to be able to map the future development of the various technologies as consistently as possible, the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), which were created as part of the 5th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) for climate policy issues, are used as framework scenarios (Kriegler et al. 2012). For the selected scenarios SSP1 (Sustainability), SSP2 (Middle Path), and SSP5 (Fossil Path), the narratives for the individual clusters are supplemented and backed up with data if these could not be taken directly from the SSP database of the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA o. J.).

In line with the two previous studies, results depend very much on the respective technologies and their market diffusion. For eleven metals, the estimated demand in 2040 from emerging technologies could be as high as or higher than their 2018 production (see fig. 0.2). However, it can also be seen in the figure that demand strongly depends on the respective scenarios (see the presentation of results in chapter 5). For example, the demand in SSP1 (Sustainability) is very high for scandium due to its use in hydrogen technology, or for lithium from the higher demand in electromobility, while the raw material demand of these two metals in SSP5 (Fossil Path) is below the production volume in 2018. At the same time, the demand for ruthenium and platinum in SSP5 is particularly high, as large data volumes and storage capacities in data centers are assumed in this scenario in 2040. Table 0.2 summarises the most important emerging technologies and their demand for a number of raw materials. Raw material requirements for technologies outside the scope of this study were not considered.

The figures presented for the SSPs do not represent forecast values, but illustrate various future possibilities that appear realistic given the what is known now. The overall scope of this study is to identify relevant fields of technologies and raw materials in order to encourage further work to address potential challenges and help develop measures to address those. The following measures can help contribute to a secure supply of mineral raw materials:

– increase capacities and improve efficiency in mining and processing,
– substitution at the material and technology level,
– resource efficiency in production and application,
– recycling, including design for recycling, return strategies, and efficient recycling technologies.

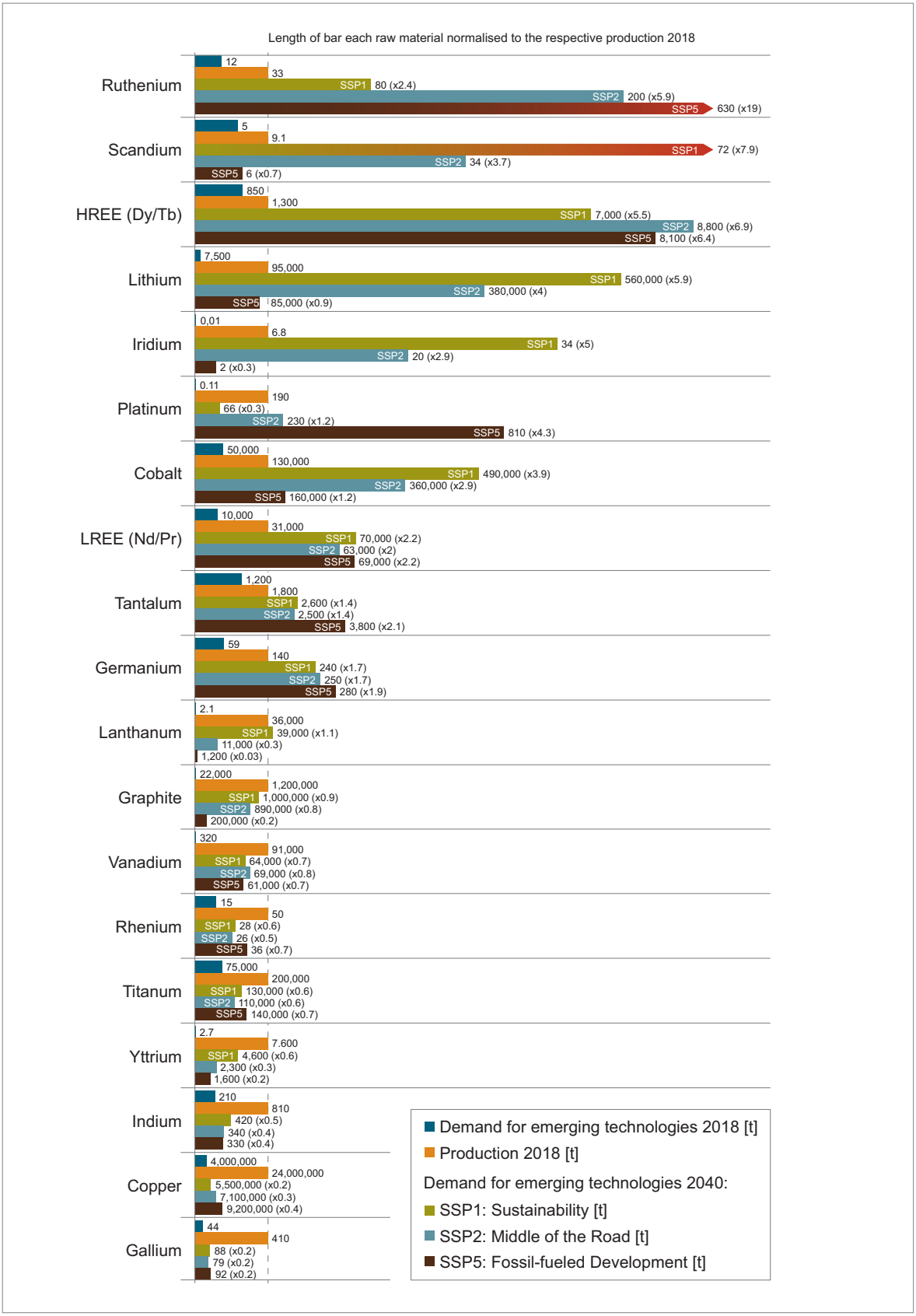


Fig. 0.2: Demand for different raw materials for selected emerging technologies for the year 2018 and in the three scenarios for the year 2040 as compared to the primary production of the respective raw materials in 2018

When developing new technologies, identifying options for securing raw materials should be considered. Current raw material prices depend on many factors; they are not a measure of the long-term physical or economic availability of a raw material. Therefore current prices should not be the sole basis for long-term decisions.

Table 0.2: Global raw material demand as a ratio of production in 2018 for the 33 future technologies analyzed

Raw material	$Demand_{2018}$ / $Production_{2018}$	$Demand_{2040}$ / $Production_{2018}$			Emerging technologies with high demand
		SSP1 Sustai-nability	SSP2 Middle Path	SSP5 Fossil Path	
Ruthenium	0.4	2.4	5.9	19	Data centers, superalloys, synthetic fuels
Scandium	0.5	7.9	3.7	0.7	SOFC – stationary fuel cell, water electrolysis
HRE	0.6	5.5	6.9	6.4	Electric traction motors for motor vehicles, wind turbines
Lithium	0.1	5.9	4	0.9	Lithium-ion high-performance electricity storage, solid-state batteries, alloys for airframe lightweight construction
Iridium	0	5.0	2.9	0.3	Water electrolysis
Platinum	0	0.3	1.2	4.3	Data centers
Cobalt	0.4	3.9	2.9	1.2	Superalloys, lithium ion high-performance electricity storage, solid-state batteries
LRE	0.3	2.2	2	2.2	Electric traction motors for motor vehicles, wind turbines, high-performance permanent magnets, data centers
Tantalum	0.7	1.4	1.4	2.1	Superalloys, microelectronic capacitors, radio frequency microchips, data centers
Germanium	0.4	1.7	1.7	1.9	Fiber optic cable
Lanthanum	0	1.1	0.3	0.03	Solid-state batteries, water electrolysis, SOFC – stationary fuel cell
Vanadium	0	0.7	0.8	0.7	CCS – Carbon Capture and Storage, redox flow storage
Rhenium	0.1	0.6	0.5	0.7	Superalloys
Titanium	0.3	0.6	0.6	0.7	Alloys for airframe lightweight construction, superalloys, solid-state batteries, additive manufacturing of metal components (“3D prin-ters”), water electrolysis, seawater desalination
Yttrium	0	0.6	0.3	0.2	Automatic piloting of road vehicles, water electrolysis, SOFC – stationary fuel cell
Graphite	0	0.9	0.8	0.2	Lithium-ion high-performance electricity storage
Indium	0.3	0.5	0.4	0.4	Indium tin oxide (ITO) in display technology, op-toelectronics/photonics, thin-film photovoltaics
Copper	0.2	0.2	0.3	0.4	Power grid expansion, electric traction motors for motor vehicles, wind turbines, solid-state batteries, water electrolysis
Gallium	0.1	0.2	0.2	0.2	Radio frequency microchips, thin-film photo-voltaics

1 Rahmenszenarien zur globalen sozioökonomischen Entwicklung

1.1 Hintergrund: Die Shared Socioeconomic Pathways

Die fünf Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) wurden ab dem Jahr 2011 im Rahmen des 5. Sachstandsberichts des Weltklimarates (IPCC) für klimapolitische Fragestellungen erstellt (Kriegler et al. 2012). Wegen der großen Unsicherheit über die zukünftige Entwicklung stellen die SSPs unterschiedliche globale sozioökonomische Entwicklungen für das 21. Jahrhundert dar.

Die SSPs dienen als Basis und Bestandteile für Szenarien (Pachauri & Meyer 2014) und sind ein Teil des breiten Bereichs an möglichen sozioökonomischen Trajektorien in die Zukunft. Sie setzen sich jeweils aus einem Narrativ bzw. einer Storyline und in einem ersten Schritt getrennten Quantifizierungen in verschiedenen globalen Modellen für Bevölkerung (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA (Kc & Lutz 2017)), Bruttoinlandsprodukt (BIP, getrennte Umsetzungen in jeweils eigenen Modellen von IIASA (Crespo Cuaresma 2017), OECD (Dellink et al. 2017) und Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, PIK (Leimbach et al. 2017)) sowie Urbanisierung (National Center for Atmospheric Research, NCAR (Jiang & O'Neill 2016)) zusammen. Die Bevölkerungsentwicklung ist dabei ein zentraler Treiber für die BIP-Entwicklung. Darüber hinaus sind zusätzliche Größen wie der Energieverbrauch oder die Landnutzung auf dieser Basis in verschiedenen globalen Impact Assessment Modellen (sog. IAMs) quantifiziert worden (Lutz et al. 2019). Unter den insgesamt fünf plausiblen SSPs sind vier Extremszenarien sowie ein Szenario zur Veranschaulichung eines Mittelwegs zwischen diesen Extremen (s. Abb. 1.1). Im Folgenden werden die Narrative aller fünf SSPs vorgestellt.

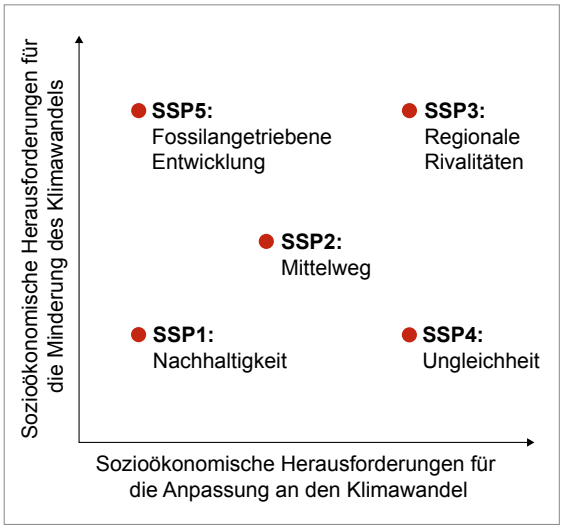


Abb. 1.1: Die fünf Shared Socioeconomic Pathways (Quelle: O'Neill et al. 2017)

SSP1 Nachhaltigkeit – Auf dem grünen Weg (Geringe Herausforderung bei der Minderung und der Anpassung an den Klimawandel)
„Die Welt verschiebt sich allmählich, aber tiefgreifend, auf einen nachhaltigeren Weg und betont eine integrativere Entwicklung, die die wahrgenommenen ökologischen Grenzen respektiert. Das Management der globalen Gemeinschaftsgüter verbessert sich langsam, Bildungs- und Gesundheitsinvestitionen beschleunigen den demographischen Übergang und die Betonung des Wirtschaftswachstums verschiebt sich hin zu einer umfassenderen Betonung des menschlichen Wohlergehens. Angetrieben durch ein zunehmendes Engagement für das Erreichen von Entwicklungszielen wird die Ungleichheit sowohl zwischen als auch innerhalb der Länder verringert. Der Konsum orientiert sich an niedrigem materiellen Wachstum und geringerer Ressourcen- und Energieintensität" (Riahi et al. 2017).

SSP2 Der Mittelweg (Mittlere Herausforderungen an die Schadensbegrenzung und bei der Anpassung)
„Die Welt folgt einem Weg auf dem sich soziale, wirtschaftliche und technologische Trends nicht merklich von historischen Mustern abwenden. Das Entwicklungs- und Einkommenswachstum verläuft ungleichmäßig, wobei einige Länder relativ gute Fortschritte erzielen, während andere hinter den Erwartungen zurückbleiben. Globale und nationale Institutionen arbeiten auf die Erreichung nachhaltiger Entwicklungsziele hin, machen jedoch nur langsame Fortschritte. Umweltsysteme erfahren eine Verschlechterung, obwohl es einige Verbesserungen gibt und insgesamt die Intensität des Ressourcen- und Energieverbrauchs abnimmt. Das globale Bevölkerungswachstum ist moderat und geht in der zweiten Hälfte des Jahr-

hunderts zurück. Die Einkommensungleichheit bleibt bestehen oder verbessert sich nur langsam und es bestehen weiterhin Herausforderungen, die Anfälligkeit für gesellschaftliche und ökologische Veränderungen zu verringern“ (Riahi et al. 2017).

SSP3 Regionale Rivalität – Ein holpriger Weg (Große Herausforderungen bei der Minderung und der Anpassung)

„Ein wiederauflebender Nationalismus, die Sorge um Wettbewerbsfähigkeit und Sicherheit sowie regionale Konflikte zwingen die Länder sich zunehmend auf innenpolitische oder allenfalls regionale Fragen zu konzentrieren. Die Politik verschiebt sich mit der Zeit und orientiert sich zunehmend an nationalen und regionalen Sicherheitsfragen. Die Länder konzentrieren sich auf das Erreichen von Energie- und Ernährungssicherheitszielen in ihren eigenen Regionen auf Kosten einer global angelegten Entwicklung. Investitionen in Bildung und technologische Entwicklung gehen zurück. Die wirtschaftliche Entwicklung verläuft langsam, der Konsum ist materialintensiv und die Ungleichheiten bleiben bestehen oder verschlimmern sich im Laufe der Zeit. Das Bevölkerungswachstum ist in den Industrieländern gering und in den Entwicklungsländern hoch. Eine niedrige internationale Priorität bei der Behandlung von Umweltbelangen führt in einigen Regionen zu einer starken Umweltzerstörung“ (Riahi et al. 2017).

SSP4 Ungleichheit – Ein geteilter Weg (Geringe Herausforderungen bei der Minderung, hohe Herausforderungen bei der Anpassung)

„Sehr ungleiche Investitionen in Humankapital führen zusammen mit zunehmenden Unterschieden bei den wirtschaftlichen Möglichkeiten und der politischen Macht zu zunehmenden Ungleichheiten und Schichtungen sowohl innerhalb als auch außerhalb der Länder. Mit der Zeit vergrößert sich die Kluft zwischen einer international vernetzten Gesellschaft, die zu wissens- und kapitalintensiven Sektoren der Weltwirtschaft beiträgt und einer fragmentierten Sammlung einkommensschwacher, schlecht ausgebildeter Gesellschaften, die in einer arbeitsintensiven Low-Tech-Wirtschaft arbeiten. Der soziale Zusammenhalt verschlechtert sich und Konflikte und Unruhen werden immer häufiger. Die technologische Entwicklung ist in der Hightech-Wirtschaft und in den Sektoren hoch. Der global vernetzte Energiesektor diversifiziert sich und investiert sowohl in kohlenstoffintensive Brennstoffe wie Kohle und unkonventionelles Öl als auch in kohlenstoffarme Energiequellen. Die Umweltpolitik konzentriert sich auf lokale Themen in Gebieten mit mittlerem und hohem Einkommen“ (Riahi et al. 2017).

SSP5 Fossil-angetriebene Entwicklung – Der fossile Pfad (Große Herausforderungen bei der Minderung, geringe bei der Anpassung)

„Diese Welt setzt zunehmend Vertrauen in wettbewerbsfähige Märkte, Innovation und partizipatorische Gesellschaften, um schnellen technologischen Fortschritt und die Entwicklung des Humankapitals als Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung zu erreichen. Die globalen Märkte sind zunehmend integriert. Es wird auch stark in Gesundheit, Bildung und Institutionen investiert, um das Human- und Sozialkapital zu stärken. Gleichzeitig geht das Streben nach wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung einher mit der Ausbeutung reichlich vorhandener fossiler Brennstoffressourcen und der Übernahme ressourcen- und energieintensiver Lebensstile auf der ganzen Welt. All diese Faktoren führen zu einem raschen Wachstum der Weltwirtschaft, während die Weltbevölkerung im 21. Jahrhundert ihren Höhepunkt erreicht und abnimmt. Lokale Umweltprobleme wie Luftverschmutzung werden erfolgreich bewältigt. Es besteht Vertrauen in die Fähigkeit, soziale und ökologische Systeme effektiv zu verwalten, wenn nötig auch durch Geo-Engineering“ (Riahi et al. 2017).

1.1.1 Auswahl einiger SSPs als Rahmenszenarien für die Studie Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021

Für diese Studie wurden die zwei Extremszenarien SSP1 und SSP5 sowie das Mittelweg-Szenario SSP2 als Rahmenszenarien ausgewählt, welche im Folgenden näher dargestellt werden. Dabei stellt SSP2 zwar insgesamt das moderate Mittelweg-Szenario dar, allerdings nicht die Mitte zwischen SSP1 und SSP5, da es auch Aspekte aus den Extremszenarien SSP3 und SSP4 zu einem gewissen Ausmaß berücksichtigt (vgl. Abb. 1.1). Insbesondere beinhalten SSP1 und

SSP5 eine global sehr starke bzw. schnelle Entwicklung von Bildung, Wirtschaft und Technologie. Sie unterscheiden sich dabei aber bei der Schwerpunkt- und Zielsetzung: in SSP1 strebt die Weltgemeinschaft eine nachhaltige Entwicklung unter Berücksichtigung der ökologischen Grenzen an. In SSP5 dominiert hingegen das Vertrauen auf technologische Innovationen und wettbewerbsfähige Märkte zur Lösung ökologischer Probleme bei einem rasanten, auf fossilen Treibstoffen basierenden Wirtschaftswachstum. In SSP2 setzt sich den historischen Entwicklungen entsprechend ein Wechselspiel zwischen fossilbasiertem Wachstum und Bemühungen um eine nachhaltige Entwicklung fort. Darüber verläuft die globale Entwicklung von Bildung, Wirtschaft und Technologie aber auch insgesamt langsamer bzw. schwächer als in SSP1 und 5. Sie wird gehemmt durch Tendenzen von regionaler Rivalität und Protektionismus sowie Ungleichheiten, die jeweils in SSP3 und 4 in noch extremerer Weise berücksichtigt werden. Dies sind wichtige und plausible mögliche zukünftige Entwicklungen. Aufgrund der extremen Hemmnis der Technologieentwicklung sind sie jedoch für diese Studie weniger relevant als SSP1, 2 und 5, so dass SSP3 und 4 daher aus Kapazitätsgründen nicht in den Technologiesynopsen berücksichtigt werden.

1.1.2 Übersichten zu den ausgewählten SSPs

Die folgenden Tabellen veranschaulichen noch einmal die wesentlichen Unterschiede und Gemeinsamkeiten der ausgewählten Rahmenszenarien SSP1, 2 und 5.

Tab. 1.1: Bevölkerungsentwicklung in SSP1, 2 und 5 (Quelle: Riahi et al. 2017)

Indikator	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Bevölkerungswachstum	Relativ gering	Mittel	Relativ gering
Urbanisierung	Hoch	Mittel	Hoch
Bildungslevel	Hoch	Mittel	Hoch
Gesundheitslevel	Hoch	Mittel	Hoch

Tab. 1.2: Entwicklung von Wirtschaft und Technologie in SSP1, 2 und 5 (Quelle: Riahi et al. 2017)

Indikator	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Internationale Zusammenarbeit	Effektiv	Vergleichsweise schwach	Effektiv für Entwicklungsziele, schwach für Umweltziele
Umweltpolitik	Besseres Management von lokalen und globalen Problemen, strengere Regulierung von Schadstoffen	Mittlere Erfolge	Fokussierung auf lokale Probleme mit direktem Bezug zu Wohlbefinden, geringe Bemühungen hinsichtlich globaler Probleme
Politikorientierung	Nachhaltige Entwicklung	Schwache Fokussierung auf Nachhaltigkeit	Wirtschaftsentwicklung, freie Märkte
Institutionen	Effektiv	Ungleichmäßig, bescheiden effektiv	Zunehmend effektiv, Fokus: freie Märkte
Umwelt	Bedingungen verbessern sich mit der Zeit	Fortgesetze Verschlechterung der Bedingungen	Sehr technische Lösungen, erfolgreich bei lokalen Problemen
Landnutzung	Starke Regulierung	Mittlere Regulierung	Mittlere Regulierung

Tab. 1.3: Entwicklung von Politik und Umwelt in SSP1, 2 und 5 (Quelle: RIAHI et al. 2017)

Indikator	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Einkommenswachstum pro Kopf	Hoch in Ländern mit mittlerem und niedrigen Einkommen, mittel in Ländern mit hohem Einkommen	Mittel, ungleichmäßig	Hoch
Ökon. Ungleichheiten	Verringert zwischen und innerhalb von Ländern	Mittlere, ungleichmäßige Verringerung zwischen und innerhalb von Ländern	Stark verringert v. a. zwischen Ländern
Internationaler Handel	Mittel	Mittel	Hoch, regionale Spezialisierung in Produktion
Globalisierung	Verbundene Märkte, regionale Produktion	Halb-offene globalisierte Wirtschaft	Starke Globalisierung und Vernetzung
Konsumverhalten	Geringes Wachstum in Materialverbrauch	Materialintensitiv	Materialismus, Status-Konsum, Tourismus, Mobilität
Fleischkonsum	Gering	Mittel	Hoch
Technologieentwicklung	Schnell	Mittel, ungleichmäßig	Schnell
Technologietransfer	Schnell	Langsam	Schnell
Energietechnologien	Fokus: effizient und erneuerbar	Investitionen in erneuerbare aber weiterhin fossile Abhängigkeit	Fossil, Alternativen nicht aktiv verfolgt
Kohlenstoffintensität	Gering	Mittel	Hoch

1.1.3 Zusätzliche Annahmen zur Klimapolitik

Die SSPs 1 – 5 enthalten in ihrer Grundform (Basiszenarien) noch keinerlei Annahmen zu zukünftigen klimapolitischen Maßnahmen. Ohne diese werden die internationalen Klimaschutzziele allerdings in allen fünf SSPs verfehlt.

Für SSP5 erscheint dies in diesem Zusammenhang plausibel, so dass in diesem Szenario keine internationalen klimapolitischen Erfolge angenommen werden (**SSP5-Baseline**). Für SSP2 wird in dieser Studie zusätzlich zum Basisszenario angenommen, dass durch klimapolitische Maßnahmen das 2 °C-Ziel bzw. eine Beschränkung des Strahlungsantriebs auf 2,6 W/m^2 erreicht wird (**SSP2-26**). Für SSP1 wird zusätzlich zum Basisszenario angenommen, dass durch eine sehr ambitionierte Klimapolitik das 1,5 °C-Ziel bzw. eine Beschränkung des Strahlungsantriebs auf 1,9 W/m^2 erreicht wird (**SSP1-19**).

1.2 Energieszenarien

Insgesamt stellen die SSPs sehr unterschiedliche Energiezukünfte dar, die eine große Bandbreite möglicher Energienachfrageentwicklungen und Energieversorgungsstrukturen aufweisen. Diese Bandbreite ergibt sich aus unterschiedlichen Annahmen zu den Rahmenbedingungen der Energiesysteme, wie Kosten und Verfügbarkeit zukünftiger fossiler Brennstoffressourcen, dem technologischen Wandel, dem Wirtschaftswachstum, neuer Energiedienstleistungen u. a.

Das Ausmaß und die Struktur der zukünftigen Energietechnologien in den SSP-Szenarien sind entscheidende Determinanten der Herausforderungen für Minderung und Anpassung an den Klimawandel. So hat das SSP5-Basisszenario eine starke Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen mit einem zunehmenden Anteil von Kohle am Energiemix. Im Gegensatz dazu zeigen SSP1 steigende Anteile an erneuerbaren Energien und anderen kohlenstoffarmen Energieträgern. Die

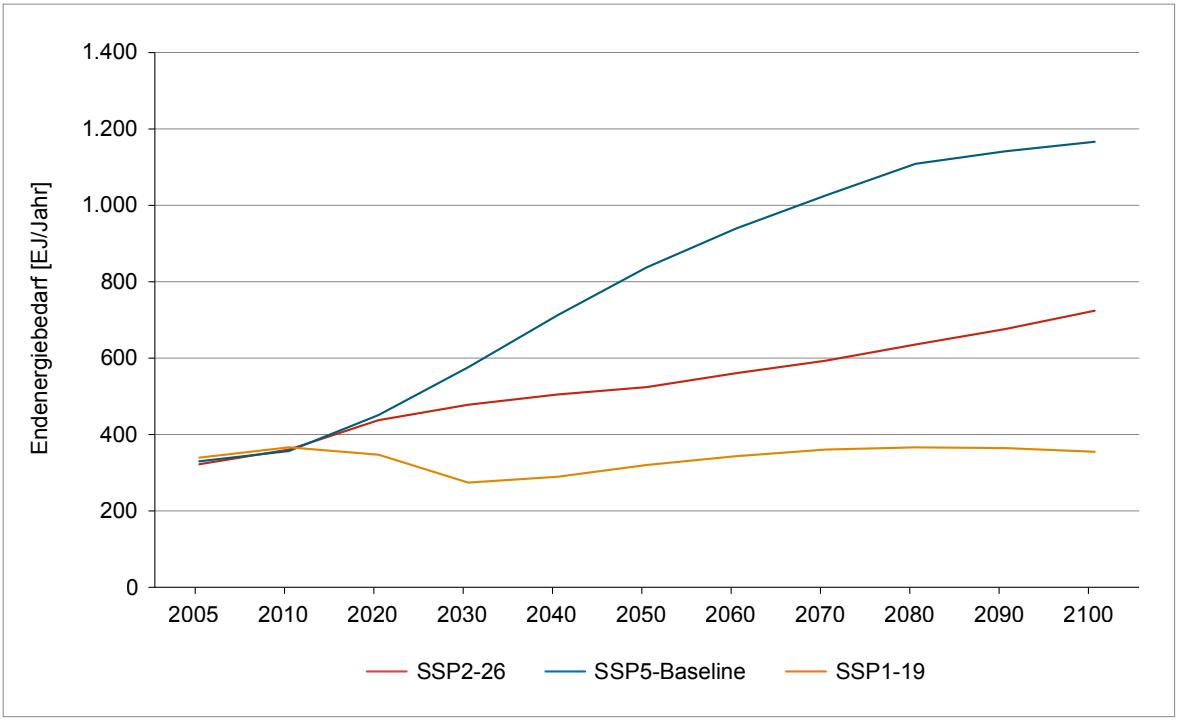


Abb. 1.2: Endenergiebedarf der drei ausgewählten SSP-Szenarien (Quelle: Datenbank der IIASA o. J.)

„Mittelweg"-Erzählung von SSP2 führt im Vergleich zu den anderen SSPs zu einer ausgewogeneren Energieentwicklung auf Basis einer Fortsetzung des gegenwärtigen von fossilen Brennstoffen dominierten Energiemixes. Dieser wird kontinuierlich durch Nutzung von Biomasse und Erneuerbaren Energien verbessert. Wie in Abb. 1.1 dargestellt ist, ergeben sich in SSP2 daher mittlere Herausforderungen sowohl an die Anpassung an die Folgen des Klimawandels als auch an die Vermeidung und Verminderung von Treibhausgasemissionen.

Das SSP5-Szenario weist eine mehr als dreifache Steigerung des Energiebedarfs im Laufe des Jahrhunderts auf (in erster Linie getrieben durch ein schnelles Wirtschaftswachstum), s. Abb. 1.2. Infolgedessen ist SSP5 durch hohe Herausforderungen an die Minderung des Klimawandels gekennzeichnet. Die Energienachfrage ist in dem SSP1-Szenario besonders niedrig, erreicht ihren Höhepunkt um 2080 und sinkt danach aufgrund der erfolgreichen Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen und Verhaltensänderungen. Dies führt zu einer globalen Entkopplung des Energiebedarfs vom Wirtschaftswachstum. In Übereinstimmung mit den intermediären Herausforderungen verdoppelt sich die Endenergienachfrage im Szenario SSP2 langfristig (2100), was einen mittleren Pfad darstellt.

Die SSP-Datenbank des International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA o. J.) enthält dezidierte Angaben zur Entwicklung der Technologien in den SSPs, wie z. B. für Windenergie, Solarenergie, Wasserstofferzeugung, CCS und der Erzeugung synthetischer Kraftstoffe (Riahi et al. 2017). Diese wurden zur Beschreibung des Marktpotenzials im Jahr 2040 in den entsprechenden Technologiekapiteln herangezogen. Die Datenbank wurde in den Jahren 2012 bis 2018 erstellt. Soweit sinnvoll und möglich, sind kurzfristige Einflüsse wie z. B. die Covid-19-Pandemie oder aktuelle Diskussionen zur Dekarbonisierung mit berücksichtigt worden.

1.3 Mobilitätsszenarien

Verschiedene Mobilitätsszenarien wurden auf Basis der Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) aufgestellt (Riahi et al. 2017), um Neuzulassungszahlen und damit Fahrzeugverkäufe und Produktion zu beschreiben. Als Datenquelle

für die Beschreibung allgemeiner Neuzulassungszahlen und technologiespezifischer Neuzulassungszahlen (dies betrifft Elektrofahrzeuge: EV) wurde die interne xEV-Datenbank des Fraunhofer ISI ausgewertet: Die Datenbank wurde 2014 vom Fraunhofer ISI entwickelt und wird seitdem jährlich aktualisiert. Die letzte Aktualisierung erfolgte im April 2020. Die Datenbank umfasst die weltweiten Produktions- und Verkaufszahlen für konventionelle Fahrzeuge und xEV-Modelle, aufgeschlüsselt nach Ländern, sowie Informationen zur Batteriekapazität und Reichweite der Fahrzeuge. Die Datenbank aggregiert Informationen, die von Marklines Co, Ltd. (MARKLINES CO LTD. 2020), der International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA 2020), dem Europäischen Verband der Automobilhersteller (ACEA 2020), dem EV-sales blog (EV SALES BLOG 2020) und anderen Online-Quellen (z. B. Websites von Automobil-OEMs) zur Verfügung gestellt werden. Die ISI xEV-Datenbank wurde mit dem European Alternative Fuels Observatory (EAFO 2020) abgeglichen und ist in guter Übereinstimmung.

Die Modellierung der Neuzulassungszahlen anhand der BIP-Entwicklung in den SSP-Szenarien wird im Folgenden dargestellt. Die Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen wurde mithilfe des Bass-Diffusion-Modells beschrieben und auf die SSP-Szenarien angepasst.

1.3.1 Entwicklung der Fahrzeugmärkte

In der Vergangenheit konnte ein paralleles Wachstum der Neuzulassungszahlen und Fahrzeugmärkte mit dem globalen BIP beobachtet werden (s. Abb. 1.3). Seit 2017 weichen die Neuzulassungszahlen vom Wachstumstrend des BIP ab. Die Ursache dessen ist nicht klar. Einerseits sind klare Abschwächungen des Wachstums von Fahrzeugmärkten, z. B. in Europa, erkennbar, was auf eine mögliche Marktsättigung hinweisen könnte. Auch in China kam es 2019 zu einem deutlichen Rückgang bei den Zulassungszahlen, was jedoch nicht notwendigerweise auf eine Marktsättigung hindeuten muss und nur einen vorübergehenden Effekt darstellen könnte. In den letzten Jahren und insbesondere während der Covid-19-Pandemie in 2020 stellten Fahrzeugverkäufe damit keinen klaren Treiber des BIP-Wachstums dar. Die Daten lassen jedoch noch keinen Schluss darüber zu, ob die Neuzulassungszahlen global in eine Sät-

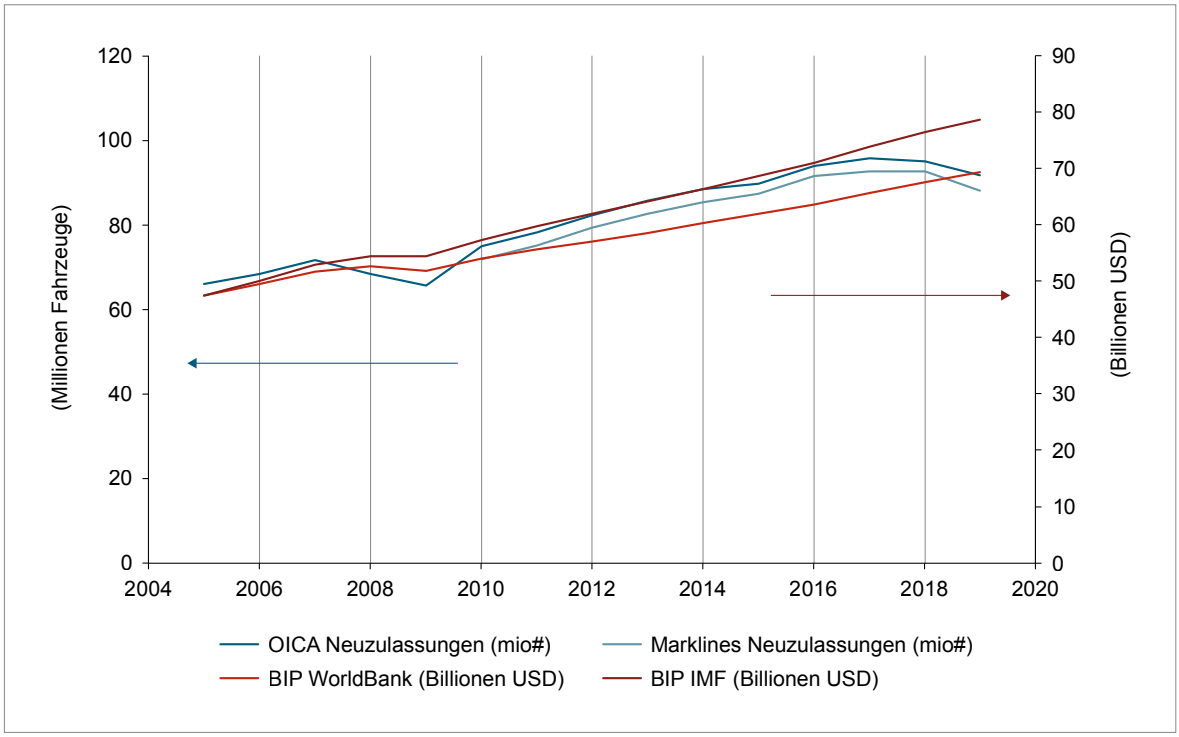


Abb. 1.3: Entwicklung der globalen Neuzulassungszahlen seit 2005 (linke Skala) und des globalen BIP (rechte Skala)

tigung übergehen und damit langfristig vom BIP-Wachstum entkoppelt sein werden.

Zur Modellierung der Mobilitätsszenarien und Neuzulassungszahlen anhand der SSPs wurde trotz aktueller Abweichungen das BIP als wesentliche Eingangsgröße gewählt. Die Vorgehensweise vereinfacht damit die in der Realität bestehende wechselseitige Abhängigkeit von BIP und Fahrzeugverkäufen. In der Modellierung wurde das BIP-Wachstum als exogene Variable zur Fahrzeugmarktbeschreibung herangezogen.

In den Szenarien „Mittelweg“ (SSP2) und „Fossiler Pfad“ (SSP5) wurde eine weiterhin proportionale Entwicklung der Fahrzeugmärkte und des prognostizierten BIP unterstellt. Im Szenario „Nachhaltigkeit“ (SSP1), welches explizit einen Übergang der Wirtschaftsweise zu ressourcenschonenden und energieeffizienten Praktiken unterstellt, wurde die Modellierung der Fahrzeugmärkte nur unterproportional an die Entwicklung des BIP angekoppelt. Während in diesem Szenario bis 2019 die gleichen Wachstumsraten für BIP und Fahrzeugmärkte angenommen wurden, wirkt sich im Modell das BIP-Wachstum bis 2040 nur noch zu 50 % auf das Wachstum der Fahrzeugmärkte aus. Im Übergangsbereich von 2020 bis 2040 wurde eine lineare Abnahme der Proportionalität von 100 auf 50 % unterstellt.

Im Resultat der Entkopplung des Fahrzeugmarktwachstums vom BIP-Wachstum im SSP1-Szenario ergeben sich niedrigere Fahrzeugmärkte als im SSP2- und im SSP5-Szenario. Der Gesamtmarkt nach SSP1 wächst demnach bis 2040 global auf etwa 135 Mio. Fahrzeuge an. Im SSP5-Wachstumsszenario umfasst der Gesamtmarkt 2040 etwa 210 Mio. Fahrzeuge (s. Abb. 1.4).

Neben der Modellierung des Gesamtfahrzeugvolumens wurden auch die Marktanteile von Kleinwagen (Mini, Segmente A, B) Kompaktklassewagen und Vans (Kompakt, Segmente C, M) und Oberklassefahrzeugen (Oberklasse, Segmente D, E, F und SUV-Segmente) variiert. In den Szenarien SSP2 und SSP5 wurde der in den letzten Jahren beobachtbare Trend bei der Verschiebung der Marktanteile zugunsten von Fahrzeugen der Oberklassesegmente fortgeschrieben. Im Nachhaltigkeitsszenario (SSP1) wurde hingegen unterstellt, dass das Wachstum der Oberklassesegmente abflacht und ab 2030 sogar rückläufig ist. Demgegenüber wurde ein entsprechend höheres Wachstum in den Kategorien Mini und Kompakt angenommen.

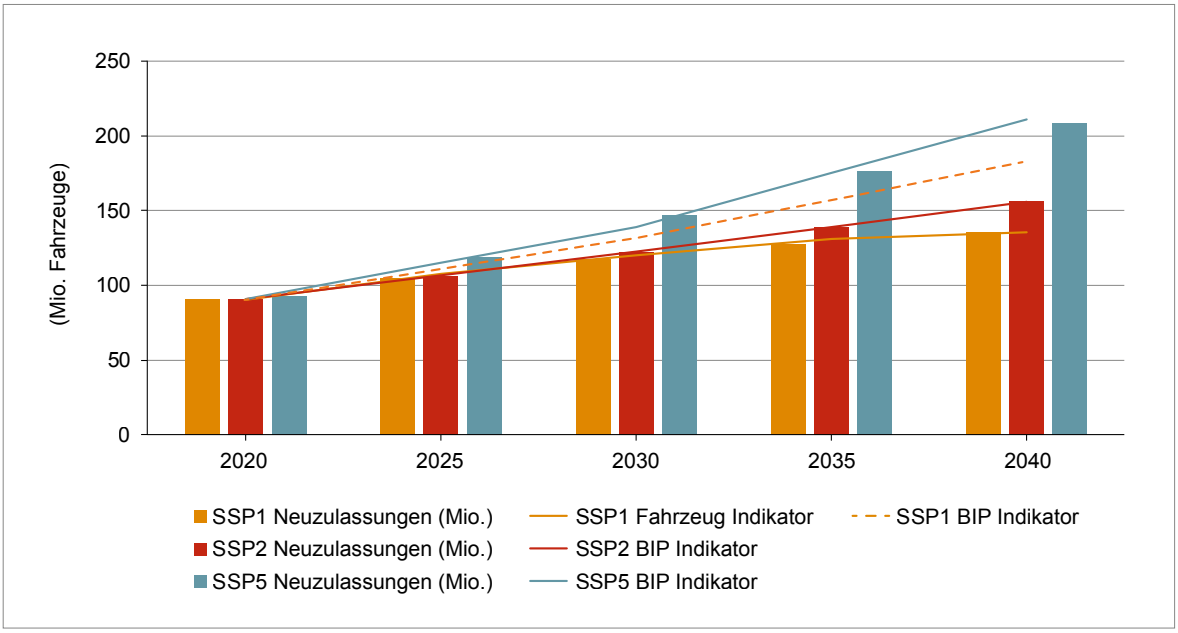


Abb. 1.4: Prognostizierte Entwicklung der Fahrzeugmärkte und Vergleich zum Wachstum des BIP aus den SSP-Szenarien

Anmerkung: Die SSP-Indikatoren wurden zum Vergleich auf die Größe des Fahrzeugmarktes in 2019 normiert.

Während die Entkopplung der Pkw-Neuzulassungszahlen vom BIP-Wachstum im Szenario SSP1 durch persönliche Kaufentscheidungen von Privatpersonen motivierbar ist, muss die Betrachtung der Nutzfahrzeugmärkte (Nfz) komplexer ausfallen. Aus Perspektive der Nachhaltigkeit ließe sich zwar ebenso ein Rückgang des Warenverkehrs und damit ein niedriges Wachstum der Nfz-Segmente motivieren, dies würde jedoch nicht das ansonsten in SSP1 steigende BIP widerspiegeln.

Entsprechend der getroffenen Annahmen stellt das Wachstum der Pkw-Märkte im SSP1-Szenario keinen entscheidenden Treiber für das BIP-Wachstum dar. Wachstumsimpulse müssten demnach von anderen Wirtschaftszweigen ausgehen. Um einen dem BIP-Wachstum entsprechenden steigenden Warenverkehr abbilden zu können, wurden die Wachstumsraten der Nutzfahrzeugkategorien im SSP1-Szenario weiterhin proportional an das BIP-Wachstum gekoppelt.

Gegenüber dem Status Quo (2019) vergrößert sich im SSP1-Szenario somit der Anteil der Nutzfahrzeuge am Gesamtfahrzeugmarkt (21 % in 2019 auf über 25 % in 2040). Im Wachstumsszenario SSP5 bleibt dagegen der Anteil der Nutzfahrzeuge über die Zeit mit etwa 21 % konstant. Ebenso im Mittelweg-Szenario SSP2.

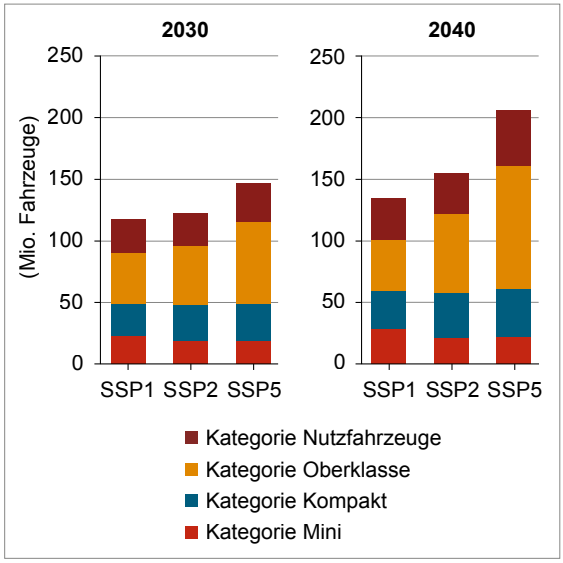


Abb. 1.5: Marktanteile der unterschiedlichen Fahrzeugkategorien in den Szenarien SSP1, 2 und 5 für 2030 und 2040

Tab. 1.4: Modellierungsparameter zur Abbildung der SSP-Szenarien als Fahrzeugmärkte sowie zur Beschreibung der Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen

Modellparameter zur Abbildung der SSP-Szenarien			
Parameter	**„Nachhaltigkeit“ (SSP1)**	**„Mittelweg“ (SSP2)**	**„Fossiler Pfad“ (SSP5)**
BIP-Abhängigkeit Pkw-Märkte	linear abnehmend, 100 % in 2019 bis 50 % in 2040	proportional, 100 %	
BIP-Abhängigkeit Nfz-Märkte	proportional, 100 %		
Fahrzeugsegmente	Verlangsamung des Wachstums der Oberklassesegmente, Stärkung Mini und Kompakt	Fortschreiben des hohes Wachstum der Oberklassesegmente, Stagnation Mini und Kompakt	
BEV adressierbarer Pkw-Markt (Anteil am Gesamtmarkt, a)	75 %	75 %	10 %
PHEV adressierbarer Pkw-Markt (Anteil am Gesamtmarkt, a)	100 %	80 %	33 %
FCEV adressierbarer Pkw-Markt (Anteil am Gesamtmarkt, a)	60 %	50 %	–
xEV adressierbarer Nfz-Markt (Anteil am Gesamtmarkt, a)	60 %	50 %	–
Marktdiffusion EV (p, q)	schnell	mittel	langsam

Tab. 1.5: Fahrzeugmärkte nach Fahrzeugkategorien für die Szenarien SSP1, 2 und 5

	2025	2030	2035	2040
SSP1 Neuzulassungen (mio#)	104,5	116,9	127,4	135,5
Mini	19,3	22,3	25,4	28,5
Kompakt	23,9	26,4	28,8	31,3
Oberklasse	37,5	41,1	42,6	41,5
Nutzfahrzeuge	23,7	27,1	30,6	34,2
SSP2 Neuzulassungen (mio#)	106,0	122,1	138,9	156,4
Mini	17,1	18,5	20,1	21,5
Kompakt	25,8	29,4	33,3	37,3
Oberklasse	39,9	47,6	55,7	64,2
Nutzfahrzeuge	23,2	26,7	29,9	33,4
SSP5 Neuzulassungen (mio#)	118,5	146,4	176,3	208,2
Mini	17,2	18,9	20,6	22,3
Kompakt	25,4	29,7	34,1	38,8
Oberklasse	51,3	67,0	83,8	101,7
Nutzfahrzeuge	24,6	30,8	37,8	45,5

1.3.2 Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen

Eine langfristige Abschätzung der Marktentwicklung für die Elektromobilität (xEV) sowie der sich hieraus ergebenden Nachfrage nach Energiespeicherkapazitäten ist komplex. Zwar läßt sich mittlerweile auf eine Entwicklung einiger Jahre zurückblicken (seit 2010 für batterieelektrische Fahrzeuge BEV und Plug-in-Hybride PHEV), jedoch sind die Einflussfaktoren vielfältig: Z. B. Entwicklung der Größe des Gesamtmarktpotenzials für Elektromobilität, Entwicklung der Mobilitätskonzepte, Batterietechnologieentwicklung (inkl. technische Leistungsparameter und Kosten), Art, Umfang und Intensität politischer Rahmenbedingungen, gesellschaftliche bzw. Nutzerakzeptanz und gesellschaftliche Veränderungen, Nutzungs- und Dienstleistungsmodelle.

Das Diffusionsmodell von Bass (1969) ist hierbei nach dem exponenziellen oder logistischen Diffusionsmodell das einfachste Modell zur Beschreibung der Markteinführung und Diffusion innovativer Produkte unter Berücksichtigung von Innovations- und Imitationseffekten, welches die globale Entwicklung, insbesondere der Elektro-Pkw-Verkäufe zwischen 2010 und 2019 hinreichend exakt reproduziert und für die Zukunft die Spannbreite existierender Marktprognosen wiedergibt (Thielmann et al. 2018). Das Modell betrachtet den Anteil von Erstkäufen aufgrund der Neuartigkeit des Produktes (Innovatoren, Innovationskoeffizient p) bzw. aufgrund seiner Verbreitung (Imitatoren, Imitationskoeffizient q).

Abb. 1.6 zeigt exemplarisch die Entwicklung der globalen Neuzulassungszahlen zwischen 2010 und 2019 für batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) der Kategorie Mini. Analog zu Abb. 1.7 wurden die Parameter p und q des Diffusionsmodells für alle elektrischen Antriebsarten und Fahrzeugkategorien anhand der Daten bis 2019 auf bestmöglichen Fit angepasst. Dieser Fit vernachlässigt den bisherigen deutlichen Rückgang bei den Neuzulassungszahlen aufgrund der Covid-19-Situation in 2020 und stellt damit eher ein optimistisches Szenario dar (Maximalmodell, schnelle Diffusion). Erste Prognosen für die Entwicklung der Fahrzeug- und Elektrofahrzeugmärkte in 2020 gehen auch für das Gesamtjahr 2020 von einem starken Rückgang im zweistelligen Prozentbereich aus (BloombergNEF 2020). Ein entsprechender Fit des Modells mit einem hypothetischen Datenpunkt für 2020, welcher einen Rückgang der EV-Märkte um 18 % annimmt, wurde für die Beschreibung des Minimalmodells (langsame Diffusion) herangezogen.

Um eine mögliche Marktsättigung im Modell zu beschreiben, wurde bei der Modellierung der Marktdiffusion von Elektrofahrzeugen weiter angenommen, dass die Neuzulassungszahlen über alle Antriebsarten hinweg (Elektrofahrzeug (EV) und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (ICE), siehe Tab. 1.5, eine natürliche maximale Grenze für das Wachstum des xEV-Marktes darstellt.

Es ist jedoch denkbar, dass nicht der gesamte Fahrzeugmarkt durch batterieelektrische (BEV) oder Plug-in-Hybride (PHEV) Antriebskonzepte adressierbar sein könnte. Insbesondere aufgrund von Reichweiten- oder Nutzungsanforderungen,

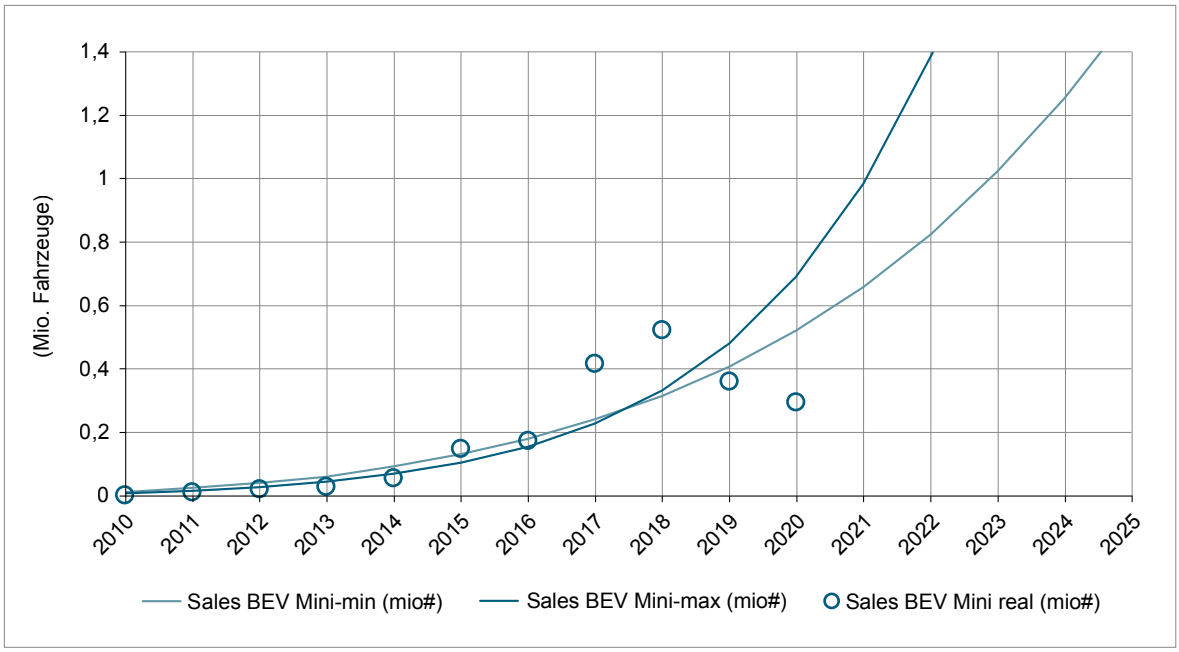


Abb. 1.6: Entwicklung der Neuzulassungszahlen für BEV-Fahrzeuge der Kategorie Mini seit 2010 sowie minimaler und maximaler Modellfit

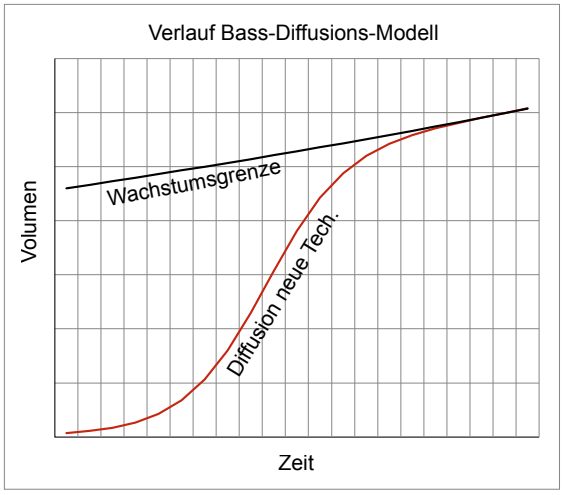


Abb. 1.7: Schematische Darstellung des Bass-Diffusionsmodells mit dynamischer Wachstumsgrenze

z. B. im Bereich der Nutzfahrzeuge könnte die Diffusion von BEV und PHEV auch langfristig nur in Teilmärkte erfolgen, was im Rahmen des Bass-Diffusionsmodells durch eine entsprechend angepasste obere Wachstumsgrenze beschrieben werden kann. Als dritter Eingangsparameter in der Modellbeschreibung neben den Innovations- und Imitationskoeffizienten (p, q) wurde im Modell der adressierbare Anteil am Gesamtmarkt (a) gewählt.

Die Annahmen zum Parameter a für die Szenarien SSP1, 2 und 5 sind in Tab. 1.4 aufgelistet. Im Szenario SSP1 wurde die mögliche Substitution von 75 % des gesamten Pkw-Marktes durch BEV angenommen. Im SSP2- und SSP5-Szenario nur jeweils von 55 bzw. 10 %, da in diesen Szenarien Elektromobilität nicht international vorangetrieben wird (SSP2), bzw. von insgesamt niedriger Bedeutung (SSP5) ist. Für PHEV wurden insgesamt höhere Substitutionspotenziale von 100, 80 und 33 % angenommen, da keine Reichweitenbeschränkung und eine weiterhin hohe Kompatibilität zu fossilen Energieträgern bestehen. Ab 2025 wurde in den Szenarien SSP1 und 2 ebenfalls eine Marktdiffusion von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen (FCEV) angenommen. Da durch die weitere Verwendung fossiler Brennstoffe kein klarer Treiber für die Entwicklung dieser Technologie besteht, wurde im SSP5-Szenario keine Markteinführung angenommen. Einer ähnlichen Argumentation folgend wurde das Substitutionspotenzial für EV im Nfz-Bereich auf 60 bzw. 50 % gesetzt (SSP1, 2), während eine mögliche Substitution im SSP5-Szenario vernachlässigt wurde.

Das angewandte Modell priorisiert unter den Antriebstechnologien den Verkauf von BEV während des Marktanstiegs. BEV können ungehindert in den Markt diffundieren, bis ihr adressierbarer

Marktanteil a erreicht ist. Die Verkäufe von PHEV (und HEV, hier nicht weiter betrachtet) sinken daher im Modell, sobald insgesamt eine Marktsättigung durch Elektrofahrzeuge (xEV) erreicht ist und es zu einem direkten Wettbewerb zwischen den drei elektrischen Antriebstechnologien (HEV, PHEV, BEV) kommt. Somit unterscheiden sich die entwickelten Szenarien nicht nur hinsichtlich der Diffusionsgeschwindigkeiten elektrischer Antriebstechnologien (xEV gegenüber ICE), sondern auch hinsichtlich der relativen Anteile der drei elektrischen Antriebstechnologien. Im SSP1-Szenario mit schneller BEV-Diffusion kommt es bereits kurzfristig zu einer Verringerung der Marktanteile von PHEV und HEV. In langsamen Szenarien (SSP5) mit einem kleineren durch BEV adressierbaren Markt besitzen PHEV und HEV auch mittelfristig höhere Marktanteile.

Obgleich das Marktpotenzial von brennstoffzellengetriebenen Fahrzeugen (FCEV), welche eine Art Hybrid aus Brennstoffzelle und batterieelektrischem Auto darstellen, aus heutiger Sicht noch nicht klar eingeschätzt werden kann, wurde die Inverkehrbringung von FCEV gegenüber allen anderen Antriebstechnologien im Modell priorisiert. Diese Annahme lässt sich nicht weiter begründen, wirkt sich aufgrund des Betrachtungszeitraums bis 2040 jedoch nicht wesentlich auf die Marktanteile der Antriebstechnologien HEV, PHEV und BEV aus.

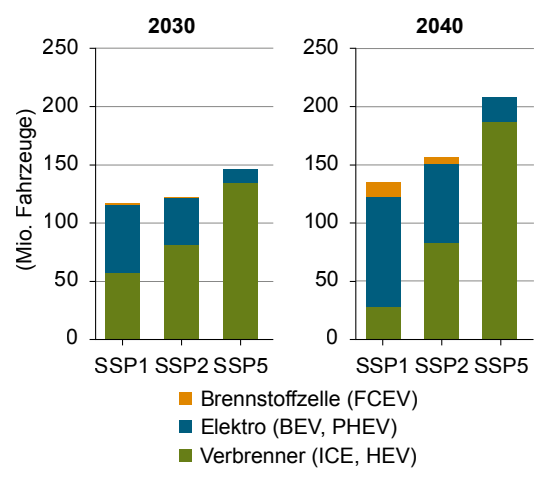


Abb. 1.8: Marktanteile der Antriebstechnologien Elektro (BEV, PHEV), Brennstoffzelle (FCEV) und Verbrenner (ICE und HEV) in den Szenarien SSP1, 2 und 5 für die Jahre 2030 und 2040

Tab. 1.6: Neuzulassungszahlen nach Antriebstechnologien im Szenario SSP1

SSP1	2025	2030	2035	2040
BEV Mini (mio#)	2,54	9,17	17,47	22,50
BEV Kompakt (mio#)	0,77	2,20	5,49	11,15
BEV Oberklasse (mio#)	12,18	26,55	28,86	26,47
PHEV Mini (mio#)	0,04	0,07	0,12	0,19
PHEV Kompakt (mio#)	0,47	1,30	3,30	7,61
PHEV Oberklasse (mio#)	4,64	14,75	11,67	7,73
FCEV Mini (mio#)	0,00	0,04	0,17	0,54
FCEV Kompakt (mio#)	0,02	0,09	0,30	0,89
FCEV Oberklasse (mio#)	0,03	0,21	1,00	3,63
BEV INfz (mio#)	0,84	3,65	10,65	17,92
BEV sNfz (mio#)	0,01	0,04	0,11	0,31
BEV Busse (mio#)	0,36	0,70	1,13	1,53
FCEV INfz (mio#)	0,01	0,11	0,58	2,37
FCEV sNfz (mio#)	0,08	0,56	2,36	4,80
FCEV Busse (mio#)	0,01	0,04	0,20	0,52

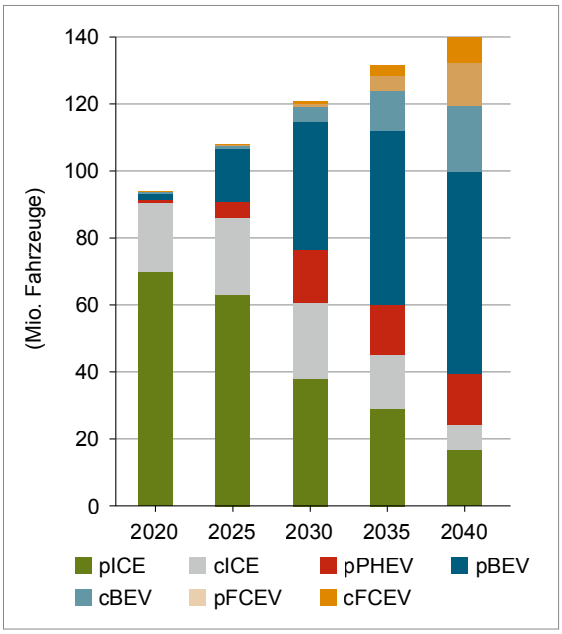


Abb. 1.9: Marktanteile und -größen der unterschiedlichen Antriebstechnologien im SSP1-Szenario bis 2040 für Pkw und Nfz

Tab. 1.7: Neuzulassungszahlen nach Antriebstechnologien im Szenario SSP2

SSP2	2025	2030	2035	2040
BEV Mini (mio#)	2,19	5,21	7,29	8,27
BEV Kompakt (mio#)	0,67	1,55	3,20	5,54
BEV Oberklasse (mio#)	8,29	16,71	21,12	24,53
PHEV Mini (mio#)	0,02	0,04	0,05	0,07
PHEV Kompakt (mio#)	0,32	0,64	1,28	2,49
PHEV Oberklasse (mio#)	4,62	10,22	10,53	12,45
FCEV Mini (mio#)	0,00	0,03	0,09	0,25
FCEV Kompakt (mio#)	0,01	0,05	0,16	0,46
FCEV Oberklasse (mio#)	0,01	0,10	0,37	1,10
BEV INfz (mio#)	0,81	3,64	8,08	13,97
BEV sNfz (mio#)	0,01	0,02	0,06	0,15
BEV Busse (mio#)	0,15	0,25	0,35	0,43
FCEV INfz (mio#)	0,00	0,04	0,42	2,95
FCEV sNfz (mio#)	0,00	0,09	0,32	0,88
FCEV Busse (mio#)	0,00	0,00	0,02	0,08

Tab. 1.8: Neuzulassungszahlen nach Antriebstechnologien im Szenario SSP5

SSP5	2025	2030	2035	2040
BEV Mini (mio#)	0,25	0,61	0,99	1,26
BEV Kompakt (mio#)	0,10	0,22	0,45	0,82
BEV Oberklasse (mio#)	0,99	3,15	4,81	6,06
PHEV Mini (mio#)	0,01	0,01	0,02	0,03
PHEV Kompakt (mio#)	0,08	0,15	0,24	0,38
PHEV Oberklasse (mio#)	1,91	7,51	10,01	12,08

1.4 Digitalisierungsszenarien

1.4.1 Grundverständnis: Die Digitale Transformation und ihre Technologieimpulse auf die Rohstoffnachfrage

Begriffsklärung

Die „Digitalisierung“ oder „Digitale Transformation“ wird in dieser Studie als Umbruch durch den Einsatz von Computersystemen und die Vernetzung aller Bereiche von Gesellschaft und Wirtschaft verstanden (Köhler et al. 2018). Die Digitale Revolution kann als dritter großer Wandel der soziologischen Menschheitsgeschichte nach der Neolithischen und der Industriellen Revolution eingeordnet werden (Stengel et al. 2017). Ihr Anfang kann auf die 80er-Jahre des 20. Jahrhunderts mit der Erfindung und ersten Verbreitung des Internets festgelegt werden (Stengel et al. 2017). Angesichts der aktuell stattfindenden umfassenden Digitalisierung der industriellen Produktion hat sich in Deutschland der Begriff Industrie 4.0 bzw. Vierte Industrielle Revolution etabliert. Tatsächlich sind diese Vorgänge aber eher als zweite Phase der Digitalen Revolution zu betrachten, da die technische Grundlage unverändert die Mikroelektronik ist (Hirsch-Kreinsen et al. 2018).

Abb. 1.10 zeigt die Betrachtungsweise der Digitalisierung bzw. digitalen Transformation mit Fokus auf die Rohstoffnachfrage. Dabei wird in eine wirtschaftliche/gesellschaftliche Ebene und eine physische Ebene unterteilt. Die physische oder materielle Grundlage des Systems Digitalisierung sind Mikroelektronik (integrierte Schaltkreise) und Mikrosystemtechnik (miniaturisierte, multifunktionelle und autark operierende Sensor-/Aktorsysteme zur Aufnahme, Verarbeitung und Übertragung von Daten). Daraus baut sich die „digitale Infrastruktur“ auf, die sich in Endgeräte, Datenübertragungsnetze sowie Datenspeicher- und -verarbeitungszentren (Rechenzentren) untergliedern lässt. Ferner lassen sich Übertragungsnetze und Rechenzentren als „zentrale digitale Infrastruktur zusammenfassen“. Zentrale Kennzahlen sind daher Speicherkapazität bzw. gespeichertes Datenvolumen, Übertragungskapazität bzw. Traffic sowie Rechenkapazität bzw. jährliches Berechnungsvolumen (Hilbert & López 2011).

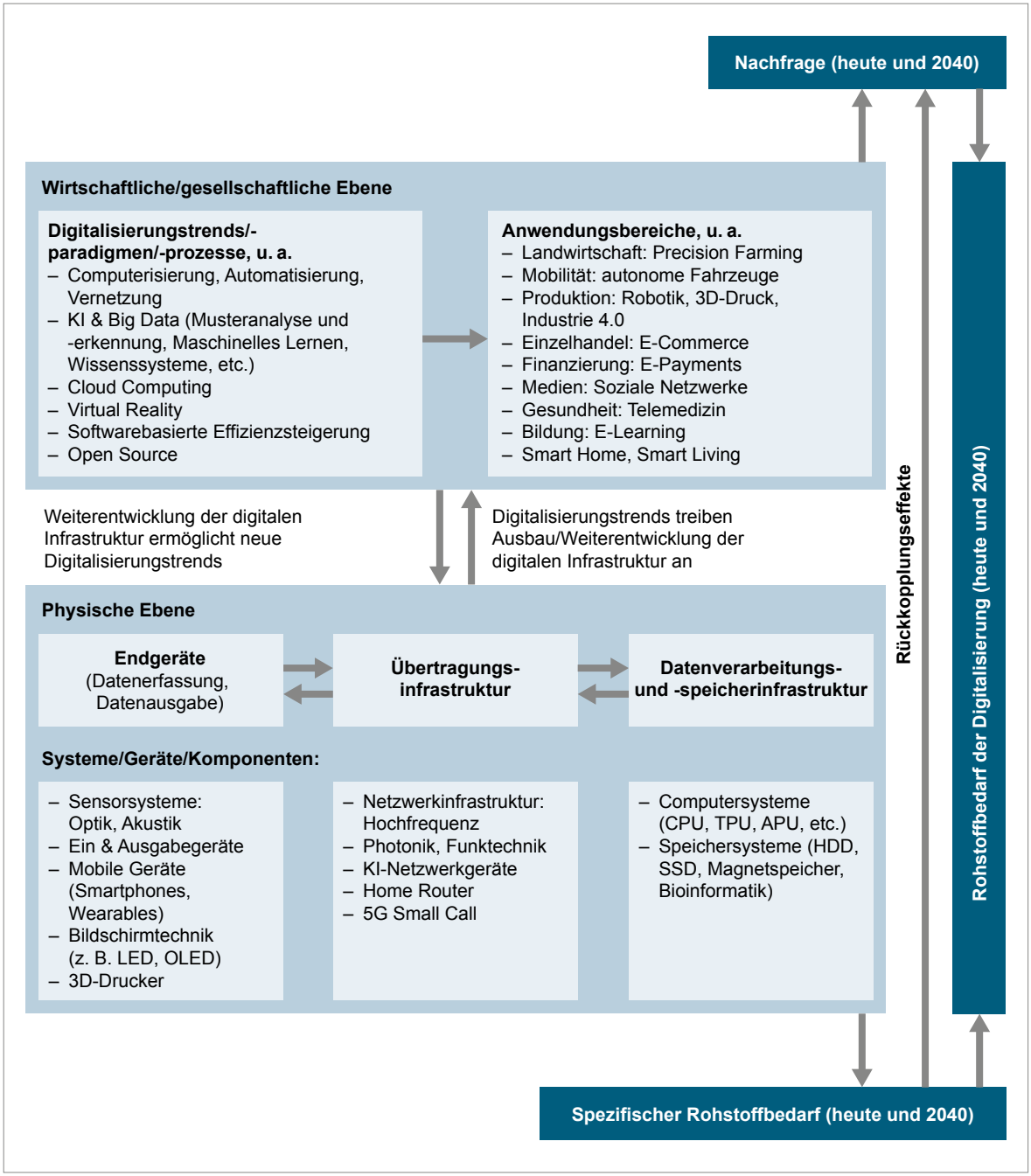


Abb. 1.10: Verständnis des Systems Digitalisierung mit Fokus auf den Rohstoffbedarf (Quelle: Eigene Darstellung)

Entscheidend für die bisherige und weitere Entwicklung der Digitalisierung ist das Zusammenspiel aus neuen Trends und Paradigmen (z. B. Vernetzung, Automatisierung, Künstliche Intelligenz, Big Data, Virtual Reality), die einen Ausbau der digitalen Infrastruktur erfordern und des innovationsbasierten Kapazitätsausbaus der Digitalisierungsinfrastruktur, der diese neuen Trends/Paradigmen erst praktisch realisierbar macht (s. Abb. 1.10). So macht beispielsweise die Künstliche Intelligenz (KI) aktuell enorme Fortschritte, da nun die infrastrukturellen Grundlagen dafür vorhanden sind, während die prinzipiellen Ansätze zur KI-Entwicklung auch schon in der Vergangenheit bekannt waren. Auf ähnliche Weise ermöglicht 5G nun die umfassende Umsetzung der Industrie 4.0.

Zusammenhang zwischen den „Rahmenszenarien Digitalisierung“ und den „Technologiesynopsen Digitalisierung“

Abb. 1.10 beinhaltet verschiedene Digitalisierungstrends auf der gesellschaftlichen/wirtschaftlichen Ebene. Kombinationen dieser Trends werden große transformativen Potenziale zugeschrieben (World Economic Forum 2018). Diese digitalen Zukunftstrends haben keine speziellen abiotischen Rohstoffbedarfe, können aber durch Daten- und Rechenanforderungen außergewöhnliche Nachfrageimpulse für die Recheninfrastruktur bedeuten (z. B. KI und Big Data, Cloud Computing, Virtuelle Realitäten). Daher werden diese Trends nicht in einzelnen Technologiesynopsen betrachtet, sondern ihre Nachfrageimpulse auf die digitale Infrastruktur werden innerhalb dieses Kapitels „Rahmenszenarien Digitalisierung“ analysiert.

Darüber hinaus sind einige digitale Zukunftstechnologien mit spezifischen Hardwarekomponenten und somit spezifischen (abiotischen) Rohstoffbedarfen verbunden. Diese werden in einzelnen Technologiesynopsen untersucht (z. B. „Geräte im Internet der Dinge (IoT)“ im Kapitel 3.2.8, „Industrielle Robotik und Industrie 4.0“ im Kapitel 3.2.6). Zusätzlich haben auch diese Technologien Nachfrageimpulse auf die zentrale Dateninfrastruktur, die wiederum in den Rahmenszenarien mitgedacht werden.

Schließlich befassen sich einige Technologiesynopsen mit wesentlichen, materialintensiven Basistechnologien der digitalen Infrastruktur (z. B. Rechenzentren, Glasfaserkabel, 5G/6G). Auch wenn diese Technologien nicht ganz neu sind, können sich aus einem ungewöhnlichen Wachstum dieser Infrastrukturelemente ungewöhnliche Nachfrageimpulse auf Rohstoffmärkte ergeben, die in den Technologiesynopsen analysiert werden. Wichtig sind dafür konsistente, synopsenübergreifende Rahmenannahmen zum Wachstum der zentralen Kennzahlen der digitalen Infrastruktur (Datenübertragung, -speicherung, -berechnung), die in den folgenden Unterkapiteln erläutert werden. Zweck der Rahmenszenarien Digitalisierung ist also, Annahmen aus Technologiesynopsen zu digitalen Infrastrukturelementen abzugleichen und gemeinsame Treiber zu erläutern.

Drei Digitalisierungstrends haben ein besonderes Potenzial, das Datenaufkommen aktuell und zukünftig zu steigern und damit den Ausbau der Infrastruktur zu treiben: KI inklusive maschinellem Lernen, IoT inklusive Industrie 4.0 und Cloud Computing inklusive Edgecomputing. (Wie eingangs erläutert und in Abb. 1.10 ersichtlich, könnte man umgekehrt sagen, diese drei großen Trends werden durch aktuelle Fortschritte der digitalen Infrastruktur ermöglicht). Zu IoT und Industrie 4.0 gibt es eine eigene Technologiesynopse; Künstliche Intelligenz und Cloud Computing werden in diesem Kapitel unter den Treibern des Ausbaus der digitalen Infrastruktur näher beschrieben.

Einige klassische digitale Endgeräte haben schon eine gewisse Marktsättigung erreicht, so dass von ihnen für 2040 keine außergewöhnlichen Nachfrageimpulse zu erwarten sind (Hilbert 2015; Cisco 2019). Daher werden Geräte wie Smartphones, Tablets, PCs, Laptops und Clients nicht in eigenen Technologiesynopsen behandelt. Spezifische Komponenten werden in anderen Synopsen abgedeckt (z. B. „5G (6G)“ in Kapitel 3.5.3 und „mikroelektronische Kondensatoren“ in Kapitel 3.2.4).

1.4.2 Historische Trends und vorhandene Zukunftsszenarien

Für die vorliegende Studie ist vor allem interessant, wie sich bisherige bzw. aktuelle Trends der Digitalisierung zukünftig fortsetzen. In der Literatur finden sich Daten zur bisherigen Entwicklung, Beschreibungen der aktuellen Situation sowie Szenarien und Prognosen für die nahe Zukunft (Zeitraum bis 2025, z. B. Hilbert (2015), Reinsel et al. (2018), Cisco (2019). Für die mittelfristige Zukunft bis 2030 gibt es zum einen Analysen zu den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Möglichkeiten (Stone et al. 2016; Rao & Verweij 2017; Bughin et al. 2018), zum anderen quantitative Prognosen zur Energienachfrage, wobei letztere meist auf einer Extrapolation aktueller Trends ohne nähere Rationalisierung beruhen z. B. Andrae & Edler (2015). Für den Zeitraum bis 2040 existieren nur allgemeinere Szenarien wie die SSPs und der World Energy Outlook, die nicht oder nur in geringem Umfang auf Digitalisierungstrends eingehen (Riahi et al. 2017; IEA 2019). Im Folgenden werden wesentliche Trends zusam-

mengefasst und Schlussfolgerungen für die eigenen Szenarien bis 2040 gezogen.

Daten und Prognosen zur Entwicklung zentraler Kennzahlen der digitalen Infrastruktur zwischen 1985 und 2025: Kapazitäten und Aufkommen in der Datenspeicherung, -übertragung und -berechnung

Im Allgemeinen verläuft die Diffusion neuer Technologien so, dass der Bestand an den entsprechenden Produkten (oder auch Anlagen, Dienstleistungseinheiten, etc.) über die Zeit eine S-Kurve bildet (s. Kapitel 1.5). Dieser empirische Befund kann mit verschiedenen Modellen erklärt werden, wobei epidemiologische Modelle und Kosten-Nutzen-Modelle zwei grundsätzliche Strömungen darstellen. Bei den kostenbasierten Modellen nimmt man an, dass die Kosten für eine Innovation mit der Zeit durch Skaleneffekte etc. fallen, so dass sich die Anschaffung zu unterschiedlichen Zeitpunkten für Menschen mit verschiedenem verfügbaren Budget als sinnvoll erweist, woraus sich der s-kurvenförmige Verlauf ergibt. Somit ist die s-kurvenförmige Technologiediffusion nach diesem Erklärungsansatz stets mit einem technologischen Fortschritt und entsprechenden Kostenreduktionen verbunden.

Auch bei vielen digitalen Technologien überlagert sich die Marktdiffusion mit dem technologischen Fortschritt, der sich allerdings in anderen Größenordnungen abspielt, als dies für nicht-digitale Technologien der Fall ist. Das klassische Beispiel hierfür ist das Moore'sche Gesetz, laut dem sich die Anzahl der Schaltkreiskomponenten auf einem integrierten Schaltkreis oder auch die Anzahl der Transistoren pro Flächeneinheit in regelmäßigen Zeitabständen verdoppelt. Die Zeitabstände betrugen in der Anfangszeit (1965 – 1970) ca. zwölf Monate, und verlangsamten sich dann auf 24 Monate. Auf diesem hohen Niveau blieben sie über Jahrzehnte, eine Verdopplung aller zwei Jahre wird zwischen 1970 und 2020 gesehen. Das Moore'sche Gesetz ist entscheidend für die zur Verfügung stehende Rechenleistung.

In Analogie dazu besagt das Edholm'sche Gesetz, dass sich die verfügbare Bandbreite alle 18 Monate verdoppelt. Die Arbeiten von Hilbert & López (2011) und Hilbert (2015) untersuchen die exponenzielle Entwicklung der global verfügbaren Kapazität für die Speicherung und Übertragung von Daten, zunächst von 1986 – 2007, in einem späteren Update bis 2014. Die Datenspeicherkapazität wuchs demnach in den 21 Jahren zwischen 1986 und 2007 mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 31 % ca. 5-mal so schnell wie die Weltwirtschaft. 2014 war eine globale Speicherkapazität von 4,6 Zettabytes (1 ZB = 10^{21} Bytes) erreicht, während sie 1986 noch 2,6 Exabytes (1 EB = 10^{18} Bytes) betrug. Die globale Kapazität zur Übertragung von Daten mittels Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) wuchs von 1986 mit 7,5 Petabits (1 Pb = 10^{15} bits) bis 2014 auf 25 Exabits (1 Eb = 10^{18} bits) mit einer CAGR von 35 %. Diese Schätzungen beinhalten alle verfügbaren Geräte mit ihrer jeweiligen Maximalkapazität und unter der Annahme, dass alle Daten optimal komprimiert werden (Hilbert & López 2011). Es handelt sich also um ein theoretisches Gesamtpotenzial, das praktisch nicht ausgenutzt wird, aber dennoch die Entwicklung über mehrere Jahrzehnte anhand konstanter Indikatoren beschreiben kann. Die Wachstumsraten resultieren somit aus der anfangs beschriebenen Überlagerung von Technologiefortschritt und Technologiediffusion, wobei man den technologischen Fortschritt noch einmal in Hardwareentwicklung und Softwareentwicklung unterteilen kann. Der technologische Software-Fortschritt ist ein wichtiger, oft unterschätzter Treiber. So konnte 2007 dank Formaten wie ZIP, GIF, JPEG, MPEG die gleiche Hardware 3-mal so viel Daten senden wie in 1986 (Hilbert 2014). Laut Hilbert (2014) ist der technologische Fortschritt von Hard- und Software insgesamt ca. 2- bis 6-mal relevanter für die jährlichen Wachstumsraten von Speicher- und Übertragungskapazität, wie die Technologiediffusion, also die weitere Verbreitung von Speicher- und Übertragungskomponenten. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Speicher- und Übertragungskapazität deutlich stärker wächst, als der dafür erforderliche Rohstoffbedarf.

Cisco (2017) stellt historische Daten zum Traffic, also zu den tatsächlich übertragenen Datenmengen, zur Verfügung, s. Abb. 1.11. Diese Werte resultieren ebenfalls aus der Überlagerung von Technologiediffusion, also der weiteren Verbreitung der Komponenten, und dem technologischen Fortschritt, also den erweiterten Möglichkeiten pro Komponente durch Hardware- und Software-Innovationen. Es ergibt sich bspw. für die via fest installiertem Internet übertragenen Daten für die

20 Jahre zwischen 1997 und 2017 eine CAGR von 67 %. Dies ähnelt aktuellen Wachstumsraten beim mobilen Traffic (z. B. 2012 – 2017: 68 % CAGR). Aus Abb. 1.11 wird allerdings auch deutlich, dass die jährlichen Wachstumsraten kleiner werden, so dass sich ein s-kurvenförmiger Verlauf ergibt. Dies ist zu erwarten, da die übertragenen Datenmengen an sich eine sehr kurze Lebensdauer (nahe 0) haben (s. Abb. 1.13 im Kapitel 1.5). Ein ähnlicher Verlauf der Wachstumsraten ist für die benötigten Energiemengen zu erwarten, allerdings deutlich gedämpft, weil diese durch die von Hard- und Softwareinnovationen ermöglichte Effizienz- bzw. Leistungssteigerung mit geringeren Wachstumsraten wachsen. Diese Dämpfung betrifft auch den Rohstoffbedarf für die entsprechenden Komponenten. Dabei ist jedoch zusätzlich zu beachten, dass diese Komponenten eine lange Lebensdauer haben (Belkhir & Elmeligi 2018), so dass der zeitliche Kurvenverlauf eher der 1. Ableitung einer gestauchten Kurve analog zu Abb. 1.12 entsprechen sollte, siehe auch Abb. 1.13 in Kapitel 1.5.

Es folgt also: Die Entwicklung des Rohstoffbedarfs ist gegenüber der Entwicklung der übertragenen Datenmengen deutlich gedämpft, zum einen durch Effizienzfortschritte, zum anderen durch die Tatsache, dass Daten permanent übertragen werden, während Infrastrukturkomponenten nur mit größeren zeitlichen Abständen erneuert werden.

Deutlich wird dieser Unterschied auch, wenn man zum Vergleich das Wachstum der jährlichen globalen Investitionen in Rechenzentren heranzieht. Hier findet man je nach Quelle für den Zeitraum zwischen 2010 und 2014 eine CAGR von 15 % (DatacenterDynamics 2015) bzw. für den Zeitraum zwischen 2012 und 2019 eine CAGR von 6 % (Gartner 2020).

In Prognosen für die nahe Zukunft (bis ca. 2025) findet man ähnlich beeindruckende Wachstumsraten für die Datenübertragung oder auch Datenerzeugung (Reinsel et al. 2018; Cisco 2019), wie in den historischen Daten. So prognostizierte Cisco (2018) ein Wachstum des Rechenzentrentraffics von 2016 bis 2021 von 6 ZB auf 19,5 ZB, wobei Daten von Unternehmen und Konsumenten berücksichtigt sind (CAGR 27 %). Ausschlaggebend für den Infrastrukturausbau ist der Busy-Hour-Traffic, dieser steigt um einen Faktor von 4,6 (Cisco 2019). Die in Rechenzentren gespeicherte Daten wachsen im selben Zeitraum mit einer CAGR von 36 % auf 1,3 ZB in 2021. Der Anteil von Big Data an diesen Daten steigt von 18 % auf 30 %. 5,9 ZB werden laut Cisco (2018) in 2021 auf Endgeräten gespeichert. In Abb. 1.11 ist zu erkennen, dass die aktuellen Prognosen eine Fortsetzung des Wachstums mit kontinuierlich kleiner werdenden Wachstumsraten bedeuten. Es folgt: Für die Zukunft erscheinen aus dem historischen Verlauf weiterhin hohe, aber kontinuierlich abnehmende Wachstumsraten für die übertragenen und gespeicherten Datenmengen wahrscheinlich.

Parallel wird das Marktwachstum von Rechenzentren mit geringeren Wachstumsraten prognostiziert. Technavio (2019) erwartet für den globalen Rechenzentren-Markt zwischen 2019 und 2023 eine CAGR von 17 %. Market Research Future (2021) nimmt zwischen 2017 bis 2023 ein Wachstum mit CAGR 11 % an. Dies bestätigt der oben bereits beschriebene Effekt: Durch technologische Effizienzsteigerungen ist ein geringeres Wachstum für Infrastrukturkomponenten als für Datenmengen zu erwarten.

Noch deutlicher wird dies bei Szenarien zu den Infrastrukturkomponenten selbst. Berwald et al. (2015) nehmen an, dass sich die Anzahl der Server in Europa von 9,3 Mio. in 2014 auf 12,8 Mio. in 2030 erhöhen wird, wobei die Rechenleistung der Server freilich nicht vergleichbar ist.

Aktuelle und zukünftige Treiber des Ausbaus der digitalen Infrastruktur

Um die Entwicklung von Datenmengen und zugrundeliegenden Infrastrukturkomponenten besser zu verstehen, lohnt sich ein Blick auf die historischen, aktuellen und zukünftigen Treiber von Technologiediffusion und technologischem Fortschritt auf globaler Ebene. Diese kann man grundsätzlich unterscheiden in (A) den prinzipiellen Zugang zur digitalen Infrastruktur und (B) die Nutzungsintensität. Die Rollen von prinzipiellem Zugang und Nutzungsintensität für die Entwicklung der übertragenen und gespeicherten Daten lassen sich besser verstehen, wenn in verschiedene Ländern in Abhängigkeit von deren Einkommenslevel differenziert wird. In Analogie zu Hilbert (2015; 2019) sowie Dutta & Lanvin (2019) wird zur Differenzierung die Weltbank-Unterteilung in Länder mit (1) hohem, (2) höherem mittleren, (3) niedrigerem mittleren und (4) niedrigem Einkommenslevel verwendet.

Die Teilhabe an der globalen, digitalen Infrastruktur korreliert stark mit dem Einkommenslevel der jeweiligen Länder. Hilbert (2015; 2019) nennt dies den Digital Divide und nutzt als Indikator das Verhältnis der Anteile der Länder mit hohem Einkommenslevel zum Rest der Welt. Für den prinzipiellen Zugang zur Infrastruktur ist dieses Verhältnis seit langer Zeit konstant abnehmend, so dass von einer globalen Breitendiffusion gesprochen werden kann. Da schon vergleichsweise viele Menschen einen Zugang haben, flacht dieses Wachstum allmählich ab. Es ist getrieben von der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung und nicht von technologischer Innovation. So hatten 2018 51 % der Weltbevölkerung Zugang zum Internet, 2023 werden es laut Cisco (2019) 66 % der Weltbevölkerung sein, was einer CAGR von 6 % entspricht. Der Anteil der Menschen, die über ein Handy verfügen, soll von 66 % der Weltbevölkerung in 2018 auf 71 % in 2023 wachsen (CAGR 2 %, (Cisco 2019)). In Ländern mit geringem Einkommenslevel haben mehr Menschen ein Handy als einen festen Internetzugang, so dass Smartphones eine dominante Rolle beim primären Internetzugang spielen.

Bezüglich der verfügbaren Bandbreite nahm das Verhältnis der Anteile in Ländern mit hohem Einkommen zum Rest der Welt („Digital Divide“) bis zum Jahr 2000 ebenfalls ab, was mit der globalen Diffusion von 2G und Schmalbandübertragung zu begründen ist. In den Jahren zwischen 2001 und 2008 stieg der Digital Divide durch die Einführung der Breitbandtechnologie (sowohl fest installiert als auch mobil) in Ländern mit hohem Einkommenslevel. Seit 2008 kann man durch die globale Diffusion der Breitbandtechnologie wieder ein Abnehmen des Digital Divide beobachten. Eine ähnlich versetzte Entwicklung ist auch für zukünftige Infrastrukturinnovationen wahrscheinlich. 2007 hatten Länder mit hohem Einkommenslevel 18-mal mehr Bandbreite pro Kopf, 2017 waren es noch 2,6-mal mehr.

Laut Dutta & Lanvin (2019) haben Länder mit hohem Einkommenslevel auch zukünftig bessere Voraussetzungen, von der digitalen Transformation zu profitieren. Sie haben nicht nur in der Vergangenheit stärker in IKT investiert, sondern werden dies auch in naher Zukunft tun. Zudem haben sie bessere Möglichkeiten, Zukunftstechnologien zu identifizieren und in sie zu investieren. Daher zeichnet sich laut Dutta & Lanvin (2019) ein genereller Trend ab: Je geringer das Einkommenslevel eines Landes, desto geringer sein Network Readiness Index. Hinzu kommt, dass Länder mit hohem Einkommenslevel einen höheren Anreiz haben, in Automatisierung etc. zu investieren, weil sie höhere Arbeitskosten haben (Rao & Verweij 2017; Bughin et al. 2018). In Ländern mit geringerem Einkommenslevel werden KI-Technologien daher sehr viel weniger bzw. langsamer übernommen. Andererseits werden große Potenziale zum Leap Frogging gesehen (Rao & Verweij 2017): Länder mit heute geringem Einkommenslevel können dabei in ihrer wirtschaftlichen Entwicklung bestimmte Phasen überspringen, die Länder mit heute hohem Einkommenslevel durchlaufen haben. Beispielsweise kann das erste Handy bereits ein Smartphone sein, oder anstelle von papierdominierten Fernunis etabliert sich das E-Learning direkt.

Neben dem Einkommenslevel haben aber auch politische Maßnahmen starken Einfluss auf die Möglichkeiten zur digitalen Teilhabe in verschiedenen Ländern (Hilbert 2015). So haben Anfang 2000 Japan und Südkorea massiv in den Ausbau der Glasfaserinfrastruktur investiert. Seit 2010 ist die Bandweite auch in China und Russland stark gestiegen (Hilbert 2015). China hat eine starke KI-Strategie und bereits heute die zweitmeisten KI-Patente nach den USA (Bughin et al. 2018). Rao & Verweij (2017) erwarten, dass die USA im Bereich KI in naher Zukunft noch dominieren werden, dann aber von China überholt werden. Weiterhin wird erwartet, dass China weltweit den größten Nutzen aus KI-Technologien ziehen kann, da sich aus der starken Produktionsausrichtung der Wirtschaft besonders viele Potenziale durch Automation und Digitalisierung ergeben.

Ein Fortsetzen der aktuell bestehenden Unterschiede zwischen verschiedenen Ländern wird in SSP2 abgebildet, wohingegen SSP1 und SSP5 von einer stärkeren Angleichung bzw. einem starken Aufholen der Länder mit geringerem Einkommenslevel ausgehen.

2017 hatten Länder mit hohem Einkommen 25 % der Zugänge, aber 43 % der Bandbreite (Hilbert 2019), wobei sie 15 % der Weltbevölkerung stellen. Neue technologische Anwendungen, die in der Regel datenintensiv sind, stellen den wesentlichen Wachstumstreiber der Datenmengen in Ländern mit hohem Einkommen dar (Cisco 2018;

Cisco 2019). Zwar sind die Wachstumsraten ähnlich in allen Weltregionen (ca. 30 % bis 2023, (Cisco 2016)), allerdings wirkt sich das innovationsgetriebene Datenwachstum in Ländern mit hohem Einkommenslevel stärker auf das globale Datenwachstum aus, weil das Wachstum hier zwar mit ähnlicher CAGR, aber von einem wesentlich höheren Grundniveau aus stattfindet. Die wichtigsten Entwicklungen in Ländern mit hohem Einkommenslevel werden im Folgenden erläutert.

Cloud-Computing

Cloud-Computing beschreibt die zentrale Bereitstellung von Speicherplatz, Rechenleistung oder Anwendungssoftware auf Servern, die mittels digitaler Übertragungsinfrastruktur auf Endgeräten verfügbar wird. Diese Kapazitäten müssen somit nicht mehr auf einzelnen Endgeräten verfügbar sein, zudem ist ein Zugriff von verschiedenen Endgeräten möglich.

Cloud-Computing wird aktuell als Hauptreiber für steigenden Datentraffic und zunehmende Datenspeicherung in Rechenzentren betrachtet (Cisco 2018). Die lokale Datenspeicherung verliert demgegenüber immer mehr an Bedeutung (Reinsel et al. 2018). Verursacht ist dies wiederum durch gesteigerte Möglichkeiten dank verbesserter Übertragungstechnologien, aktuell z. B. 5G, sowie neuer Architekturen wie Multicloud und hybride Cloud, die die Nutzung insbesondere für Unternehmen attraktiver machen (Technavio 2019). Bereits 2014 waren 20 – 40 % aller Daten laut Hilbert (2015) in der Cloud gespeichert. Zu den aktuellen Trends zählt auch eine Dezentralisierung der Cloudspeicherung, einerseits durch semizentrale Speichersysteme (Edge Computing), andererseits durch steigende Anteile von Cloudservices außerhalb der USA, die eine stärkere Verteilung der Rechenzentren auf verschiedene Weltregionen bewirkt. Beides verbessert Latenzzeiten, Kontrollmöglichkeiten und macht den Datentransport effizienter. Weitere Effizienzsteigerungen werden vom vermehrten Einsatz von HyperScale-Rechenzentren erwartet. Diese Effizienzsteigerungen ermöglichen wiederum eine stärkere Gesamtnachfrage durch Preissenkungen und die Ermöglichung neuer Anwendungen, so dass insgesamt von steigendem Traffic und steigender Speicherung ausgegangen wird.

Laut Cisco (2018) betrug der Anteil von Cloudanwendungen am Gesamttraffic 88 % im Jahr 2016; für 2021 wird ein Anstieg dieses Anteils auf 95 % prognostiziert. Auch hier gilt wieder zu unterscheiden: die gespeicherten Daten sind ein Bestand, zu dem jährlich etwas dazu kommt, während es beim Traffic keinen Bestand, sondern nur das jährliche Aufkommen gibt. Streaming, Gaming und Social Media stellen die Hauptanteile des von Konsumenten verursachten Cloudtraffics, und diese Anteile nehmen weiter zu (Cisco 2018).

Internet der Dinge (IoT)

Technische Details und Entwicklungen zum IoT können im Kapitel 3.2.8 nachgelesen werden. Vom IoT werden hohe Wachstumsimpulse auf Datenmengen erwartet, da viele Anwendungen Videofunktionen beinhalten, sowie eine hohe Auflösung und geringe Latenz benötigen (z. B. autonomes Fahren). Zwar ist die Menge der erzeugten Daten um zwei Größenordnungen höher als die Menge der gespeicherten Daten (Cisco 2018). Dennoch wird erwartet, dass von IoT-Anwendungen große Impulse auf die Cloud-Speicherung ausgehen (Reinsel et al. 2018).

Videoanwendungen

Insgesamt werden von Videoanwendungen die stärksten Wachstumsimpulse auf Datenspeicherung und Datenübertragung erwartet. In China wird laut Reinsel et al. (2018) die Videoüberwachung eine zentrale Rolle bei den Videoanwendungen einnehmen. In Ländern mit hohem Einkommenslevel wird das stärkste Wachstum hingegen in der Unterhaltungsbranche durch Streaming, Gaming und Social Media erwartet. So geht Cisco (2019) von einer zunehmenden Verbreitung von internetfähigen TV-Geräten aus, deren Auflösung zudem kontinuierlich gesteigert wird: 66 % der in 2023 neu angeschafften TV-Geräte sollen demnach UHD-fähig sein (CAGR 30 %), wobei UHD („Ultra High Definition“ bzw. ultrahochauflösende Videos) bzw. 4K der doppelten Auflösung von HD („High Definition“ bzw. hochauflösende Videos) entspricht, welches wiederum die 9-fache Auflösung von SD („Standard Definition“ bzw. normal auflösende Videos) darstellt. Über 2023 hinaus wird sich dieser Trend laut Cisco (2019) mit 8K und Wall-TV fortsetzen. Wie eingangs beschrie-

ben erfordern neue Anwendungen bessere Übertragungsraten und mehr Speicher bzw. schnellere Übertragungsraten, und bessere Speichermöglichkeiten ermöglichen neue Anwendungen. Dieses Wechselspiel kann sich theoretisch beliebig fortsetzen, eine Sättigung scheint nicht absehbar. Denkbar wäre ein Abschwächen des Trends, wenn sich zukünftig in anderen Konsumbereichen interessantere Entwicklungen ergeben. So gab es im Bereich Robotik schon Anwendungen, für die geringes Kaufinteresse bestand (Stone et al. 2016). Ein Abschwächen des Wachstumstrends kann aber auch durch eine Beschränkung auf ein Kosumniveau innerhalb nachhaltiger Grenzen erfolgen. Letzteres kann im zum SSP1 gehörigen Szenario abgebildet werden, während der uneingeschränkte Konsum in SSP5 abgebildet werden kann.

Mobile Daten

Der Trend beim mobilen Datentransfer gleicht prinzipiell der Entwicklung der Datenübertragung über fest installierte Internetanschlüsse (s. Abb. 1.11). Da diese technologische Entwicklung später begonnen hat, sind die Wachstumsraten aktuell noch höher. Auch hier sind Videoanwendungen der wesentliche Treiber für den Datenverkehr, 2017 machten sie bereits 59 % der mobilen Datenübertragung aus. Der mobile Datentransfer ist im Vergleich zur Übertragung durch fest installiertes Internet wesentlich energieintensiver. Mobil vernetzte IoT-Geräte (z. B. GPS im Auto, mobile Überwachung von Gütern in Produktion und Transport, Patientenüberwachung) sollen laut Cisco (2019) zwischen 2018 und 2023 mit einer CAGR von 30 % wachsen. Smartphones nehmen allerdings nur mit einer CAGR von 8 % zu, andere Handys nehmen global sogar ab, so dass sich insgesamt eine CAGR von 8 % für mobil vernetzte Geräte ergibt (Cisco 2019). Seit 2014 hat die Diffusion von Smartphones auch für insgesamt zunehmende Bandbreiten in Ländern mit höherem mittleren Einkommen in Asien gesorgt.

Bei den Übertragungsgeschwindigkeiten als Enabler für neue Entwicklungen bei Streaming, Gaming und Social Media prognostiziert (Cisco 2019) folgende Anstiege zwischen 2018 und 2023:

- Breitband 46 Mbps → 110 Mbps,
- Mobile Daten 13 Mbps → 44 Mbps,
- WiFi 20 Mbps → 92 Mbps.

Als neues Netzwerksystem könnten sich in Ländern mit hohem Einkommenslevel Low-Power-Wide-Area-Netzwerke (LPWA) für IoT-Anwendungen mit geringen Anforderungen an die Bandbreite, aber großen Anforderungen an die geographische Abdeckung etablieren (z. B. zur Haustierüberwachung).

Künstliche Intelligenz

Der Begriff Künstliche Intelligenz (KI) wird von verschiedenen Akteuren unterschiedlich genutzt. In Rao & Verweij (2017) findet sich eine gute Beschreibung verschiedener Aspekte. Unter KI werden hier Computersysteme verstanden, die ihre Umgebung wahrnehmen können, und entsprechend dieser Wahrnehmungen und ihrer einprogrammierten Ziele lernen, Entscheidungen treffen und Handlungen ausführen können. Somit fällt auch die Sensorik, z. B. das Aufnehmen von Videos, unter den Begriff KI. Innerhalb dieser Systeme wird zum einen unterschieden, ob diese menschliche Handlungen oder Entscheidungen unterstützen oder vollkommen autonom agieren. Eine zweite Unterscheidung wird dahingehend getroffen, ob die Systeme konstant lernen und sich anpassen, oder ob sie in ihren Reaktionen festgelegt sind. Somit fällt auch die mittlerweile weit verbreitete Automation von Routineaufgaben unter die Künstliche Intelligenz. Besonderes Zukunftspotenzial wird aber den Möglichkeiten des maschinellen Lernens basierend auf neuronalen Netzwerken zugeschrieben. Darunter fallen u. a. die Mustererkennung und das Reinforcement Learning. Das Erkennen von Mustern in großen Datenmengen findet beispielsweise Anwendung in der Spracherkennung und -verarbeitung (Natural Language Processing), beim Erkennen von Auffälligkeiten in medizinischen Bildaufnahmen oder bei der Verkehrsflussplanung in Städten. Von Reinforcement Learning spricht man, wenn ein Computersystem basierend auf Grundeinstellungen durch Versuch und Irrtum Fähigkeiten erarbeitet. Damit können Maschinen lernen, innerhalb fest definierten Grenzen die richtigen Entscheidungen zu treffen oder bei Entscheidungen zu unterstützen. Vielleicht prominentestes Beispiel ist AlphaGoZero, welches mittels Ver-

such-und-Irrtum-Lernens zum weltweit besten Schachspielsystem geworden ist. Welche praxisrelevanten Anwendungen es über Gaming-Clients hinaus für das Reinforcement Learning gibt, ist aber noch zu ermitteln, denkbar wären beispielsweise bestimmte Prozessoptimierungen (World Economic Forum 2018). Somit sind die Erfolge der Künstlichen Intelligenz zum Teil beeindruckend, aber die Möglichkeiten eines KI-Systems auch jeweils auf sehr spezifische Anwendungen begrenzt (Stone et al. 2016). Ein Transfer des Erlernten auf eine leicht abweichende Aufgabenstellung ist bisher nicht möglich (World Economic Forum 2018). Für Stone et al. (2016) fallen auch Crowdsourcing-Projekte wie Wikipedia unter den Begriff KI. Dies zeigt, wie schwer es mitunter ist, den Begriff abzugrenzen. Laut World Economic Forum (2018) ist KI der allgegenwärtigste, fundamentalste Digitalisierungstrend und somit der Trend, der die weitreichendsten Auswirkungen haben wird.

Die Entwicklungen im Bereich Künstliche Intelligenz stehen noch am Anfang und werden mittel- bis langfristig immer größere Potenziale entfalten (Stone et al. 2016; Rao & Verweij 2017; Bughin et al. 2018). Rao & Verweij (2017) schätzen, dass KI-Anwendungen bis zum Jahr 2030 das weltweite BIP um 14 % wachsen lassen. Davon fallen ca. 40 % auf Produktivitätssteigerungen, die in der nahen Zukunft im Vordergrund stehen werden, und ca. 60 % auf neue Konsumimpulse, die in der ferneren Zukunft an Bedeutung gewinnen. Die neuen Konsumimpulse sind auf personalisierte und optimierte Produkte zurückzuführen, Zeitersparnisse durch die vermehrte Automatisierung etc. spielen laut Rao & Verweij (2017) eine untergeordnete Rolle. „Intelligentere“ Produkte können wiederum mehr oder andere Daten sammeln, die wiederum zur Entwicklung neuer Produkte führen, so dass sich die Entwicklung selbst verstärkt. Bughin et al. (2018) erwartet sogar eine Netto-Steigerung des weltweiten BIP um 16 % bis 2030, wobei beispielsweise schon Transaktionskosten abgezogen sind, der pure Zuwachs wird auf 26 % geschätzt. Dabei wird angenommen, dass ca. 70 % der Unternehmen bis 2030 zumindest eine KI-Anwendung umgesetzt haben, während weniger als 50 % der Unternehmen ihre vollen KI-Möglichkeiten ausschöpfen. 7 % BIP-Wachstum werden allein von innovativen Produkten erwartet. Diese Szenarien sind natürlich mit großen Unsicherheiten behaftet, insbesondere könnte die Diffusion der KI-Technologien auch langsamer voranschreiten (Rao & Verweij 2017). Dennoch wird generell angenommen, dass KI-Technologien in den nächsten Jahrzehnten ihr volles Potenzial entfalten (Herweijer et al. 2020).

Als Gründe, warum die Zeit für eine breite Marktdiffusion der KI-Technologien in den Massenmarkt gerade jetzt bzw. in der nahen bis weiteren Zukunft gegeben ist, werden folgende Punkte genannt (Stone et al. 2016; Bughin et al. 2018; World Economic Forum 2018):

- Zunahme an Daten, dazu zählen strukturierte Daten (Tabellen und Datenbanken) ebenso wie unstrukturierte Daten (Text, Bilder, Video, Audio), z. B. GPS-Daten und Sensordaten von Handys und Fahrzeugen,
- Bearbeitung dieser großen Datenmengen wird möglich, u. a. durch Cloud-Computing, neue Hardwaresysteme, z. B. GPU (Global Processing Unit) statt CPU (Central Processing Unit), SiM (System in Module) und SiC (System on Chip) ermöglichen komplexere Systeme in mobilen Anwendungen,
- Neue Algorithmen → maschinelles Lernen,
- Bessere globale Vernetzung → schnellerer Wissenstransfer, Crowdsourcing, Open Source,
- Wettbewerbsdruck.

Für die weitere Entwicklung bis 2040 werden als Hardwareinnovation v. a. neuromorphe Systeme relevant sein; ab 2040 können auch Quantencomputer (s. Kapitel 3.2.2) eine Rolle spielen (World Economic Forum 2018).

Bis 2030 wird die Entwicklung der Künstlichen Intelligenz weiterhin auf spezifische Anwendungen beschränkt sein und die Fortschritte werden sich je nach Wirtschaftssegment und Anwendung stark unterscheiden (Stone et al. 2016; Rao & Verweij 2017):

- Gesundheitsbereich: Diagnoseunterstützung durch Mustererkennung, insbesondere bei bildgebenden Verfahren, Patientenmonitoring und -coaching,
- Mobilität: autonomes Fahren und Wartung, Verkehrsplanung,
- Finanzwesen: Automatisierung von Prozessen, Sicherheit von Transaktionen, personalisierte Finanzberatung,

- Einzelhandel: personalisierte Produkte, Bedarfsvorhersagen, Bestandsmanagement,
- Unterhaltung und Kommunikation: personalisierte Werbung, automatisierte Mediengenerierung, Virtual Reality,
- Produktion: On-demand, Optimierung, Maintainance,
- Landwirtschaft: Precision Farming,
- Energie: Smart Metering, Netzoptimierung, predictive maintainance,
- Logistik: autonomes Fahren, Verkehrssteuerung,
- Robotik: Lieferung, Reinigung,
- Bildung: Personalisierte Angebote für die breite Masse (gesteigerte Effizienz und Effektivität, reduzierte Kosten, neue Möglichkeiten für Länder mit geringem Einkommenlevel),
- Sicherheit: visuelle Überwachung (insbesondere in China (Reinsel et al. 2018), USA (Stone et al. 2016)).

Im Allgemeinen wird die Entwicklung in Bereichen mit großem Hardwareanteil (z. B. Robotik) langsamer vorangehen als in anderen Bereichen, da sich Hardware nicht so schnell und preiswert entwickeln und skalieren lässt wie Software (Stone et al. 2016). Außerdem ist es auch schwieriger, eine geeignete und sichere Lernumgebung für Roboter zu schaffen. Beispielsweise kam der erste Staubsaugroboter 2001 auf den Markt; das Produkt hat sich aber bis heute nicht in voller Breite durchgesetzt. Somit erscheint es plausibel, dass die neuesten Trends heute in 2040 signifikante Marktanteile erobern können und für die Rohstoffnachfrage relevant werden. Weiterhin können Regulationen und fehlendes Vertrauen in der Bevölkerung die Entwicklungen bremsen.

Neben der spezifischen Weiterentwicklung für konkrete Anwendungen ist eine inkrementelle, kontinuierliche Weiterentwicklung typisch für die KI, es ist also bis 2040 weder mit radikalen Sprunginnovationen noch mit der Entstehung einer Superintelligenz zu rechnen (Stone et al. 2016).

Insgesamt sind somit weitreichende und langfristige (über 2040 hinausgehende) Auswirkungen der KI-Technologien zu erwarten. Verschiedene Diffusionsgeschwindigkeiten können innerhalb der Szenarien durch eine langsamere Entwicklung (SSP2) und eine sehr schnelle Entwicklung (SSP1 und 5) abgedeckt werden.

Digitalisierung zur Erreichung der Sustainable Development Goals (SDGs)

Soll die digitale Transformation zum Erreichen der Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen beitragen, muss sie durch eine geeignete Governance unter Beteiligung von Politikern, Technologieentwicklern, Investoren, Wissenschaftlern und der Zivilgesellschaft in die richtige Richtung gelenkt werden (World Economic Forum 2018; Dutta & Lanvin 2019; WBGU 2019). Andernfalls droht sie zum Verfehlen der Ziele beizutragen (TWI2050 2018; WBGU 2019). Die SDGs decken u. a. die Bereiche Bildung, Gesundheit, wirtschaftliche Entwicklung und Umweltschutz ab. Es wird allgemein angenommen, dass der Wohlstand durch digitale Technologien steigt, allerdings nicht unbedingt gleich verteilt wird, wobei insbesondere der Verlust von Arbeitsplätzen durch Automatisierung und Digitalisierung thematisiert wird, was die Themen gerechte Wohlstandsverteilung bis hin zu bedingungslosem Grundeinkommen auf die Tagesordnung holt (Stone et al. 2016; Rao & Verweij 2017; Bughin et al. 2018). Auch der Abbau von Unterschieden in der digitalen Teilhabe zwischen verschiedenen Ländern stellt eine wesentliche Herausforderung dar (s. o.).

Ein Fortsetzen historischer Trends, also gleichbleibende Unterschiede zwischen verschiedenen Ländern wird im Szenario SSP2 angenommen. SSP1 und SSP5 gehen dagegen von einem verstärkten Aufholen der Länder mit geringem Einkommensniveau aus, so dass hier auch angenommen wird, dass die Digitalisierung global zu raschen Verbesserungen im Bereich Gesundheit, Bildung und existenzsichernder Wohlstand beiträgt.

In allgemeinen Szenarien und Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Digitalisierung wird Umweltschutz in der Regel nicht erwähnt (Stone et al. 2016; Bughin et al. 2018). Am ehesten werden noch Energieeinsparpotenziale durch Effizienzgewinne aufgeführt, allerdings eher am Rande. Studien, die sich speziell den Umweltschutzpotenzialen der Digitalisierung widmen stellen ebenfalls diese Einsparpotenziale in den Vordergrund (World Economic Forum 2018; Herweijer et al. 2020), wobei diese in Relation zu daraus resultierender stärkerer Nachfrage und auch den Energie- und Ressourcenbedarfen der Digitalisierung selbst zu sehen sind (Köhler et

al. 2018). Tatsächlich haben die enormen Effizienzsteigerungen der Vergangenheit stets zu Leistungssteigerungen und höheren Nachfragen geführt, woraus sich insgesamt steigende Energie- und Ressourcenverbräuche ergaben (Gossart 2015). Das Potenzial von KI-Anwendungen für den Umweltschutz wird von Herweijer et al. (2020) bis zum Jahr 2030 auf 1,5–4 % Treibhausgaseinsparungen sowie 3,1–4 % BIP-Steigerung geschätzt. Der Vergleich mit der Schätzung zur allgemeinen BIP-Steigerung durch KI derselben Institution von 14 % (Rao & Verweij 2017) verdeutlicht die untergeordnete Bedeutung von Umweltanwendungen. Anwendungsperspektiven werden am stärksten in Europa erwartet (Herweijer et al. 2020). Über die direkten Einsparpotenziale hinaus werden Umweltschutzpotenziale oft in einem verbesserten Monitoring gesehen, z. B. World Economic Forum (2018). Dabei gilt zu bedenken, dass es an vielen Stellen im Umweltschutz nicht an Problemkenntnis, sondern an Maßnahmen mangelt.

In SSP1 wird zunächst angenommen, dass die technische Entwicklung in etwa so schnell wie in SSP5 verläuft, also deutlich schneller als in SSP2. In SSP1 ist der Fokus stärker auf Umweltschutzanwendungen ausgerichtet, wodurch sich die Datenmengen insgesamt nicht zwischen SSP2 und SSP5 unterscheiden. Zusätzlich wird für SSP1 angenommen, dass auf Anwendungen verzichtet wird, die einen großen Ressourcen- und Energieverbrauch haben, aber nur einen geringen Mehrwert bzw. einen geringen Beitrag zum Erreichen der SDGs mit sich bringen. Dazu zählen beispielsweise Streaming und Gaming in immer höheren Auflösungen, die wesentlich zu den insgesamt transportierten und gespeicherten Daten beitragen. Es wird hier also ein alternativer Entwicklungspfad aufgezeigt, bei dem zukünftige Effizienzsteigerungen tatsächlich Einsparungen im Sinne geringerer Zuwachsraten bewirken, anstatt durch Leistungssteigerungen und erhöhte Nachfrage weiterhin konstantes Wachstum zu bewirken. Somit wird in SSP1 von einem geringeren Wachstum der Datenübertragung und Datenspeicherung, als in SSP2 und SSP5 ausgegangen.

Szenarien über 2030 hinaus

Die IEA (2019) beschreibt, dass bis 2040 mit einem steigenden Elektrizitätsbedarf für digitale Technologien zu rechnen ist, der in Ländern mit hohem Einkommensniveau in etwa dem entspricht, was durch Effizienzmaßnahmen in allen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereichen eingespart werden kann. Gewissermaßen kann man das als makroökonomischen Reboundeffekt interpretieren: Die Einsparungen durch Effizienzmaßnahmen werden in neue Anwendungen reinvestiert. Gleichzeitig werden von der IEA (2019) die Digitalisierungstechnologien stark als Enabler für Effizienzmaßnahmen und Optimierung betrachtet.

1.4.3 Szenarien zur Entwicklung von Digitalisierung und Datenmengen in SSP1, 2 und 5

Tab. 1.9 veranschaulicht einige Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Digitalisierung innerhalb der drei Rahmenszenarien SSP1, 2 und 5 (s. Kap. 1.1) .

SSP2

In SSP2 folgt die generelle weitere Entwicklung historischer Muster, was daher in diesem Szenario auch für die Digitalisierung angenommen wird. Auch weiterhin führen Effizienzsteigerungen digitaler Technologien dank Kostenreduktionen zu steigender Nachfrage und erhöhter Leistungsfähigkeit bzw. neuen Digitalisierungstrends, woraus sich insgesamt eine weitere Steigerung bei der Datenspeicherung, übertragung und -verarbeitung ergibt. Abb. 1.11 veranschaulicht die Fortsetzung der historischen Entwicklung für die Datenübertragung: Die Wachstumsraten nehmen weiter kontinuierlich ab, bleiben aber insgesamt auf einem sehr hohen Niveau. Der „Digital Divide“ verkleinert sich graduell, bleibt aber bestehen: Länder mit niedrigem Einkommenslevel holen entsprechend der historischen Muster nur langsam auf.

SSP5

Dank internationaler Kooperation kommt es in SSP5 zu einer schnellen Angleichung der digitalen Anschlussfähigkeit in Ländern mit geringem Einkommenslevel, was auch zu einer schnelleren Verbesserung der ökonomischen Verhältnisse beiträgt. Auch in den Bereichen Gesundheit

Tab. 1.9: Annahmen zur Entwicklung digitaler Technologien

	SSP1	SSP2	SSP5
Technologischer Fortschritt (Technologiegenerationen und -sprünge)	sehr hoch (Fokus Nachhaltigkeit)	mittel	sehr hoch
Internationale Vernetzung	sehr hoch	mittel	sehr hoch
Nutzung digitaler Technologien	mittel-hoch: orientiert an Nachhaltigkeitszielen	ungleichmäßig verteilt, abhängig vom Einkommenswachstum	sehr hoch: alles, was möglich ist
Datenmengen	mittel-hoch	mittel, unterschiedlich in verschiedenen Ländern	sehr hoch
Nachfrageentwicklung digitaler Produkte/Technologien	mittel-hoch	mittel	sehr hoch
Digitalisierungsgrad industrieller Sektoren	hoch	mittel	sehr hoch
Materialeffizienzsteigerung	sehr hoch	mittel	hoch (rentable Potenziale werden ausgeschöpft)
Recycling	sehr hoch	mittel	hoch, wenn rentabel, ansonsten mittel
Ausbau Glasfaser in Ländern mit bisher schwacher digitaler Infrastruktur	sehr hoch	mittel	sehr hoch
Ausbau Glasfaser in Ländern mit bereits starker digitaler Infrastruktur	gering	gering-mittel	mittel-hoch

und Bildung ermöglichen digitale Technologien rasche Fortschritte, u. a. durch Leap Frogging. Insgesamt nimmt die technologische Entwicklung noch an Geschwindigkeit zu. Auch in Ländern mit hohem Einkommenslevel steigt der digitale Konsum ungebremst, während der Rest der Welt diese Konsummuster entsprechend seiner Möglichkeiten übernimmt. Abb. 1.11 zeigt, wie dies zu einem gegenüber historischen Mustern (SSP2) beschleunigten bzw. gesteigerten Wachstum der Datenmengen führen könnte.

SSP1

In SSP1 wird ebenfalls ein schnellerer technologischer Fortschritt als in SSP2 angenommen, bedingt v. a. durch gute internationale Kooperation. Im Unterschied zu SSP5 fokussiert die weitere Entwicklung hier jedoch auf Anwendungen im Bereich Gesundheit, Bildung und Umweltschutz, insbesondere die Potenziale zur Energie- und Rohstoffeinsparung durch digitale Technologien werden voll ausgenutzt. Das wirtschaftliche und technische Aufholen der Länder mit niedrigem oder mittlerem Einkommenslevel schreitet aufgrund der guten internationalen Zusammenarbeit schnell voran. Das Konsumlevel in Ländern mit hohem Einkommenslevel steigt dagegen nicht weiter ungebremst. Somit wird ein Abweichen vom historischen Muster angenommen. In der Vergangenheit haben Effizienzsteigerungen digitaler Technologien stets zu höherer Nachfrage und Leistungsfähigkeit, aber nicht zu absoluten Energie- und Rohstoffeinsparungen des Sektors geführt. In SSP1 wird angenommen, dass Effizienzgewinne erstmals auch zu einer Entkopplung des Wirtschaftswachstums von Energie- und Rohstoffbedarfen führen.

Als stärkster Treiber für übertragene und gespeicherte Datenmengen gelten Videoanwendungen (Cisco 2019). Diese umfassen eine Reihe von Anwendungen die für Gesundheit (z. B. Telemedizin, Patientenüberwachung) und Bildung (z. B. Online-Teaching) sowie Umweltschutz (z. B. Precision Farming, Umweltmonitoring, smarte Energieversorgungsnetze) relevant sind. Diese Anwen-

dungen werden in SSP1 stärker als in SSP2 wachsen. Gleichzeitig stellen Streaming, Gaming und Social Media in immer höherer Auflösung und steigendem Konsumlevel den größten Anteil der Datenmengen und werden auch als größte zukünftige Wachstumsfaktoren der Datenmengen gesehen. Das Nachhaltigkeitspotenzial einer steigenden Auflösung und zunehmenden Nutzung dieser Anwendungen wird als gering gegenüber ihren Ressourcenverbräuchen betrachtet, so dass diese Anwendungen in SSP1 weniger stark zunehmen als in SSP2. Daraus ergibt sich insgesamt das geringste Wachstum an Datenmengen in SSP1 (s. Abb. 1.11). Das Wachstum

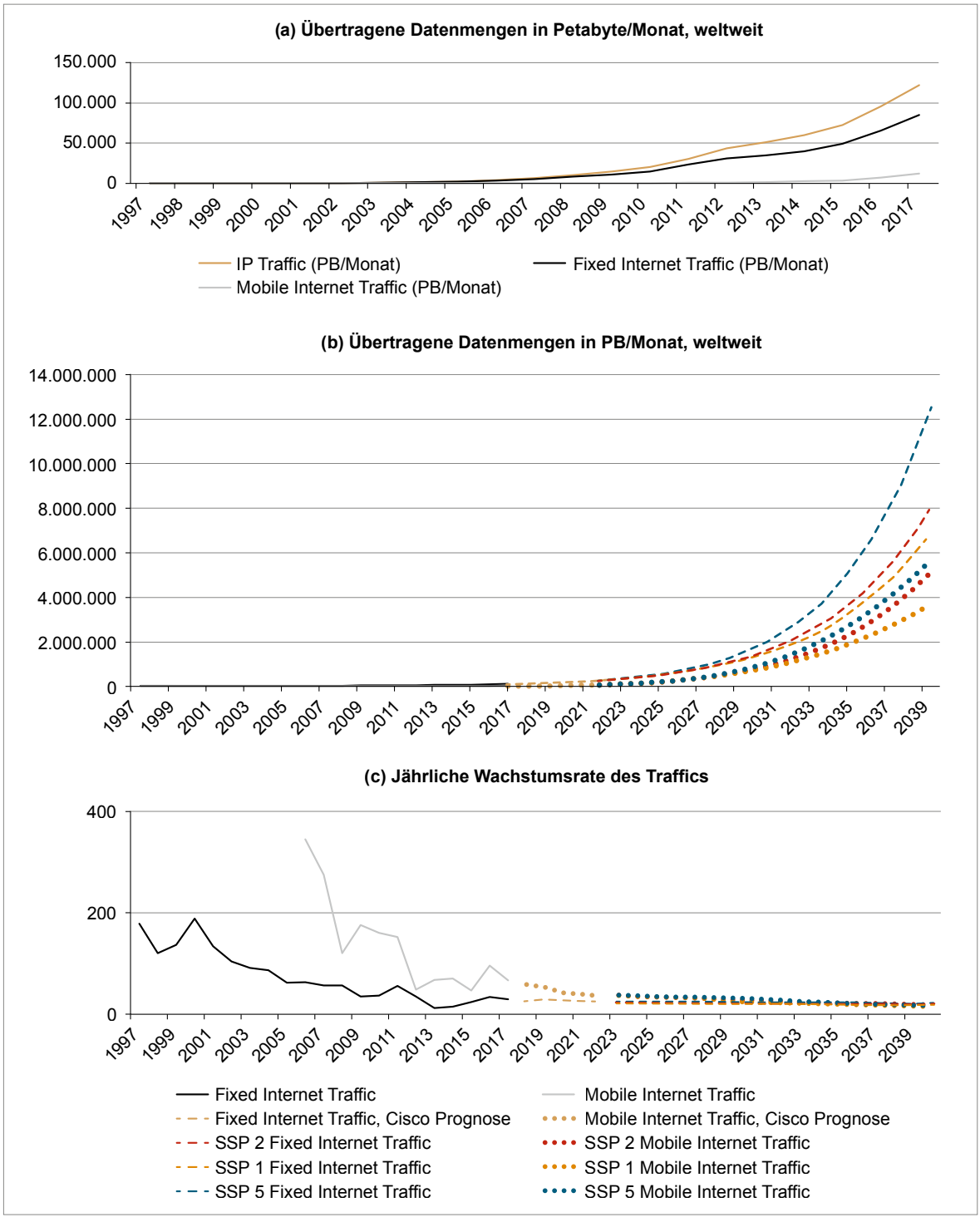


Abb. 1.11: Wachstum der übertragenen Datenmengen (a) historisch; (b), (c) historisch + Szenarien

bei mobilen Daten ist gegenüber fest installiertem Internet zusätzlich schwächer, da mobile Daten eine schlechtere Energiebilanz haben. Nach 2028 schwächt sich das Wachstum in SSP1 noch einmal deutlicher ab, als in den anderen Szenarien, da etwa zu diesem Zeitpunkt die größten Ressourceneffizienzpotenziale ausgeschöpft sind und neue Produkte in den Vordergrund treten (Rao & Verweij 2017).

Andere denkbare Entwicklungen

Eine Abschwächung des Wachstums durch weniger Wirtschaftswachstum und eine schwächere technologische Entwicklung ist ebenfalls denkbar, wird hier aber nicht näher betrachtet, weil in diesem Fall keine ungewöhnlichen Impulse auf die Rohstoffnachfrage zu erwarten sind (ähnlich SSP3 & 4 bei den übergeordneten Szenarien).

Die Szenarien dienen der Veranschaulichung möglicher Entwicklungen und sind keine Prognosen. Das Wachstum der Rohstoffnachfrage kann hiervon nicht direkt abgeleitet werden, da erstens parallel enorme Effizienzsteigerung durch Hardware- und Softwareinnovationen zu erwarten sind und zweitens übertragene Datenmengen jährlich komplett neu anfallen, während die zugrundeliegenden Infrastruktur über längere Zeiträume bestehen bleibt und sich nur durch Zubau, Ersatz oder Erneuerungen ändert.

1.5 Diffusionsszenarien

Die verwendete Schätzmethode für den künftigen Rohstoffbedarf wurde in BMWi (2007) beschrieben. Die Einflüsse der technischen und der wirtschaftlichen Entwicklung werden dabei getrennt betrachtet und anschließend als Faktoren zusammengeführt:

(1) $B = b \cdot A$

- B Rohstoffbedarf einer bestimmten Anwendung in t/a
- b spezifischer Rohstoffbedarf der Anwendung (t/Einheit)
- A Aktivitätsrate (Produktionsmenge) der Anwendung (Einheiten/a)

(2) $\frac{B_{2040}}{B_{2018}} = \frac{b_{2040}}{b_{2018}} \cdot \frac{A_{2040}}{A_{2018}}$

In (2) wird das Verhältnis des Rohstoffbedarfs des Jahres 2040 zum Rohstoffbedarf des Jahres 2018 berechnet. Der Faktor $\frac{b_{2040}}{b_{2018}}$ beschreibt die Änderung des spezifischen Rohstoffbedarfs pro Anwendung durch den technologischen Wandel und der Faktor $\frac{A_{2040}}{A_{2018}}$ den Einfluss der wirtschaftlichen Entwicklung zwischen dem Basisjahr 2018 und dem Zieljahr der Projektion 2040.

Die Anwendungseinheiten können in dieser Studie u. a. km an Glasfaserkabel, Anzahl an Batteriefahrzeugen, kW installierter Leistung von Windkraftanalgen sein. Die Anzahl der 2018 produzierten Anwendungseinheiten A_{2018} und der spezifische Materialbedarf pro Einheit b_{2018} sind Daten, die theoretisch genau bestimmt werden können. In der Praxis gestaltet sich die Erhebung globaler Produktionszahlen aufgrund der vielen Hersteller, Produkttypen und Absatzmärkte etc. jedoch schwierig. So konnten in einigen Fällen keine Daten ausfindig gemacht werden, während in anderen Fällen voneinander abweichende Schätzungen existieren. Auch die Ermittlung des Materialbedarfs pro Anwendungseinheit gestaltet sich in vielen Fällen problematisch. Der spezifische Materialbedarf unterscheidet sich nach Hersteller und Ausführung der Technologie und wird zum Teil als Betriebsgeheimnis gehütet. Beim spezifischen Materialbedarf sind neben dem in der Produkteinheit enthaltenen Material auch Produktionsabfälle und Produktionsausschuss zu berücksichtigen.

Die entsprechenden Daten für 2040 können dagegen nicht bestimmt werden. In der vorliegenden Studie wird versucht, mittels Szenarien abzuschätzen, welche zukünftigen Entwicklungen basierend auf momentan verfügbarem Wissen möglich bzw. wahrscheinlich sind.

Die Entwicklung des spezifischen Materialbedarfs bis zum Jahr 2040 (b_{2040}) ist für verschiedene Technologien stark unterschiedlich und wird jeweils basierend auf Recherchen und Expertenbefragungen ermittelt. Einige allgemeine Grundüberlegungen werden im Folgenden erläutert. Generell führen steigende Ansprüche an Leistung und Funktionalität zu höheren spezifischen Materialbedarfen. Diesem Trend entgegen steht eine Reduktion des spezifischen Materialbedarfs durch Effizienzsteigerung und Substitution. Für Technologien, welche sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden, sind diesbezüglich höhere

Einsparpotenziale zu erwarten. Außerdem werden die Einsparungen umso größer sein, je höher das Problembewusstsein und die Forschungsbemühungen in den jeweiligen Branchen sind. Je spezifischer die Funktion des Materials für die jeweilige Anwendung ist, desto unwahrscheinlicher erscheint eine Substitution. Dennoch kann eine unvorhersehbare Innovation (beispielsweise die Substitution durch ein neues, besser geeignetes Material) den spezifischen Materialbedarf drastisch ändern.

Auch die Abschätzung der 2040 produzierten Anwendungseinheiten (A_{2040}) erfolgt für alle Technologien individuell, da sich die Technologien in den für die globale Marktentwicklung relevanten Kriterien stark unterscheiden. Wichtigstes Kriterium für die Verbreitung einer Technologie ist ihr Nutzen. Dabei gibt es Technologien, die einen völlig neuen, zusätzlichen Nutzen erbringen und solche, die bestehende Technologien ersetzen können, weil sie ihnen gegenüber Nutzenvorteile haben. Die Nutzenvorteile solcher Verdrängungstechnologien können so groß sein, dass sie einen bestehenden Markt vollständig erobern (z. B. Flachbildfernseher/Röhrenfernseher). Es können allerdings auch mehrere Technologien dauerhaft in Konkurrenz stehen, da alle gewisse Vorteile bieten, die in verschiedenen Anwendungsfällen unterschiedlich stark zum Tragen kommen (z. B. verschiedene Generatortechnologien für Windkraftanlagen). Neben der Verbreitung der Anwendung im Jahr 2040 müssen in diesen Fällen auch Szenarien für den Marktanteil der verschiedenen Technologien erstellt werden. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass auch heutige Zukunftstechnologien in der nahen Zukunft durch unvorhersehbare Innovationen wieder verdrängt werden können.

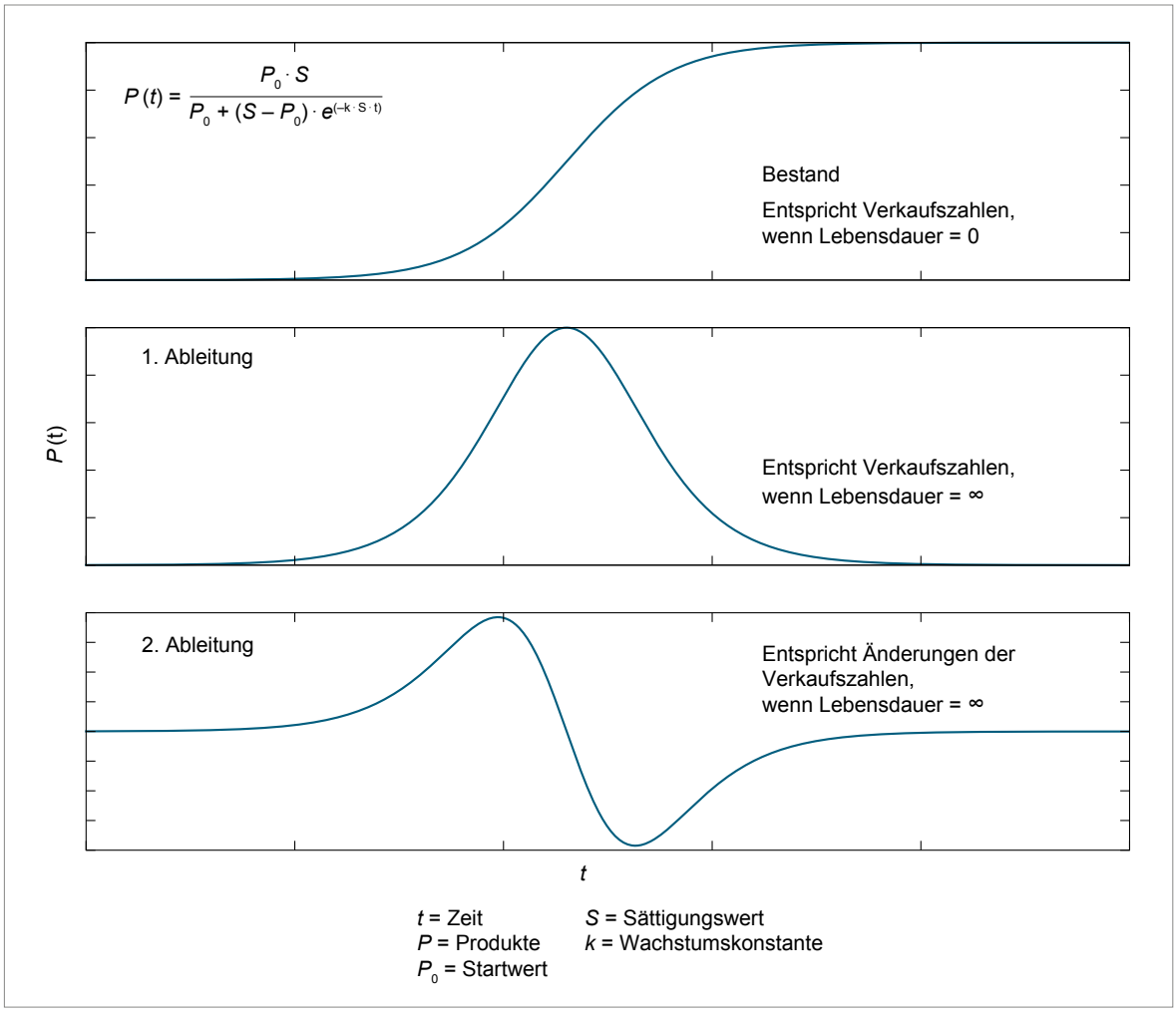


Abb. 1.12: Diffusion einer Technologie gemäß Sättigungsmodell (Quelle: Eigene Darstellung)

Wie ein Technologiemarkt global wächst, hängt auch davon ab, inwiefern die Verbreitung ausschließlich oder vorrangig in bestimmten Regionen, Kulturen oder soziökonomischen Sphären stattfindet. Hierbei sind die Offenheit der Nutzer gegenüber Neuerungen sowie die notwendigen infrastrukturellen Voraussetzungen für die tatsächliche Ausbreitung von Zukunftstechnologien entscheidend. Darüber hinaus hängt die Entwicklung einiger betrachteter Technologien stark von politischer Förderung ab (z. B. Windkraftanlagen, Traktionsmotoren für elektrisch angetriebene Pkw).

Für die Diffusion neuer Technologien existieren ökonomische Modelle, in denen zunächst exponentielles Wachstum stattfindet, welches bei Näherung an einen Sättigungswert abflacht, so dass S-Kurven resultieren (s. Abb. 1.12). Diese Kurven beschreiben die Entwicklung des Gesamtbestands. Die Entwicklung der jährlichen Verkaufszahlen gleicht dieser Kurve nur bei sehr kurzen Lebensdauern (nahe 0, z. B. bei Energierohstoffen). Bei sehr langen Lebensdauern (nahe unendlich) stellen die jährlichen Verkaufszahlen die erste Ableitung der Bestandskurve dar (s. Abb. 1.12). Abb. 1.13 verdeutlicht die theoreti-

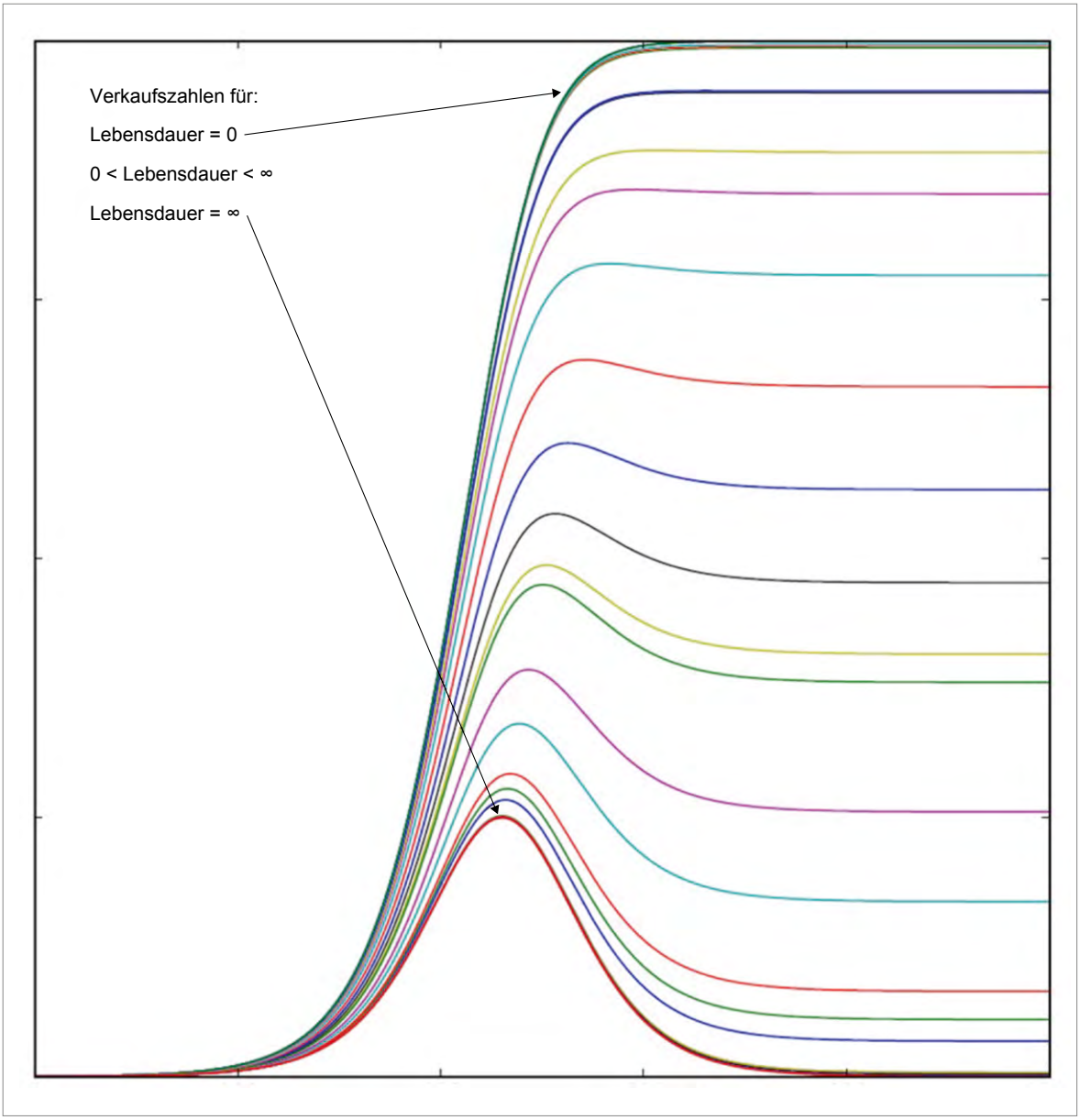


Abb. 1.13: Zeitliche Entwicklung der Verkaufszahlen für unterschiedliche Lebensdauern (Quelle: Eigene Darstellung)

schen Verläufe für Lebensdauern zwischen 0 und unendlich. Die häufig in Marktstudien angegebenen jährlichen Wachstumsraten CAGR (Compound Annual Growth Rate) sind die Änderung der Verkaufszahlen und somit die erste Ableitung der Verkaufszahlen. Außerdem entsprechen sie der zweiten Ableitung des Bestandes, wenn die Lebensdauer des Produkts unendlich ist. Abb. 1.12 macht deutlich, dass die CAGR bei fortschreitender Reife kleiner und sogar negativ werden können, obwohl der Bestand weiter wächst.

Wie hoch die Sättigung ist und wann sie erreicht wird, ist häufig unbekannt. Daher sind auch komplexe Modellrechnungen letztlich nur so gut wie die angenommenen Koeffizienten. Aufgrund der hohen Unsicherheiten wird sich folglich auf einfache Modelle beschränkt.

Weltweit ist zwischen Regionen mit unterschiedlichen Entwicklungsstufen, Infrastrukturen und Kulturen zu unterscheiden. Das weltweite Wachstum des Bedarfs an einer Technologie ist also die Überlagerung des zeitlich unterschiedlich verlaufenden Wachstums in verschiedenen Regionen.

Die frühe Wachstumsphase neuer Technologien ist in der Regel durch exponentielles Wachstum mit hohen Exponenten für Bestand und Verkaufszahlen gekennzeichnet (vgl. Abb. 1.12). Auch das Wachstum der Weltwirtschaft beeinflusst das Wachstum der Zukunftstechnologien. Die in Kapitel 1.1.2 geschilderte Entwicklung des BIP in den unterschiedlichen SSPs dienen als Basis zur Abschätzung der Marktdiffusion. Dies gilt aber für verschiedene Technologien in unterschiedlichem Ausmaß und hängt z. B. davon ab, ob es sich um eine Breitentechnologie handelt, die in vielen anderen Technologien enthalten ist, oder um eine Spezialtechnologie mit einer einzelnen, konkreten Anwendung. Ungewöhnliche Impulse auf die Rohstoffnachfrage werden vor allem von Technologien ausgehen, die über einen gewissen Zeitraum mit Wachstumsexponenten weit über dem der Weltwirtschaft wachsen.

2 Auswahl der Zukunftstechnologien

Auswahl von Technologien für eine detaillierte Analyse

Grundlage für die Auswahl der Technologien, die in den folgenden Kapiteln detailliert dargestellt und analysiert werden, war eine Liste potenzieller Zukunftstechnologien. Zukunftstechnologien sind definiert als industriell verwertbare technische Fähigkeiten, die revolutionäre Innovationsschübe weit über die Grenzen einzelner Wirtschaftssektoren auslösen. Diese Liste wurde für die Vorgängerstudie erstellt und enthielt 168 Zukunftstechnologien (Marscheider-Weidemann et al. 2016). Diese Sammlung wurde durch eine gezielte Recherche nach Zukunftstechnologien aktualisiert.

Ein weiterer Beitrag zu der Technologiesammlung erfolgte durch einen Expertenworkshop, der im November 2019 bei der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) stattfand. Teilnehmer waren Vertreter von Industrieverbänden der Metallindustrie, Rohstoffhersteller und Industrieunternehmen, die besonders kritische Rohstoffe nutzen. Eine grundlegende Erkenntnis aus dem Workshop war, dass sich die Auswahl der Zukunftstechnologien und deren Marktentwicklung an dem 1,5 Grad Ziel des Übereinkommens von Paris (United Nations 2015) orientieren sollte. Auch sollten die Technologien in Clustern dargestellt werden, um einen Beitrag zur entsprechenden Diskussion in anderen Bereichen leisten zu können, wie beispielsweise zum Rohstoffbedarf der Energiewende in Deutschland.

Daher sind die Technologiesynopsen im Folgenden nach Clustern dargestellt und nicht, wie in den Vorgängerstudien, nach betroffenen Branchen. So werden in diesem Bericht auch Technologien untersucht, die nicht als innovativ gelten, aber wesentlich für ein Cluster sind. Für diese Wesentlichkeitsanalyse wurden schematische Übersichten der Cluster erstellt, wie sie in Abb. 2.1 bis Abb. 2.3 für die Cluster „Mobilität, Luft- und Raumfahrt“, „Digitalisierung und Industrie 4.0“ und „Energietechnologien und Dekarbonisierung“ dargestellt sind. Die in dieser Studie untersuchten Technologien sind blau dargestellt. Es ist zu erkennen, dass einige Technologien in mehreren Clustern zum Einsatz kommen und dass einige Technologien eine notwendige Basis für den Betrieb anderer Technologien darstellen. Diese Technologien wurden in die beiden Clustern „Kreislauf- und Wasserwirtschaft“ (Meerwasserentsalzung und Rohstoffliches Recycling) und „Strom- und Datennetzwerke“ (Ausbau Stromnetz, Glasfaserkabel, 5G (6G), Rechenzentren und Induktive Übertragung elektrischer Energie) eingeordnet.

Darüber hinaus galten zur Auswahl der zehn neuen Technologiesynopsen auch die folgenden Kriterien: Wie war der Stand der Technik im Bezugsjahr 2018, gibt es potenziell einen zukünftigen Markt im Jahr 2040, wie sieht der Rohstoffbedarf und das Recyclingpotenzial im Jahr 2040 aus? Technologien, die keine anorganischen mineralischen Rohstoffe benötigen, blieben unberücksichtigt, z. B. DNA-Synthese, Künstliche Intelligenz oder Browsertechnologien. Am Ende des Prozesses wurden so 33 Technologien ausgewählt.

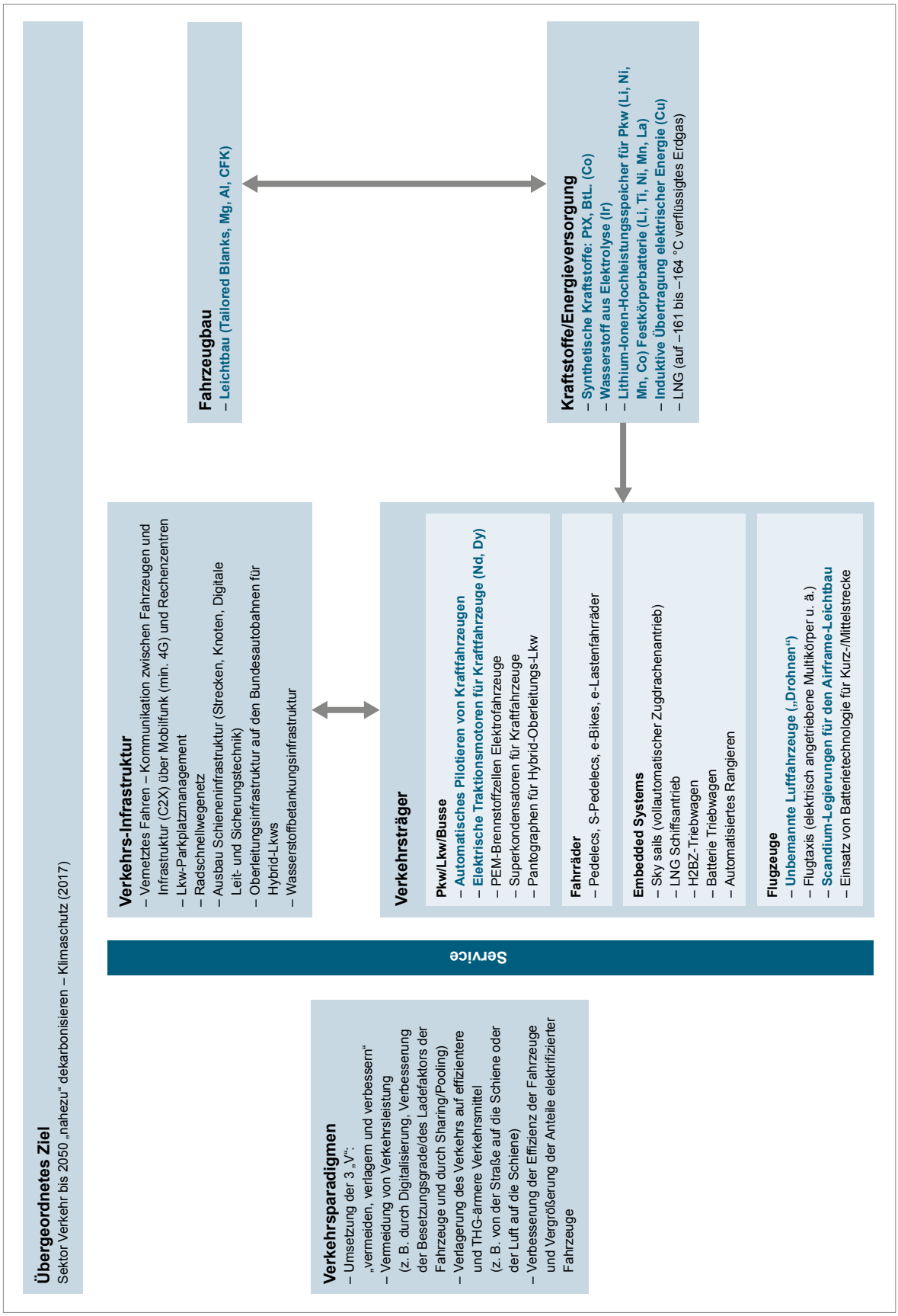


Abb. 2.1: Schematische Übersicht über den Cluster Mobilität, Luft- und Raumfahrt (Quelle: Eigene Darstellung)

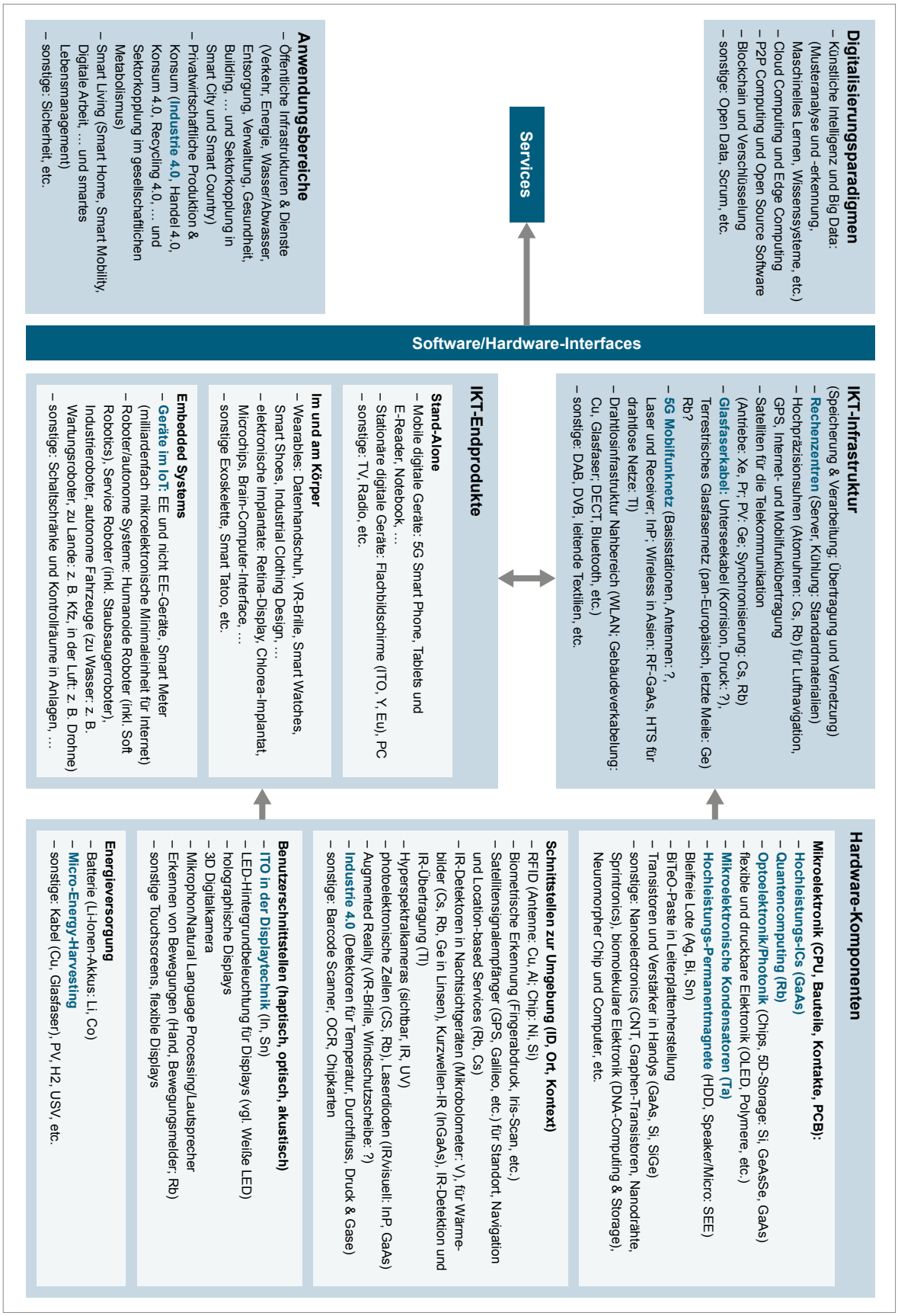


Abb. 2.2: Schematische Übersicht über den Cluster Digitalisierung und Industrie 4.0 (Quelle: Eigene Darstellung)

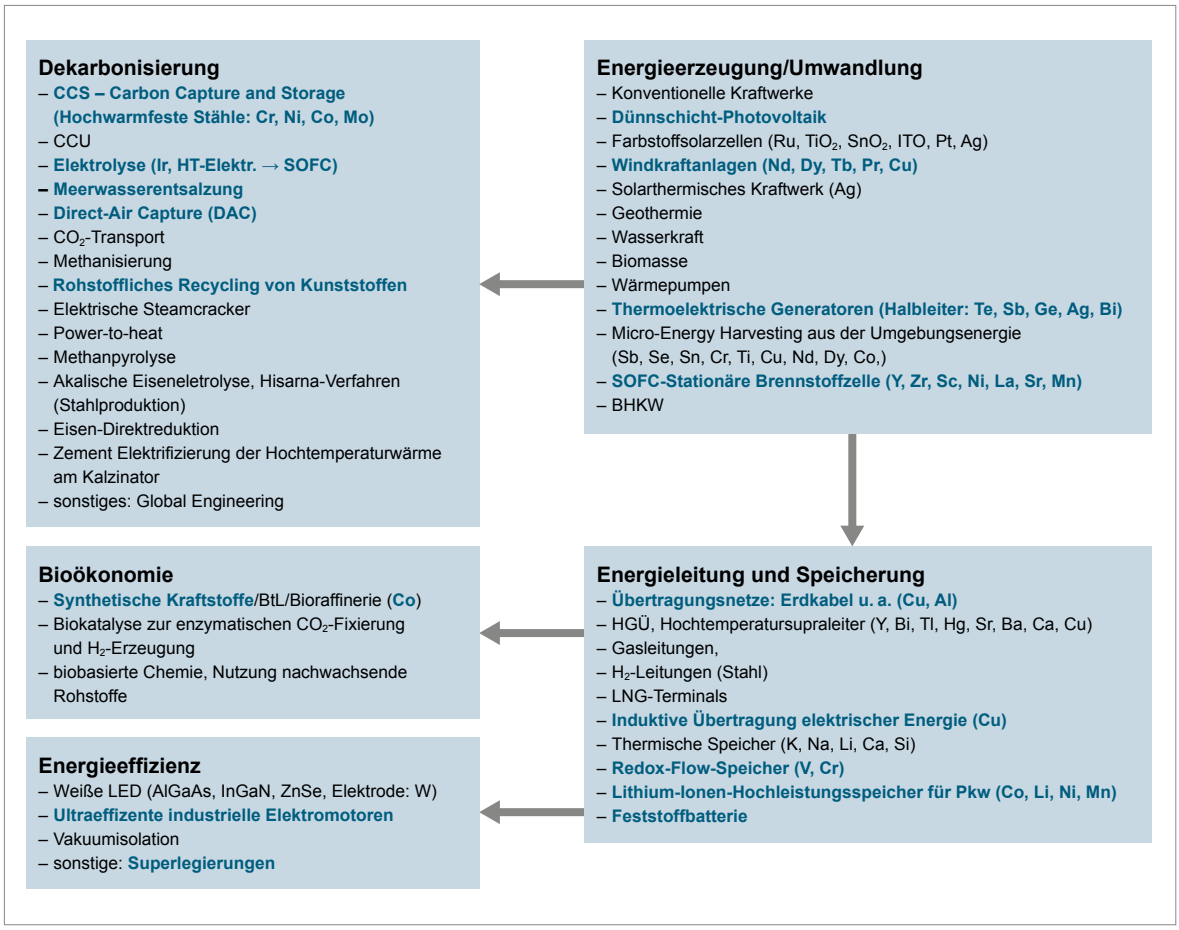


Abb. 2.3: Schematische Übersicht über die Energietechnologien und Dekarbonisierung (Quelle: Eigene Darstellung)

3 Technologiesynopsen

3.1 Cluster: Mobilität, Luft- und Raumfahrt

3.1.1 Pkw-Leichtbau

3.1.1.1 Technologiebeschreibung

Die Gewichtsreduzierung von Fahrzeugen ist für Fahrzeughersteller eine permanente Herausforderung, die durch Anstrengungen im Klimaschutz und die Erhöhung der Reichweite bei Elektrofahrzeugen noch an Bedeutung gewonnen hat. Der Fahrzeugwiderstand setzt sich aus dem Luft-, Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand zusammen. Ausgenommen des Luftwiderstands sind all diese direkt proportional zu der Fahrzeugmasse. Dies bedeutet, dass mit steigender Fahrzeugmasse auch eine größere Antriebsleistung benötigt wird. Durch eine Fahrzeuggewichtsreduzierung von 100 kg wird der Kraftstoffverbrauch konventioneller Pkw um durchschnittlich 0,5 l/100 km gesenkt und der CO_2-Ausstoß um 12 g/km reduziert (Klein 2012).

Durch Gesetzgebung und Kundenwünsche steigen die Anforderungen an die Sicherheitstechnik und Komforteinrichtungen, sodass das durchschnittliche Fahrzeuggewicht in der Vergangenheit stark zugenommen hat. Bei Pkw sind das beispielsweise der Seitenaufprallschutz, ABS, ESP, die Abgaskatalysatoren aber auch Klimaanlagen und Motoren für Fensterheber, Sitzverstellung und weitere Komforteinrichtungen. Wegen des steigenden Fahrzeuggewichts werden auch stets höhere Motorleistungen gefordert, um keine Einbußen in der Fahrzeugdynamik zu haben. Aus der steigenden Motorleistung resultiert wiederum ein höheres Motorengewicht, eine sich fortsetzende Gewichtsspirale entsteht, mit welcher die Masse neuer Fahrzeuge stetig zunehmen. Um dieser Gewichtsspirale entgegenzuwirken, wird im Fahrzeugbau zunehmend auf Leichtbau gesetzt. Besonders für batteriegetriebene Elektrofahrzeuge ist Leichtbau ein essenzieller Erfolgsfaktor, um der Reichweitenproblematik durch begrenzte Batteriekapazitäten entgegenzuwirken. Mit sinkendem Karrosseriegewicht kann entweder das Gesamtgewicht des Fahrzeugs verringert werden, sodass sich ein verminderter Energiebedarf durch sinkende Fahrzeugwiderstände ergibt, oder es kann eine größere Batterie bei gleichbleibendem Gesamtgewicht eingesetzt werden. In beiden Fällen lässt sich die Reichweite eines Elektrofahrzeugs durch Leichtbau erhöhen, auch wenn dem Leichtbau aus Gründen der Technik, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit Grenzen gesetzt sind.

Es existieren unterschiedliche Leichtbaustrategien, um die Masse von Strukturen bei gleichbleibender mechanischer Beanspruchbarkeit zu senken (Friedrich 2013):

– Stoffleichtbau: Beim Stoffleichtbau wird eine Gewichtsreduzierung durch die Substitution des ursprünglichen Werkstoffs durch einen Werkstoff geringerer Dichte bei gleichbleibender Form bewirkt. Wenn konventioneller Stahl durch hochfesten Stahl ersetzt wird, spricht man von Stahlleichtbau. Weitere Metalle für den Stoffleichtbau sind Aluminium oder Magnesium, mit welchen ein Gewichtsersparnis von 40 % bzw. 49 % bewirkt werden kann. Insbesondere Audi setzte mit dem sogenannten Audi Space Frame auf Aluminiumleichtbau, wodurch beim Q7-Modell von 2015 das Karosseriegewicht um 71 kg gesenkt werden konnte (Audi 2017). Neben metallischen Werkstoffen können auch faserverstärkte Verbundwerkstoffe wie GFK (Glasfaser) mit einem Leichtbaupotential von 20 % oder CFK (Kohlenstofffaser) mit einem Leichtbaupotenzial von über 50 % eingesetzt werden. Beim Mercedes Benz SL 500 konnte beispielsweise alleine in der Heckklappe 4,5 kg Gewicht eingespart werden, indem diese bei gleichbleibender Form aus GFK statt Stahl gefertigt wird (Friedrich 2013). Auch BMW setzt auf Verbundwerkstoffe, beispielsweise im Elektrofahrzeug BMW i3.

– Fertigungsleichtbau: Leichtbaumaßnahmen, welche durch den Produktionsprozess ermöglicht werden, werden unter Fertigungsleichtbau zusammengefasst. So hat beispielsweise die Weiterentwicklung des Laserschweißens zu neuen Möglichkeiten beim Fügen geführt. Durch das neue Flow-Forming-Verfahren kann Material während des Umformens derartig verfestigt werden, dass Gewichtsersparnisse von bis zu 15 % bei der Felgenproduktion erreicht werden. Durch die Gas- oder

Wasser-Injektions-Technik können Hohlbauteile aus Kunststoff in einem Arbeitsschritt gefertigt werden, welche die ursprünglichen Vollbauteile ersetzen und somit Gewicht einsparen (Friedrich 2013).

– Formleichtbau: Im Formleichtbau wird das Material eines Bauteils derartig verteilt, dass es an die Beanspruchung angepasst wird, sodass an weniger beanspruchten Stellen Material eingespart werden kann. Konstruktive Maßnahmen zur Versteifung sind beispielsweise Rippen, Sicken oder Schalenform. Durch die Struktursimulation (z. B. Finite-Elemente-Methode) von Bauteilen unter Belastung kann die Form optimal an die Belastung angepasst werden.

– Bedingungsleichtbau: Äußere Einflussfaktoren wie Beanspruchbarkeit, Gesetzgebung oder erwartete Lebensdauer haben einen Einfluss auf das Gewicht von Fahrzeugen. Durch den Bedingungsleichtbau werden diese angepasst, um Leichtbau umzusetzen.

– Konzeptleichtbau: Der Konzeptleichtbau bezieht sich auf die Bauweise, welche in Differential-, Integral- und integrierende Bauweise unterschieden wird. In der Differentialbauweise setzen sich mehrere Bauteile additiv durch Fügen zu einer Struktur zusammen, während in der Integralbauweise eine Struktur aus nur einem Bauteil angestrebt wird, welche dann eine höhere Formkomplexität aufweist. Die integrierende Bauweise verbindet Integration und Differentiation (Klein 2012).

Viele reale Ansätze für Fahrzeugleichtbau lassen sich nicht vollständig einer Leichtbaustrategie zuordnen. Ein Leichtbauansatz wurde mit den sogenannten Tailored Blanks von der Stahlindustrie entwickelt, wobei die damalige Thyssen Stahl AG die Pionierarbeit geleistet hat. Die Technologie begann 1985 mit dem Verschweißen von großformatigen Stahlblechen, die breiter als mit den damaligen Walzgerüsten herstellbar waren. Mit der Qualifizierung im Laserstrahlschweißen erkannte man die Möglichkeit, Bleche unterschiedlicher Dicke, Festigkeit und Oberflächenbeschichtung zu einem Vorprodukt zu fügen, welches anschließend beim Kunden zum Karosseriebauteil tiefgezogen wird (Mertens & Koch 2003). Mit dieser Technologie werden Bleche in Dicken von 0,6 – 3 mm den unterschiedlichen lokalen mechanischen Anforderungen am fertigen Bauteil angepasst. Hochfester Stahl wird dort eingefügt, wo die lokale Belastung dies erfordert und die Blechdicke wird dort verstärkt, wo hohe Steifigkeit vonnöten ist. Durch die Anpassung des Werkstoffs, der Werkstoffgüte sowie der Oberflächenbeschaffenheit an die im Bauteil lokal auftretenden Belastungen können die Blechdicken reduziert werden, während Verstärkungsteile und Flansche für Überlappungsverbindungen entfallen. Tailored Blanks weist somit Elemente des Stoff-, Fertigungs- und Konzeptleichtbaus auf. Die unterschiedlichen Verfahren zur Herstellung von Tailored Blanks werden im Folgenden beschrieben (Merklein et al. 2014):

– Tailor Welded Blanks: Verschweißen von Blechen unterschiedlicher Werkstoffeigenschaften.
– Patchwork Blanks: Lokale Verstärkung durch Überlappung von Blechen.
– Tailor Rolled Blanks: Bleche, welche durch einen Walzprozess eine kontinuierliche Änderung in der Dicke aufweisen.
– Tailor Heat Treated Blanks: Lokal unterschiedliche Wärmebehandlung von Blechen.

Eingesetzt wird die Technologie für die Fertigung von Türen, Heckklappen, Seitenteilen, A- und B-Säulen, Dach, Radkästen, Bodenblech, Längsträgern, Motorträgern, Stoßfängern und Federbeintöpfen. Heute liefern alle großen Stahlhersteller Tailored Blanks, darunter auch die Salzgitter Europlatinen GmbH, deren Internetauftritt Abb. 3.1 entnommen ist. Sie zeigt die Rohbaukarosserie eines Pkw und hebt die besonders beanspruchten Komponenten hervor.

Die Technologie der laserstrahlgeschweißten, maßgeschneiderten Blechplatinen erlaubt Gewichteinsparungen an der Rohkarosserie von 25 %. Bei einem Fahrzeug der VW Golf-Klasse mit einem Karosseriegewicht von 360 kg sind dies 90 kg. Somit tragen Tailored Blanks neben der Gewichtsreduzierung auch zur Ressourcenschonung verglichen mit einer konventioneller Blechbauweise bei. Zudem können durch den Einsatz von Tailored Blanks die Kosten gesenkt werden, da Material eingespart wird.

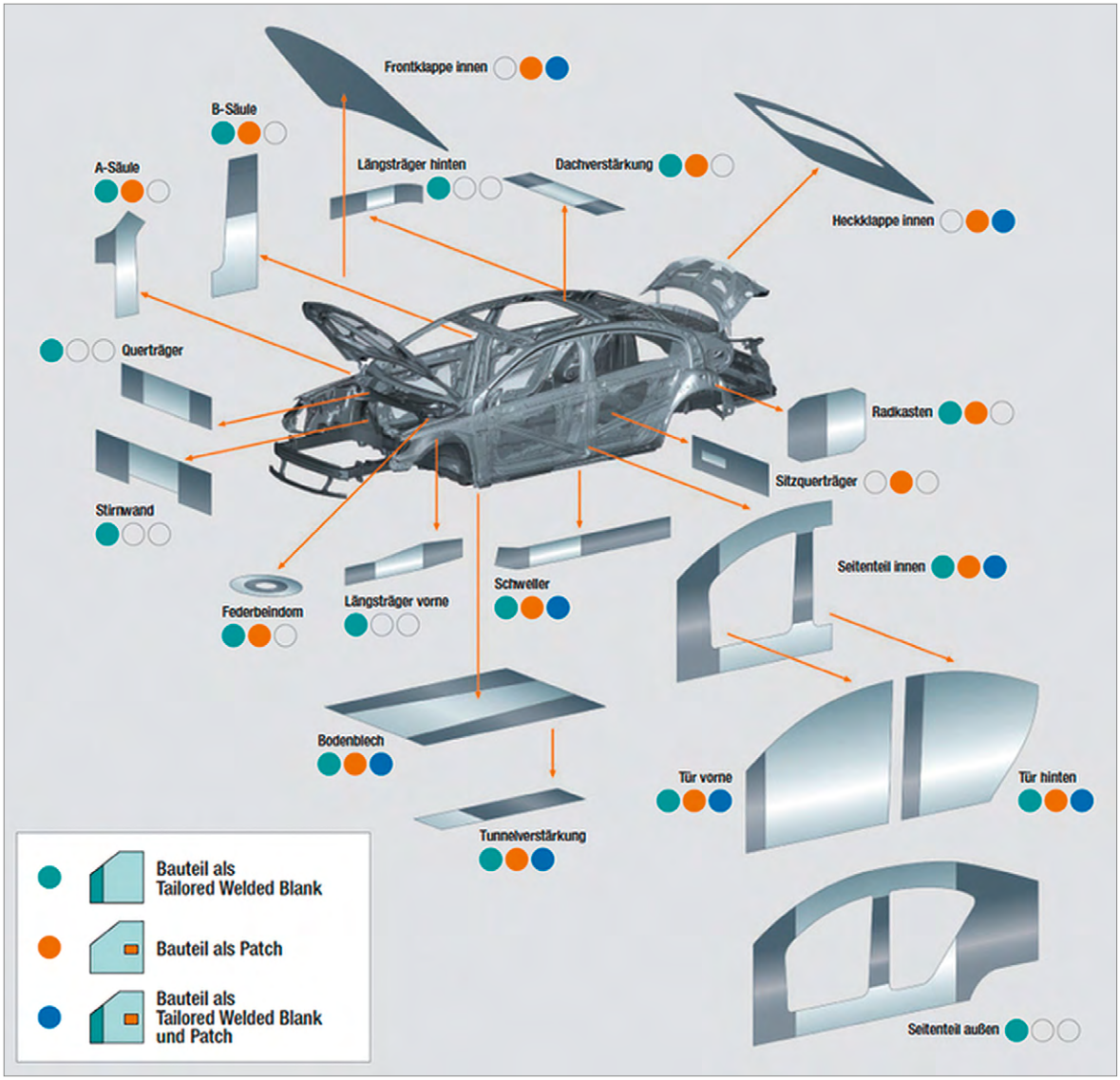


Abb. 3.1: Mögliche Anwendungsbereiche von Tailored Blanks (Quelle: Salzgitter Europlatinen GmbH)

Die Technologieentwicklung ist noch im Fluss. In der Zwischenzeit können auch nicht gerade verlaufende Blechfugen verschweißt werden. Der Laserstrahl folgt dabei dem Kurvenverlauf beliebiger Fugenkonturen. Auch mit der Verbindung von Stahl- und Aluminiumblechen zu hybriden Tailored Blanks wird experimentiert und wurde bereits 2004 erfolgreich von dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der TU München durch Laser-Rollnahtfügen umgesetzt. Weitere Verfahren zur Herstellung hybrider Tailored Blanks sind das Reibrührschweißen und das Cold-Metal-Transfer-Verfahren (Friedrich 2013). Beim Verschweißen von Stahl mit Aluminium durch konventionelle Verfahren bildet sich eine intermetallische Phase in der Fügezone, welche spröde Eigenschaften aufweist. Infolgedessen kann das Bauteil nur begrenzt umgeformt oder tiefgezogen werden, sodass es für die meisten automobilen Karosserieanwendungen nicht geeignet ist. Um die intermetallische Phasenbildung zu vermeiden, wurde vom Fraunhofer IWS ein spezielles Verfahren zum Fügen von Aluminium und Stahl entwickelt. Für dieses wird ein Zwischenfügeelement (sog. Transition Joint) hergestellt, welches ein Stahl-Aluminium-Bimetallband darstellt. Dieses wird in einem Walzprozess mit gleichzeitigem Erhitzen durch Laserstrahlung in der Fügezone hergestellt. Durch die präzise Einstellung der thermomechanischen Bedingungen, wird eine stoffschlüssige

Verbindung mit einer extrem dünnen intermetallischen Phase erzeugt. Der Transition Joint verfügt dadurch über eine exzellente Verformbarkeit und Festigkeit. Der Transition Joint wird anschließend als Zwischenelement der zu fügenden Bleche genutzt, indem der Stahlteil mit dem Stahlbauteil und der Aluminiumteil mit dem Aluminiumbauteil verschweißt wird (Wagner et al. 2014).

Die zugrundeliegende neuartige Leichtbaustrategie ist dabei das Multi-Material-Design, dessen Ziel es ist, an jeder Stelle den für den Anwendungsfall optimalen Werkstoff einzusetzen (Klein 2012). Durch den Einsatz von Aluminium in Tailored Blanks lässt sich das Gewicht von Bauteilen noch weiter senken; so konnte bei einem Stoßfänger das Gewicht um 30 % gesenkt werden, bei nahezu gleichbleibendem Verformungsverhalten im Crashfall (Wagner et al. 2014).

Da Tailored Blanks derzeit und in Zukunft im Karosseriebau eine wesentliche Rolle spielen und diese durch den Metalleinsatz Auswirkungen auf den zukünftigen Rohstoffmarkt haben wird, werden im Folgenden ausschließlich Tailored Blanks untersucht.

3.1.1.2 Rohstoffinhalt

Klassische Tailored Blanks werden aus unterschiedlichen Stählen, also einer Legierung aus Eisen und Kohlenstoff, hergestellt, welchen unter Umständen weitere Legierungselemente beigefügt werden. Schweißbaren und hochfesten Stählen zur Aufnahme lokaler Belastungsspitzen kommen in Tailored Blanks eine Schlüsselrolle zu. Sie sind Voraussetzung für die Gewichtseinsparung, weil sie es ermöglichen, die Blechdicken an der Belastungsstelle und auch an den übrigen weniger beanspruchten Stellen herabzusetzen. Die eingesetzten hochfesten Stähle weisen Zugfestigkeiten um 1.000 N/mm² und mehr auf. Die Festigkeit von Stahl lässt sich durch die Erhöhung des Kohlenstoffgehalts, Wärmebehandlung und mechanische Verformung steigern. Bei einem Kohlenstoffanteil von über 0,22 % nimmt jedoch die Schweißbarkeit und Zähigkeit rapide ab (Dubbel 1983), beides Eigenschaften die für geschweißte und tiefgezogene Tailored Blanks unverzichtbar sind. Die Steigerung der Festigkeit von schweißbaren Stählen erfolgt deshalb durch Ausbildung eines feinkörnigen Gefüges. Dies geschieht zum einen durch die Zugabe kleinster Mengen das Korn verfeinernder Legierungselemente, darunter Aluminium, Niob und Vanadium mit Anteilen unterhalb von 0,1 Gewichtsprozent. Zum anderen wird das Gefüge durch Wärmebehandlung und Walzen beeinflusst. Für die Ausbildung von Gefüge und Eigenschaften bei Karosserieblechen spielt die Haubenglühstufe nach dem Kaltwalzen eine große Rolle.

Für die optimierten hochfesten Spezialstähle im Fahrzeugbau haben sich Bezeichnungen wie TRIP-Stahl (Transformation Induced Plasticity), DP-Stahl (Dualphasenstahl), CP-Stahl (Complexphasenstahl) und andere herausgebildet. Ihnen ist gemeinsam, dass durch spezielle Wärmebehandlung und mechanische Umformung in einem ferritischen (DP) oder ferritisch-austenitischen (TRIP) Grundgefüge martensitische Inseln ausgebildet werden, welche die Zugfestigkeit steigern und zugleich die Streckgrenze für eine gute Umformbarkeit beim Tiefziehen niedrig halten. Wichtige Legierungselemente von Dualphasenstahl sind Mangan (0,8 – 2 %), Silizium (0,1 – 0,5 %) und Aluminium (bis 0,2 %). Austenitische Stähle, darunter TRIP-Stahl, enthalten zusätzlich Austenitbildner wie Nickel, Kobalt und Mangan. Die Werkstoffentwicklung ist nach wie vor stark im Fluss. Eine neuere Entwicklung sind hochfeste Mangan-Bor-Stähle (Vollmers 2008; Bartos 2014).

3.1.1.3 Foresight Industrielle Nutzung

Der Golf III von Volkswagen war 1991 weltweit das erste Fahrzeug, bei dem Tailored Blanks in der Serienfertigung eingesetzt wurden. Große Hersteller von Tailored Blanks sind beispielsweise Salzgitter Europlatinen und Bao Steel, die mit Wisco Tailored Blanks den Pionier dieses Bereichs, ThyssenKrupp Tailored Blanks übernahmen. Zum derzeitigen Stand konnte keine Studie zur Marktdurchdringung von Tailored Blanks gefunden werden. Daher kann der derzeitige Anteil von Tailored Blanks lediglich geschätzt werden, sodass dieser mit 40 % an der Rohkarosserie angenommen wird.

Die Beherrschung des Laserstrahlschweißens beliebiger Nahtformen erschließt der Technologie weitere Anwendungen und zusätzliche Poten-

ziale zur Gewichtsreduktion. Zudem ist durch einen Anstieg des Know-hows und durch großer skalierte Produktion mit sinkenden Kosten von Tailored Blanks in der Zukunft zu rechnen. Da Tailored Blanks insbesondere bei Bauteilen mit inhomogener Belastung einen Vorteil bringen, ist nicht davon auszugehen, dass sich in Zukunft die gesamte Karosserie aus Tailored Blanks zusammensetzt. Daher wird geschätzt, dass sich der Anteil von Tailored Blanks an der Rohkarosserie bis 2040 verdoppelt und somit 80 % beträgt.

Hybride Tailored Blanks sind derzeit noch Gegenstand der Forschung und werden daher bis heute nicht serienmäßig in Fahrzeugen eingesetzt (Hildenbrand 2019). Herausforderungen bei unterschiedlichen Materialien sind die Verminderung der elektrochemischen Korrosion und die Beherrschung unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten. Da noch nicht absehbar ist, wann und ob sich hybride Tailored Blanks auf dem Markt durchsetzen, werden diese in dem Szenario für den Rohstoffbedarf von Karosserien nicht mit einbezogen.

Haupteinsatzgebiet von Tailored Blanks ist die Automobilindustrie. Einsatzpotenziale bestehen aber auch in anderen Sektoren, beispielsweise der Hausgeräteindustrie, im Maschinenbau und im Anlagenbau.

3.1.1.4 Foresight Rohstoffbedarf

Um den Rohstoffbedarf für Tailored Blanks in der Zukunft abzuschätzen, werden die Mobilitätsszenarien SSP1, SSP2 und SSP5 herangezogen, welche bereits in diesem Bericht ausführlicher beschrieben wurden. Die derzeitigen und zukünftigen Fahrzeugproduktionszahlen sind in Tab. 3.1 dargestellt, wobei sowohl private als auch kommerzielle Fahrzeuge einbezogen werden. Es wird davon ausgegangen, dass ein durchschnittliches neuzugelassenes Fahrzeug etwa 1.800 kg wiegt (Abuelsamid 2019) und die Karosserie einen Anteil von 25,5 % an dem Gesamtgewicht des Fahrzeugs hat (Lutsey 2010). Die Zusammensetzung von Fahrzeugkarosserien werden wie im Foresight industrielle Nutzung beschrieben angenommen. Es wird lediglich der Rohstahl ohne Legierungselementen betrachtet, da die verwendeten Legierungselemente und deren Konzentrationen im Stahl je nach Anwendungsfall und Fertigungstechnologie stark variieren.

2018 hatte die Produktion von Fahrzeugkarosserien einen Anteil von 2,2 % an der gesamten Rohstahlproduktion. Durch den Einsatz von Tailored Blanks kann eine durchschnittliche Gewichtsersparnis von 11 % verglichen mit derzeitigen Fahrzeugkarosserien erwirkt werden. Der Rohstoffbedarf für Karosserien steigt somit je nach Szenario um lediglich 42 %, 63 % oder 117 % an, während die Anzahl der produzierten Fahrzeuge im betrachteten Zeitraum um 59 %, 84 % oder 145 % ansteigt. Neben einem positiven Effekt der Gewichtsreduktion auf den Energiebedarf für den Fahrzeugbetrieb kann durch Tailored Blanks auch der Rohstoffbedarf pro Fahrzeug gesenkt werden. Bei einer steigenden Rohstahlproduktion ist daher eine Senkung des Anteils der Fahrzeugkarosserien am gesamten Stahlbedarf möglich. Dies ist ein Beispiel für das Potenzial mit Leichtbaustrategien die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Rohstoffbedarf herbeizuführen.

3.1.1.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Tailored Blanks sind, wie andere Stahlprodukte auch, vollständig rezyklierbar. Durch den Entfall

Tab. 3.1: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Tailored Blanks

	Einheit	Produktion 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Fahrzeugproduktion	Mio.	85,1	135,5	156,4	208,2
Bedarf Karosserieblech	kt	39.799	56.328	65.017	86.550
Rohstahlproduktion	kt	1.820.366			

von Abdichtmasse entstehen Vorteile im Recyclingprozess gegenüber konventionellen Karosserien (Friedrich 2013). Der Recyclingaufwand steigt bei hybriden Tailored Blanks aus mehreren Metallen, beispielsweise Aluminium und Stahl an, da in diesen unterschiedliche Rohstoffe innerhalb eines Bauteils vorkommen, welche zum Recyceln mechanisch oder metallurgisch getrennt werden müssen. Durch das Erwärmen der Fügezone kann jedoch ein derartiges intermetallisches Phasenwachstum im Transition Joint erzeugt werden, welches mit einem spröden Versagen der Fügezone schon bei geringen Lasten einhergeht, sodass ein mechanisches Trennen durch die Versprödung der Fügezone vereinfacht wird (Wagner 2020).

3.1.2 Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge

3.1.2.1 Technologiebeschreibung

Basierend auf den Szenarien zu zukünftigen Fahrzeugverkäufen und Flottenanteilen der elektrischen Antriebskonzepte (Kapitel 1.3) werden in dieser Technologiesynopse die Materialbedarfe für elektrische Traktionsmotoren analysiert. Es werden nur Pkw, keine Nutzfahrzeuge, Züge und Busse betrachtet.

Anforderungen an Traktionsmotoren für E-Pkw

Generell ist der Wirkungsgrad bzw. die Effizienz das wichtigste Qualitätsmerkmal eines Motors. In Kraftfahrzeugen sollte eine hohe Effizienz des Motors über eine große Bandbreite von Geschwindigkeiten und Drehmomenten gewährleistet sein. Für die Gesamteffizienz des Fahrzeugs ist außerdem wichtig, dass der Traktionsmotor möglichst wenig Platz einnimmt und möglichst wenig zur Gesamtmasse beiträgt. Ein wesentliches Kriterium ist daher eine hohe Leistungs- und Drehmomentsdichte des Motors. Zudem zählen ein geringer Wartungsaufwand, eine hohe Verlässlichkeit und geringe Lärmbelastung zu den Grundanforderungen. Auch die Konkurrenzfähigkeit der Kosten und die Verfügbarkeit der Werkstoffe müssen bei der Motorwahl berücksichtigt werden (Bradshaw et al. 2013b; Chau & Li 2014a).

Arten von Traktionsmotoren für E-Pkw

In der Vergangenheit wurden Gleichstrommotoren in Elektrofahrzeugen eingesetzt, da es sich um eine einfache und ausgereifte Technologie handelte. Ihr größter Nachteil ist jedoch der wartungs- und abnutzungsintensive Gleichrichter, der außerdem Kohlenstaub verursacht (Bradshaw et al. 2013b). In Zukunft werden Gleichstrommotoren daher höchstens in stark auf Einfachheit abzielenden Kraftfahrzeugkonzepten Verwendung finden (Chau & Li 2014a). Dominierend werden Drehstrommaschinen sein. Hierbei kommen Synchron- und Asynchronmotoren sowie geschaltete Reluktanzmotoren in Elektrofahrzeugen zum Einsatz.

Synchron- und Asynchronmotoren arbeiten nach dem Prinzip der Lorenzkraft. Kupferspulen am Stator erzeugen ein rotierendes Magnetfeld, so dass der Rotor, an welchem ebenfalls ein Magnetfeld anliegt oder induziert wird, in Bewegung versetzt wird. Rotiert er synchron mit dem Magnetfeld des Stators, handelt es sich um einen Synchronmotor. Dreht sich der Rotor langsamer, spricht man von einem Asynchronmotor.

Asynchronmotoren (ASM) werden auch als Induktionsmotoren bezeichnet. Ihr Rotor („Kurzschlussläufer“ oder „Käfigläufer“) besteht meistens aus einem in Eisenblech eingebetteten, kurzgeschlossenen Käfig aus Aluminium oder Kupfer (s. Kapitel 4.6). Hauptvorteil der Asynchronmotoren sind ihre geringen Kosten. Darüber hinaus sind sie wartungsarm, effizient und technologisch ausgereift. Hauptnachteil ist, dass Masse und Volumen im Vergleich zu anderen Motortypen bei gleicher Leistung groß ausfallen (Bradshaw et al. 2013a; Chau & Li 2014b).

Das Magnetfeld am Rotor eines Synchronmotors kann durch Permanentmagneten erzeugt oder durch Kupferspulen elektrisch induziert werden. Auch eine Kombination aus beidem ist denkbar (Burkhardt et al. 2014). Die Permanentmagnete können an der Oberfläche montiert (SPM) oder integriert (IPM) eingebaut werden. **Elektrisch erregte Synchronmotoren (ESM)** sind mit geringeren Kosten verbunden, haben gegenüber permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren aber auch einen geringeren Wirkungsgrad und sind bei gleicher Leistung größer und schwerer.

Permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren (PSM) zeichnen sich durch die größte Leistungsdichte aus und sind zudem wartungsarm und sehr effizient. Die eingesetzten Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete, vgl. Kapitel 3.3.9) verursachen allerdings hohe Kosten aufgrund der enthaltenen Seltenerdelemente Neodym und Dysprosium. Außerdem lassen sich PSM nicht abschalten, sondern rekuperieren immer, wenn sie die Achse nicht antreiben. Die Rekuperation ist aber nur beim Bremsen gewünscht, nicht z. B. beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit auf der Autobahn, wenn gerade weder gebremst noch beschleunigt wird. Daher kann insbesondere bei häufigen Langstreckenfahrten der ASM vorteilhaft sein (Oppenheimer 2020).

Reluktanzmotoren basieren auf der durch magnetischen Widerstand (Reluktanz) verursachten Ausrichtung eines ferromagnetischen Rotors im Magnetfeld des Stators. Als Traktionsmotoren in elektrischen Kraftfahrzeugen kommen geschaltete Reluktanzmotoren (Switched Reluctance, SR) zum Einsatz, bei denen am Stator durch Ein- und Ausschalten von Kupferspulen ein rotierendes Magnetfeld entsteht. Geschaltete Reluktanzmotoren sind wartungsarm, effizient und mit niedrigen Kosten verbunden, haben jedoch eine geringere Leistungsdichte als permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren. Ein wesentlicher Nachteil ist ihre hohe Lautstärke (Chau & Li 2014a). Entscheidend für ihre zukünftige Marktdurchdringung wird daher sein, inwieweit diese Lautstärke in der Weiterentwicklung der relativ neuen Technologie noch reduziert werden kann.

Sogenannte **Hybridmotoren (HSM)** kombinieren das Reluktanzprinzip mit dem Einsatz von Permanentmagneten. Die Magnete befinden sich allerdings am Stator. Gegenüber den PSM haben diese Motoren den Vorteil, dass sie abgeschaltet werden können und somit keine ungewollte Rekuperation verursachen (Merwerth 2014). Ihre Leistungsdichte und Effizienz ist höher als die von ASM und ESM (Merwerth 2014; Kane 2020).

3.1.2.2 Rohstoffinhalt

Der spezifische Materialbedarf des Traktionsmotors eines Kraftfahrzeugs hängt stark von der Motorgröße ab, die wiederum vom Segment (Klein- bis Oberklassewagen) und der Antriebstechnologie (HEV, PHEV, BEV, FCEV, REEV) beeinflusst wird. Außerdem unterscheidet sich der Rohstoffbedarf der verschiedenen Motortypen.

In konventionell mit Verbrennungsmotor angetriebenen Kraftfahrzeugen werden kleinere Mengen Kupfer für Anlasser und Generator benötigt. Demgegenüber erzeugen elektrische Traktionsmotoren einen deutlichen Mehrbedarf an Kupfer. Kupferspulen werden zur Erzeugung von Magnetfeldern am Stator eines Elektromotors, bei elektrisch erregten Synchronmotoren auch am Rotor eingesetzt. Der Kurzschlussläufer am Rotor der Asynchronmotoren besteht aus Kupfer oder Aluminium.

In permanentmagnetisch erregten Synchronmotoren und Hybridmotoren werden Neodym-Eisen-Bor-Magnete (NdFeB-Magnete) verwendet, welche das Seltenerdelement Neodym (Nd) enthalten. Zur Optimierung der Magneteigenschaften (s. Kapitel 3.3.9) wird ein Teil des Neodyms durch das Seltenerdelement Dysprosium (Dy) substituiert.

Aktuelle Angaben zur Magnetmasse pro Traktionsmotor schwanken zwischen 1,2 – 3 kg. Tab. 3.2 gibt eine Übersicht der eingesetzten Magnetmassen nach Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie basierend auf Glöser-Chahoud & Tercero Espinoza (2015). Zugrunde liegt der nicht lineare Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetmasse.

Angaben zum Dysprosiumanteil sind zum Teil sehr unterschiedlich, liegen jedoch meist zwischen 6,6 % und 12 % Dysprosium. Es wird von dem in Glöser-Chahoud & Tercero Espinoza (2015) berechneten Mittelwert von 8,3 % Dy ausgegangen, woraus sich (bei insgesamt 32 % Sel-

Tab. 3.2: Magnetmasse pro Motor in kg bei verschiedenen Antriebstechnologien und Fahrzeugsegmenten (Quelle: Glöser-Chahoud & Tercero Espinoza 2015)

	HEV	PHEV	BEV/FCEV
Mini	1,2	1,7	1,7
Kompakt	1,5	2,3	2,5
Oberklasse	2,0	2,8	3,0

tenerdelementen) 23,7 % Nd ergeben. Möglich ist eine teilweise Substitution von Nd und Dy durch Praseodym (Pr) und Terbium (Tb), was in Kapitel 3.3.9 näher diskutiert wird.

3.1.2.3 Foresight Industrielle Nutzung

Die Anzahl der im Jahr 2040 verkauften xEV wird direkt aus den Rahmenszenarien Elektromobilität entnommen. Für den entsprechenden Bedarf an den Seltenen Erden Nd/Pr und Dy/Tb ist ausschlaggebend, wie stark sich die verschiedenen Motorkonzepte für Traktionsmotoren durchsetzen. Anhaltspunkte dafür liefern die derzeit eingesetzten Motorkonzepte und die Marktpositionen der dahinterstehenden Unternehmen, die im Folgenden betrachtet werden.

Relevante Hersteller

Die Hersteller mit den höchsten Marktanteilen im Bereich PHEV und BEV in 2020 sind (Pontes 2021):

- Tesla, Inc.
- SAIC Motor Co Ltd (zuvor Shanghai Automotive),
- Volkswagen AG,
- Renault SA – Nissan Motor Co., Ltd.,
- BYD Co Ltd,
- BMW AG.

Weitere Hersteller mit relevanten Absatzzahlen von xEV sind Hyundai, Audi, Volvo, Chery, Wuling, BAIC (Beijing Automotive) und Great Wall Automotive. Auffällig ist die hohe Anzahl chinesischer Automobilunternehmen (SAIC, BYD, Wuling, Great Wall Automotive, Chery). Auch andere asiatische Länder wie Indien, Indonesien, Thailand und Vietnam haben eine zunehmend relevante Automobilproduktion; Unternehmen wie SAIC und Hyundai planen größere Investitionen in Indien (Mordor Intelligence 2020b). Weltweit werden die meisten Autos in China produziert, die ansässigen Automobilunternehmen fokussieren auf eine zunehmende Produktion und einen zunehmenden Verkauf von xEV im eigenen Land (Mordor Intelligence 2020b). Viele chinesische Unternehmen haben Joint Ventures oder Partnerschaften mit ausländischen Unternehmen, z. B:

- Volkswagen/General Motors – SAIC/Wuling,
- BMW – Great Wall Automotive,
- Daimler – BYD,
- Daimler – BAIC,
- Jaguar Land Rover – Chery,
- Volvo – Geely.

Tesla ist das einzige ausländische Unternehmen, welches in China xEV vertreibt, ohne ein Joint Venture mit einem chinesischen Unternehmen zu haben. Dafür hat Tesla selbst große Produktionsanlagen in China. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die in China produzierten xEV ähnliche Technologien verwenden wie die ausländischen Unternehmen.

Aktuelle Technologiewahl

Aktuell kommen folgende Varianten in marktüblichen xEV zum Einsatz (technische Details s. Technologiebeschreibung):

- permanentmagnetisch erregte Synchronmotoren (PSM),
- induktiv erregte Synchronmotoren (ESM),
- elektrisch erregte Asynchronmotoren (ASM),
- Hybridmotoren (HSM), welche mit Permanentmagneten am Stator nach dem Reluktanzprinzip funktionieren.

ESM kommen aufgrund ihrer geringeren Kosten, aber Nachteilen bzgl. extremer Fahrleistungen eher im preissensiblen Segment, also bei Kleinwagen wie Renault Zoe und Smart zum Einsatz (Oppenheimer 2020).

PSM werden aufgrund ihrer Vorteile bei Effizienz und Leistungsdichte in nahezu allen Hybridautos verwendet (Oppenheimer 2020). Auch für vollelektrische Pkw verwenden viele Hersteller diese leistungsstarken, aber vergleichsweise teuren Motoren; so fahren bspw. Nissan Leaf, Hyundai Ioniq, Hyundai Kona, BYD Qin, BYD e6, BYD F3DM, JAC iEV6E, SAIC Roewe E50 mit PSM.

ASM kommen aufgrund ihrer Vorteile bei Langstreckenfahrten vor allem im Hochpreissegment zum Einsatz, z. B. beim Audi e-tron. Ebenfalls beliebt in Hochpreissegment sind Kombinationen von PSM und ASM, durch welche die jeweiligen Vorteile beider Konzepte optimal ausgenutzt werden sollen (Lang 2019; Oppenheimer 2020).

Tab. 3.3: Marktanteile verschiedener Motortechnologien in unterschiedlichen Preissegmenten in 2040

BEV-Klassen	ESM	PSM	ASM	HSM	PSM + ASM	HSM + ASM
Mini	0,3	0,3	0	0,4	0	0
Kompakt	0	0,45	0	0,45	0	0,1
Oberklasse	0	0,15	0,2	0,2	0,15	0,3

BMW setzte 2013 als erstes Unternehmen serienreife **HSM** ein (Merwerth 2014), die im Modell BMW i3 eine marktrelevante Verbreitung fanden. Tesla setzte in der Vergangenheit prinzipiell auf Asynchronmotoren, der Name des Unternehmens ehrt den Erfinder des Asynchronmotors. Seit 2019 wird aber auch die Hybridmotortechnologie genutzt. Die neueren Modelle haben jeweils einen Motor auf der Vorderachse und 1 bis 2 Motoren auf der Hinterachse. Dafür kommen ASM und HSM zum Einsatz (Lambert 2018; Kane 2020).

Szenarien zur zukünftigen industriellen Nutzung

Bei den Annahmen zur zukünftigen Nutzung verschiedener Motorkonzepte (Tab. 3.3) für BEV werden die Stärken und Schwächen der verschiedenen Konzepte hinsichtlich der unterschiedlichen Preissegmente berücksichtigt. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die vergleichsweise neuen Konzepte der Hybridmotoren und der Kombination verschiedener Motoren in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Für HEV und PHEV wird hingegen angenommen, dass die PSM-Technologie hier zu 100 % zum Einsatz kommt. In diesen Fahrzeugen müssen ein elektrischer und ein konventioneller Antriebsmotor Platz finden, so dass die Vorteile des PSM hinsichtlich Leistungsdichte und Effizienz klare Priorität haben.

3.1.2.4 Foresight Rohstoffbedarf

Basierend auf den Annahmen zum Anteil verschiedener Motortechnologien im Jahr 2040 in verschiedenen Preissegmenten (Tab. 3.3) und den benötigten Magnetmengen in verschiedenen Preissegmenten (Tab. 3.2) ergeben sich die durchschnittlich benötigten Magnetmengen. Dabei wird angenommen, dass ein HSM nur 60 % so viel Magnetmaterial benötigt, wie ein PSM (Blagoeva et al. 2019). Auch eine Kombination von ASM und PSM halbiert die benötigte Magnetmenge. Bei einer Kombination aus HSM und ASM beträgt die benötigte Magnetmenge somit nur noch ca. 30 % der Menge, die bei einer reinen PSM-Lösung gebraucht wird.

Für den spezifischen Dysprosiumbedarf 2040 werden aufgrund zahlreicher Forschungsanstrengungen zur Reduktion des Dysprosiumanteils in NdFeB-Magneten die in Tab. 3.4 dargestellten Szenarien betrachtet. Da sich Dysprosium und Neodym in den Magnetmaterialien gegenseitig substituieren, bedeutet eine Reduktion des Dysprosiums bei allen materialwissenschaftlichen Ansätzen eine Erhöhung des Neodymanteils. Es wird angenommen, dass es im SSP5 nur geringe Bemühungen um Materialeffizienz im Allgemeinen gibt, gleichzeitig aber der allgemeine wissenschaftliche Fortschritt rasch voranschreitet und durch die hohen Preise für Dysprosium ein hin-

Tab. 3.4: Szenarien für die Entwicklung des Dy-Anteils in NdFeB-Magneten für Motoren von E-Pkw (Dy-Anteil 2014) (Quelle: Glöser-Chahoud & Tercero Espinoza 2015)

Szenario	Reduktion des Dy-Anteils durch F&E-Fortschritte	Dy-Anteil in NdFeB-Magneten in E-Pkw-Motoren 2040	Nd-Anteil in NdFeB-Magneten in E-Pkw-Motoren 2040
SSP1	[Anteil Dy 2014] – 50 %	4,2 %	27,8 %
SSP2	[Anteil Dy 2014] – 25 %	6,2 %	25,8 %
SSP5	[Anteil Dy 2014] – 25 %	6,2 %	25,8 %

Tab. 3.5: Spezifischer Kupferbedarf für verschiedene Elektromotoren in kg/kW

	ESM	PSM	ASM	HSM	PSM + ASM	HSM + ASM
Kupfer	0,16	0,09	0,16	0,04	0,125	0,1

Tab. 3.6: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Neodym/ Praseodym	23.900 (R) 7.500 (R)	1.430	34.050	31.350	31.960
Dysprosium/ Terbium	1.000 (R) 280 (R)	500	5.140	7.530	7.680
Kupfer	20.590.600 (B) 24.137.000 (R)	33.200	800.000	816.000	772.600

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

reichender Anreiz für eine Materialeffizienzsteigerung gegeben ist. Im SSP2 wird von ähnlichen Einsparungen ausgegangen, der wissenschaftliche Fortschritt ist hier zwar langsamer, bis 2040 sollten aber dennoch moderate Einsparungen möglich sein. Im Nachhaltigkeitsszenario SSP1 wird eine stärkere Ausrichtung auf Materialeffizienz und somit eine starke Reduktion des Dy-Gehalts angenommen.

In dieserr Synopse wird ausschließlich der Rohstoffbedarf für Traktionsmotoren von E-Pkw betrachtet. Zum Bedarf an NdFeB-Magnetmaterial für weitere Automobilanwendungen s. Kapitel 3.3.9 zu Hochleistungs-Permanentmagneten.

Tab. 3.6 zeigt die aus den Szenarien resultierenden Bedarfe an den Seltenen Erden Neodym (bzw. Substitut Praseodym) und Dysprosium (bzw. Substitut Terbium, Details s. Kapitel 3.3.9) im Jahr 2040. Die aggregierte Fördermenge der Seltenen Erden betrug 2018 laut BGR (2021) 151.200 t in Metallinhalt. Die sehr ähnlichen Werte für Nd in allen drei Szenarien ergeben sich aus der Überlagerung verschiedener Effekte. So gibt es in SSP1 im Jahr 2040 zwar deutlich mehr BEV, aber auch deutlich weniger HEV als in SSP2 und SSP5. Aufgrund der Dominanz der PSM-Motortechnologie bei HEV und PHEV ergeben sich insgesamt vergleichbare Bedarfserwartungen für Neodym. Beim Dysprosium liegen die Bedarfserwartungen in SSP2 und SSP5 sogar deutlich über SSP1, da in SSP1 von einer stärkeren Reduzierung des Dy-Gehalts in den Magneten durch Effizienzbemühungen ausgegangen wird. Die Werte für 2018 wurden ebenfalls aus Schätzungen für den aktuellen Anteil verschiedener Motortechnologien und den Verkaufszahlen der Rahmenszenarien Mobilität errechnet.

Zur Berechnung des Kupferbedarfs für elektrische Traktionsmotoren wird auf eine Studie von IDTechX für den Kupferverband zurückgegriffen (ICA 2020), in der für verschiedene Motortypen mittlere spezische Kupferbedarfe zwischen 0,04 und 0,16 kg/kW genannt werden, vergleiche Tab. 3.5. Unterstellt man für die Fahrzeugsegmente Mini, Kompakt und Oberklasse die Motorleistungen von 50, 85 und 150 kW im Jahr 2040 und die Zulassungszahlen der Elektrofahrzeuge aus Kapitel 1.3.2, so errechnen sich die Kupferbedarfe wie in Tab. 3.6 dargestellt.

3.1.2.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Zu entsorgende Traktionsmotoren aus E-Pkw werden in Deutschland derzeit in der Regel dem Kupfer-Recyclingstrom zugeführt (Bast et al. 2015). Es ist zwar technisch möglich, die NdFeB-Magnete zerstörungsfrei aus den Motoren zu entfernen und wiederzuverwenden. Durch den Einsatz verschiedener Geometrien und Legierungen und die stetige Weiterentwicklung der Magnet- und Motortechnologien wird die direkte Wiederverwendung allerdings erschwert. Gelingt jedoch das sortenreine Sammeln von NdFeB-Magneten in einem separaten Abfallstrom, ist ein werkstoffliches Recycling durch Wasserstoffversprödung möglich, was aber zu Verlusten bei der Remanenz (Restmagnetisierung) von ca. 3 % führt. Durch rohstoffliches Recycling mittels hydrometallurgischer Aufbereitung können reine Seltene Erden als Oxide zurückgewonnen werden. In Deutschland ist die Reduktion dieser Oxide zu reinen Metallen jedoch derzeit technisch nicht möglich (Bast et al. 2015).

2040 wird das Recycling von NdFeB-Magneten nach ihrem Einsatz in E-Pkw-Traktionsmotoren in Deutschland wahrscheinlich wirtschaftlich sein, wobei dies von Mengenaufkommen, Rohstoffpreisen und dem Anteil der teureren schweren Seltenerdelementen Dysprosium und Terbium abhängen wird (Bast et al. 2015).

3.1.3 Legierungen für den Airframe-Leichtbau

3.1.3.1 Technologiebeschreibung

Der Airframe stellt die mechanische Struktur eines Flugzeuges dar. Diese beinhaltet Rumpf, Tragflächen, Triebwerksgondel, Verkleidung, Heck und Fahrgestell (s. Abb. 3.2 und Aviation Safety Bureau 2007). Bei der Entwicklung neuer Flugzeugmodelle spielt die Optimierung der für den Airframe verwendeten Werkstoffe eine bedeutende Rolle. Grundlegende Voraussetzungen für ein geeignetes Material sind eine hohe Korrosions- sowie Ermüdungsbeständigkeit, Schadenstoleranz, Steifigkeit und Festigkeit. Besonders wichtig ist die möglichst geringe Dichte des Materials, die zur Gewichtsreduktion des Flugzeugs und somit zu Treibstoffeinsparungen führt. Performanz, Gewicht und Kosten geeigneter Materialien müssen dann erwogen werden. Aufgrund ihrer Leichtigkeit waren Aluminiumlegierungen jahrzehntelang die dominierenden Werkstoffe im Airframe-Leichtbau. Diese sind aber starker Konkurrenz von Verbundwerkstoffen ausgesetzt, die in neu entwickelten Airframes zunehmend einen großen Anteil der Flugzeugstruktur ausmachen (Frost & Sullivan 2016; AIRBUS 2018; Frost & Sullivan 2019).



Abb. 3.2: Schematische Darstellung des Airframes eines Passagierflugzeugs, bestehend aus Rumpf, Tragflächen, Triebwerksgondel, Verkleidung, Heck und Fahrgestell (Quelle: mit freundlicher Genehmigung von E. Tercero Daschner)

3.1.3.2 Rohstoffinhalt

Legierungen

Aluminiumlegierungen haben sich für den Airframe-Leichtbau bewährt. Trotz des beachtlichen Anstiegs in der Nutzung von Verbundwerkstoffen in neueren Flugzeugmodellen (s. unten), bleiben Aluminiumlegierungen das meistbenutzte Material im Flugzeugbau (Frost & Sullivan 2016; Frost & Sullivan 2019). Dies ist auf die große Zahl an Kurz- und Mittelstreckenflugzeugen (z. B. die Airbus 320-Familie und Boeing 737) im Vergleich zu Großraumflugzeugen zurückzuführen (s. Abb. 3.3). In Regionalflugzeugen wird Aluminium auch in neueren Entwicklungen zumindest teilweise bevorzugt (Mraz 2014; Morimoto et al. 2017).

Herkömmliche Aluminiumwerkstoffe müssen genietet werden. Neuere Entwicklungen, insb. Aluminium-Lithium-Legierungen (Al-Li), erlauben jedoch das Schweißen mit Lasern und/oder durch Rührreibschweißen, was erhebliche Kosteneinsparungen ermöglicht (Angerer et al. 2009; siehe z. B. Constellium 2017c; Constellium 2017f). Die Zugabe von Scandium (Sc) erlaubt ebenfalls das Schweißen mit Lasern (Angerer et al. 2009). Aufgrund des hohen Scandiumpreises sind Al-Sc-Legierungen im Flugzeugbau jedoch gegenwärtig nicht konkurrenzfähig und werden lediglich in Nischenmärkten benutzt (Djukanovic 2017; Dorin et al. 2018).

Anders als Al-Sc-Legierungen gewinnen Al-Li-Legierungen an Bedeutung und werden als Bleche, Platten oder Gussteile kommerziell verwendet, z. B. in der Boeing 787 und im Airbus A350 XWB und A380 (Constellium o. J.; Constellium 2013; Aluminium-Messe 2014; Arconic 2020). Die gewichtssparenden Aluminiumbauteile können ohne oder mit nur geringen Änderungen an der Flugzeugkonstruktion in bestehende Baureihen eingefügt werden (Aluminium-Messe 2014). Die Zusammensetzung einiger kommerziell erhältlichen Al-Li-Legierungen wird in Tab. 3.7 gezeigt.

Titan und seine Legierungen haben ebenfalls einen festen Platz im Flugzeugbau aufgrund ihrer geringen Dichte, hoher Korrosionsbeständigkeit und Festigkeit auch bei erhöhten Temperaturen (Frost & Sullivan 2016; Pervaiz et al. 2019). Titanlegierungen werden in Verbundwerkstoffkonstruktionen bevorzugt, da es an der Verbindung zwischen Aluminium- und Verbundwerkstoffbauteilen zu Korrosion kommt. Folglich steigt die Verwendung von Titan mit steigender Verwendung von Verbundwerkstoffen (AIRBUS 2018). Von früher unter 10 % Gewichtsanteil (Sibum et al. 2003-2020) erreicht der Gewichtsanteil an Titan- und Titanlegierungen in der Verbundwerkstoffreichen Boeing 787 und dem Airbus A350 XWB 14 – 15 % (Dursun & Soutis 2014; Frost & Sullivan 2016).

Die Verarbeitung von Metallbauteilen für den Flugzeugbau ist traditionell subtraktiv: massive Metallhalbzeuge werden vielfach zur gewünschten Endform gefräst (López de Lacalle et al. 2011). Dadurch wird weit über 80 % des Materials entfernt (López de Lacalle et al. 2011; AIRBUS 2018). Dies ändert sich im Moment durch den

Tab. 3.7: Legierungsbestandteile einiger kommerziell erhältlicher Aluminium-Lithium-Legierungen (Quellen: Constellium 2017a, Constellium 2017b, Constellium 2017c, Constellium 2017d, Constellium 2017e, Constellium 2017f, Constellium 2017g)

Legierung	Li	Cu	Mn	Mg	Ag	Zr
2098	0,8 – 1,3 %	3,2 – 3,8 %	Max. 0,35 %	0,25 – 0,80 %	0,25 – 0,60 %	0,04 – 0,18 %
2195	0,8 – 1,2 %	3,7 – 4,3 %	Max. 0,25 %	0,25 – 0,80 %	0,25 – 0,60 %	0,08 – 0,16 %
2065	0,8 – 1,5 %	3,8 – 4,7 %	0,15 – 0,50 %	0,25 – 0,80 %	0,15 – 0,50 %	0,05 – 0,15 %
2198	0,8 – 1,1 %	2,9 – 3,5 %	Max. 0,50 %	0,25 – 0,80 %	0,10 – 0,50 %	0,04 – 0,18 %
2196	1,4 – 2,1 %	2,5 – 3,3 %	Max. 0,35 %	0,25 – 0,80 %	0,25 – 0,60 %	Max. 0,35 %
2050	0,7 – 1,3 %	3,2 – 3,9 %	0,20 – 0,50 %	0,20 – 0,60 %	0,20 – 0,70 %	0,06 – 0,14 %
2297	1,1 – 1,7 %	2,5 – 3,1 %	0,10 – 0,50 %	Max. 0,25 %		0,08 – 0,15 %

Anmerkungen: Alle dargestellten Legierungen enthalten auch bis zu 0,12 % Si und bis zu 0,15 % Fe; die meisten davon ebenfalls bis zu 0,10 % Ti und bis zu 0,35 % Zn.

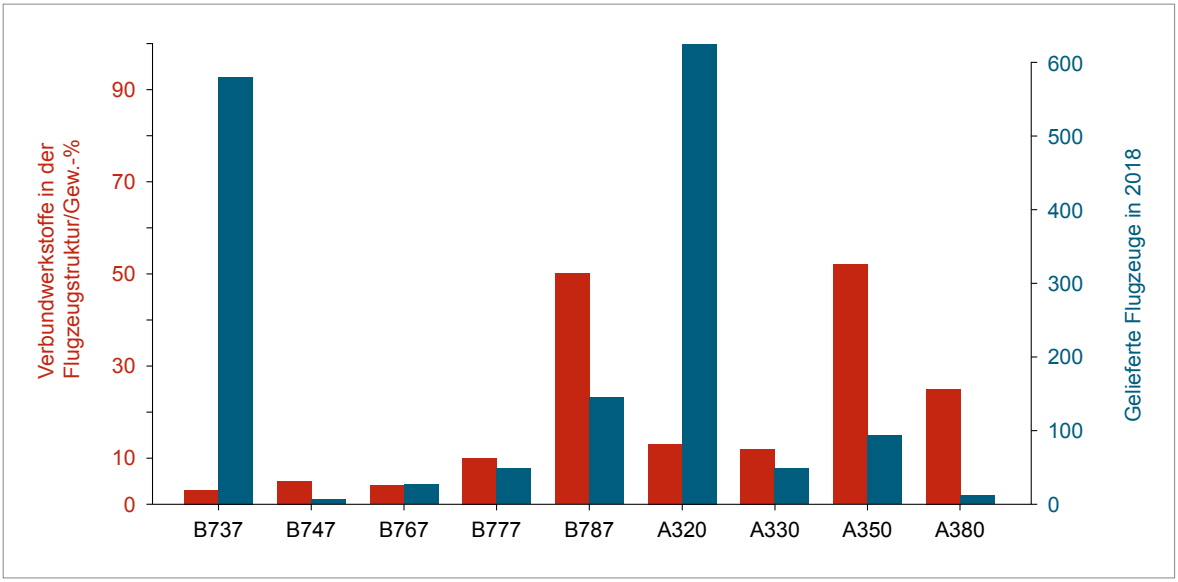


Abb. 3.3: Verbundwerkstoffanteil im Airframe aktueller Flugzeugmodelle von Airbus und Boeing und die entsprechende Anzahl an ausgelieferten Flugzeugen im Jahr 2018

Einsatz von additiven Fertigungsverfahren (AIRBUS 2018). Hierfür werden Titanlegierungen aber auch Aluminiumlegierungen entwickelt und bereits kommerziell angeboten (APWORKS o. J.; AIRBUS GROUP 2015; METAL AM 2020).

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK)

Hochleistungs-Al-Legierungen bleiben weiterhin ein wichtiger Bestandteil im zivilen Flugzeugrahmenbau, verlieren aber ihre eindeutige Dominanz durch die vermehrt eingesetzten Verbundwerkstoffe, wobei es sich hauptsächlich um kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe handelt (DURSUN & SOUTIS 2014). Diese Kompositmaterialien sind mit ca. 50 Gew.-% (AIRWISE 2013) bereits Hauptbestandteile der Großraumflugzeuge Boeing 787 Dreamliner (Erstflug: 2009) und Airbus A350 (Erstflug: 2013). Al-Legierungen machen nur noch 20 Gew.-% aus. Das vor dem A350 fertig gestellte Airbus-Modell A380 (Erstflug: 2005) besteht noch zu 25 Gew.-% aus Verbundwerkstoffen, wovon 85 Gew.-% CFKs sind (WOIDASKY & JEANVRÉ 2015). Abb. 3.3 zeigt den Verbundwerkstoffanteil verschiedener Flugzeugmodelle von Airbus und Boeing. Da Schmalrumpf-Flugzeuge auch dünnere Bleche für die Außenhaut benötigen, ist dort die Gewichtseinsparung durch die Nutzung von Verbundwerkstoffen auch geringer (SLOAN 2020), und diese kleinere, deutlich häufiger verkauften Modelle bestehen hauptsächlich aus Aluminiumlegierungen (s. Abb. 3.3). Darüber hinaus ist die Produktion von Verbundwerkstoffteilen in der erforderlichen Stückzahl für die Airbus A320-Familie und Boeing 373-Serie mit der gegenwärtig dominierenden Technologie nicht möglich. Die Entwicklung entsprechender Lösungen wird vorangetrieben (SLOAN 2020).

3.1.3.3 Foresight Industrielle Nutzung

Die drei Flugzeughersteller Airbus, Boeing und Bombardier stellen und veröffentlichen detaillierte Prognosen für die globalen Flugzeugmärkte. In den neuesten Auflagen gehen alle drei von stetigem und starkem Wachstum der Flugzeugnachfrage aus, gestützt v. a. auf Wirtschaftswachstum sowie einer Vielzahl anderer Treiber (BOMBARDIER 2017; AIRBUS 2019a; BOEING 2019a). Die Erwartung ist eine etwas mehr als Verdoppelung der Flugzeugflotte in den kommenden 20 Jahren. Das Wachstum der Flugzeugflotte wird v. a. von Schmalrumpfflugzeugen getrieben, die ihren großen Anteil (derzeit ca. 70 %) an der Flugzeugflotte sogar ausbauen sollen.

Noch vor dem Ausbruch der Covid-19-Pandemie thematisierten Airbus und Boeing die Resilienz des Flugverkehrssektor anhand historischer

Daten vergangener geopolitischer und wirtschaftlicher Krisen (AIRBUS 2019a; BOEING 2019a). Diese Krisen hatten den Effekt, dass die Passagierzahlen für 1 bis 3 Jahre stagnierten bzw. leicht zurückgingen, um danach wieder das gleiche bzw. sogar stärkere Wachstum zu zeigen. Die Covid-19-Pandemie ist jedoch andersartig und hat bisher zu einem starken Einbruch, nicht Stagnation, der Passagierzahlen geführt. Die Flugzeugproduktion bei beiden großen Herstellern ist in der ersten Hälfte des Jahres 2020 stark gesunken (ca. 40% für Airbus, über 50% für Boeing in Q1 2020; ARGUS MEDIA 2020). Es ist deshalb zu erwarten, dass die Effekte deutlicher und länger anhaltend sein werden, so dass die erst kürzlich veröffentlichten Prognosen trotz historischer Resilienz des Sektors aus heutiger Sicht eher optimistisch erscheinen.

Für die Abschätzung des Passagier-Flugzeugmarktes wurden folgende Annahmen getroffen:

– Flugzeugkategorien wie bei Boeing (BOEING 2019a): Schmalrumpf- und Großraumflugzeuge, da diese besser mit der Flugzeugzusammensetzung korrelieren als die von Airbus genutzte Kategorien (klein, mittel, groß), weil die mittlere Kategorie nicht nur Aluminium- sondern auch CFK-lastige Flugzeuge beinhaltet.

– Wachstumsrate der Flugzeuglieferungen: 2,7 % für Schmalrumpf- und 0,9 % für Großraumflugzeuge basierend auf den Prognosen von AIRBUS (2019a) und BOEING (2019a).

– Covid-19-Anpassung: 40 % Einbruch in Flugzeuglieferungen in 2020, wobei der Einbruch bei Schmalrumpfflugzeugen stärker ausfällt als bei Großraumflugzeugen, und Steigung zum „normalen“ Verlauf bis 2024. Dies ergibt insgesamt 11 % weniger Flugzeuglieferungen in 2040 (ca. 1.900 Schmalrumpf- sowie ca. 440 Großraumflugzeuge) verglichen mit den Prognosen in AIRBUS (2019a) und BOEING (2019a) und vergleichbar mit BOEING (2020).

– Es wird angenommen, dass die Prognosen der Flugzeughersteller am ehesten dem SSP2-Szenario entsprechen. Da Flugzeuglieferungen mit dem Wirtschaftswachstum gut korrelieren, wird das Szenario in Abb. 3.4 zunächst mit Hilfe der BIP-Szenarien (DELLINK et al. 2017; RIAHI et al. 2017) skaliert. Beim SSP5 „Fossiler Pfad“ wird mit einer wesentlich stärkeren Zunahme des Flugverkehrs gerechnet, getrieben durch sehr starkes Wirtschaftswachstum gekoppelt mit schwach ausgeprägtem Umweltbewusstsein (vgl. Tab. 1.2), so dass sich für das Jahr 2040 ein Bedarf von ca. 3.250 (statt 2.350 in SSP2) Flugzeugen ergibt. Im SSP1-Szenario fällt die Zunahme des Flugverkehrs trotz hohem Wirtschaftswachstum aufgrund des großen Umweltbewusstseins nicht so stark aus, so dass der Bedarf an neuen Flugzeugen auf insgesamt ca. 2.200 beziffert wird.

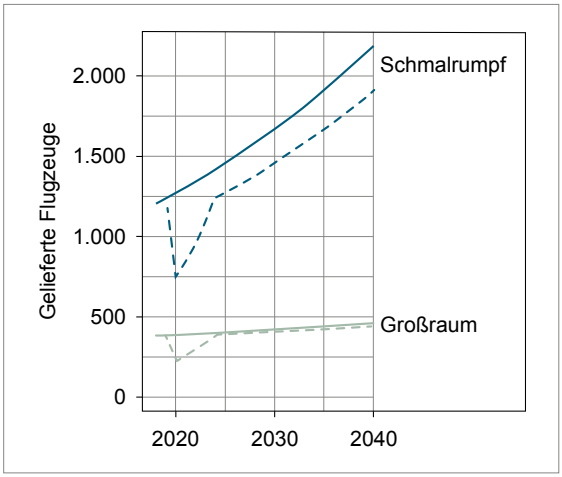


Abb. 3.4: Angenommene Flugzeuglieferungen bis 2040 im SSP2-Szenario (Quelle: geändert nach AIRBUS (2019a) und BOEING (2019a); siehe Erläuterungen im Text)

3.1.3.4 Foresight Rohstoffbedarf

Die Luftfahrtbranche wird bis 2040 weiterhin eine breite Mischung aus Materialien benutzen (vgl. AIRBUS 2018). Derzeit ergibt sich eine gewisse Zweiteilung, in der Großraumflugzeuge bevorzugt Verbundwerkstoffe und Schmalrumpfflugzeuge bevorzugt Aluminiumwerkstoffe benutzen. Allerdings ist in diesem Zeitraum ein Neudesign der verkaufsstarken Airbus A320 und Boeing 737 (bei Schmalrumpfflugzeugen) zu erwarten, und diese könnten einen vermehrten Einsatz von Verbundwerkstoffen zulasten von Aluminium mit sich bringen (SLOAN 2020). Allerdings spielt bei der Materialwahl nicht nur Gewicht eine Rolle, auch

Tab. 3.8: Annahmen zur Airframezusammensetzung (Anteile an Aluminiumlegierungen, Stahl, Titan und Titanlegierungen sowie Verbundwerkstoffe im Jahr 2040)

Kategorie	Leergewicht	Al	Stahl	Ti	Verbundwerkstoffe
Schmalrumpf	40 t	72 %	10 %	12 %	6 %
Großraum	110 t	20 %	8 %	15 %	51 %

neuere Entwicklungen in Schmalrumpfflugzeugen setzen auf Aluminium statt auf Verbundwerkstoffe (Morimoto et al. 2017; AIRBUS 2018). Durch den vermehrten Einsatz von 3D-Druck in der Flugzeugherstellung entstehen neue Möglichkeiten für Metalllegierungen (AIRBUS 2018).

Es wird deshalb angenommen, dass im Schmalrumpfflugzeugsegment Aluminiumwerkstoffe bis 2040 den Flugzeugrahmenbau dominieren. Des Weiteren wird unterstellt, dass Al-Li-Legierungen bis 2040 herkömmliche Aluminiumwerkstoffe ablösen. Für das Großraumflugzeugsegment wird angenommen, dass die Dominanz von Verbundwerkstoffen sich bis 2040 festigen und der Materialmix näherungsweise dem des A350 XWB und B787 entsprechen wird.

Die genauen Anteile der Legierungselemente in Al-Li-Legierungen sind in der Regel Betriebsgeheimnis. Um eine ungefähre Größenordnung des Lithiumbedarfs für Al-Li-Legierungen im Flugzeugrahmenbau zu ermitteln, wird sich an den Produktdaten der Tab. 3.7 orientiert, die eine breite Palette an Aufgaben im Flugzeugrahmenbau abdecken. Die Mittelwerte der angegebenen Konzentrationsbereiche sind 1,2 % Li, 3,5 % Cu, 0,25 % Mn, 0,5 % Mg, 0,35 % Ag und 0,1 % Zr. Titanlegierungen werden vereinfacht als Titan betrachtet.

Der Einfluss der Covid-19-Pandemie wird vereinfacht wie folgt modelliert: 40 % Rückgang in der Flugzeugherstellung in 2020 im Vergleich zu 2019, mit Rückkehr zum Vorkrisenniveau im Jahr 2024. Danach wird das Wachstum angelehnt an die Wachstumsprognosen der großen Flugzeughersteller berechnet (s. Abb. 3.4). Die Differenz in den Rohstoffbedarfen zwischen den Vor-Covid-19-Prognosen der Flugzeughersteller und der einfachen Covid-19-Anpassung im SSP2-Szenario beträgt im Jahr 2040, je nach Material, 9 – 12 %.

Das Zusammenspiel dieser Annahmen und Szenarien ergibt für das Jahr 2040 Bedarfe von 330.000 bis 480.000 t Al, 4.200 bis 6.200 t Li, 12.000 bis 18.000 t Cu, 1.700 bis 2.600 t Mg, 1.200 bis 1.800 t Ag und 75.000 bis 110.000 t Titan. Kupfer wird auch heute schon in Aluminiumlegierungen eingesetzt. Diese Abschätzungen beziehen sich auf die für die Flugzeugrumpfherstellung notwendigen Rohstoffe, nicht auf den Rohstoffinhalt der Flugzeuge. Insbesondere bei metallischen Werkstoffen wird viel Produktionsabfall generiert (AIRBUS 2018).

Tab. 3.9: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe für Airframe-Leichtbau-Legierungen in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Kupfer	20.590.600 (B) 24.137.000 (R)	11.000	12.000	13.000	18.000
Lithium	95.170 (B)	gering	4.200	4.400	6.200
Silber	28.083 (B)	gering	1.200	1.300	1.800
Titan	260.548 (R)	57.000	75.000	80.000	110.000

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

3.1.3.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Das Recycling von Aluminiumlegierungen aus dem Flugzeugbau ist bereits gut etabliert. Dies folgt von dem ungünstigen Verhältnis zwischen eingekauftem Material und Material im Endprodukt (das sog. Buy-to-Fly-Verhältnis, AIRBUS 2018) sowie dem hohen intrinsischen Wert der Legierungen. Aluminiumlieferanten für den Flugzeugbau benutzen deshalb nur ca. 25 % Primäraluminium und 75 % Produktionsschrotte (Michaels 2018). Aluminiumrecycling aus Altprodukten ist ebenfalls etabliert. Die Entsorgung von Altflugzeugen bzw. Komponenten davon ist v. a. durch strenge Vorschriften bzw. Nachverfolgbarkeit und Dokumentation geprägt. Dabei ist der Wert bei Wiederverwendung der Teile um ein Vielfaches höher als der Materialwert. Durch Identifikation und Getrennthaltung ist die Wiedergewinnung hochwertiger Al-Legierungen aus Altflugzeugen möglich. Diese werden jedoch nicht in Strukturteilen wiederverwendet (Woidasky & Jeanvré 2015; Woidasky et al. 2017). Außerdem entwickeln sich die Legierungen mit der Zeit weiter und sind somit heute nicht notwendigerweise für die ursprünglich vorgesehene Funktion nutzbar.

Mit der Verschrottung größerer Mengen von Flugzeugen mit nennenswerten Anteilen an Verbundwerkstoffen wird erst nach 2030 gerechnet. Zurzeit entstehen deshalb vor allem Produktionsschrotte von Verbundwerkstoffen, aber deren Menge ist als vergleichsweise gering einzuschätzen (AIRBUS 2018). Darüber hinaus ist das Recycling oder Entsorgung von Verbundwerkstoffen generell mit vielerlei technischen Schwierigkeiten verbunden. In diesem Bereich bestehen Parallelen zum Bau von Windkraftanlagen. An das Recycling von diesen Materialien wird derzeit aktiv geforscht.

Es ist zu erwarten, dass die stärkere Nutzung von additiven Verfahren zu besseren Buy-to-Fly-Verhältnissen führen werden (AIRBUS 2018). Angesichts der hohen Recyclingraten bei Produktionsschrotten sollte der Effekt für die Primärnachfrage gering bleiben.

3.1.4 Automatisches Pilotieren von Kraftfahrzeugen

3.1.4.1 Technologiebeschreibung

Übernimmt ein computergesteuertes System die Fahraufgabe vom Fahrer in einem beliebigen Verkehrsmittel, dann spricht man in der Fachsprache von „automatisiertem Fahren“ oder dem „automatischen Pilotieren von Kraftfahrzeugen“. Umgangssprachlich wird jedoch oftmals noch der Begriff des „autonomen Fahrens“ verwendet. Die Übernahme von Fahraufgaben kann dabei sehr unterschiedlich im Umfang sein, weil der Großteil der Hersteller und Zulieferer von Fahrzeugen das automatisierte Fahren in Evolutionsstufen einführt. Vor diesem Hintergrund haben sich die Fahrzeughersteller auf Basis der Arbeiten der SAE (Society of Automotive Engineers) auf die folgenden fünf Stufen des automatisierten Fahrens geeignet:

Stufe 1 – Assistiertes Fahren
Die Vorstufe auf dem Weg zum automatisierten Fahren ist das assistierte Fahren mittels Fahrassistenzsysteme. Hierbei wird in gewissen Grenzen entweder die Längs- oder die Querführung des Fahrzeugs übernommen, wobei der Fahrer das System dauerhaft überwachen und zum Eingreifen bereit sein muss.

Stufe 2 – Teilautomatisiertes Fahren
Beim teilautomatisierten Fahren übernimmt das System sowohl die Längs- als auch die Querführung des Fahrzeugs für einen gewissen Zeitraum oder in spezifischen Situationen. Der Fahrer muss das System jedoch nach wie vor dauerhaft überwachen und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe in der Lage sein.

Stufe 3 – Hochautomatisiertes Fahren
Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal hochautomatisierter Fahrfunktionen im Vergleich zu den vorangegangenen Automatisierungsstufen ist die zeitliche begrenzte Übernahme der Längs- und Querführung durch das Fahrzeug oder in spezifischen Situationen und der Fahrer das System nicht mehr dauerhaft überwachen muss. Er muss dabei jedoch immer in der Lage sein, die Fahraufgabe nach Aufforderung mit einer angemessenen Zeitreserve wieder vollständig und sicher zu übernehmen.

Stufe 4 – Vollautomatisiertes Fahren
Beim vollautomatisierten Fahren übernimmt das System die Fahrzeugführung in einem definierten Anwendungsfall vollständig und bewältigt alle damit verbundenen Situationen automatisch.

Stufe 5 – Fahrerloses Fahren
Beim fahrerlosen Fahren als höchste Stufe der Automatisierung übernimmt das System die Fahrzeugführung vollständig vom Start bis zum Ziel auf allen Straßentypen, in allen Geschwindigkeitsbereichen und bei allen Umfeld- und Wetterbedingungen. Alle im Fahrzeug befindlichen Personen werden damit zu Passagieren.

Das automatische Pilotieren von Kraftfahrzeugen startet nach dem 5-Stufen-Schema somit mit der Stufe der Teilautomatisierung. Bei Kraftfahrzeugen auf der Straße steht man heute bereits auf der Schwelle von Stufe 3, dem hochautomatisierten zu Stufe 4, dem vollautomatisierten Fahren. 2018 wurde mit dem Audi A8 das erste Serienfahrzeug mit Stufe 3 auf den Markt gebracht. Waymo arbeitet seit Herbst 2020 in verschiedenen Städten der USA bereits mit vollautomatisierten Fahrzeugen im Taxibetrieb (Waymo One). Auf der Schiene und im Luftverkehr hingegen gibt es bereits seit vielen Jahren vollautomatisierte Systeme. Die Einführung der Automatisierung im Straßenverkehr begann jedoch bereits mit einer Vielzahl von Fahrerassistenzsystemen (ADAS – Advanced Driver Assistance Systems) in den 1950er Jahren mit der serienmäßigen Einführung von Bremskraftverstärker und Servolenkung. 1958 bot Chrysler erstmals einen Tempomat in einem Serienfahrzeug an. Seit 1985 ist das Antiblockiersystem (ABS) und daraus abgeleitet die Antischlupfregelung (ASR) und der automatisch schaltende Allradantrieb in Serienfahrzeugen erhältlich. 1987 brachte Toyota das erste GPS-geführte Navigationssystem auf den Markt und seit 1995 ist die elektronische Stabilitätskontrolle (ESP) verfügbar. Heute sind in Neufahrzeugen zahlreiche Steuergeräte verbaut, neben der Motorregelung vor allem für Assistenzsysteme. Die Innovationsgeschwindigkeit bei Assistenzsystemen hat sich in den letzten Jahren sehr dynamisch entwickelt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die parallele Entwicklung von automatisierten Kraftfahrzeugen außerhalb der klassischen Automobilindustrie. Große IT-Unternehmen, wie Google (mit Waymo) und Apple, aber auch neue Player in der Automobilindustrie wie Tesla geben eine hohe Schlagzahl vor. Die klassischen OEM und Zulieferer wollen und müssen dabei mithalten, um nicht zum reinen Produzenten der fahrbaren Hülle degradiert zu werden. Technisch gesehen sind wesentlicher Treiber dieser dynamischen Entwicklung die zunehmende Leistungsfähigkeit von Prozessoren und Speichern, Sensoren und Aktuatoren, die Entwicklung von Algorithmen zum Handling von Big Data in der Kombination mit Künstlicher Intelligenz sowie den stetig fallenden Preisen dieser Komponenten.

In Tab. 3.10 sind beispielhaft Assistenzsysteme zusammengestellt und nach Entwicklungsstand gruppiert. Die Übersicht zeigt die technologische Vielfalt an Unterstützungsfunktionen, erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es werden Einzelsysteme aufgeführt und Cluster, die mehrere Einzelsysteme bündeln wie bei „Teilautomatischem Fahren“. „Im Markt“ heißt, dass das System als Ausrüstung von Serienfahrzeugen bei den Fahrzeugherstellern geordert werden kann.

Assistenzsysteme sowie die gesamten Automatisierungsfunktionen, die zum pilotierten Fahren benötigt werden, sind auf leistungsfähige Sensoren und Steuergeräte angewiesen, die jederzeit und unter allen Rahmenbedingungen und Wettersituationen valide Informationen über das Fahrzeugumfeld bereitstellen. Bei der Zusammensetzung dieser Systemkomponenten zur Erfüllung der Voraussetzungen für eine bestimmte Automatisierungsstufe gehen die OEMs zum Teil sehr unterschiedlich vor. Während Tesla beispielweise in den derzeit für die Funktion des Full Self Driving (entspricht der Automatisierungsstufe 4) auf das Zusammenspiel von derzeit bis zu acht Kameras, ein Fernbereichs- und ein Nahbereichs-RaDAR sowie neun Ultraschallsensoren setzt, stattet Audi seine Fahrzeuge wie den A8 für die Automatisierungsstufe 3 mit fünf Kameras, vier Mittelbereichs-RaDARen, ein Fernbereichs-RaDAR, zwölf Ultraschallsensoren und ein Laserscanner (LiDAR) aus. Mit Ausnahme von Tesla setzen derzeit jedoch alle anderen OEMs auf mindestens ein LiDAR bei der Ausstattung der Fahrzeuge mit Sensoren. Anhand von Experteninterviews sowie der Auswertung von Sekundärliteratur haben Krail et al. (2019) eine Abschätzung über die pro Automatisierungsstufe häufigste Verteilung und Anzahl der benötigten System-Komponenten vorgenommen (siehe Tab. 3.11).

Tab. 3.10: Fahrerunterstützungs- und Assistenzsysteme (Quelle: Eigene Recherchen)

	System	Entwicklungsstand
1.	Bremskraftverstärker (Servobremse)	Im Markt seit den 1950er
2.	Servolenkung	Markteinführung 1951
3.	Tempomat	Markteinführung 1958
4.	ABS	Markteinführung 1985
5.	Antischlupfregelung (ASR)	Markteinführung 1985
6.	Automatisch schaltender Vierradantrieb	Markteinführung 1985
7.	GPS-Navigation	Markteinführung 1987
8.	ESP	Markteinführung 1995
9.	Abstandsregeltempomat (ACC)	Im Markt
10.	Anfahrhilfe für Steigungen	Im Markt
11.	Einparkhilfe	Im Markt
12.	Fahreraufmerksamkeitsassistent	Im Markt
13.	Fernlichtassistent	Im Markt
14.	Fußgängerschutzsystem	Im Markt
15.	IR-Wärmebildkamera für Nachtfahrten (night vision)	Im Markt
16.	Kurvenlichtassistent	Im Markt
17.	Notbremsassistent (collision avoidance system)	Im Markt
18.	Reifendruckkontrolle	Im Markt
19.	Rückfahrkamera	Im Markt
20.	Seitenwindassistent	Im Markt
21.	Sicherheitsgurtstraffer	Im Markt
22.	Spurhalteassistent	Im Markt
23.	Spurwechselassistent	Im Markt
24.	Teilautomatisches Fahren	Im Markt
25.	Telefonassistent	Im Markt
26.	Totwinkelassistent	Im Markt
27.	Verkehrszeichenerkennung	Im Markt
28.	Warnassistent bei Falschfahrt	Im Markt
29.	Unfallassistent (Positionsmeldung u. a.)	Im Markt
30.	Elektronische Deichsel für Lkw	In der Markteinführung
31.	Ferngesteuertes automatisches Parken	Im Markt
32.	Intelligent speed limit adaptation	Im Markt
33.	Automatischer Kreuzungsassistent	Im Markt
34.	Hochautomatisiertes Fahren	Im Markt
35.	Vollautomatisiertes Fahren	In der Markteinführung
36.	Fahrerloses Fahren	In der Entwicklung

Tab. 3.11: Durchschnittliche Anzahl der benötigten Systemkomponenten (Quelle: KRAIL et al. 2019)

Komponenten	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Ultraschall	9	9	9	9	9
Radar	2	4	4	8	8
Lidar	0	0	1	1	1
Kamera	0	2	5	5	5
DSRC	1	1	1	1	1
GNSS Positioning	1	1	1	1	1
V2X Modul	1	1	1	1	1
Steuergeräte	1	1	2	3	3

Die Informationen über das Fahrumfeld werden somit derzeit in den verfügbaren Serienfahrzeugen, aber auch in den Prototypen der OEMs, Zulieferer sowie der weiteren Hersteller (Waymo, etc.) durch optische Kameras im sichtbaren und IR-Lichtwellenspektrum, durch Ultraschallsensoren, durch Radarsensoren und Laserscanner bzw. LiDAR-Sensoren gewonnen. Abb. 3.5 zeigt die Sensorausstattung des ersten mit Stufe 3 verfügbaren hochautomatisierten Serienfahrzeugs, dem Audi A8.

Eine zentrale Komponente für die Gewinnung von Daten zur Erstellung eines räumlichen Bilds der Umgebung ist der Laserscanner. Der Laserscanner ist technisch ein LiDAR (Light Detection And Ranging), das mit Hilfe von monochromatischer Laserstrahlung auf optischem Weg Entfernung

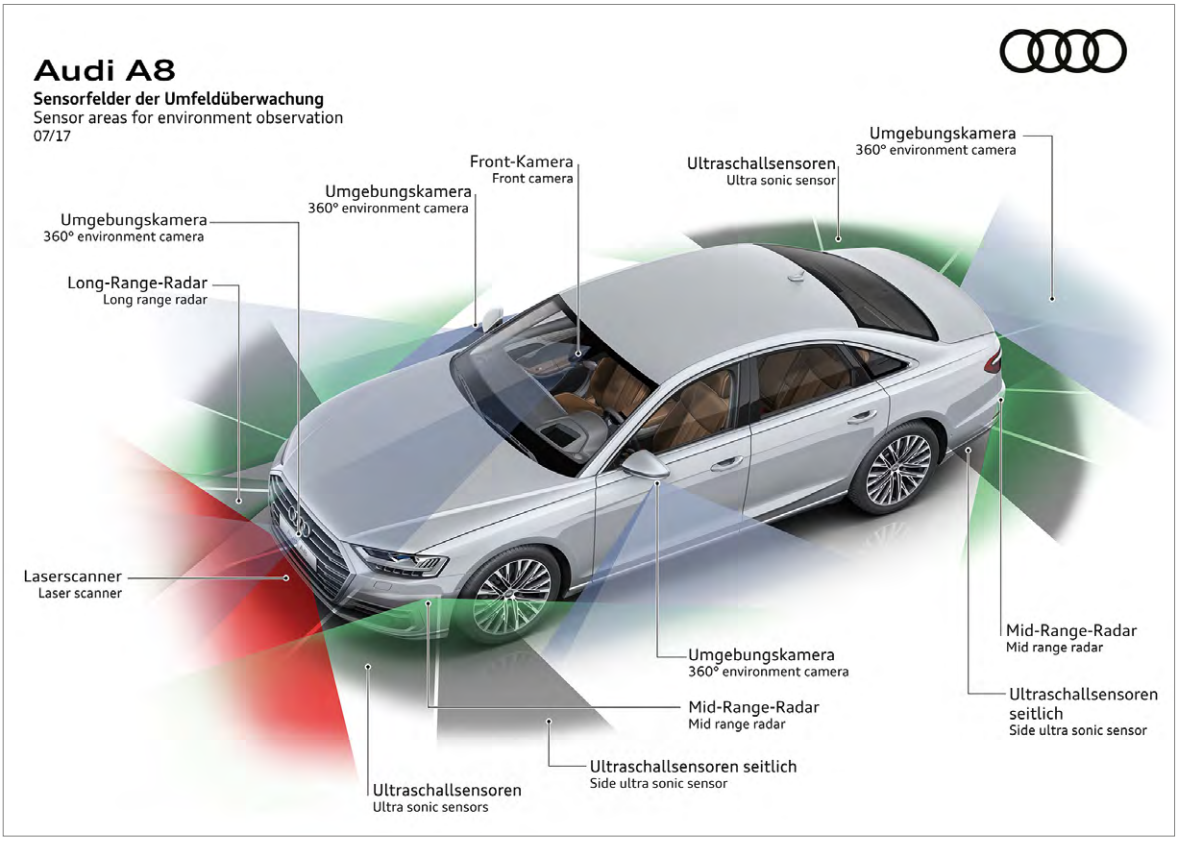


Abb. 3.5: Beispiel für die Sensoren eines hochautomatisierten Serienfahrzeugs (Quelle: Audi AG)

und Geschwindigkeit im Nah- und Fernbereich messen kann. Der Auswerteprozessor des LiDAR errechnet aus dem Vergleich der ausgesandten und reflektierten Laserstrahlung ein zentimetergenaues Abbild der Fahrzeugumgebung. LiDARe sind leistungsfähige, aber auch heute noch vergleichsweise teure Komponenten. Das erste autonome Versuchsfahrzeug von Google ist mit dem High Definition LiDAR HDL-64E der kalifornischen Firma Velodyne Lidar, Inc. ausgestattet. Es hat eine maximale Reichweite von 120 m, misst mit einer Genauigkeit von unter 2 cm und kostete 2015 noch mehr als 70.000 USD. Mittlerweile konnten die LiDARe sowohl in den Ausmaßen, in der Leistungsfähigkeit als auch im Preis (zwischen 10.000 und 18.000 USD) deutlich optimiert werden. Velodyne verbaut mittlerweile bei Ford Fahrzeugen LiDARe vom Typ Alpha Prime mit Reichweiten bis zu 245 m und deutlich kleineren Ausmaßen.

Konventionelle LiDARe arbeiten mit einem Laser. Der erzeugte Laserstrahl wird dann über oszillierende Drehspiegel auf die Messfläche gelenkt. Das Velodyne Alpha Prime VLS-128 verzichtet auf Drehspiegel, sondern ist mit 128 Lasern ausgerüstet, die einen vertikalen Strahlenfächer erzeugen. Durch die Rotation des Laserkopfes wird das 360°-Sichtfeld abgetastet. Verwendet werden Laser der Klasse 1 mit einer Strahlleistung von unter 1 mW, die für das menschliche Auge ungefährlich ist. Der Laser arbeitet auf der Wellenlänge 905 nm im unsichtbaren Infrarotbereich (Velodyne 2020). Anhand der Angaben von Velodyne ist nicht ersichtlich, welche Art von Lasern verbaut sind, aber es könnte sich um InGaAs-Laser handeln, deren stoffliche Zusammensetzung und Geometrie nicht bekannt sind.

Steuergeräte sind die Komponenten in automatisierten Fahrzeugen, in denen die Sensordaten zu Befehlen für die Aktoren in den Fahrzeugen umgewandelt werden. Diese müssen für die Automatisierungsstufen 2 und 3 bereits sehr leistungsfähig sein und bis zu 30 Billionen TOPS (Operationen pro Sekunde) ausführen können. Für das vollautomatisierte und fahrerlose Fahren müssen die Steuergeräte noch leistungsfähiger sein. Nvidia als einer der wichtigsten Hersteller für CPU-Einheiten in den Steuergeräten automatisierter

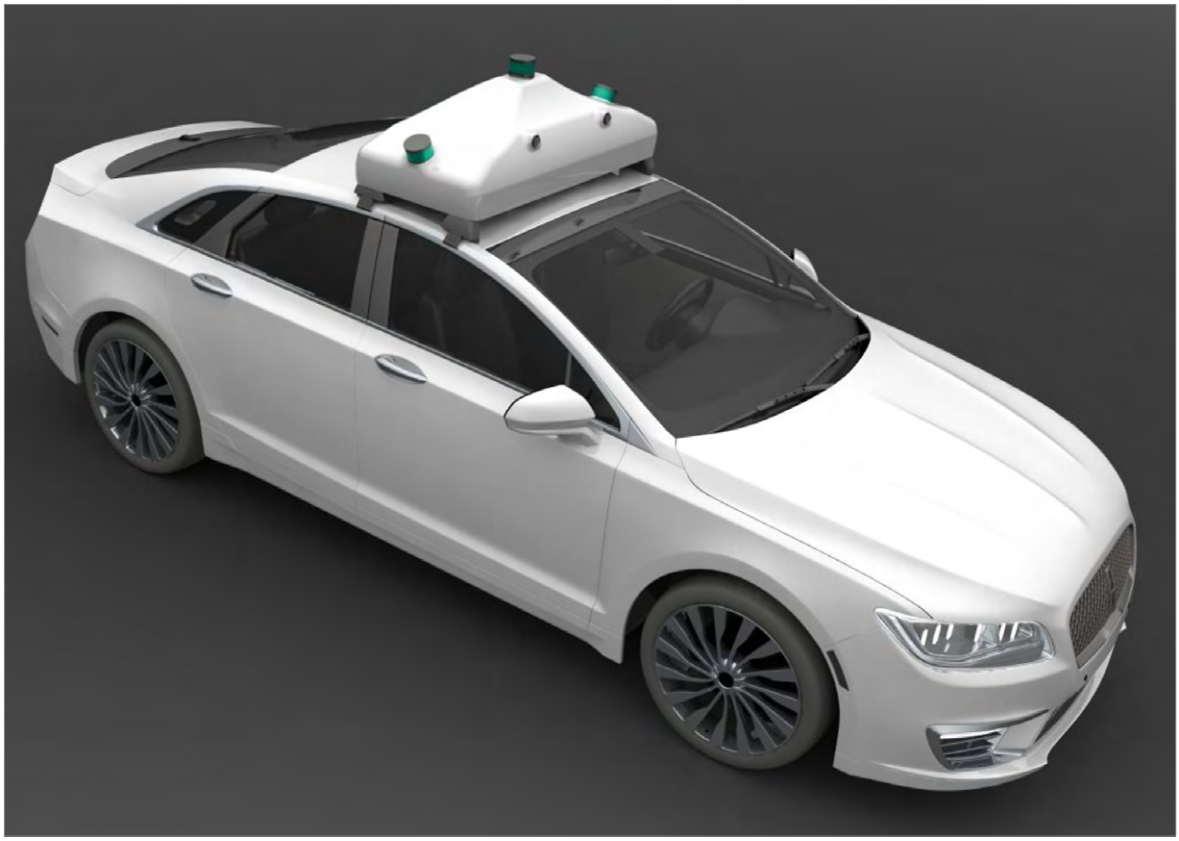


Abb. 3.6: Vollautomatisiertes Testfahrzeug mit LiDAR-Technologie (Quelle: Velodyne)

Fahrzeuge bietet hierzu derzeit die Plattform NVIDIA Drive AGX Pegasus an, die laut Herstellerangaben bis zu 320 Billionen TOPS ausführen kann. Während für Automatisierungsstufe 2 und 3 eine CPU (mit acht Prozessorkernen), eine GPU, ein DLA (Deep Learning Accelerator), ein PVA (Programmable Vision Accelerator), ein ISP (Bildsignalprozessor) und ein 256-Bit LPDDR4 Speicher benötigt werden, braucht es für die Stufen 4 und 5 die doppelte Menge dieser Einheiten plus zusätzlich zwei Grafikprozessoren.

3.1.4.2 Rohstoffinhalt

LiDARe in hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugen sind mit Festkörper- oder Halbleiterlasern konzipiert. Kommerziell weit verbreitet sind mit Neodym dotierte YAG-Laser (Nd:YAG-Laser). Dieser Festkörper-Laser nutzt als Wirtsmaterial einen transparenten Yttrium-Aluminium-Granat-Einkristall ($Y_3Al_5O_{12}$). Das aktive Material ist Neodym, das etwa ein Atomprozent von Yttrium ersetzt. Bei der Dotierung werden Y^{3+}-Ionen durch Nd^{3+}-Ionen ersetzt. Die energetisch dominierende Laserstrahlung des Nd:YAG-Kristalls liegt im Infrarotbereich und hat eine Wellenlänge von 1064 nm, die durch Frequenzverdoppelung auf 532 nm gebracht werden kann. 532 nm werden vom Auge als grünliches Licht wahrgenommen. Für das Pumpen werden Gallium-Arsenid-Laserdioden eingesetzt, die Licht der Wellenlänge 808 nm in den YAG-Kristall einstrahlen. Außerdem sind Peltierelemente, beispielsweise Bismuttellurid (Bi_2Te_3), auf dem Pumplaser und dem YAG-Kristall zur Temperaturstabilisierung vorhanden. Die Feinabstimmung der Frequenz erfolgt piezokeramisch, indem der YAG-Kristall einer mechanischen Spannung ausgesetzt wird. Als Piezokeramik wird beispielsweise Blei-Zirkonat-Titanant ($Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$, $0 \leq x \leq 1$) genutzt. Zur Frequenzverdoppelung eignet sich das Mineral Kalium-Titanoxid-Phosphat mit der Summenformel $KTiOPO_4$ (Eichenseer 2003).

Radarsensoren für die Abstandsmessung, beispielweise für Parkassistenten, lassen sich heute hoch integriert bauen. Ein Konsortium des KIT, der Robert Bosch GmbH und anderen Partnern hat einen miniaturisierten Radarsensor entwickelt, der in Serie zu Kosten unter einem Euro gefertigt werden soll. Die Hochfrequenzkomponenten, die Sende- und Empfangsantennen und die Auswertelektronik sind auf einem SiGe-Chip von 8 x 8 mm untergebracht. Der Sensor arbeitet mit elektromagnetischen Wellen der Frequenz von 122 GHz. Der Abstand von Objekten in einigen Metern Entfernung lässt nach Aussage der Entwickler mit einer Genauigkeit von unter 1 mm bestimmen (KIT 2012).

Ultraschallsensoren für die Abstandsmessung nutzen piezoelektrische Keramiken oder piezoelektrische Kunststoffe für die Schallerzeugung und -detektion. Dabei wird das piezoelektrische Material durch Wechselspannung zum Schwingen gebracht (Piezolautsprecher). Das umgekehrte Prinzip wird für die Detektion der reflektierten Welle genutzt. Die eingehende Welle trifft auf piezoaktives Material. Die übertragene Schwingung erzeugt elektrische Signale, die von der Auswerteelektronik interpretiert werden.

Neben den aktiven Halbleitermaterialien der verschiedenen Sensoren werden für die elektronischen Schaltungen Kupfer, Lötzinn, Gold als Kontaktmaterial, Platinen als Schaltungsträger und eine Vielzahl passiver Bauelemente wie ohmsche und induktive Widerstände sowie Kondensatoren verbaut. Die benötigten Stoffmengen für die elektronischen Bauteile und ihre Sensoren sind jedoch weit von kritischen Werten entfernt.

3.1.4.3 Foresight industrielle Nutzung

Der Markt für Assistenz- und bzw. oder Automatisierungssysteme entwickelt sich seit einigen Jahren sehr dynamisch. Während zwischenzeitlich durch einige unfallbedingte Rückschläge und teilweise vorschnelle bzw. schlecht vorbereitete Markteinführungen von Autopilot-Systemen auf der Straße der Optimismus einer schnellen Markteinführung der Automatisierungsstufe 4 einem Realismus gewichen ist, zeigen sich nun durch die derzeitigen Bemühungen einiger Hersteller doch bereits erste Erfolge. Anhand von Experteninterviews mit Entscheidungsträgern aus der Automobilindustrie kann die Einführung der Automatisierungsstufe 4 innerhalb der nächste Jahre bereits erwartet werden. Roadmaps verschiedener Verbände, beispielsweise dem VDA oder der europäischen ERTRAC, bestätigen diese Erwartungen. Ob und wann die finale Automatisierungsstufe 5 realisiert werden kann, ist jedoch in Expertenkreisen fraglich. Da sich die Funktionali-

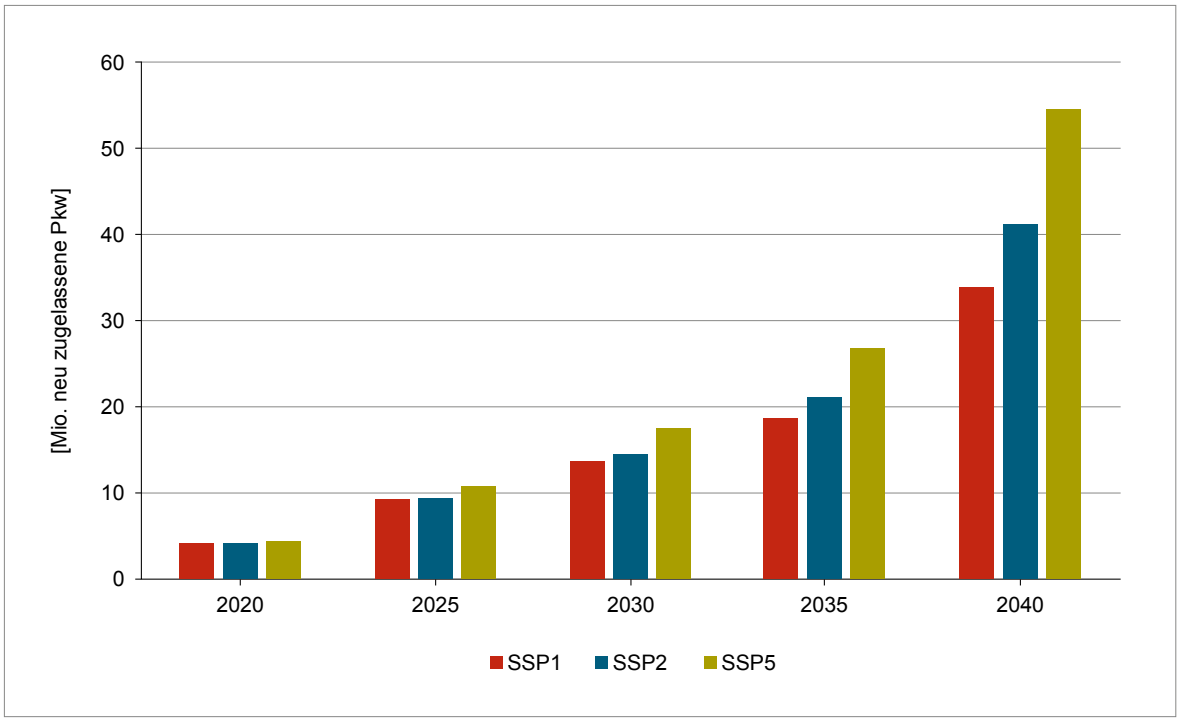


Abb. 3.7: Weltweite Neuzulassungen an automatisierten Pkw der Stufen 2 bis 5 (Quelle: Fraunhofer ISI)

täten zwischen Stufe 4 und Stufe 5 jedoch nicht wesentlich unterscheiden und der Umfang des automatisierten Fahrens nur durch die Rahmenbedingungen (Straßenbeschaffenheit, Wettersituation, Verfügbarkeit von hochauflösenden Karten und die Abdeckung mit schnellem Mobilfunk) bei Stufe 4 eingeschränkt sind, ist die Einführung der Stufe 5 nicht entscheidend für die Entwicklung der Technik und damit des Rohstoffbedarfs.

Krail et al. (2019) haben auf Basis von Lernkurven auf der Ebene der Systemkomponenten und der Akzeptanz bzw. der Bereitschaft zur Zahlung eines Aufpreises mögliche Markthochlaufkurven für Pkw, Lkw und Busse in verschiedenen Größenklassen und für die fünf Automatisierungsstufen für den deutschen Markt abgeschätzt. Überträgt man die Erkenntnisse zum Markthochlauf auf den globalen Markt nach Pkw und Nutzfahrzeugen, ergibt sich der skizzierte Markthochlauf für Pkw bzw. Nutzfahrzeuge, die bis 2040 weltweit mit Systemen der Automatisierungsstufen 2 (teilautomatisiertes Fahren) bis 5 (fahrerloses Fahren) ausgestattet und neu zugelassen werden.

Grundlage für die Berechnung ist zunächst eine Abschätzung der Entwicklung der Neuzulassungen von Pkw und Nutzfahrzeugen (Nfz) bis 2040. Diese Abschätzung geht von einem Anstieg der weltweiten Neuzulassungen bei Pkw von 74,2 Mio. im Jahr 2019 auf 99,6 Mio. Pkw im Jahr 2040 aus bzw. bei Nfz von 18,7 Mio. in 2019 auf 24,7 Mio. in 2040. Unter der Annahme, dass nur die Märkte der Industrieländer den gleichen Pfad bzw. der gleichen Geschwindigkeit des Markthochlaufs folgen und Märkte in Schwellen- bzw. Entwicklungsländer mit einem zeitlichen Verzug von fünf bzw. zehn Jahren folgen, ergibt sich das folgende Bild (siehe Abb. 3.7 und Abb. 3.8). Bei Pkw könnten anhand der Abschätzung bis 2040 zwischen 34 Mio. (für das Szenario SSP1) und 54,6 Mio. Pkw (für das Szenario SSP5) mit Systemen ausgestattet sein, die pilotiertes Fahren auf verschiedenen Automatisierungsstufen ermöglichen. Bei Nutzfahrzeugen klettert die Zahl der Neuzulassungen von automatisierten Fahrzeugen bis 2040 auf Zahlen zwischen 17,8 Mio. (für das Szenario SSP2) und 24,2 Mio. Nutzfahrzeugen (für das Szenario SSP5).

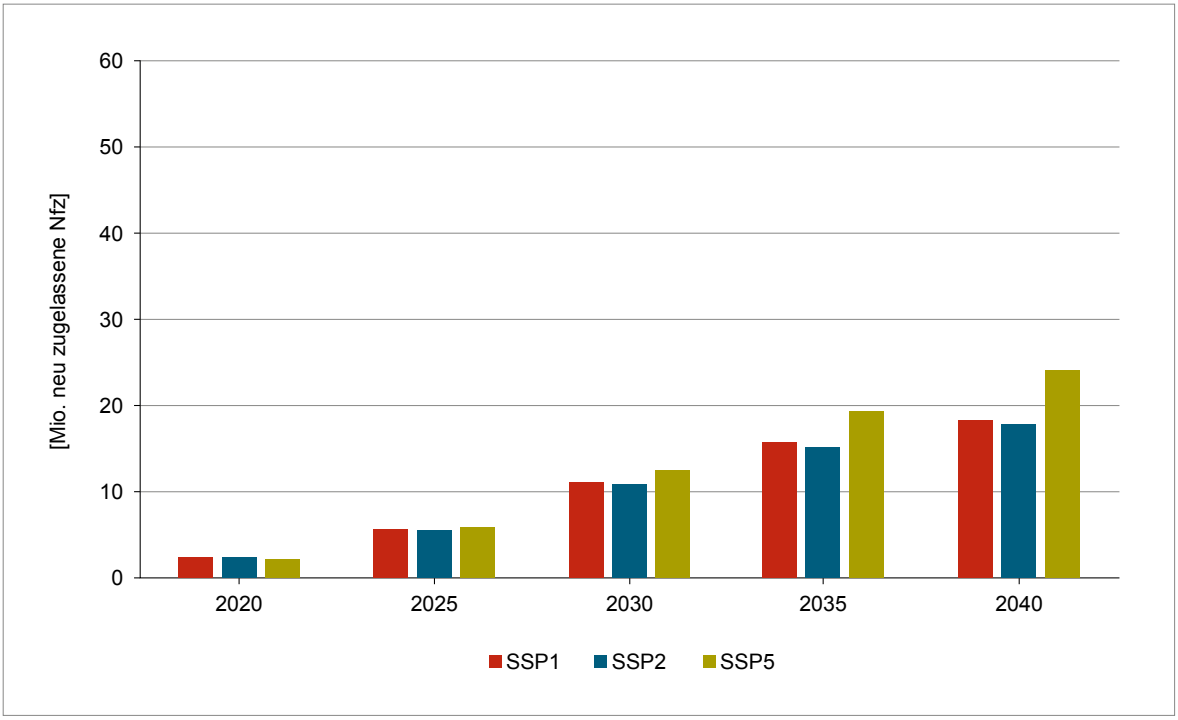


Abb. 3.8: Weltweite Neuzulassungen an automatisierten Nutzfahrzeugen der Stufen 2 bis 5 (Quelle: FRAUNHOFER ISI)

3.1.4.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für die Abschätzung des künftigen Rohstoffbedarfs soll das technische Konzept des schon anwendungsnahen Velodyne LiDAR Alpha Prime VLS-128 zugrunde gelegt werden. Es enthält 128 Lasersysteme. Es wird ferner angenommen, dass, wie im zuvor erwähnten selbstparkenden Forschungsfahrzeug BMW i3, vier LiDAR pro Fahrzeug eingesetzt werden (PRIEMER 2015). Die geometrischen Abmessungen der Laser im Alpha Prime VLS-128 sind nicht bekannt. Für die Abschätzung des künftigen Rohstoffbedarfs werden die in Tab. 3.12 dargestellten Annahmen zugrunde gelegt.

Tab. 3.12: Annahmen zur Abschätzung des Rohstoffbedarfs

Wirtskristall YAG	
Aktives Material	1 Atom-% Nd
YAG-Dimension	3 mm Durchmesser, 10 mm Länge
YAG-Dichte	4,55 g/cm^3
Anzahl Laser pro LiDAR	128
Anzahl LiDAR pro Fahrzeug	1
Fahrzeug-Produktion 2040	52,2 bis 78,8 Mio. Fahrzeuge pro Jahr

Mit diesen Annahmen errechnet sich ein Gewicht des einzelnen YAG-Kristalls von 0,32 g, bei 128 verbauten Lasern 40,96 g YAG pro LiDAR und pro Fahrzeug. Für die Ausstattung von 78,8 Mio. Pkw und Nutzfahrzeugen mit LiDAR-Laserscannern entsteht demnach ein jährlicher Bedarf an YAG-Kristall von 3.228 t.

Die chemische Summenformel für mit 1 Atom-% Neodym dotiertes YAG lautet $Y_{2,97}Nd_{0,03}Al_5O_{12}$. Das Molekulargewicht dieses Materials beträgt 595,3 g. Es enthält nach Tab. 3.13 0,72 Gew.-% Neodym und rund 44 Gew.-% Yttrium. Daraus ergibt sich mit den getroffenen Annahmen ein jährlicher Bedarf von etwa 14,7 t bis 22,2 t Neodym und 928 t bis 1.401 t Yttrium, wenn die laut Abschätzungen in Szenario SSP1 ca. 52,2 Mio. bzw. in SSP5 ca. 78,8 Mio. in 2040 produzierten Fahrzeuge mit Laserscannern ausgestattet wür-

Tab. 3.13: Gewichtsanteile der Rohstoffe im Nd:YAG-Festkörper-Laser

Element	Atomgewicht g/Mol	Atomanzahl	Molekulargewicht g/Mol	Gewichtsanteil %
Yttrium	88,9	2,97	264,0	44,35
Neodym	144,2	0,03	4,3	0,72
Aluminium	27,0	5	135,0	22,68
Sauerstoff	16,0	12	192,0	32,25
Nd:YAG		20	595,3	100,00

Tab. 3.14: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe für Laserscanner zum automatischen Pilotieren von Kraftfahrzeugen in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Neodym	23.900 (R)	~0	14,7	16,2	22,2
Yttrium	7.600 (R)	~0	928	1.050	1.401
Aluminium	63.756.000 (R)	~0	480	540	720

R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

den (Tab. 3.14). Um den vorhandenen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, ist das formulierte Szenario eine Potenzialabschätzung und bildet die Obergrenze für den erwarteten Rohstoffbedarf der Anwendung.

Der Vergleich des erwarteten Rohstoffmengenpotenzials für Laserscanner mit der Weltproduktion zeigt, dass in dieser Anwendung kein kritisches Nachfragesegment entsteht. Diese Einschätzung gilt auch für die übrigen Fahrzeugsensoren.

Anhand der abgeschätzten Menge der Fahrzeuge (Pkw und Nutzfahrzeuge) für das Jahr 2040 ergibt sich für die Steuergeräte ein Bedarf in Höhe von 105 – 160 Mio. CPUs und 210 – 320 Mio. GPUs.

3.1.4.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Der Laserscanner ist eine der zentralen Sensorkomponenten für die Realisierung des pilotierten Fahrens von Straßenfahrzeugen. Durch das schnelle Abtasten des Fahrzeugumfelds um 360° mit zahlreichen Laserstrahlen (Laserscanner mit bis zu 128 Lasern sind mittlerweile auf dem Markt erhältlich) lässt sich in Kombination mit anderen Sensoren ein zuverlässiges und hochaufgelöstes Bild der Umgebung erzeugen. Laserstrahlung ist monochromatisch und lässt sich deshalb sehr gut bündeln. Dadurch ist auch in größerer Entfernung der Abtaststrahl schmal und in der Lage feine Strukturen aufzulösen. Bis heute ist der Laserscanner in nahezu allen entwickelten automatisierten Fahrzeugkonzepten elementares Bestandteil, da bisher die Leistungsfähigkeit kostengünstiger Ultraschall- und Radarsensoren nicht so weit gesteigert werden konnte, dass sie alleine das benötigte hochgenaue Abbild der Fahrzeugumgebung erzeugen können. Als Alternative kämen lediglich Mustererkennungsverfahren in Betracht, die das Bild optischer Stereokameras auswerten. Tesla baut als einziger Hersteller stark auf die Kameratechnologie, hat jedoch nach einigen Unfällen die Systeme auch um Laserscanner ergänzt.

Es ist möglich das LiDAR von Laserscannern mit unterschiedlichen Halbleiter- und Festkörper-Lasersystemen zu realisieren. Die Forschungsfahrzeuge von Ford arbeiten mit Laserscannern

der Velodyne Laser Incorporation, die für die Erzeugung der 903 nm Laserstrahlung InGaAs-Halbleiterlaser vermutlich verwenden. Aber auch mit dem gängigen Nd:YAG-Festkörper-Laser können mit 946 nm und 1.064 nm Wellenlängen in der Nähe der InGaAs-Laserstrahlung realisiert werden.

Für die Entsorgung von gebrauchten Autos gibt die Altfahrzeug-Verordnung anspruchsvolle Recyclingziele vor. Seit dem 1. Januar 2015 müssen 95 % des Leergewichts wiederverwendet oder stofflich oder energetisch verwertet werden. Die energetische Verwertung wird beschränkt, indem mindestens 85 % wiederverwendet oder stofflich zu verwerten sind (AltfahrzeugV 2016). Unterlaufen werden die gesetzlichen Vorgaben in erheblichem Umfang, indem hochbetagte Gebrauchtfahrzeuge, darunter, so die Vermutung, auch schrottreife Autos, in Entwicklungsländer und nach Osteuropa exportiert werden (EUWID 2015). Sensoren, Aktuatoren und Prozessoren können am Ende einer Autolebensdauer nicht wiederverwendet werden, weil der technische Wandel nach mehr als einem Jahrzehnt dies nicht zulässt. Für diesen komplexen Elektronikschrott sind auch die Möglichkeiten der stofflichen Rückgewinnung aus technischen und wirtschaftlichen Gründen unbefriedigend. Es ist zu erwarten, dass ein nicht unerheblicher Teil dieser Komponenten energetisch verwertet (Platinen, Isolierungen, Kunststoffgehäuse) oder beseitigt wird.

Ein zentraler Begleiteffekt des pilotierten Fahrens ist die Unfallvermeidung. Erste Feldstudien mit automatisierten Fahrzeugen auf europäischer Ebene (z. B. die EU-Projekte euroFOT, AdaptiVe oder L3Pilot) haben auf Basis von Millionen Testkilometer bestätigt, dass 90 bis 100 % der Unfälle durch automatisierte Systeme in Kraftfahrzeugen vermieden werden können. Die vermiedene Verschrottung und Wiederinstandsetzung von Unfallfahrzeugen verbessert die Rohstoffeffizienz. Assistenzsysteme helfen, Verkehrsstaus zu vermeiden, den Parkraum besser auszunutzen (Flächenentsiegelung), und unterstützen behinderte und ältere Menschen mit eingeschränkten sensorischen Fähigkeiten. Sie verbessern die Energieeffizienz und reduzieren die Emissionen von CO_2 und Schadstoffen, indem sie den Fahrzeugantrieb um den optimalen Betriebspunkt aussteuern (siehe Krail et al. 2019).

Darüber hinaus kann das automatisierte Fahren einen revolutionären Innovationschub einleiten, der mit dem fahrerlosen Führen von Autos im Straßenverkehr seine Kulmination erreicht. Es wird mit erheblichen gesellschaftlichen Implikationen verbunden sein, kennzeichnend für eine Zukunftstechnologie. Taxis werden zu fahrerlosen Robotaxis, die per Smartphone angefordert werden und denen man per Sprachbefehl das Ziel vorgibt. Carsharing oder Carpooling-Dienste werden zunehmend flexibilisiert und ermöglichen komfortable Tür-zu-Tür Fahrten ohne Wartezeiten. Das angeforderte Fahrzeug fährt zum vorgegebenen Zeitpunkt fahrerlos vors Haus und ist bereit zum Einsteigen. Am Ende der Fahrt steuert es automatisch den nächsten Auftrag an. Der Nutzer merkt kaum einen Unterschied zum eigenen Auto und steigt ohne Komforteinbuße auf Carsharing um. Die bestehende Fahrzeugflotte wird effizienter ausgenutzt, die Neuproduktion und die Menge der benötigten Rohstoffe nehmen ab. Solche Effekte auf die Rohstoffnachfrage lassen sich auch heute noch nicht mit der nötigen Sicherheit einschätzen, da zahlreiche andere Aspekte, die diese Entwicklung treiben oder bremsen noch nicht klar sind. Dies sind zum einen die technischen Rahmenbedingungen besonders im Stadtverkehr, die rechtlichen Rahmenbedingungen sowie die Frage der Akzeptanz und von Aspekten wie dem Wunsch nach Privatheit.

3.1.5 Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL)

3.1.5.1 Technologiebeschreibung

Die Terminologie für die Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität ist sehr uneinheitlich. 3D-Mobilität wird für den Personenverkehr, manchmal auch einschließlich des Güterverkehrs, verwendet. Oft werden unbemannte Luftfahrzeuge „Drohnen“ oder „Unmanned Aerial Vehicles (UAV)“ genannt, bemannte Luftfahrzeuge aber „Flugtaxis/Fliegende Autos“ oder „Passagierdrohne“. Der Terminus „Urban Air Mobility“ schließt durch den Bezug auf den urbanen Raum sinnvolle Anwendungen der gleichen Technologie im ländlichen Raum aus. In dieser Technologiesynopse wird der Begriff 3D-Mobilität verwendet und erstreckt sich sowohl auf bemannte als auch auf unbemannte Einsatzgebiete.



Abb. 3.9: Unbemanntes 3D-Luftfahrzeug zum Ausbringen von Pflanzenschutzmittel (Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:4X-UHJ_Agridrones_d.jpg; Lizenz: CC BY-SA 4.0)

3D-Mobilität wird mit kleinen und leichten Luftfahrzeugen realisiert, die vertikal oder auf kurzen Strecken starten und landen können. Im Gegensatz zu großen Luftfahrzeugen mit Strahltriebwerk benötigen diese kleinen Luftfahrzeuge nur kleine Infrastruktureinheiten für das Starten und Landen. Das Senkrechtstarten (engl. vertical take-off and landing aircraft, VTOL) kann mit Multicopter, Dual Phase, Tilt-Wing und Modular Car-Quadrocopter realisiert werden, das kurze Starten und Landen mit Landebahn (engl. Short take-off and landing, STOL) mit Gyrocopter und Roadable Aircraft; mögliche Antriebsarten sind elektrisch (Batterie und Brennstoffzelle), Hybridantrieb, verteilte Antriebe, Hubschrauberantrieb und turboelektrisch (Duwe et al. 2019). 3D-Luftfahrzeuge werden von Piloten, halbautomatisch oder autonom gesteuert (Xu 2020). Vereinfachend wird im Folgenden über elektrische VTOL-Luftfahrzeuge (eVTOL-Luftfahrzeuge) geschrieben, wobei neben dem vertikalen auch das kurze Starten und Landen eingeschlossen ist.

In den letzten Jahren nahm die Leistungsdichte von Batterien zu und damit auch ihr breiter Einsatz in verschiedenen Anwendungen, so auch in eVOTL-Luftfahrzeugen. Der elektrische Antrieb von eVTOL-Luftfahrzeugen verursacht im Vergleich zum konventionellen Strahl- oder Hubschraubertriebwerk deutlich geringere Lärmemissionen und keine lokalen Schadstoffemissionen. Aus diesem Grunde werden Einsatzszenarien für eVTOL-Luftfahrzeuge auch für dicht besiedelte Gegenden entwickelt (vgl. Abb. 3.10). Zentral für die Erlangung ökonomisch interessanter Fluggeschwindigkeiten und Reichweiten sind Leichtbaukonzepte sowohl für den Airframe, als auch für die beweglichen Teile wie Rotoren oder ausfahrbare Tragflächen.

Im Personenverkehr gibt es für eVTOL-Luftfahrzeuge verschiedene potentielle Einsatzmöglichkeiten. Kernbereiche sind die Personenmobilität beispielsweise im individuellen Luftfahrzeug für das Berufspendeln und den privaten Verkehr, im Sicherheits- und Rettungswesen (u. a. Flugambulanzen) sowie kommerzielle Fahrzwecke und -dienstleistungen (u. a. städtisches Lufttaxi, innerstädtischer Lufttransport, fliegende Flughafenzubringer oder Fährschiff-Alternative), vergleiche Abb. 3.10. Typischerweise haben Luftfahrzeuge für die 3D-Mobilität Platz für zwei bis vier Personen.

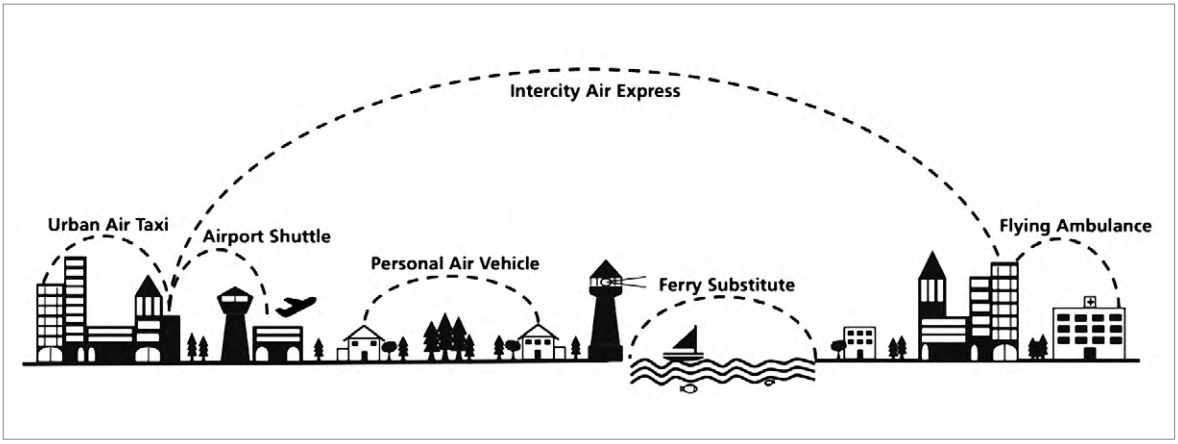


Abb. 3.10: Ausgewählte Anwendungsszenarien für bemannte 3D-Mobilität – © Fraunhofer IAO (Quelle: Duwe et al. 2019)

Luftfahrzeuge für die 3D-Mobilität werden in Kooperationen von großen Herstellern und von über 80 Start-Ups mit finanzstarken Partnern entwickelt, darunter Kitty Hawk und Joby Aviation sowie in Deutschland Volocopter und Lilium.

Hinsichtlich ihrer Hauptfunktion können unbemannte zivile eVTOL-Luftfahrzeuge in drei Typen unterschieden werden (DRONEII 2020):

- Gütertransport (z. B. zur Lieferung von Päckchen)
- Versprühen (z. B. von Pestiziden oder Setzlingen)
- Bildaufnahmen (u. a. zur Inspektion/Instandhaltung, Monitoring, Kartierung, Beobachtung, Film/Fotographie, Lokalisierung/Detektion)

Hauptmotive des Einsatzes von unbemannten eVTOL-Luftfahrzeugen sind Einsparungen an Zeit und Kosten sowie Verbesserungen der Qualität und des Arbeitsschutzes (DRONEII 2020). Unbemannte eVTOL-Luftfahrzeuge für die zivile Nutzung werden hinsichtlich ihrer Startmasse in die Gewichtsklassen ‚Mikro' bzw. ‚Nano' (leichter als 2 kg), ‚Mini' (leichter als 20 kg) und ‚Klein' (schwerer als 20 kg) eingeteilt. Die Größen ‚Mittel' (150 – 600 kg) und ‚Groß' (über 600 kg) werden überwiegend bzw. ausschließlich für militärische Zwecke genutzt (BMVI 2020). Die meisten Modelle werden für unbemannte Luftfahrzeuge der Größenklasse „Mini" entwickelt bzw. hergestellt.

Der globale Markt für zivile Drohnen (Freizeit und Business) wird derzeit von DJI und seinen Wettbewerbern Parrot und Yuneec dominiert, die aber unter der aggressiven Preisstrategie von DJI leiden (Global Data 2019). Wichtige Entwickler und Anbieter von unbemannten Luftfahrtsystemen in Deutschland sind die Firmen Microdrones und HeightTech. Zu den aktiven Firmen im Bereich Gütertransport zählen DHL, Deutsche Post AG, Zookal, Google, Amazon und FedEx.

3.1.5.2 Rohstoffinhalt

Tab. 3.15 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Rohstoffe in unbemannten eVTOL-Luftfahrzeugen.

Das Rohstoffspektrum und seine Einsatzgebiete in eVTOL-Luftfahrzeugen sind heterogen. eVTOL-Luftfahrzeuge gehören zu den systemischen Innovationen, die mehrere bereits am Markt etablierte oder weiterentwickelte Komponenten kombinieren. Angesichts der Vielzahl an unterschiedlichen Systemkonfigurationen und damit auch Rohstoffen in ihren Komponenten muss für eine Einschätzung des Rohstoffinhaltes eine Auswahl an Komponenten und Einsatzzwecken erfolgen. Wesentliche Hauptkomponenten sind der Aeroframe und die Flügel/Rotoren, der Elektromotor, die Batterie, die Avionik und – im Falle des Einsatzzwecks Bildaufnahmen – die Kamera.

Aus Wettbewerbsgründen werden nur wenige quantitative technische Angaben zu eVTOL-Luftfahrzeugen gemacht. Derzeit gibt es für das flügellose Multirotorkonzept über 40, für das flug-

Tab. 3.15: Rohstoffe in unbemannten eVTOL-Luftfahrzeugen (Quelle: European Commission 2020a, geändert)

Rohstoff	Einsatzgebiete
Be	Legierungen, Kommunikationsausrüstung und integrierte Drahtnetze, elektrooptische Systeme und Fahrwerk
Cu	Superlegerungen und CuBe-Legierungen, Kommunikationssysteme
Ga	GaAs und GaN für Kommunikations- und Identifikationssysteme sowie elektrooptische Systeme
Ge	Bordelektronik, Inertial-Navigationssysteme und Identifikationssysteme für Gefechte
In	Komponenten für elektrooptische Systeme
Al	Leichte Hochleistungslegierungen für Airframe, Getriebegehäuse und Avionik
Hf	NiHf-Superlegierungen für hochfeste Hochtemperaturanwendungen
Fe	Spezialstähle für Struktur- und Maschinenbauteile
Mg	Hochleistungs-AlMg-Legierungen
Ni	Ni- und NiTi-Legierungen (duktil und korrosionsbeständig) für Turbinen- und Maschinenbauteile
Nb	Ferroniob für hochfeste Strukturbauteile
Sc	AlSc-Legierungen für leichte, hochfeste Bauteile und Formstücke
Ti	Ti-Legierungen für leichte und hochfeste Bewehrungen u.a. auch in 3D-Druck, Airframe, Flügel, Ventilatoren und Kompressoren
Nd, Pr, Dy (SEE)	Elektromotoren mit elektronischer Geschwindigkeitskontrolle (Rotoren)
Li	Lithiumionenbatterien
Co	Lithiumionenbatterien

zeugartige Lift & Cruise-Konzept über 20 und für das Tilt-Wing/Rotor-Konzept über 50 Entwicklungsprojekte (Heckmann 2020). Der Elektrojet von Lilium (5-Sitzer) soll mit seinen 36 schwenkbaren Elektromotoren (2.000 PS) am Ende bis zu 300 km/h schnell fliegen und eine Reichweite von 300 km haben. Das Gewicht beträgt rund eineinhalb Tonnen, die Spannweite liegt bei 11 Metern. Der Volocopter (2-Sitzer) hat 18 Rotoren (Münder 2017). Für den Prototyp eines kleineren Modells (2-Sitzer) werden ein Leergewicht von 440 kg (Startmasse maximal 640 kg), eine Reichweite von 300 km und eine Höchstgeschwindigkeit von 300 km/h angegeben, wobei die 36 Elektromotoren zusammen auf 320 kW Leistung kommen (Mattke 2020).

Der elektrische Antrieb mit Batterie begrenzt aufgrund ihres hohen Gewichtes die Zuladung und Reichweite, weshalb eVTOL-Luftfahrzeuge in Leichtbauweise hergestellt werden. Hierfür kommen aufgrund ihres geringen spezifischen Gewichts und ihrer Festigkeit insbesondere Karbonfaser-verstärkte Polymere zum Einsatz (Xu 2020). Auch wenn die Projektionen für Kompositmaterial (Aeroframe, Flügel und Rotoren) auf starkes Wachstum hinweisen, wird der Anteil des Segments der unbemannten Luftfahrzeuge am Kompositmarkt für die gesamte Luftfahrt gering bleiben.

Im Bereich des luftgebundenen Personentransports spielen Sicherheitsaspekte eine noch größere Rolle als im Bereich der unbemannten Luftfahrzeuge (u. a. Crashtests, Kollision mit Vögeln, Beladungsbedingungen, Flughülle, Abschirmung von Rotoren, Information über abnormale Betriebszustände). Die Systeme von Volocopter und Lilium sind deshalb hochgradig redundant ausgelegt: Sie verfügen über mehrere Motoren und zahlreiche Batteriezellen, die jeweils unabhängig voneinander operieren, um bei Ausfall einzelner Komponenten eine sichere Landung zu ermöglichen (Jetzke 2018).

Das Auftragsvolumen für Antriebe unbemannter Luftfahrzeuge ist relativ klein. Aus diesem Grund wurde in der Vergangenheit meist auf einen bestehenden elektrischen Antrieb zurückgegriffen und dieser angepasst. Die Neuentwicklung von Antriebskonzepten unterliegt strenger Geheimhaltung (Hegmann 2019), weshalb für diese keine Angaben zum Kupfer- und NdFeB-Einsatz vorliegen.

Bei einem massenhaften Einsatz von eVTOL-Luftfahrzeugen könnten unter Umständen nennenswerte Nachfrageimpulse auf Lithium-Akkus ausgelöst werden. Die Batterie trägt etwa ein Drittel zum Leergewicht bei (Xu 2020). Entwicklungsziel ist eine Zunahme der Energiedichte von 220 Wh/kg im fertigen Paket auf mehr als 500 Wh/kg im Jahr 2025. Eine 420 kg schwere Batterie würde dann mindestens 210 Kilowattstunden Strom an Bord eines Lilium-Jets bereitstellen können (Hegmann 2019).

Die Komponenten für die Avionik von eVTOL sind wenig spezifisch für 3D-Luftfahrzeuge. 3D-Luftfahrzeuge können über GNSS/GPS-Positionierung (+/- 0,5 bis 1,5 m) oder Sichtpositionierung (+/- 0,1 bis 0,3 m) in der Umgebung operieren. Die Mikrodrohne „Paketcopter“ verwendet zur Navigation Magnetometer, die das Erdmagnetfeld in seiner räumlichen Ausdehnung messen. Andere Magnetometer-Technologien sind Fluxgate-Magnetometer, supraleitende Quanteninterferenzgeräte, Proton-Magnetometer, Helium-3- und Helium-4-Magnetometer und Alkali-Magnetometer (K, Cs, Rb) (Hovde et al. 2013). GNSS/GPS und Magnetometer werden auch zu Einheiten kombiniert. In der Sensorik, u. a. auch bei Barometern, Gyrometern und Accelerometern, gibt es einen starken Trend hin zu mikroelektromechanischen Systemen (MEMS), meist auf Silizium-Basis. In der Avionik setzen Hersteller zunehmend auf Automatisierung und Künstliche Intelligenz, insbesondere maschinelles Lernen.

Für das Wachstumssegment Fernerkundung für eine zielgerichtete Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen (Precision Agriculture) kommen vor allem IR- und multi-spektrale Sensoren zum Einsatz (Colomina & Molina 2014). Germanium hat bei IR und optischen Sensoren ein wichtiges Anwendungsfeld. Auch für andere Bildaufnahmen können solche germaniumhaltigen Kameralinsen zum Einsatz kommen. Für Freizeitdrohnen wird davon ausgegangen, dass diese standardmäßig mit einer Kamera ausgestattet sind (SESAR 2016).

3.1.5.3 Foresight industrielle Nutzung

Zu den Haupttreibern und -hemmnissen der 3D-Mobilität gehören die Verfügbarkeit von End-to-End-Lösungen („Drones as a Service“), das Internet der Dinge (IoT) und die Gesetzgebung (Global Data 2019). In Deutschland regulieren u. a. das Luftverkehrsgesetz und die Luftverkehrsordnung den Einsatz von bemannten und unbemannten Luftfahrtsystemen. Demnach wird keine Erlaubnis für Drohnen benötigt, die bis zu 5 kg wiegen. Für den Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugen mit einer Gesamtmasse von maximal 25 kg in Sichtweite des Steuernden kann eine Erlaubnis erteilt werden, wenn eine Flughöhe von 100 Metern über Grund nicht überschritten wird und keine Menschenansammlungen, keine Wohngrundstücke, keine Polizeieinsatzorte etc. überflogen werden (BMVI 2020).

In einer Befragung von Drohnenherstellern und -anwendern gaben 54 % an, dass die Covid-19-Pandemie langfristig eher positive Effekte auf die Drohnenindustrie haben würde, 17 % erwarteten negative Effekte und 29 % hatten keine Meinung (DRONEII 2020).

Sowohl für unbemannte als auch für bemannte 3D-Luftfahrzeuge gibt es eine Reihe von Marktstudien (u. a. von Frost&Sullivan, Roland Berger bzw. Meticulous Research, Grandview Research), die sich mit der Entwicklung der Stückzahlen befassen. Wissenschaftsbasierte Studien für unbemannte 3D-Luftfahrzeuge liegen für die USA (FAA 2020) und Europa (SESAR 2016) vor, für bemannte 3D-Luftfahrzeuge unternehmen zwei Studien wichtige Differenzierungen, eine für die USA (NASA 2018) und eine in globaler Perspektive (Grandl et al. 2018).

Es ist derzeit nicht absehbar, welche Technologien und Systeme sich für die unbemannte und bemannte 3D-Mobilität langfristig durchsetzen werden. Im Jahr 2018 dominierten Rotationsflügel den Markt für kommerzielle Drohnen in Deutschland; auf starre Flügel und hybride Konzepte entfiel der Rest in Höhe von etwa einem Achtel

Tab. 3.16: Projektionen des Verkehrsaufkommens von eVTOL-Luftfahrzeugen in verschiedenen Studien

Bezug	Szenariogegenstand und -annahmen	Bezugsjahr	Projektion Verkehr
Unbemannte eVTOL in USA (FAA 2020)	Freizeitdrohnen: 1,32 Mio. Stück im Bestand Kommerziell: 385.000 Stück im Bestand; starkes Wachstum	2019/ unbestimmt	Freizeitdrohnen Sättigung: 1,5 Mio. Stück
Unbemannte eVTOL in EU (SESAR 2016)	Freizeit: 1–1,5 Mio. Drohnen im Bestand Kommerziell und staatlich: 10.000 Drohnen im Bestand starkes Wachstum; Szenarien abweichend von Baseline: konservativ und hohe Akzeptanz	2035/2050	7 Mio. Freizeitdrohnen; im Bestand; Marktsättigung mit 1 Mio. Verkäufen pro Jahr 2025 erreicht. 200.000 (2025), 395.000 (2035), 415.000 (2050) Drohnen für kommerzielle und staatliche Nutzung im Bestand; konservativ (230.000 bzw. 265.000) und hohe Akzeptanz (830.000 bzw. 910.000)
Bemannte eVTOL global (Grandl et al. 2018)	Markteintritt 2025 mit 500 Passagierdrohen im Bestand, Diffusion 2035 in Asien (45 %), Europa (35 %) und Amerika (20 %) / theoretisches Potenzial bei vollem Ausbau der Infrastruktur (u. a. Vertiports)	2035/ unbestimmt	15.000 Passagierdrohnen im Bestand/ theoretisches Potenzial: 200.000 Passagierdrohnen im Bestand; realistisches Potenzial: 40.000–75.000 Passagierdrohnen für Megacities und Großstädte (oberer Wert mit ausgebauter Vertiport-Infrastruktur)
Bemannte eVTOL in Metropolen USA (NASA 2018)	Air-Metro (standardisierte Luftverkehrsrouten, autonom befahren, mit durchschnittlich drei Passagieren)	2030	740 Mio. Passagiertrips mit 23.000 Fahrzeugen, 100–300 Vertiports pro Metropole (3–6 VTOL parallel)

Zum Vergleich (Grandl et al. 2018): Der globale Bestand an Automobilen soll 2035 1,7 Milliarden Stück und an Flugzeugen mit mehr als 100 Sitzplätzen oder mehr als zehn Tonnen Zuladung 42.000 betragen.

beziehungsweise weniger als einem Sechzehntel des Marktes (Grand View Research 2019).

3.1.5.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für die Abschätzung des zukünftigen Rohstoffbedarfs sind drei typische Konfigurationen von eVTOL-Luftfahrzeugen definiert worden, die sich vor allem hinsichtlich ihres Payloads (Nutzlast) und damit auch ihres Gewichts unterscheiden.

Für die Identifikation der stofflichen Zusammensetzung wurde eine Ökobilanz für eine Gütertransportdrohne zugrunde gelegt (Koiwanit 2018).

Der Kupferanteil der Elektromotoren beträgt nach dieser Quelle 35 %, der Magnetwerkstoffanteil $Nd_2Fe_{14}B$ 10 %. Der Gewichtsanteil an Neodym in $Nd_2Fe_{14}B$ beträgt 27 Gew.-%, wobei Neodym aus Preisgründen auch bis zu maximal einem Viertel durch Praseodym ersetzt werden kann (Marscheider-Weidemann et al. 2016). Die Mengenanteile für Elektromotoren wurden auf die anderen 3D-Luftfahrzeuge übertragen.

Die Mengen an Lithium-Polymer-Batterien wurde für die eVTOL-Luftfahrzeuge aus diversen Angaben geschätzt[1]. Der Lithiumanteil in Lithium-Polymer-Batterien für Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher für Pkw beträgt rund 80 – 120 g Li/kWh,

[1] 350 Gramm (LiPo) und 90 Gramm für eine Kameradrohne (RIT-Kamera), 297–468 Gramm für eine Consumerdrohne (DJI 2020), 440 Gramm für eine 8,8 kg schwere Drohne zum Versprühen von Agrarchemikalien (FPV 2020), 680 Gramm für eine Lieferdrohne (Koiwanit 2018) und ca. 200 kg Batterie für eine 530 kg schwere Passagierdrohne (Khavarian und Kockelman 2020).

Tab. 3.17: Annahmen zur Gewichtsverteilung der Komponenten in eVTOL-Luftfahrzeugen in kg

	eVTOL-Luftfahrzeugtyp		
	Bildaufnahmen	**Fracht (Gütertransport und Versprühen)**	**Personentransport**
Payload	Kamera	10 kg Zuladung	6 Passagiere
Gewicht ohne Payload	1	10	1.000
Airframe und Propeller	0,25	8	300
Motoren	0,1	0,5	150
Batterie	0,5	1	500
Avionik	0,1	0,25	25
Unbestimmt	0,05	0,25	25

vergleiche Kapitel 3.1.7. Mit der Energiespeichermenge der Batterien lässt sich hieraus der Lithiumbedarf pro eVTOL-Luftfahrzeug abschätzen[2]. Für den Germanium-Gehalt werden GoPro-Kameras unterstellt, diese Actionkameras sind auch multispektral bzw. für die Nachsicht ausgerüstet. Für die IR-/Multispektralkameras konnte ein Wert von 4,2 g Germanium pro Linse aus einer Ökobilanz für die Linsenfertigung für Nachtsichtsysteme identifiziert werden (Bhutto & Jalbani 2012).

Für 3D-Luftfahrzeuge zum Einsatz für Inspektionsflüge oder für Freizeitzwecke wird eine Lebensdauer von 7 Jahren (SESAR 2016), zum Transport von Gütern von elf Jahren (AUVSI 2013) und zum Transport von Personen von 15 Jahren geschätzt.

Folgende spezifische Annahmen wurden getroffen:

– eVTOL-Luftfahrzeuge für kommerzielle und staatliche Zwecke verteilen sich im Bestand 2040 in Anlehnung an das Mengengerüst von SESAR (2016) zu 25 % auf die Fracht und zu 75 % auf Bildaufnahmen.

– eVTOL-Luftfahrzeuge in der Landwirtschaft werden 2040 zu 25 % für den Austrag von Pestiziden und Saatgut (Fracht) und zu 75 % für Bildaufnahmen eingesetzt.

– Von den eVTOL-Luftfahrzeugen für Bildaufnahmen im Jahr 2040 verfügen in der Landwirtschaft 100 %, in der Industrie/Infrastruktur 50 %, für staatliche Zwecke 25 % und für Freizeitzwecke 5 % über eine Multispektral-/IR-Kamera mit Germaniumlinse.

– Die globalen Stückzahlen der 3D-Luftfahrzeuge 2040 wurden anhand der zukünftigen Stückzahl für Europa (SESAR 2016) und dem Anteil von Europa an der globalen bebauten Fläche 2040 (für staatliche Zwecke und Gütertransport), an der globalen Agrarfläche 2040 (für landwirtschaftliche Fläche) und am BIP (für sonstige kommerzielle Zwecke) in den SSP-Szenarien hochgerechnet. Für die Projektionen des Bestandes an eVTOL-Luftfahrzeuge für Freizeitzwecke 2040 wird die Einteilung der Bevölkerung nach Ländern mit niedrigem, mittleren und hohem Einkommen zugrunde gelegt (United Nations 2019)[3].

Hinsichtlich des Metallbedarfs für die Motoren und Batterien sind für die verschiedenen SSPs (s. Kapitel 1.1) unterschiedliche Materialeffizienzfortschritte angesetzt worden, nicht aber für den Germaniumbedarf der ausgereiften Infrarot (IR) und Multispektralkameras.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen errechnen sich je nach Szenario die Rohstoffbedarfe für 2040 (s. Tab. 3.19).

[2] Für den Personentransport sind 1.000 kWh Batterien angenommen (80–120 kg Li pro Luftfahrzeug), für Bildaufnahmen 100 Wh Batterien (8–12 g Li pro Luftfahrzeug) und für Gütertransport 1 kWh Batterie (80–120 g Li pro Luftfahrzeug).

[3] In SSP1 betragen die Zahlen für den Ausstattungsgrad 0,25 %, 0,1 % und 0,01 %, in SSP2 0,5 %, 0,15 % und 0,03 % und in SSP5 1 %, 0,2 % und 0,05 %.

Tab. 3.18: Annahmen zur Anzahl und zur Effizienz von eVTOL-Luftfahrzeuge unter den Bedingungen ausgewählter SSP-Szenarien

Faktor	Einheit	Szenario		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
eVTOL staatliche Zwecke	Stück im Bestand 2040	1.400.000	1.200.000	1.000.000
eVTOL Landwirtschaft	Stück im Bestand 2040	1.000.000	1.500.000	2.000.000
eVTOL Gütertransport	Stück im Bestand 2040	400.000	1.400.000	2.400.000
eVTOL sonst. kommerzielle Zwecke	Stück im Bestand 2040	666.667	666.667	666.667
eVTOL Freizeitzwecke	Stück im Bestand 2040	7.312.586	12.604.181	20.312.069
eVTOL Personentransport	Stück im Bestand 2040	10000	30000	50000
Materialeffizienz Motoren und Batterien	Änderung 2018–2040	50 %	35 %	20 %

Tab. 3.19: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für 3D-Luftfahrzeuge in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Kupfer	20.590.600 (B) 24.137.000 (R)	n. v.	150	390	900
Neodym	23.900 (R)	n. v.	11	30	70
Lithium	95.170 (B)	n. v.	210	660	1.630
Germanium	143,1 (R)	n. v.	0,76	1,3	1,5

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Im Vergleich zu Elektroautos sind die zukünftigen Rohstoffbedarfe an Lithium, Kupfer und Neodym für eVTOL-Luftfahrzeuge sehr gering. Dies liegt insbesondere an den relativ geringen Stückzahlen, die jährlich in den Verkauf kommen. Lediglich für Germanium beträgt der Nachfrageimpuls im SSP5-Szenario für 2040 ca. 1 % der Raffinadeproduktion im Jahr 2018 und bei Lithium ca. 2 % der Bergwerksförderung. Auch im SSP5-Szenario würde die induzierte Rohstoffnachfrage unter sonst gleichen Bedingungen problemlos gedeckt werden können.

Die Nachfrage nach Germanium für die IR-/Multispektrallinsen könnte zukünftig merkliche Nachfrageimpulse erfahren, wenn 3D-Luftfahrzeuge massenhaft für Bildaufnahmen in der Landwirtschaft, für Überwachungen und für Freizeitzwecke eingesetzt werden. Die eher konservativ berechneten Germaniumbedarfe dürften problemlos gedeckt werden können, wenn keine anderen Technologien den Germanium-Markt disruptiv beeinflussen.

Für andere, in Tab. 3.19 nicht untersuchte Rohstoffe gilt (vgl. Marscheider-Weidemann et al. 2016), dass lediglich bei den Spezialmetallen mit

kleinem Produktionsvolumen nennenswerte relative Nachfrageimpulse möglich sind. Dies setze aber ein dezidiertes Forschungsinteresse an den Speziametallen beispielsweise für die Avionik und eine entsprechende Datenverfügbarkeit voraus, die heute nicht in ausreichendem Maße gegeben ist.

3.1.5.5 Recycling, Ressourceneffizienz, Substitution

Derzeit konkurrieren viele Technologien und Komponenten in den Märkten für bemannte 3D-Luftfahrsysteme. Der Bereich der unbemannten Systeme ist ausgereifter, aber auch hier gibt es eine Fülle an möglichen stofflichen Konfigurationen. Der Einfluss von Rohstoffpreisen oder -engpässen auf das Design von eVTOL-Luftfahrzeugen scheint im Vergleich zur Realisierung der Funktionalität derzeit von untergeordneter Bedeutung zu sein.

Zum Recycling und zur Ressourceneffizienz von eVTOL-Luftfahrzeugen liegen keine aussagekräftigen Informationen vor. Der Verlust an unbemannten eVTOL-Luftfahrzeugen durch Absturz dürfte eine wichtige Lücke im Materialkreislauf sein, während die Sicherheitsanforderungen an bemannte Systeme Abstürze minimieren dürften. Die im Vergleich zu Flugzeugen geringen spezifischen Materialmengen und die Verwendung von Verbundmaterialien erschweren das Recycling.

3.1.6 Superlegierungen

3.1.6.1 Technologiebeschreibung

Als Superlegierungen werden Werkstoffe komplexer Zusammensetzung für Hochtemperaturanwendungen bezeichnet. Zumeist sind dies Nickel-, Kobalt- oder Eisen-Basislegierungen, welchen eine Vielzahl weiterer Legierungselemente in Teilen auch in höheren Konzentrationen hinzugefügt wird. Als wichtige Legierungsbestandteile sind insbesondere Platin, Chrom, Molybdän, Wolfram, Rhenium, Ruthenium, Tantal, Niob, Aluminium, Titan, Mangan, Zirkonium, Kohlenstoff und Bor zu nennen. Superlegierungen sind zumeist zunder- und hochwarmfest. Im Gegensatz zu anderen Legierungen sind Superlegierungen darauf ausgelegt, auch bei hohen Temperaturen eine hohe Festigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Kriechfestigkeit sowie Oberflächenstabilität zu besitzen. Dadurch erweitert sich der Anwendungsbereich der Superlegierungen gegenüber beispielsweise Stählen. Ihre Herstellung kann sowohl schmelzmetallurgisch, als auch pulvermetallurgisch erfolgen.

Die Güte eines thermodynamischen Kreisprozesses, wie er in Verbrennungsmotoren, Turbinen und Triebwerken technisch realisiert wird, wird durch den Carnot-Wirkungsgrad charakterisiert:

$$(1)\ \eta_C = 1 - \frac{T_0}{T_E}$$

η_C: Carnot-Wirkungsgrad
T_0: Austrittstemperatur
T_E: Eintrittstemperatur

Die Gleichung zeigt, der Wirkungsgrad der Arbeitsmaschine ist umso besser, je niedriger die Austrittstemperatur T_0 und je höher die Eintrittstemperatur T_E des Prozesses ist. Da sich die Austrittstemperatur in der Regel nicht unter die Umgebungstemperatur absenken lässt, bleibt für die Wirkungsgradverbesserung nur die Erhöhung der Eintrittstemperatur. Die Werkstoffentwicklung trachtet deshalb danach, die Warmfestigkeit der Werkstoffe zu steigern. Die heute verwendeten, auf Kohlenstoff basierenden Brennstoffe Öl, Gas, Kohle und Biomasse setzen bei der Verbrennung CO_2 frei. Die Verbesserung des Wirkungsgrads und damit die Reduzierung des Brennstoffverbrauchs ist deshalb immer ein Beitrag zum Klimaschutz.

Die Einsatzgrenze hochwarmfester Stähle liegt bei etwa 850 °C. Mit ferritischen rostfreien Stählen lassen sich Einsatztemperaturen bis 1.350 °C erreichen; die Festigkeit ist bei diesen Temperaturen allerdings gering. Diese Stähle sind somit zwar hitzebeständig (korrosionshemmend), aber nicht warmfest (d. h. ohne gute mechanische Eigenschaften). Bei höheren Anforderungen an die Festigkeit wird auf Superlegierungen und Verbundwerkstoffe aus Keramik und Metallen (Cermets) zurückgegriffen. Die Arbeitstemperaturen warmfester Superlegierungen auf Nickelbasis in Gasturbinen erreichen heute 1.230 °C.

Um eine wirtschaftlich attraktive Standzeit der Bauteile zu erreichen, werden an warmfeste

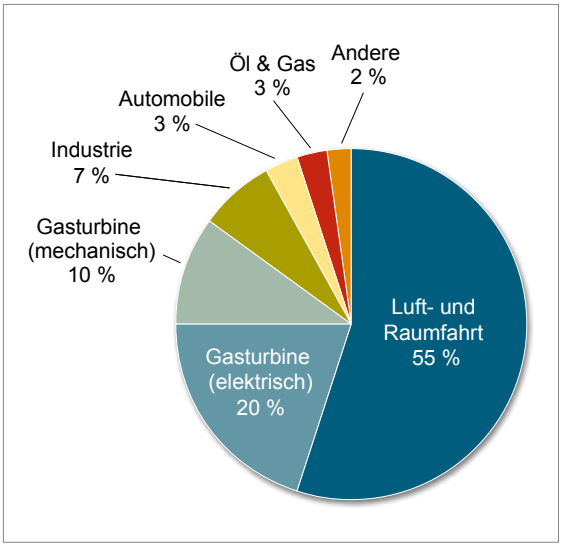


Abb. 3.11: Superlegierungen nach letzter Verwendung 2012 (Quelle: Eigene Darstellung nach Bedder & Baylis 2013)

Werkstoffe neben hoher Festigkeit weitere Anforderungen gestellt. Darunter die Beständigkeit gegen Oxidation, Korrosion, Abrasion und eine geringe Kriechneigung. Für Werkstoffe, welche diese anspruchsvollen Anforderungen bei hohen Arbeitstemperaturen erfüllen, hat sich die Bezeichnung „Superlegierung" eingebürgert.

Hochtemperatur-Anwendungen sind in zahlreichen Sektoren, Prozessen und Produkten von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Bei Triebwerken für die Luft- und Raumfahrt, stationären Gas- und Dampfturbinen, Diesel- und Ottomotoren für Kraftfahrzeuge, Heizkesseln für die Gebäudeheizung, in der Eisen- und Stahlindustrie, der Nichteisenmetallerzeugung, der Metallverarbeitung und -bearbeitung, der chemischen und petrochemischen Industrie, beim Erschmelzen von Glasprodukten und beim Brennen von Zement und Kalk, um einige zu nennen. Abb. 3.11 gibt den Bedarf von Superlegierungen nach den beschriebenen Sektoren an.

3.1.6.2 Rohstoffinhalt

Als gängige Superlegierungen werden im Folgenden Nickel- sowie Kobaltbasislegierungen beschrieben. Als weitere Hochtemperaturwerkstoffe werden zudem Titanlegierungen und Cermets angegeben.

Nickelbasislegierungen

Es gibt eine große Zahl von hochwarmfesten Superlegierungen. Die wirtschaftlich bedeutsamsten sind die Nickelbasislegierungen. Sie wurden ursprünglich für Düsentriebwerke entwickelt, um deren Leistung (Schub) und Brennstoffverbrauch zu verbessern. Die Lauf- und Leitschaufeln der Gasturbine dieser Triebwerke erreichen Spitzentemperaturen von über 1.000 °C. Sie werden heute aus Nickelbasis-Superlegierungen gefertigt, ebenso wie der Turbinenrotor, die Brennkammern und die Auslasseinheit mit dem Strahlrohr.

Abb. 3.12 zeigt ein Strahltriebwerk älterer Bauart, bei dem die wesentlichen Komponenten gut erkennbar sind. Heute werden Mantelstromtriebwerke verwendet, mit getrennten koaxialen Wellen für die Verdichter- und Turbinenstufe.

Superlegierungen sind aus der Luft- und Raumfahrt in viele andere Anwendungen vorgedrungen. Beispiele sind Abgasventile in Verbrennungsmotoren, Komponenten von Autoabgaskatalysatoren, Hochtemperaturfedern, Schmiedewerkzeuge, Bohrwerkzeuge bei der Erdöl- und Erdgasförderung und Wärmetauscher. Markennamen für Nickelbasis-Superlegierungen sind Inconelâ, Incoloyâ, Hastelloyâ, Nimomicâ, Waspaloyâ, Croniferâ, Nicroferâ. Die Zusammensetzung von Nickelbasislegierungen ist in Tab. 3.20 als ein Durchschnitt üblicher Legierungen gegeben.

Der hohe Chromanteil sorgt für die Korrosions- und Zunderbeständigkeit (Oxidation), wirkt sich jedoch negativ auf die Kriechfestigkeit des Werkstoffs aus (Strassburg 2019). Molybdän, Wolfram und Kobalt werden zur Erhöhung der Festigkeit zulegiert. Titan und Aluminium behindern durch die Bildung intermetallischer Phasen das Kriechen des Werkstoffs. Auch kleine Mengen an Cer, Hafnium, Zirkonium und Yttrium werden als Korrosionsinhibitoren verwendet (Dubbel 1983). Rhenium, ein Metall mit dem zweithöchsten Schmelzpunkt nach Wolfram, wird in Anteilen von 3–6 % für bestimmte hoch belastete Bauteile, bspw. in Strahltriebwerken, als Legierungsbestandteil zugesetzt (Konter 2012). Bedder & Baylis (2013) gehen davon aus, dass 75 % des Rhenium in

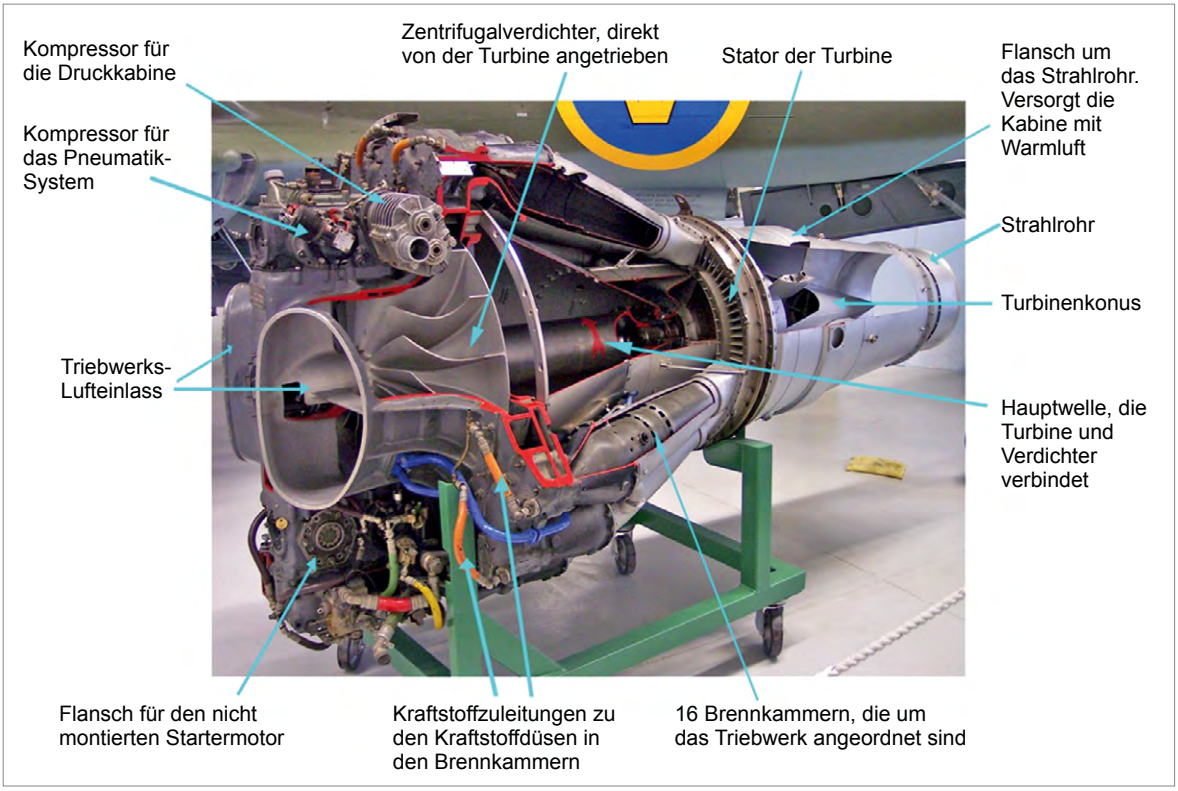


Abb. 3.12: Strahltriebwerk (Quelle: Ian Dunster, Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

Nickelbasislegierungen verbraucht werden, weshalb kontinuierlich versucht wird, Rhenium einzusparen.

Tab. 3.20: Durchschnittliche Zusammensetzung von Nickelbasis-Superlegierungen (Quelle: European Commission 2020a; European Commission 2020b)

Legierungselement	Gewichtsanteil [%]
Nickel	57
Chrom	17
Kobalt	10
Eisen	1,4
Molybdän	3
Aluminium	1,7
Titan	1,6
Niob	1,3
Kohlenstoff	0,07

Kobaltbasislegierungen

Eine weitere Gruppe von Superlegierungen sind die Kobaltbasislegierungen. Sie zeichnen sich durch eine hohe Verschleißfestigkeit aus und deren Beständigkeit gegen Abrieb und Korrosion geht auch bei höheren Temperaturen nicht verloren. Die Zeitstandfestigkeit ist jedoch niedriger zu bewerten als bei den Nickelbasislegierungen. Die Zeitstandfestigkeit ist jene Zugspannung, die bei einem Werkstoff auf einer bestimmten Temperatur (bspw. 600 °C) über eine bestimmte Beanspruchungszeit (bspw. 10.000 Stunden) zum Bruch führt. Die Zeitstandfestigkeit bestimmt die zulässige Betriebsdauer eines Bauteils.

Ein Hauptlegierungsbestandteil der Kobaltbasislegierungen ist Chrom. Je nach Anwendung werden Molybdän, Wolfram, Nickel und andere Metalle zulegiert. Ihre Anwendung sind Bauteile, die hohen Verschleißbelastungen ausgesetzt sind, beispielsweise Schneidwerkzeuge, Laufschienen von Kettensägen, Auskleidungen von Waffenläufen und Gleitpaarungen von künstlichen Gelenken. Tab. 3.21 gibt die durchschnittliche Zusammensetzung üblicher Kobaltbasislegierungen an.

Tab. 3.21: Durchschnittliche Zusammensetzung von Kobaltbasis-Superlegierungen (Quelle: Donaldson & Beyersmann 2012)

Legierungselement	Gewichtsanteil [%]
Kobalt	55
Chrom	21,5
Molybdän	0,4
Wolfram	8,4
Eisen	2,6
Nickel	8,3
Tantal	1,7
Niob	0,4
Titan	0,5
Bor	< 0,4
Zirkonium	0,1
Kohlenstoff	< 0,85

Titanlegierungen

Die Nutzung von Titanlegierungen begann um 1950 und damit 50 Jahre nach den ersten Versuchen mit Nickel- und Kobaltbasislegierungen. Ursprünglich auf die Luft- und Raumfahrtindustrie beschränkt ist Titan aufgrund seines nicht zu übertreffenden Verhältnisses von Festigkeit zu Gewicht in unzählige Anwendungen vorgedrungen. Heute stehen hochwarmfeste, korrosionsbeständige Titanlegierungen für Arbeitstemperaturen bis 600 °C zur Verfügung (Sibum et al. 2017). Sie erreichen damit beinahe die Einsatzgrenze hochwarmfester Stähle. Tab. 3.22 zeigt die Zusammensetzung der Titanlegierung IMI 829 für Hochtemperatur-Technologien. Als weitere Legierungselemente in spezifischen Anwendungen werden Kupfer, Mangan, Vanadium und andere verwendet.

Tab. 3.22: Zusammensetzung einer warmfesten Titanlegierung (Quelle: Meetham 2012)

Legierungselement	Gewichtsanteil [%]
Titan	86,45
Aluminium	5,50
Zinn	3,50
Zirkonium	3,00
Niob	1,00
Silizium	0,30
Molybdän	0,25

Cermets

Ein weiterer Werkstoff für warmfeste und verschleißfeste Werkstoffe sind Cermets. Das sind Metall-Keramik-Verbünde, bei denen in eine Metallphase keramische Stoffe oder Karbide eingelagert werden, beispielsweise Wolframkarbid in Kobalt, Titankarbid in Nickel, Aluminiumoxid (Al_2O_3) in Chrom oder Thoriumoxid (ThO_2) in Wolfram. Durch die Nutzung von Metall als Bindemittel wird die Sprödigkeit behoben, die für reine Keramiken typisch ist. Cermets werden als Hartmetalle in Schneidwerkzeugen für Metall und Stein genutzt, für Hochtemperatur-Anwendungen wie Thermoelement-Schutzröhren, als Kathoden in Elektronenstrahlröhren und als Gleitkugel in Kugelschreibern, um einige zu nennen. Ihre Herstellung erfolgt pulvermetallurgisch.

3.1.6.3 Foresight Industrielle Nutzung

Die Nutzung von Nickel-Chrom-Legierungen geht auf den Beginn des 20. Jahrhunderts zurück. Ihre Nutzung hat seither stetig zugenommen und in jüngerer Zeit durch die Bestrebungen, mit Energieeffizienz und Leichtbau zum Klimaschutz beizutragen und die stark steigenden Kosten für Brenn- und Treibstoffe aufzufangen, neue Impulse erhalten. Anwendungen von Superlegierungen wurden in den vorhergehenden Abschnitten diskutiert. Sie sind äußerst vielfältig und entziehen sich einer quantitativen Abschätzung des mengenmäßigen Umfangs der heutigen und künftigen Nutzung. Auch die Welthandelsstatistik der Vereinten Nationen (UN COMTRADE) liefert keine verwertbaren Informationen für eine Abschätzung des globalen Bedarfs an Superlegierungen.

Superlegierungen vereinen mehrere vorteilhafte Eigenschaften, auf die bereits hingewiesen wurde. Ihre Anwendung führt zum Teil zu enormen Verbesserungen in der Produktentwicklung.

Nach G. W. Meetham, von Rolls-Royce plc, UK, konnte z. B. an einem Strahltriebwerk durch den Einsatz einer Hochtemperatur-Titan-Legierung im Vergleich zum Werkstoff Stahl der Treibstoffverbrauch um 13 % und das Gewicht um 18 % gesenkt sowie der Schub um 42 % gesteigert werden (Meetham 2012). Bei Dieselmotoren hält die gleiche Quelle durch die Nutzung von Hochtemperatur-Keramiken eine Steigerung des Wirkungsgrads von 38 auf 65 % für möglich (Meetham 2012).

Die Werkstoffentwicklung von Superlegierungen ist noch keineswegs abgeschlossen, was sich auch daran zeigt, dass die Anzahl an Patenten zu Superlegierungen zwischen 2015 und 2019 kontinuierlich um 24 % zunahm (Frost & Sullivan 2020b). Der Fokus vergangener Forschungsarbeiten verschob sich innerhalb der letzten fünf Jahre in Richtung Nickel-Basislegierungen, zu welchen ein signifikant steigendes Interesse beobachtet werden kann, wohingegen die Anzahl der Forschungsarbeiten zu Kobalt- bzw. Eisen-Basislegierungen rückläufig war (Frost & Sullivan 2020b). Neben der Weiterentwicklung neuer Legierungen wird auch die Bearbeitung von Bauteilen aus Superlegierungen tiefergehend untersucht, da sich diese aufgrund der hohen Hitzebeständigkeit und Festigkeit häufig als schwierig erweist. Dabei stehen insbesondere Verfahren zur mechanischen Weiterverarbeitung (Thellaputta et al. 2017) und zum Schweißen von Superlegierungen (Sashank et al. 2020) im Fokus.

Durch das Vordringen von Superlegierungen gehen insbesondere Nachfrageimpulse auf Nickel, Chrom, Kobalt und Titan aus. Abb. 3.13 zeigt, dass sich die Zusammensetzung der Superlegierungen über die Zeit maßgeblich weiterentwickelt. Ein Hemmnis für das Wachstum von Superlegierungen stellt die immer komplexere Werkstoffzusammensetzung dar. Um den steigenden Anforderungen bezüglich mechanischer Eigenschaften und Korrosionsbeständigkeit gerecht zu werden, steigen die Anteile teurer Elemente wie Rhenium oder Ruthenium, sodass die Kosten für Superlegierungen steigen (Frost & Sullivan 2020b).

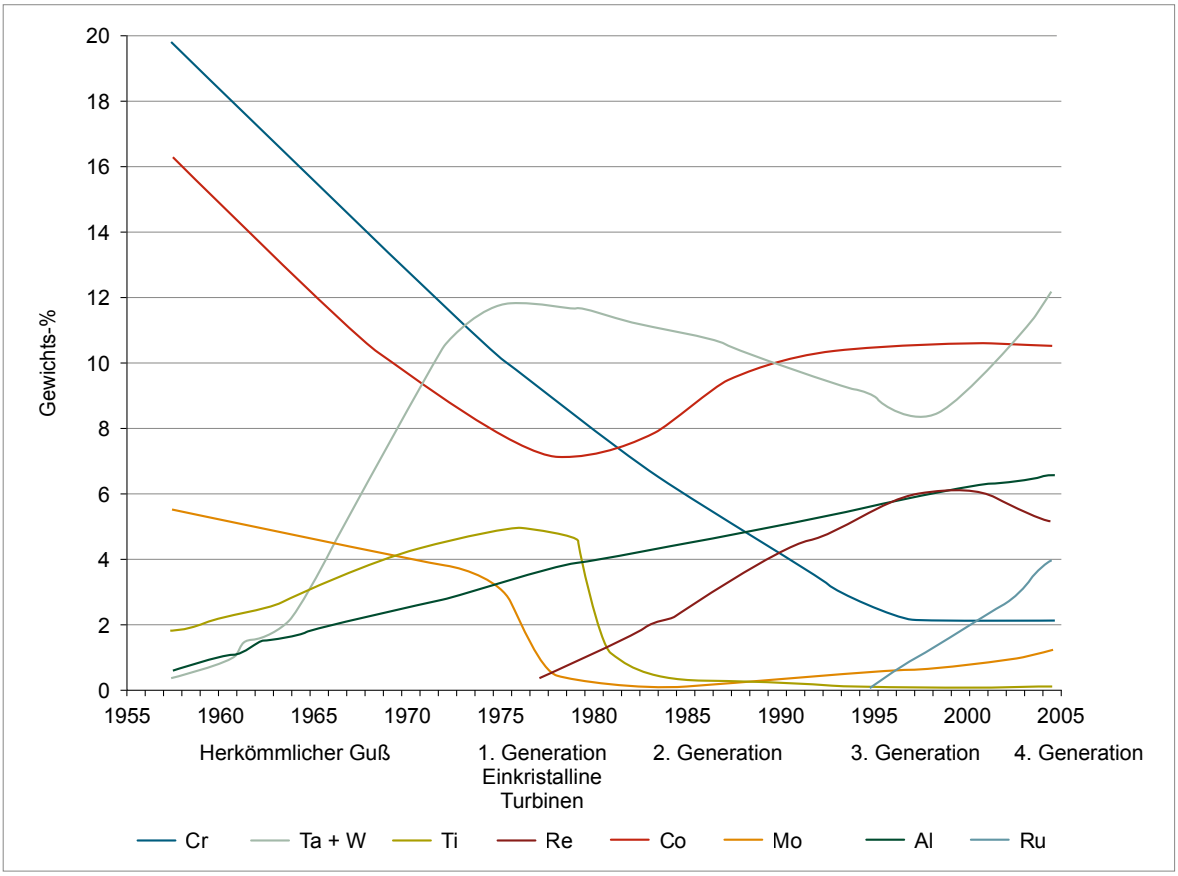


Abb. 3.13: Materialentwicklung im Strahltriebwerksbau (Quelle: verändert nach Clifton 2013)

3.1.6.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für 2018 wird von NETL (2019) ein weltweiter Bedarf von 287 Kilotonnen Nickelbasis-Superlegierungen angegeben. Nach Bedder & Baylis (2013) sind 95 % der eingesetzten Superlegierungen auch Nickelbasislegierungen. Innerhalb des gebildeten Rohstoffbedarfsszenario wird davon ausgegangen, dass die übrigen 5 % Kobaltbasislegierungen sind, da Eisenbasislegierungen unter den Superlegierungen eher selten sind. Somit ergibt sich ein Bedarf von 15 Kilotonnen Kobaltbasislegierungen in 2018.

Über die durchschnittlichen Zusammensetzungen der Superlegierungen auf Nickel- bzw. Kobaltbasis, welche in Tab. 3.20 und Tab. 3.21 gegeben sind, kann der Bedarf an den jeweiligen Legierungselementen für 2018 berechnet werden. Dieser ist in Tab. 3.23 gegeben und wird der Metallproduktion desselben Jahres gegenübergestellt.

Um das Wachstum des Marktes für Superlegierungen abzuschätzen, wird zwischen den Anwendungsgebieten der Superlegierungen unterschieden, wie diese in Abb. 3.11 gegeben sind. Die Verwendung von Superlegierungen für Luft- und Raumfahrt wird als konstant zu der Anzahl produzierter Flugzeuge angenommen, wie diese im Kapitel 3.1.3 beschrieben ist. Die Verwendung in den weiteren Anwendungsfeldern wird als konstant wachsend mit dem BIP nach den einzelnen Szenarien angesehen.

Die Rohstoffzusammensetzung der Superlegierungen wird über den betrachteten Zeitraum als konstant angenommen, kann sich in der Realität jedoch durch neue Legierungsbestandteile und -zusammensetzungen verändern. Mit dem angenommenen Wachstum ergibt sich für 2040 ein abgeschätzter Bedarf von knapp 520 bis 720 Kilotonnen Superlegierungen. Daraus ergibt sich die Rohstoffbedarfsvorschau, welche in Tab. 3.23 gegeben wird. Der Rohstoffbedarf erweist sich im Szenario SSP5 als besonders kritisch, da innerhalb diesem vom größten Wachstum im Flugzeugbau ausgegangen wird. Bei Kobalt beispielsweise ergibt sich im SSP5-Szenario für das Jahr 2040 ein kritischer Bedarf von ca. 70 % der Jahresproduktion von 2018. Demgegenüber steht

Tab. 3.23: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe für Superlegierungen in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Nickel	2.189.313 (R)	164.000	301.000	283.000	392.000
Chrom	27.000.000 (B)	52.000	95.000	89.000	124.000
Kobalt	126.019 (R)	37.000	68.000	63.000	88.000
Niob	68.200 (B)	4.000	6.900	6.500	9.000
Eisen	1.520.000.000 (B)	4.000	8.100	7.600	10.500
Molybdän	265.582 (B)	9.000	16.000	15.000	21.000
Aluminium	63.756.032 (R)	5.000	8.900	8.400	11.600
Titan	260.548 (R)	5.000	8.500	8.000	11.100
Wolfram	77.080 (B)	1.300	2.300	2.200	3.000
Tantal	1.832 (B)	260	470	440	610
Bor	N/A[1]	60	110	100	140
Zirkonium	1.256.362[2] (B)	20	28	26	36

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

[1] *Keine aussagekräftigen Daten verfügbar, da länderbezogene Produktionsdaten auf unterschiedlichen Bor-Produkten/ Bor-Inhalten basieren*
[2] *Produktion Zirkoniumminerale*

jedoch der Trend zu mehr Nickelbasislegierungen statt Kobaltbasislegierungen, welcher innerhalb des Szenarios nicht weiter berücksichtigt werden konnte. Jedoch wird Kobalt auch für Nickelbasislegierungen mit einem Massenanteil von bis zu 20 % eingesetzt (Strassburg 2019). Des Weiteren sind im SSP5-Szenario hohe Bedarfe von Nickel und Tantal zu berücksichtigen, welche 18 % bzw. 33 % der derzeitigen Produktion entsprechen. Geringere Einflüsse wird es auch auf den Markt von Niob (13 % der Produktion von 2018) und Molybdän (8 % der Produktion von 2018) geben. Für die Szenarien SSP1 und SSP2 ergeben sich jeweils niedrigere Rohstoffbedarfe, wobei trotz einer höheren Anzahl in der Flugzeugproduktion wegen des niedriger angenommenen Wirtschaftswachstums das Szenario SSP2 am niedrigsten liegt.

In den oben beschriebenen Annahmen wird von einer gleichbleibenden Zusammensetzung der Superlegierungen ausgegangen. In Zukunft könnten jedoch zusätzlich bis zu 4 % Rhenium und 5 % Ruthenium den Nickelbasisgelierungen zulegiert werden (Frost & Sullivan 2020b). Es zeigt sich in Tab. 3.24, dass in dem SSP5-Szenario bis 2040 58 % der derzeitigen weltweiten Rheniumproduktion für Superlegierungen eingesetzt werden könnte, sodass bei einem Durchsetzen dieser Legierung mit einem signifikanten Einfluss auf den Rhenium-Markt zu rechnen wäre. Sogar noch kritischer ist die Bedarfsvorschau von Ruthenium, bei welcher der geschätzte Bedarf für Superlegierungen in dem SSP5-Szenario 2040 bei 109 % der Bergwerksförderung von 2018 liegt. In allen drei Szenarien wird mit einem erheblichen Einfluss auf die Märkte von Rhenium und insbesondere Ruthenium gerechnet.

3.1.6.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Da Superlegierungen, wie oben dargestellt, u. a. in großen Turbinen eingesetzt werden und ihre Zusammensetzung in Teilen bekannt ist, können diese effizient für das Recycling gesammelt werden. Die komplexe Zusammensetzung und Veränderung der Legierungsbestandteile, welche in Abb. 3.13 dargestellt ist, stellen jedoch eine große technische und folglich auch wirtschaftliche Herausforderung für das Recycling von Superlegierungen dar. Dennoch sind der hohe Rohstoffpreis und die knappe Verfügbarkeit einiger Legierungsbestandteile der Superlegierungen Treiber für das Recycling. Neben dem Wiedereinschmelzen gemeinsam mit Primärmaterial zur Produktion neuer Superlegierungen existieren auch pyro- und hydrometallurgische Prozesse zur Gewinnung der einzelnen Metalle der Superlegierung (Srivastava et al. 2014). Besonders knappe Metalle wie Ruthenium und Rhenium könnten in Zukunft substituiert werden.

3.1.7 Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher (für mobile Anwendungen)

3.1.7.1 Technologiebeschreibung

Elektromobilität ist seit Jahren ein heranwachsender Sektor und erfährt zudem eine hohe mediale Aufmerksamkeit. Durch aktuelle politische Debatten wie das Dieselfahrverbot und politische Ziele, Europa bis 2050 klimaneutral zu machen, ist auch eine Mobilitätswende nötig, welche die Förderung

Tab. 3.24: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe in t; unter der Annahme, dass sich Ruthenium und Rhenium in Superlegerungen durchsetzen

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Ruthenium	33[1] (R)	15	28	26	36
Rhenium	50 (B)	12	22	21	29

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

[1] *Quelle: JM 2020*

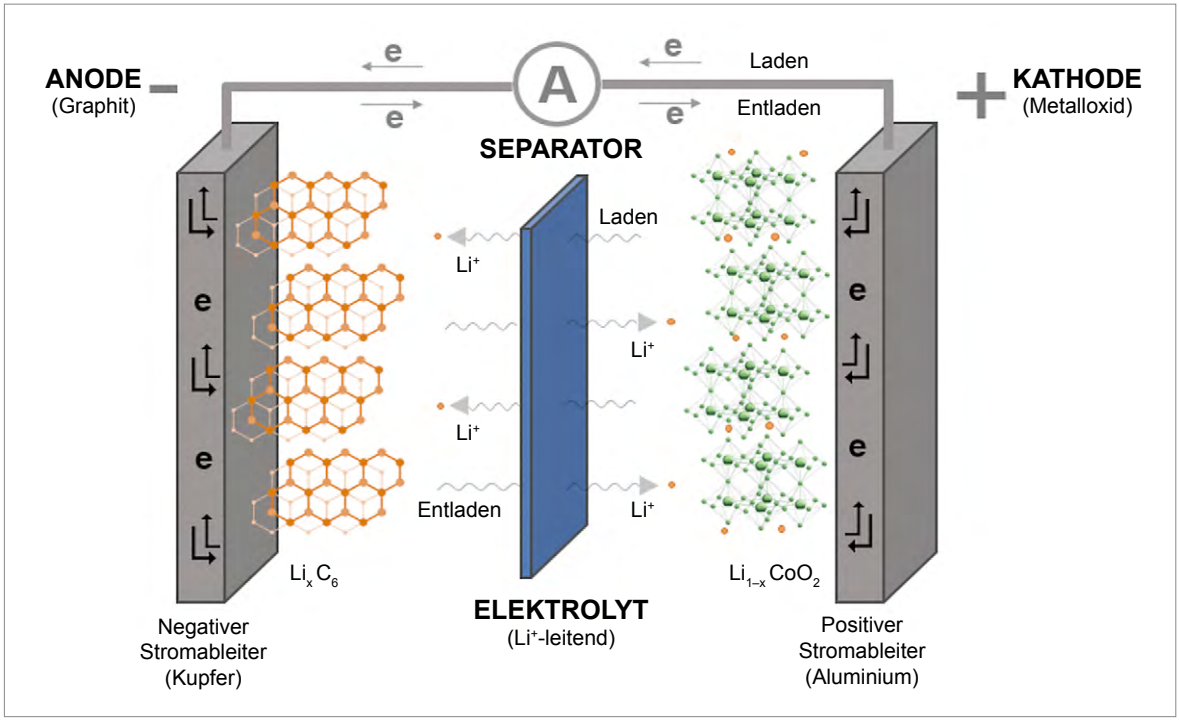


Abb. 3.14: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie (Quelle: Eigene Darstellung)

und den Ausbau von Elektromobilität einschließt (Europäische Kommission 2019). Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren verursachen Elektrofahrzeuge während ihrer Nutzungsphase keine lokalen Treibhausgasemissionen wie CO_2 oder andere Luftschadstoffe wie Stickoxide. Während heutzutage zur Stromproduktion in der Regel noch fossile Energieträger eingesetzt werden, kann zukünftig bei der Verwendung sogenannter grüner Energieträger bei der Stromerzeugung eine emissionsfreie Nutzung möglich sein. In der Untersuchung des Lebenszyklus eines Elektrofahrzeuges gegenüber einem Diesel- oder Benzin-Pkw kommen viele Studien zum Schluss, dass Elektrofahrzeuge schon heute eine positive Klimabilanz haben, die sich mit einem Ausbau der CO_2-neutralen Stromerzeugung noch verbessern wird (Agora Verkehrswende 2019a; Reuter et al. 2019). Einige kritische Stimmen sehen es u.a. als sinnvoller an, grünen Strom mittelfristig im Stromnetz zu nutzen und damit z. B. Kohlestrom zu substituieren. Die Förderung von Elektroautos beim heutigen Energieträgermix im Stromnetz solle daher zu ca. 75 % mehr THG-Emissionen bei Elektroautos gegenüber Dieselfahrzeugen führen (Schmidt 2020). Im wissenschaftlichem Diskurs wird diesen Berechnungen aber wiedersprochen (Wietschel 2020).

Die vier Hauptbestandteile einer Lithium-Ionen-Zelle sind die Kathode, die Anode, der Elektrolyt und der Separator (Abb. 3.14). Beim Entladevorgang fungiert die Kathode als positive Elektrode und die Anode als negative Elektrode, was sich beim Ladevorgang umkehrt (Korthauer 2013).

Als Anodenmaterialien kommen derzeit je nach Anwendung amorpher Kohlenstoff (Hard und Soft Carbons), Graphit, Lithiumtitanat (LTO) oder Siliziumverbundwerkstoffe zum Einsatz. Amorpher Kohlenstoff sowie auch Graphit kommen natürlich vor, können aber auch synthetisch hergestellt werden (Korthauer 2013).

Als positives Elektrodenmaterial an der Kathode kommen überwiegend Übergangsmetallschichtoxide zum Einsatz (Kurzweil & Dietlmeier 2018). Bei konventionellen Kathodenmaterialien für meist kleine elektronische Anwendungen wie Smartphones, Laptops oder Tablets kommt Lithium-Kobaltoxid (LCO) zum Einsatz. Aufgrund der geringen thermischen Stabilität von Kobaltoxid und dessen hohem Materialpreis wird es nicht in der Elektromobilität verwendet (Zubi et al. 2018). Hierfür werden folgende Elektrodenmaterialien verwendet:

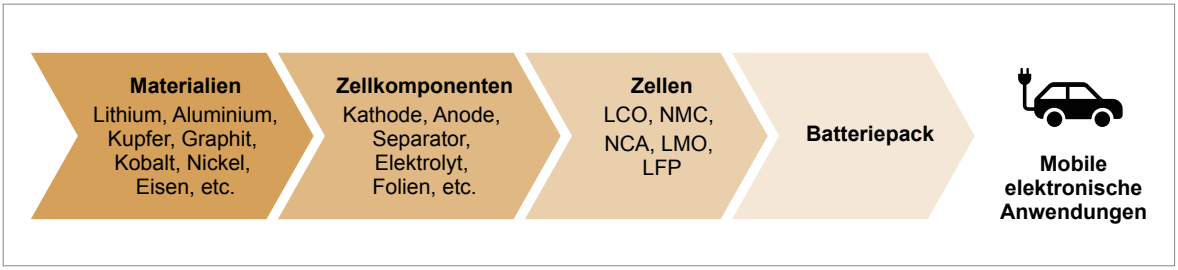


Abb. 3.15: Aufbau der Batteriepacks für elektronische Anwendungen (Quelle: Zubi et al. 2018)

Tab. 3.25: Leistungsmerkmale verschiedener Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien (Quelle: Kurzweil & Dietlmeier 2018, Zubi et al. 2018, Reinhardt et al. 2019, Battery University 2020; Duan et al. 2020, Durmus et al. 2020)

Kathode	LCO	LMO	NMC	NCA	LFP
Summenformel	$LiCoO_2$	$LiMn_2O_4$ (spinel)	$LiNi_xMn_yCo_{1-x-y}O_2$	$LiNiCoAlO_2$	$LiFePO_4$
Energiedichte auf Zellebene [Wh/kg]	150–200	100–140	150–270	200–270	90–120
Thermisches Durchgehen [°C]	150	250	210	150	270
Zellspannung [V]	3,6 – 3,9	3,7 – 4,0	3,6 – 3,7	3,6 – 3,8	3,1 – 3,3
Praktische Kapazität [Ah/kg]	145	120	150 – 180	190 – 200	160
Kosten	Hoch	Niedrig	Mittel	Mittel	Niedrig
Sicherheit	Niedrig	Mittel	Hoch	–	Sehr hoch

- Lithium-Manganoxid (LMO)
- Lithium-Nickel-Mangan-Kobaltoxid (NMC)
- Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid (NCA)
- Lithium-Eisenphosphat (LFP)

Ein Batteriepack, welches für Elektrofahrzeuge benötigt wird, besteht aus einzelnen Zellen, diese bestehen aus Zellkomponenten, welche bestimmte Metalle als chemische Verbindungen enthalten (Abb. 3.15).

Im Gegensatz zu Nickel-Kadmium (NiCd) und Nickel-Metallhydrid (NiMH) Batterien mit Energiedichten von bis zu 60 Wh/kg und 80 Wh/kg erreichen heutige 3,7 V-Lithium-Ionen-Batterien spezifische Energiedichten von bis zu 270 Wh/kg (Tab. 3.25) (Kurzweil & Dietlmeier 2018). Eine hohe Energiedichte ist vor allem bei mobilen Anwendungen wie Mobiltelefonen, Laptops oder elektrischen Fahrzeugen notwendig, da der Akku bei gleichbleibender Kapazität umso leichter bzw. kleiner wird, je größer die Energiedichte ist (Rahimzei et al. 2015).

Als Zukunftstechnologien im Gegensatz zur klassischen Lithium-Ionen-Batterie werden die Lithium-Schwefel und die Lithium-Luft-Batterie gesehen, welche grundsätzlich eine andere Zellstruktur aufweisen und eine höhere Energiedichte besitzen können (Korthauer 2013). Lithium-Schwefel-Batterien können Energiedichten von 300 – 350 Wh/kg aufweisen, während Lithium-Luft-Batterien Energiedichten von 700 – 1.700 Wh/kg erreichen könnten (Korthauer 2013; Kim et al. 2019). Diese Batterietypen werden in der Prognose für 2040 nicht berücksichtigt, da eine Einführung bis zu diesem Jahr und ihre Nutzung in der Elektromobilität unklar ist.

3.1.7.2 Rohstoffinhalt

Für NMC-Batterien existieren verschiedene Zusammensetzungen innerhalb ihrer Summenformel, bezogen auf den Inhalt an Nickel, Mangan und Kobalt. Neben der klassischen NMC 111 mit jeweils gleichen Anteilen an Nickel, Mangan und Kobalt gibt es noch NMC 433 (Verhältnis 4:3:3), NMC 532 (Verhältnis 5:3:2), NMC 622 (Verhältnis 6:2:2), NMC 811 (Verhältnis 8:1:1) (Thielmann et al. 2015). An einer weiteren Einsparung von Kobalt, bis hin zu kobaltfreien Batterien, wird geforscht.

Der hohe Nickelgehalt verbessert die Kapazität der Batterie und erhöht beispielsweise die einer NMC 811 um fast 50 % gegenüber NMC 111 auf etwa 200 mAh/g (Research Interfaces 2020). Dies stellt zwar im Gegensatz zu den klassischen NMC-Kathoden der aktuellen Generation keinen großen Sprung dar, dennoch wird prognostiziert, dass NMC mit verschiedensten Zusammensetzungen 75 % des Batteriemarktes im Jahr 2030 dominieren werden (Zhao 2018).

Berechnungen des Kathodenmaterial- und Metallbedarfs pro kWh wurden im Folgenden auf Grundlage typischer Formierungsverluste, wie sie heute bei Graphitanoden auftreten, durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.26 dargestellt.

3.1.7.3 Foresight industrielle Nutzung

Nach dem heutigen Stand kann die Lithium-Ionen-Technologie unter den zur Verfügung stehenden Speichertechnologien die hohen Anforderungen eines großen Speichersystems im Elektromobilbereich in Bezug auf Lebensdauer, Sicherheit sowie Leistungs- und Energiedichte am besten erfüllen (Kampker et al. 2018).

Der Trend bei Kathodenmaterialien für LIB geht zu einem kobaltarmen und nickelreichen Rohstoffeinsatz, um die Materialkosten zu senken und potentiell kritische Materialien weitestgehend zu substituieren. Mit einem hohen Nickelanteil steigt auch die elektrische Leitfähigkeit und das Li^+-Diffusionsvermögen, was eine Steigerung der Materialperformance bewirkt (Thielmann et al. 2018).

NMC 622 stellt in der Automobilindustrie den Stand der Technik dar. NMC 811 befindet sich aktuell aufgrund der höheren spezifischen Energiedichte in der Kommerzialisierung (Ding et al. 2019). Neben der erhöhten Energiedichte durch Verwendung von NMC-811 werden die Batteriekosten aufgrund der Reduzierung des derzeit gegnüber Nickel teureren Elements Kobalt im NMC 811 (10 Gew.-%) im Gegensatz zu NMC-111 (33,3 Gew.-%) erheblich gesenkt (Ding et al. 2019).

Hochenergie-NMC (HE-NMC) sind lithiumreiche „integrierte“ Kompositmaterialien, welche eine

Tab. 3.26: Spezifische Metallmengen in Batteriekathoden [kg/kWh]

Kathodenmaterial	Li	Co	Ni	Mn	Fe	P	Al	O
NMC-111	0,120	0,333	0,333	0,312	0	0	0	0,550
NMC-433	0,117	0,298	0,395	0,278	0	0	0	0,539
NMC-532	0,121	0,205	0,512	0,191	0	0	0	0,558
NMC-622	0,104	0,176	0,525	0,164	0	0	0	0,476
NMC-811	0,096	0,082	0,653	0,076	0	0	0	0,445
HE-NMC 2030	0,123	0	0,106	0,491	0	0	0	0,456
NCA15	0,098	0,125	0,661	0	0	0	0,019	0,451
NCA 5	0,095	0,065	0,725	0	0	0	0,011	0,439
LFP	0,084	0	0	0	0,674	0,374	0	0,772
LMO	0,080	0	0	1,266	0	0	0	0,738

Steigerung der Energiedichte zum Ziel haben und aufgrund des hohen Mangananteils auch einen preislichen Vorteil gegenüber nickelreichen Materialien bietet (Rozier & Tarascon 2015; Thielmann et al. 2017). Ein Markteintritt der Technologie könnte im Jahr 2025 erfolgen, insofern die derzeitigen Schwierigkeiten überwunden werden (Thielmann et al. 2017).

Die seit vielen Jahren im Fokus stehenden LFP-Kathoden scheinen derzeit aufgrund der geringen, auf Zellebene erzielbaren Energiedichte von 90 – 120 Wh/kg, mittelfristig keine realistischen Konkurrenten im Bereich der Automobilindustrie zu sein, könnten jedoch eine Wiederbelebung erfahren, wenn ökologische Kriterien an Bedeutung gewinnen (Zubi et al. 2018; Wu et al. 2020). Die LFP-Batterie spielt heute eine marginale Rolle bei Elektrofahrzeugen, während sie bei E-Bikes einen besseren Erfolg erzielt sowie großes Potenzial für den Einsatz in netzunabhängigen und netzgekoppelten Stromversorgungssystemen bietet (Zubi et al. 2018).

Unter den vier Hauptchemien für LiB zeigt LMO eine mäßige Sicherheit und eine relativ niedrige spezifische Energie (Ding et al. 2019). Obwohl LMO-Zellen ursprünglich in einigen Elektrofahrzeugen verwendet wurden, hat das Interesse an diesem Material nachgelassen (Zubi et al. 2018). Auf Basis dieser Trends wurde eine Abschätzung der Anteile der Kathodematerialien bis zum Jahr 2040 durchgeführt (Abb. 3.16).

Im Gegensatz zum alleinigen Einsatz von Graphit als Anodenmaterialien in LIB gelten Silizium-Kohlenstoffkomposite als vielversprechend. Bereits heute werden Si-basierte Beimischungen in LIB eingesetzt. Es kann mit einer fortlaufenden Steigerung des Si-Anteils gerechnet werden. Eine Ausreifung von Si-reichen Technologien sowie deren produktionstechnische Umsetzung wird bis 2025 erwartet (Thielmann et al. 2017).

3.1.7.4 Foresight Rohstoffbedarf

Zur Kalkulation des zukünftigen Rohstoffbedarfs wird aus einer umfangreichen Literaturrecherche von Antriebstechnologien und Fahrzeugsegmenten die durchschnittliche Batteriegröße ermittelt (Tab. 3.27) und eine Abschätzung der Anteile der Kathodematerialien bis zum Jahr 2040 durchgeführt (Abb. 3.16).

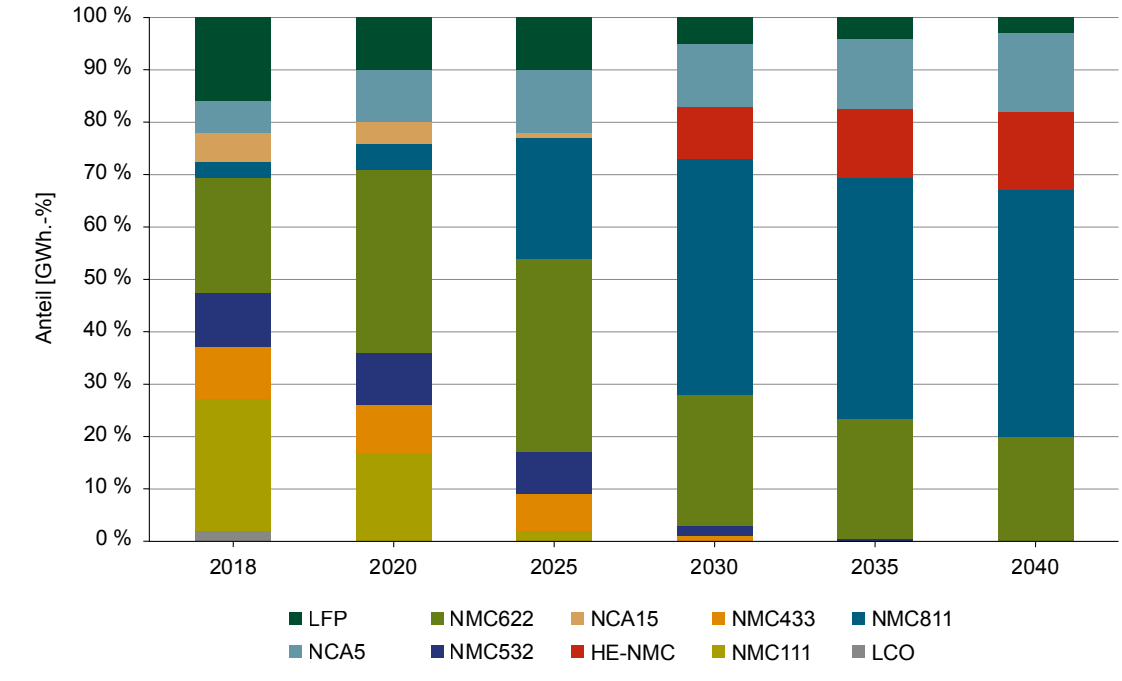


Abb. 3.16: Abschätzung der Anteile der Kathodenmaterialien bis 2040 (Quelle: Eigene Darstellung)

Tab. 3.27: Batteriegrößen nach Antriebstechnologie und Größensegment in kWh (Werte gerundet)

Fahrzeugsegment	HEV bis 2020	HEV ab 2020	PHEV bis 2020	PHEV ab 2020	BEV bis 2020	BEV ab 2020	FCEV bis 2020	FCEV ab 2020
	Durchschnittliche Batteriekapazität [kWh]							
Kleinwagen	–	1	24		25	30	1*	1,6*
Kompaktwagen	1	1	11	12	35	51	1*	1,6*
Oberklasse	–	2	12	14	83	83	1	1,6
Leichte Nutzfahrzeuge	–	–	14		29	50	1*	1,6
Schwere Nutzfahrzeuge	–	–	41		307		10*	
Busse	–	–	–	–	193		10*	

** geschätzt*

Tab. 3.28: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Kobalt	151.059 (B) 126.019 (R)	12.750	311.000	270.400	59.830
Nickel	2.327.499 (B) 2.189.313 (R)	32.320	2.003.000	1.742.000	385.400
Mangan	20.300.000 (B)	11.140	530.500	461.300	102.000
Lithium	95.170 (B)	7.460	377.300	328.100	72.600
Flockengraphit (natürlich)	1.156.300 (B)	21.900	1.019.000	886.400	196.000
Graphit (synthetisch)	1.573.000				

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Die anschließende Berechnung des Rohstoffbedarfes erfolgt mit Hilfe der spezifischen Metallmengen der Batteriekathoden, der Anteile der Kathodenmaterialien und der Gesamtkapazitäten der in Kapitel 1.3 kalkulierten Szenarien (Tab. 3.28).

3.1.7.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die meisten bestehenden Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien konzentrieren sich hauptsächlich auf die Rückgewinnung von Kobalt, Nickel sowie Kupfer und nicht auf die Rückgewinnung von Lithium. Die Gründe hierfür sind zum einen, dass Recyclinganlagen sich auf die Rückgewinnung älterer LIBs (hauptsächlich LCO) konzentrieren müssen, die heutzutage das Ende ihrer Lebensdauer erreichen, und zum anderen, dass der Rohstoff Kobalt bei weitem das wertvollste Metall in Lithium-Ionen-Batterien ist und somit verantwortlich für die Rentabilität beim Recycling (Or et al. 2020). In Tab. 3.29 sind einige Recyclinganlagen ohne Anspruch auf Vollständigkeit zusammengestellt. Einige Recycler gewinnen eine sogenannte „Schwarzmasse“ als Zwischenprodukt, die Elektrodenaktivmaterialien und Leitsalze enthält und bei anderen Firmen wei-

Tab. 3.29: Recyclinganlagen für LIB weltweit (Quellen: Mayyas et al. 2019, Velázquez-Martínez et al. 2019, Or et al. 2020, Sojka et al. 2020)

Recyclinganlage	Inputstrom	Zurückgewonnene Materialien	Lithiumrück-gewinnung
Umicore Battery Recycling (BE)	LIB, NiMH	Co, Ni, Cu, Fe, $CoCl_2$	Nein
Inmetco (US)	LIB, NiMH, NiCd	Co, Ni, Fe	Nein
Nickelhütte Aue (DE)	LIB, NiMH	Ni, Cu, Co	Nein
Accurec Recycling GmbH (DE)	LIB, NiMH, NiCd	Co-Legierung Schwarzmasse	Li_2CO_3
Sumitomo-Sony (JP)	LIB	CoO	Nein
Recupyl S.A.	LIB, Primär-Li	$LiCO_2$	Li_2CO_3, Li_3PO_4
Retriev Technologies (Toxco)	LIB, Primär-Li	MeO	Li_2CO_3
Akkuser (FI)	LIB	Co, Cu Puder, Fe	Nein
Battery Resources	LIB	$NMC(OH)_2$	Li_2CO_3
LithoRec (Duesenfeld) (DE)	LIB	Metalloxide	Li_2CO_3
OnTo (US)	LIB	Zellkathodenpulver	Li_2CO_3
Aalto University (FI)	LIB	CoC_2O_4, Al	Li-Ni-Lösung
Sung Eel (KR)	LIB	Co, Mn, Ni	Li_2CO_3
Kyoei Seiko (JP)	LIB	Ni, Co, Cu	Nein
Dowa (JP)	LIB	Ni, Co, Cu	Unbekannt
Brunp (CN)	LIB	$NMC(OH)_2$	Unbekannt
GEM (CN)	LIB	Co, Ni	Nein
Huayou Cobalt (CN)	LIB	Co, Ni	Nein
Ganzhou Highpower (CN)	LIB	Co-, Ni-salze	Li_2CO_3

ter aufbereitet wird. In naher Zukunft wird NMC 111 durch NMC 622 und NMC 811 immer weiter ersetzt werden. Die optimierten Zellen werden geringere Mengen an Kobalt und einen höheren Nickelanteil enthalten. Recyclinganlagen sollten daher zukünftig möglichst alle Kathodenchemien mit hoher Effizienz handhaben können, um das Recyclingpotential voll auszuschöpfen. Derzeit gestaltet sich die technische Umsetzbarkeit der Lithiumrückgewinnung noch als schwierig. Vor dem Hintergrund der langfristig prognostizierten Anforderungen an LIB sollte auch hier eine Rückgewinnung angestrebt werden. Im Idealfall sollten Recyclinganlagen auch Verfahren verwenden, die einen geringeren Energieeinsatz und eine geringere Umweltbelastung aufweisen. Der im Dezember 2020 veröffentlichte Vorschlag für eine Verordnung über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020, sieht auch Recyclingeffizienzen für Lithium-Ionen-Batterien und stoffliche Verwertungsquoten für deren enthaltene Rohstoffe Kobalt, Nickel, Lithium und Kupfer vor (Europäische Kommission 2020c).

Graphit ist und bleibt ein wesentlicher Bestandteil von Lithium-Ionen-Batterien und wird auch in Zukunft als Kombination mit Hochleistungsverbindungen wie Silizium oder Silizium-Metall-Legierungen eingesetzt werden (Asenbauer et al. 2020). Obwohl das Recycling von Graphit aus verbrauchten Lithium-Ionen-Batterien eine wichtige Rolle in Bezug auf den Umweltschutz und des zukünftigen Mangels an Graphitressourcen spielt, hat dieses bisher noch keine große Aufmerksamkeit auf sich gezogen, da recyceltes Graphit nicht für den Wiedereinsatz in Batterien geeignet ist (Gao et al. 2020; Liu et al. 2020b). Ein erfolgsversprechendes Reinigungsverfahren EcografTM hat die australische Firma EcoGraf Limited mit dem

Ziel entwickelt, hochreines Anodenmaterial für Batterien aus gebrauchten Lithium-Ionen-Batteriematerialien zurückzugewinnen (EcoGraf 2020).

3.1.8 Feststoffbatterie

3.1.8.1 Technologiebeschreibung

Feststoffbatterien (engl. all-solid-state batteries, ASSB) sind elektrochemische Systeme, in welchen der ionische und elektronische Ladungstransport und die Ladungsspeicherung ausschließlich durch Feststoffe realisiert wird. Gegenüber herkömmlichen Lithium-Ionen-Batterien (Kapitel 3.1.7) unterscheiden sich ASSB insbesondere durch die in den Zellkonzepten verwendeten Elektrolyte (Thielmann et al. 2017; Thielmann et al. 2019).

Viele der Sicherheitsrisiken in herkömmlichen LIB gehen von der Verwendung flüssiger, leicht entzündlicher oder explosiver Elektrolyte aus. Auch die Kompatibilität vieler Aktivmaterialien im elektrochemischen System wird durch die Eigenschaften der Elektrolyte bestimmt. Die üblicherweise eingesetzten organischen Lösungsmittel und Salze begrenzen z. B. die praktisch zugängliche Zellspannung. Viele der Alterungseffekte in LIB sind Resultat des Zusammenspiels aus Elektrolyt und Partikeloberfläche der Aktivmaterialien.

Die Nutzung von Feststoffelektrolyten und damit die Ermöglichung von Feststoffbatterien kann sowohl Sicherheitseigenschaften der Zellen verbessern, als auch neue Materialkombinationen ermöglichen und damit die Leistungsparameter von Batterien verbessern. Insbesondere die Nutzbarmachung von metallischem Lithium als Anode in Li-basierten ASSB verspricht enorme Steigerungen der Energiedichte bis auf Werte über 1.000 Wh/l bzw. über 350 Wh/kg (Thielmann et al. 2017; Green Car Congress 2019; Ruffo 2019). Feststoffelektrolyte könnten metallische Anoden ermöglichen, da sie aufgrund ihrer harten Struktur das Dendritenwachstum von Lithium während der Zyklisierung unterdrücken könnten, welches ansonsten zum Kurzschluss führen kann und damit enorme Sicherheitsprobleme erzeugt.

In Forschung und Industrie werden zurzeit noch unterschiedliche Klassen von Feststoffelektrolyten untersucht. Dazu gehören Gläser, anorganische Keramiken (SCE solid ceramic electrolyte), und auch Polymer-Metallsalz-Komplexe (SPE solid polymer electrolyte) (Takada 2013). Einige der bekannten Oxidkeramiken zeigen eine hohe Spannungsstabilität und erlauben somit die Nutzung von Hochvoltkathoden. Eine generelle Schwäche oxidkeramischer Feststoffbatterien ergibt sich aus der häufig niedrigen ionischen Leitfähigkeit und den hohen Grenzflächenwiderständen zwischen Zellkomponenten. Derartige Batterien müssen häufig bei erhöhten Temperaturen betrieben werden. Sulfidische Feststoffelektrolyte zeigen teilweise deutlich höhere Leitfähigkeiten, was ihren Gebrauch bei Raumtemperatur ermöglicht. Die Materialien besitzen jedoch häufig keine gute chemische Stabilität, was besondere Anforderungen an ihre Prozessierung und Schutzbeschichtungen stellt. Neben den Oxiden und Sulfiden werden z. B. Phosphate für die Eignung als Festelektrolyt untersucht.

Tab. 3.30 führt beispielhaft verschiedene keramische Festelektrolyte und ihre Eigenschaften auf. Unter den untersuchten Systemen sind insbesondere diejenigen interessant, welche eine hohe Ionenleitfähigkeit aufweisen (Sulfide, z. B. LSPS, Lithium-Zinn-Phosphor-Sulfid) oder aus günstigen Rohstoffen hergestellt werden können (z. B. LATP, Lithium-Aluminum-Titan-Phosphat). Insbesondere z. B. germaniumhaltige Verbindungen scheiden daher für die kommerzielle Anwendung aus Kostensicht aus.

Polymere können durch die Komplexbildung mit Li-Salzen ionenleitend gemacht werden. Dabei werden die Salze in den Polymerketten gelöst. Der Ionentransport geschieht über die Beweglichkeit der Ketten des Polymer. Der bekannteste Vertreter dieser Klasse ist Polyethylenoxid (PEO) in Kombination mit Lithiumbis(trifluoromethanesulfonyl)imid (LiTFSI)-Salz. SPEs besitzen bei Raumtemperatur meistens eine niedrige Ionenleitfähigkeit, welche eine praktische Anwendung verhindert. Beispiele aus der Literatur beschreiben, z. B. die Komplexbildung von PEO und einem $LiNO_3$ oder LiTFSI-Salz mit einer Konzentration von Ethylenoxidgruppen zu Li von 20:1 bis 10:1 und ionischen Leitfähigkeit von 0,1 bis 1 mS/cm. Polymerelektrolyte versprechen eine hohe Kompatibilität zu etablierten Fertigungsverfahren der Batteriezellproduktion, da Rolle-zu-Rolle Prozesse angewendet werden könnten.

Tab. 3.30: Auswahl in der Forschung untersuchter keramischer Feststoffelektrolyte der Klassen „Phosphate“, „Oxide“ und „Sulfide“

Material	LATP	LAGP	LLZO	LLTO	LGPS	LSPS1	LSPS2	LPS
Summenformel	$Li_{1,4}Al_{0,4}Ti_{1,6}(PO_4)_3$	$Li_{1,5}Al_{0,5}Ge_{1,5}(PO_4)_3$	$Li_7La_3Zr_2O_{12}$	$Li_{0,34}La_{0,51}TiO_{2,94}$	$Li_{10}Ge_{0,5}Sn_{0,5}P2S_{12}$	$Li_{3,4}Si_{0,4}P_{0,6}S_4$	$Li_{9,54}Si_{1,74}P_{1,44}S_{11,7}Cl_{0,3}$	$Li_{9,6}P_3S_{12}$
Typ	NASICON	NASICON	Granat	Perovskit	LISICON	LISICON	Tetragonal	Tetragonal
Dichte (g/cm³)	2,93	3,42	5,02	4,82	2,03	1,93	1,90	1,91
Ionische Leitfähigkeit bei Raumtemperatur (mS/cm)	2	4	3	0,9	9	6,7	25	1,2

Durch Kombination mit keramischen oder metallorganischen Nanopartikeln zu Kompositelektrolyten (CPE composite polymer electrolyte) kann die Leitfähigkeit von Polymerelektrolyten deutlich erhöht werden. Zu unterscheiden sind SPE/CPE Polymerelektrolyte von sogenannten Gel-Polymeren, wie sie heute bereits in LIB eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um Elektrolytformulierungen, welche sehr ähnlich zu konventionellen Flüssigelektrolyten sind. Durch die Verwendung von CPE mit Ionenleitenden keramischen Füllmaterialien wird der Übergang von Polymerelektrolyten zu keramischen Elektrolyten fließend. In der Anwendung könnte sich eine Kombination aus Polymermatrix, welche die Verarbeitbarkeit unterstützt, und keramischen Füllstoffen, welche die Leitfähigkeit erhöhen und das Wachstum von Li-Dendriten verhindern, durchsetzen. Welche der genannten Materialien und Kombinationen letztlich zum kommerziellen Durchbrauch der Feststoffbatterien führen kann, ist aus heutiger Sicht jedoch noch unklar.

Auch für das Zelldesign sind verschiedene Optionen denkbar. Prinzipiell sind zumindest für Polymerelektrolytzellen alle gängigen Formate möglich, da der Elektrolyt gewickelt werden kann. Rein keramische Elektrolytschichten könnten das Stapeln der Elektroden erfordern. Wie in Abb. 3.17 dargestellt, könnte die Volumenänderung

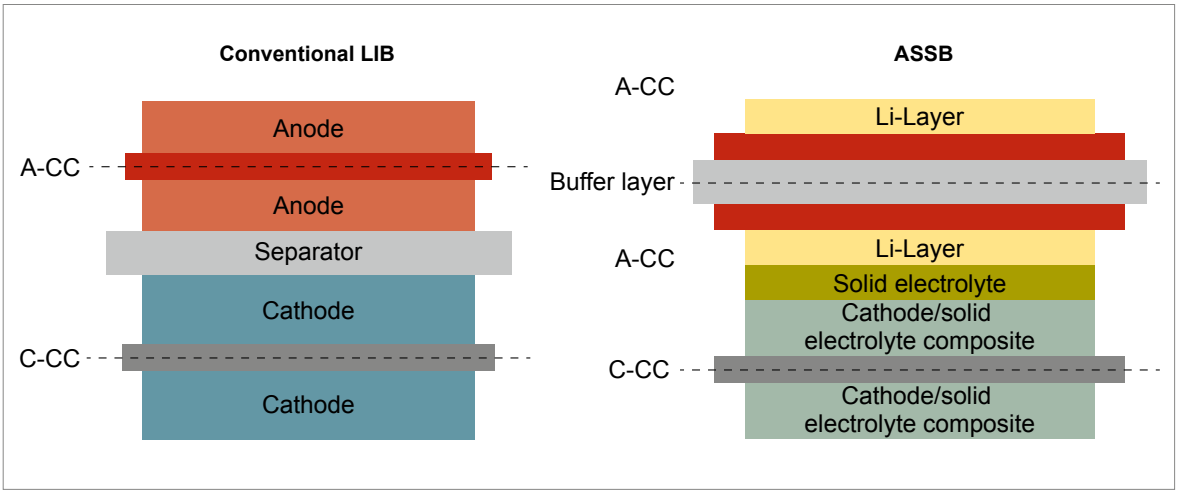


Abb. 3.17: Schematische Darstellung des Aufbaus konventioneller LIB (links) und Feststoffbatteriezellen (rechts) (Quelle: Thielmann et al. 2019)

Anmerkungen: In konventionellen LIB durchdringt der Flüssigelektrolyt das poröse Gesamtsystem Anode, Separator, Kathode. In ASSB besteht die Kathode aus einem Aktivmaterial-Festelektrolytkomposit. Die metallische Li-Schicht könnte dicht ausgestaltet sein. Die Volumenänderung der Li-Schicht während der Zyklisierung kann eine Pufferschicht erfordern.

der Anode während der Zyklisierung eine Pufferschicht erfordern. In diesem Fall ist eine doppelseitige Nutzung der Stromableiterfolien, wie sie in Flüssigelektrolyt-LIB Anwendung findet, zumindest für eine der Elektroden nicht möglich.

3.1.8.2 Rohstoffbedarf

Der Rohstoffbedarf nach den Metallen Lithium, Titan, Lanthan, Kupfer, Mangan, Kobalt und Nickel (Aluminium wurde nicht betrachtet) für ASSB resultiert aus der Nutzung in den Aktivmaterialien, dem Festelektrolyten und den Stromableitern der Batteriezellen. Der Rohstoffbedarf für das Batteriemodul oder auf Packebene wurde nicht betrachtet. Im Vergleich zu konventionellen, flüssigelektrolytbasierten LIB ergeben sich Veränderungen des Rohstoffbedarfs bei der Anode, dem Elektrolyten und gegebenenfalls auch der Kathode.

In ASSB sollen ähnliche Kathodenmaterialien eingesetzt werden, wie dies bei Flüssigelektrolyt-LIB der Fall ist. Zwar schließt die chemische Reaktivität einiger der untersuchten Festelektrolyte gegenüber vielen heutigen Kathodenmaterialien diese Materialkombinationen noch aus, jedoch ist davon auszugehen, dass passende Schutzbeschichtungen entwickelt werden können (Culver et al. 2019). Damit sollten insbesondere Materialien wie NMC und Hochvolt-Spinelle (LMNO) in zukünftigen ASSB verwendbar sein.

Der Rohstoffbedarf pro Wh durch die Kathodenaktivmaterialien deckt sich somit grundsätzlich mit dem in Kapitel 3.1.7 beschriebenen Bedarf für konventionelle LIB. In Zukunft könnte dies jedoch nicht mehr gelten. Die Dimensionierung von Kathode und Anode in LIB muss neben passenden reversiblen Flächenkapazitäten auch hinsichtlich irreversibler chemischer Reaktionen ausgelegt sein. Bei einer zukünftigen Nutzung von siliziumhaltigen Hochkapazitätsanoden könnten irreversible chemische Reaktionen an der Anode bei der Zellformierung dominieren. Die zugrundeliegenden Prozesse verbrauchen Li, welches durch einen Überschuss an Kathodenmaterial in die Zelle eingebracht werden müsste (Aravindan et al. 2017).

In Feststoffbatterien mit metallischer Li-Anode könnte dagegen die Menge an zyklisierbarem Li in der Zelle nicht nur durch die Kathode, sondern auch durch die Dicke der initialen Li-Metallschicht gesteuert werden. Im Ergebnis könnte eine bessere Ausnutzung der Kathodenkapazität, insbesondere über den späteren Verlauf der Batterielebenszeit hinweg, möglich sein, welche sich in einem geringeren Bedarf an Kathodenmaterial pro Wh niederschlägt.

Zum heutigen Zeitpunkt liegt noch kein abschließendes Konzept für die Gestaltung metallischer Li-Anoden vor. Es ist sowohl denkbar, dass initial Li-freie Anoden (Lee et al. 2020) in ASSB verbaut werden, wodurch wiederum das gesamte für die elektrochemischen Reaktionen benötigte Lithium durch die Kathode eingebracht werden muss. Ebenso sind aber auch initial dünne Li-Schichten (z. B. wenige µm) auf den Anodenstromableiterfolien denkbar. Im Vergleich zu konventionellen Flüssigelektrolyt-LIB mit Graphitanoden besteht in dieser Variante für die Anode ein höherer Rohstoffbedarf nach Lithium. In den Berechnungen in Tab. 3.31 wurde eine dünne initiale Lithiumschicht angenommen.

Die größten Veränderungen hinsichtlich des Rohstoffbedarfs ergeben sich durch den Wechsel des Elektrolyten. Die Konzentration (z. B. 1 mol/l) von Li-Salzen in Flüssigelektrolyten entspricht einem geringen Gewichtsanteil von Lithium. Gegenüber dem Anteil von Lithium in den Kathodenmaterialien fällt der Rohstoffbedarf nach Lithium durch den Elektrolyt damit kaum ins Gewicht.

Ähnlich verhält es sich bei polymeren Festelektrolyten (SPE), deren Salzkonzentration im Elektrolyt eine ähnliche Größenordnung besitzt. Durch die Verwendung einer mehr oder weniger glatten Li-Metall-Anode in SPE kann jedoch im Vergleich zu Flüssigelektrolyt-LIB die zur Porenfüllung der (Graphit)-Anode benötigte Menge an Elektrolyt eingespart werden.

Keramische Feststoffelektrolyte (SCE) mit einem oder mehreren Li-Atomen pro Formeleinheit hingegen besitzen eine deutlich höhere Li-Konzentration. Insbesondere bei den Sulfid-Elektrolyten macht der Gewichtsanteil des Lithiums mehr als 10 % aus. Je nach spezifischer Verbindung können weitere der in dieser Studie betrachteten Rohstoffe durch den Einsatz keramischer Feststoffelektrolyte benötigt werden, z. B. Lanthan in LATP.

Tab. 3.31: Vergleich von SCE, SPE und Flüssigelektrolytbatteriezellen und Parameter für die Berechnung des Rohstoffbedarfs

Vergleich Lithium-Bedarf unterschiedlicher Elektrolytsysteme			
System	**SCE**	**SPE**	**Flüssig**
Materialkombination	Als Mix aus 25 % LLZO, 25 % LATP und 50 % LSPS	PEO:LiTFSI	EC/DMC/DEC:LiPF6
Konzentration Li im Elektrolyt	Siehe Summenformeln. Als Mix 8,3 Gew.-%	15:1(EO:Li) entsprechend 0,73 Gew.-%	1M entsprechend 0,55 Gew.-%
Konzentration Ti, La im Elektrolyt	Siehe Summenformeln. Als Mix 5 Gew.-% (Ti) bzw. 12,5 Gew.-% (La)	–	–
Annahmen Elektrolyt	SCE Schicht 5 µm, 25 % Porosität	SPE Schicht 10 µm	Elektrolytbedarf 2 g/Ah auf Zellebene
Annahmen Kathode	SCE 20 Vol.-% in Kathodenkomposit	SPE 20 Vol.-% in Kathodenkomposit	
	6 mAh/cm² Flächenbeladung		
Annahmen Anode	Metallisches Li, 5 µm		–
Annahmen Stromableiter Anode	Cu, 5 µm, einseitig beschichtet		Cu, 6 µm, beidseitig beschichtet
Rohstoffbedarf Li g/kWh	15 (Anode) 27,2 (Elektrolyt)	15 (Anode) 1,3 (Elektrolyt)	3,1 (Elektrolyt)
Rohstoffbedarf Ti g/kWh	16,3 (Elektrolyt)	–	–
Rohstoffbedarf Cu g/kWh	210 (Stromableiter)		126 (Stromableiter)
Rohstoffbedarf La g/kWh	40,9 (Elektrolyt)	–	–

Anmerkung: Der Rohstoffbedarf wurde für SCE als Materialmix aus gleichen Anteilen LLZO, LATP und LSPS berechnet.

Insgesamt ergibt sich damit ein vergleichbarer Rohstoffbedarf für Flüssigeleketrolyt-LIB und reine SPE-LIB. Keramische SCE oder Hybridformen aus SPE und SCE können einen signifikant höheren Li-Bedarf aufweisen.

3.1.8.3 Foresight Industrielle Nutzung

Feststoffbatterien sind aktuell noch ein Thema von Forschung und Entwicklung. Insbesondere die großindustrielle Nutzung und Herstellung birgt einige Herausforderungen, angefangen bei der Auswahl von Materialsystemen, bis hin zur Entwicklung eines massentauglichen Herstellungsprozesses für die Batteriezellen. Gegenüber konventionellen LIB müssen wesentliche Anpassungen sowohl bei der Materialherstellung, der Elektrodenfertigung und -stapelung als auch bei der Formierung in die Produktionsprozesse eingebracht werden. Dennoch sind Feststoffbatterien mittlerweile fester Bestandteil der Technologieroadmaps großer internationaler Zell- und Automobilhersteller.

Insbesondere in den USA befassen sich mehrere Start-ups wie z. B. Ionic Materials (Ionic Materials 2020), Pathion (PATHION 2020) oder TeraWatt (TeraWatt Technology 2020) mit der Entwicklung und Herstellung von Feststoffelektrolyten und Feststoffbatteriezellen. Ebenso sind bereits voll in der LIB-Wertschöpfungskette etablierte Unternehmen wie Toray oder Asashi Kasei mit der Entwicklung von Feststoffbatterien befasst. Unter den Automobilherstellern kommuniziert insbesondere Toyota seine Kommerzialisierungsziele und Entwicklungsfortschritte an die Öffentlichkeit. So

Tab. 3.32: Marktgrößen für Feststoffbatterien im Elektromobilitätsbereich in 2040 für unterschiedliche SSP-Szenarien

	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Marktvolumen ASSB 2040	1.244 GWh (25 % des Gesamtmarktes)	360 GWh (10 % des Gesamtmarktes)	38 GWh (5 % des Gesamtmarktes)

Anmerkung: Die verbliebenen Marktanteile (95 % in SSP5 bis 75 % in SSP1) werden durch konventionelle LIB (siehe Kapitel 3.1.7) abgedeckt.

ist für 2025 eine Kleinserienfertigung von Batteriezellen geplant (Steffen 2020). Der Einsatz in Toyota-Fahrzeugen könnte ggf. mit wenigen Jahren Versatz erfolgen.

Der Zeitpunkt erster kommerzieller Anwendungen von Feststoffzellen für Elektrofahrzeuge könnte somit zwischen 2025 und 2030 liegen. Können die Entwicklungsziele hinsichtlich Energiedichte und Sicherheit umgesetzt werden, so ist wahrscheinlich, dass Feststoffbatterien wesentliche Marktanteile im Automobilbereich erlangen können. Die Marktdurchdringungsgeschwindigkeit wird ebenso von den nötigen Investitionen in Produktionsinfrastruktur abhängen, sodass auch bei hoher technischer Reife der Technologie nicht von einem schlagartigen Umstieg von konventionellen auf Feststoffbatterien zu rechnen ist.

Die Unterscheidung der drei SSP-Zukunftsszenarien erlaubt die Modellierung möglicher Spannbreiten der Marktdurchdringung von ASSB. Im Nachhaltigkeitsszenario SSP1 ist von deutlichen Forschungsanstrengungen im Bereich Batteriespeicher und Elektromobilität auszugehen, sodass die Marktreife von ASSB sehr früh erreicht werden könnte. Bis 2040 wird ein Marktanteil von 25 % Feststoffbatterien im Elektromobilitätsmarkt angenommen. Im Wachstumsszenario SSP5 könnte aufgrund fehlender Anreize die Kommerzialisierung von Feststoffbatterien verzögert oder nur auf Nischensegmente beschränkt erfolgen. Bis 2040 wurde ein Marktanteil von 5 % für ASSB angenommen. Im gemäßigten Szenario SSP2 wurde entsprechend ein Marktanteil von 10 % für ASSB angenommen. Entsprechend der in Kapitel 1.3 diskutierten Mobilitätsszenarien und Fahrzeugbatteriegrößen sind die resultierenden Marktgrößen in Tab. 3.32 aufgeführt.

Wie diskutiert, sind die für eine kommerzielle Nutzung geeigneten Materialkombinationen und Festelektrolyte heute noch in Entwicklung. Um verschiedene Trends hinsichtlich Schnellladefähigkeit, Kosten und Prozessierbarkeit der Materialien abzubilden, wurde für die Nutzung von Feststoffelektrolyten in 2040 ein Mix aus 75 % keramischen Materialien und 25 % Polymerelektrolyte (hier PEO:LiTFSI) angenommen. Unter den keramischen Materialien wurde ein Mix aus 50 % eines sulfidischen Materials (LSPS), 25 % eines oxidischen Materials (LLZO) und 25 % eines Phosphats (LATP) angenommen. Die stärkere Gewichtung des sulfidischen Materials soll die aktuell vielversprechenden Ergebnisse zu dieser Materialklasse aus der Forschung berücksichtigen. Der angenommene Mix soll die Unsicherheiten zur späteren industriellen Nutzung abbilden und ist nicht als Materialkombination innerhalb einer einzelnen Batteriezelle zu verstehen.

3.1.8.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für die Berechnung des zukünftigen Rohstoffbedarfs wurden die gleichen Kathodenmaterialien wie für herkömmliche LIB (siehe Kapitel 3.1.7) angenommen. Der Rohstoffbedarf für Batteriezellen für den angenommenen Materialmix der Feststoffelektrolyte ist in Tab. 3.33 dargestellt.

Tab. 3.33: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Feststoffbatteriezellen in Elektromobilitätsanwendungen in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Lithium	95.170 (B)	–	177.000	47.000	5.000
Titan	260.548 (R)	–	15.000	4.400	500
Mangan	20.300.000 (B)	–	187.000	49.000	5.100
Kobalt	151.059 (B) 126.019 (R)	–	109.000	28.000	3.000
Nickel	2.327.499 (B) 2.189.313 (R)	–	702.000	183.000	19.000
Kupfer	20.590.600 (B) 24.137.000 (R)	–	261.000	76.000	8.000
Lanthan	35.800 (R)	–	38.000	11.000	1.200

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

3.1.8.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Ähnlich zum Recycling konventioneller LIB können für Feststoffbatterien Verfahren angewendet werden, welche die Rückgewinnung der Übergangsmetalle oder auch des Lithiums zulassen. Mögliche Verfahren konzentrieren dabei auf die Kathode und den Festelektrolyten, da im entladenen Zustand der Zellen praktisch kein metallisches Lithium an der Anode vorliegt.

Grundsätzlich bestehen aufgrund der Abwesenheit organischer Lösungsmittel andere Anforderungen an den Recyclingprozess. Beim mechanischen Zerkleinern von Fahrzeugbatterien stellt die Brennbarkeit organischer Flüssigelektrolyte ein Sicherheitsrisiko dar, welches für Festelektrolyte nicht besteht. In heute etablierten Prozessen wird der Flüssigelektrolyt durch Erhitzung zunächst abgedampft und damit auch das elektrochemische System inaktiviert. Die Wiederverwendung des Elektrolyten ist daher nicht möglich. Dieser Schritt könnte für Feststoffzellen entfallen. Die metallischen Bestandteile von Feststoffelektrolyten sind, ebenso wie die der Kathode, durch pyro- oder hydrometallurgische Recyclingverfahren zugänglich. Der höhere Anteil von Lithium pro kWh, insbesondere der keramischen Feststoffzellen, könnte die Anreize erhöhen, auch dieses Metall im Prozess rückzugewinnen. Darüber hinaus besteht jedoch für Feststoffbatterien die grundsätzliche Möglichkeit, die Elektrolytmaterialien direkt rückzugewinnen, aufzuarbeiten und für die Fertigung neuer Batteriezellen zu verwenden (Tan et al. 2020b). Bisher existieren jedoch keine Studien, die die praktische Trennbarkeit von Kathoden- und Elektrolytmaterialien untersuchen (Tan et al. 2020a).

Aus Industriesicht ist es unwahrscheinlich, dass für konventionelle LIB und Feststoffbatterien getrennte Recyclingprozesse aufgesetzt werden, da dies eine weitere Vorsortierung von Batterien erfordern würde und das Erreichen wirtschaftlicher Effizienz durch große Batchgrößen verzögern würde. Mit einem nennenswerten Rücklauf gebrauchter Feststoffzellen, z. B. ab 2040, müssen Recyclingprozesse gegebenenfalls für eine entsprechende Kompatibilität angepasst werden.

Wie bereits dargestellt wurde, existieren vielfältige Feststoffelektrolyte, welche heute hinsichtlich ihrer technischen Eignung in Batterien untersucht und optimiert werden. Insbesondere die keramischen Elektrolyte unterscheiden sich stark in ihrem Gehalt unterschiedlicher Metalle und damit auch in den spezifischen Materialkosten. Ähnlich zur Entwicklung der Kathodenmaterialien in den letzten zehn Jahren sind somit auch langfristig Materialentwicklungen wahrscheinlich, welche auf die Reduktion der Kosten pro kWh von Feststoffbatterien abzielen.

3.2 Cluster: Digitalisierung und Industrie 4.0

3.2.1 Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik

3.2.1.1 Technologiebeschreibung

Unsere heutige Zeit ist geprägt von mobiler Informationsübertragung und -verarbeitung, welche stark von der Visualisierung von Multimediadaten sowie Benutzereingaben abhängig ist. Diese Herausforderungen werden in der heutigen Zeit überwiegend von hochauflösenden elektronischen Dünnschichttransistor- (engl. TFT) Displays mit steigendem Touchscreenanteil bewältigt, da diese schlichtweg die höchste Informationsübertragungsdichte besitzen. Damit sind verschiedenste Displaytechnologien als unverzichtbarer Bestandteil in unsere heutige Gesellschaft gerückt und finden Anwendung, nicht nur als alltägliches Kommunikations- und Informationsportal, sondern auch für Sicherheit, Gesundheitswesen, Unterhaltung, Industrie und Handel (Chen et al. 2016).

Seit der Erfindung der Kathodenstrahlröhren (engl. CRT) dominierten diese den Markt für über hundert Jahre. Erst mit der Entwicklung von Flachbildschirmen (FPD), beginnend mit segmentierten Flüssigkristallbildschirme (LCD) für die Massenproduktion, läuteten diese den graduellen Rückgang dieser ersten Displaytechnologie ein. Über die Jahre hinweg wurden LCDs mit anfänglich schlechter Auflösung und einer Passiv-Matrix weiterentwickelt, bis Ende der 1990er Jahre der Durchbruch der LCD Technik durch die Massenproduktion von Aktiv-Matrix-LCD-Bildschirmen, basierend auf Dünnschichttransistortechnik (TFT) aufkam (Chen et al. 2016). Flachbildschirme auf Basis von Flüssigkristallen (Liquid Crystal Displays LCDs) dominieren den Displaymarkt, nachdem die Hersteller die Produktion von Plasmabildschirmen in den Jahren 2013 und 2014 eingestellt haben (Katzmeyer 2014). Mit der im Jahr 1987 zuerst demonstrierten Organic Light Emitting Display (OLED) Technologie, welche mittlerweile in den Mainstream der Unterhaltungstechnologie Einzug erhalten hat, kam erneut ein Konkurrent der LCD-Technik auf. OLED bieten Vorzüge wie die Fähigkeit des Selbstleuchtens, ihre Transparenz, verbesserte Farbdarstellung, eine hohe Auflösung sowie die Fähigkeit, diese flexibel bzw. biegsam zu konzipieren. Diese Vorteile gehen aber mit höheren Preisen einher (Salehi et al. 2019). Der Displaymarkt wird demnach momentan von diesen beiden Technologien vereinnahmt, wenn auch mit einem signifikanten Ungleichgewicht zugunsten der LCDs. Momentan befinden wir uns in einer Übergangsphase, in welcher die Marktdominanz zwischen dem Innovationspotenzial von LCDs und dem Preispotenzial von OLEDs entschieden wird (Blankenbach 2016). Dies und nicht vorhersehbare Technologieinnovationen machen eine Prognose insbesondere bis zum Jahr 2040 sehr kompliziert.

Als transparente Elektrode werden leitfähige transparente Oxide eingesetzt (TCO, transparent conductive oxide), meist dotiertes ZnO oder SnO_2. ZnO wird dabei z. B. mit Aluminium dotiert und SnO_2 mit Indium (ITO, Indium Tin Oxide) oder mit Fluor. Als eine weitere kostengünstigere Alternative zu ITO hat ein englisches Konsortium ein Verfahren entwickelt, Antimonzinnoxid (ATO) als transparente Elektrode auf Glas zu drucken. ATO besteht aus 90 % Zinn und 10 % Antimon, das preisgünstiger und leichter verfügbar als Indium ist (Bush 2006).

In LCDs, OLEDs, PDPs und FEDs wird ITO zur Herstellung der Elektrodenschichten benutzt. Im Folgenden werden die Aufbauprinzipien von LCDs und OLEDs beschrieben.

Liquid Crystal Display (LCDs)

LCDs werden in vielen Prozessschritten hergestellt, um die verschiedenen Funktionsschichten zu strukturieren und aufzubringen. Die ITO-Schicht wird auf der vorderen und hinteren Glasplatte als Elektrode aufgebracht (Abb. 3.18). Danach wird eine Polymerschicht auf ein Glassubstrat aufgetragen. Diese Schicht wird so strukturiert, dass sie die spätere Ausrichtung der LC-Moleküle ermöglicht. Die beiden Glasplatten werden ausgerichtet, zu einem Panel zusammengefügt und im Heißpressofen ausgehärtet. Danach erfolgt die Befüllung mit Flüssigkristallen und Aufbringung der Polarisationsfolien (Fraunhofer IZM 2007, Steinfeldt et al. 2004).

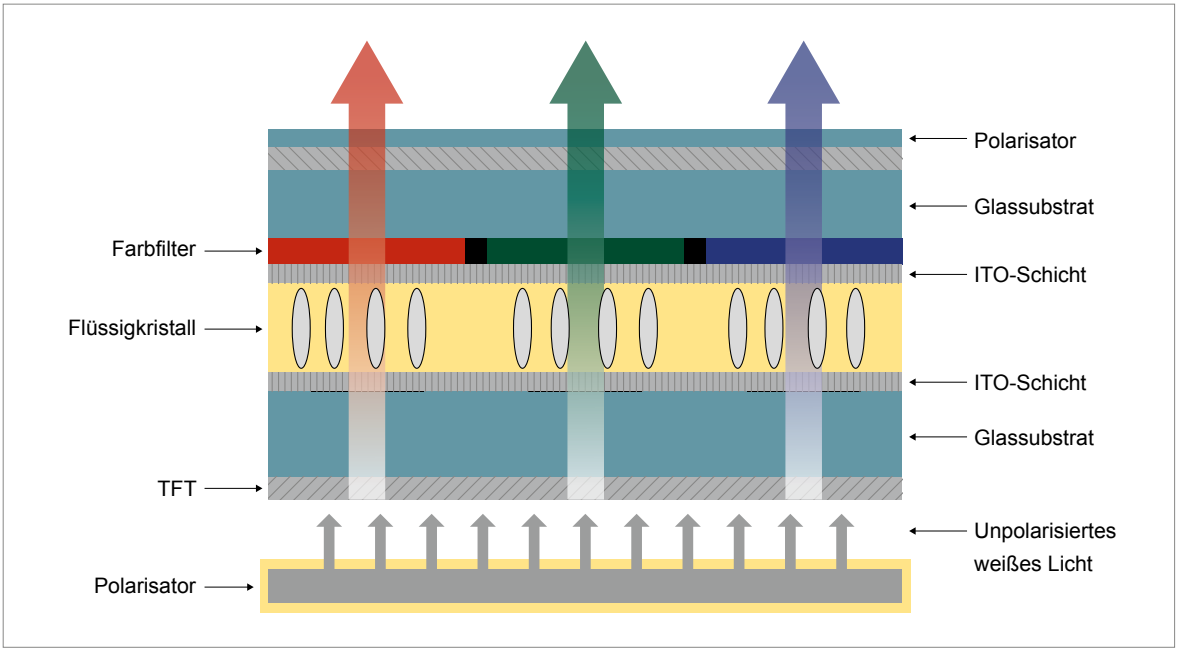


Abb. 3.18: Schematischer Aufbau eines LC-Displays (Quelle: Fraunhofer IZM 2007)

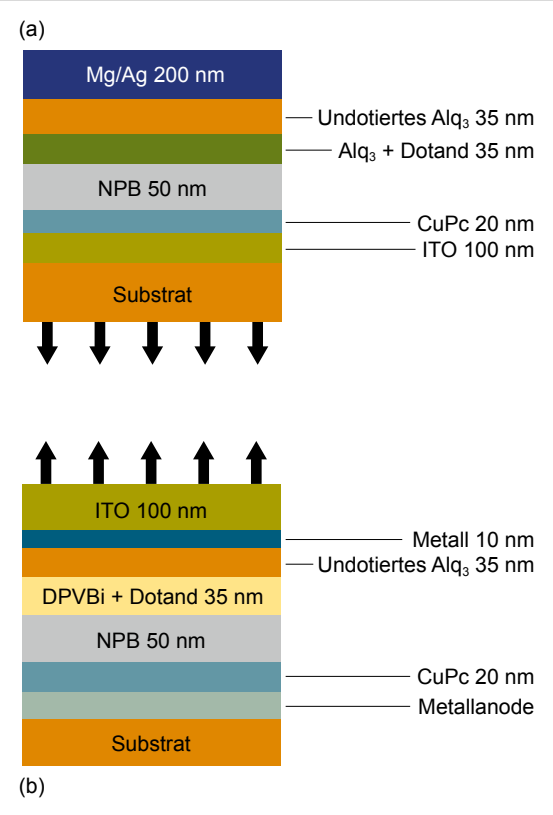


Abb. 3.19: Schematischer Aufbau eines OLED, a) Down-Emitting Stack, b) Up-Emitting Stack (Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an Steinfeldt et al. 2004)

Organic Light Emitting Diode Display (OLED-Displays)

Bei der Herstellung von OLED-Displays wird pro Stack (siehe Abb. 3.19) auf ein Glassubstrat die transparente ITO-Schicht aufgebracht. In den nächsten Schritten werden alle anderen organischen und metallischen Schichten (u. a. Silber) durch Verdampfen appliziert. Anschließend wird die Frontschreibe angebracht und das ganze luftdicht verkapselt (Fraunhofer IZM 2007, Steinfeldt et al. 2004).

3.2.1.2 Rohstoffinhalt

In einer Studie des Umweltbundesamtes wurde festgestellt, dass es zwischen einzelnen Gerätetypen sowie deren Panelgrößen Variationen der Indium-Massenbelegung gibt (Wolf et al. 2017). Bei LCD-Displays, welche zwei ITO-Schichten zur Bilddarstellung verwenden, wurde durch Analysen im Rahmen des e-Recmet Projektes der BAFU eine Massenbelegung zwischen 613–931 mg/m^2 für PC-Monitor, Laptop und TV-Flachbildschirme verschiedener Größen ermittelt (Böni et al. 2015). Diese Werte reihen sich in die des Vorgängerberichts ein. Gestützt auf eine Analyse von Rasenack & Goldmann (2014) für ebenfalls diverse Geräte wird im Verlauf der folgenden Berechnungen ein

pauschaler Durchschnittswert von 700 mg/m² für LCD-Panels angenommen.

Für OLED-Displays musste aufgrund einer geringen Datenlage mit einer Massenbelegung von 350 mg/m² ausgegangen werden. Diese Annahme wurde aufgrund des Aufbaus von OLED-Panels festgelegt. Wie bereits erwähnt, verwenden OLED-Bildschirme anstatt zwei nur eine transparente Elektrodenschicht, also ITO. Damit wird davon ausgegangen, dass OLED-Geräte durchschnittlich nur die Hälfte, also 350 mg/m² der Indium-Massenbelegung im Vergleich zu LCDs aufweisen.

3.2.1.3 Foresight industrielle Nutzung

Zu den Berechnungen des globalen Indium-Bedarfs für Display-Panels wurden die weltweit verkauften Quadratmeter an OLED- und LCD-Panels herangezogen, undifferenziert für welchen Gerätetyp sie verwendet wurden, da es nicht möglich war, über die Verkaufszahlen der Gerätetypen (TV, Handy, etc.) in Verbindung der zugehörigen Panelgröße und Displaytechnologie die produzierte Gesamtfläche zu ermitteln.

Für die Flachbildschirmgesamtfläche lagen Daten im Zeitraum von 2014 bis 2019 von Display Daily (2020a) und IHS Markit (2019) vor. Anhand des gemittelten Wachstums von 6,9 % im Jahr 2018 wurde mithilfe eines s-kurvenförmigen Verlaufs eine Displayfläche von 424 Mio. m² im Jahr 2040 modelliert. Die Daten der jetzigen Verteilung an OLED und LCD Displays wurden aus Display Daily (2020b) und JPCIC (2020) erhoben. Angelehnt an das momentane Wachstum beider Technologien wurde ebenso die Technologieverteilung im Jahr 2040 modelliert. In Szenario A hält der jetzige Trend eines schnellen Wachstums für die OLED-Technologie länger an, wobei in Szenario B dieses Wachstum schneller abfällt. Szenario A beschreibt daher eine Technologieverteilung für das Jahr 2040 von 30 % LCD und 70 % OLED, wohingegen in Szenario B der Markt mit 80 % LCD dominiert wird und lediglich 20 % für die OLED-Technologie anfällt. Beide Szenarien sind grafisch in Abb. 3.20 und Abb. 3.21 abgebildet.

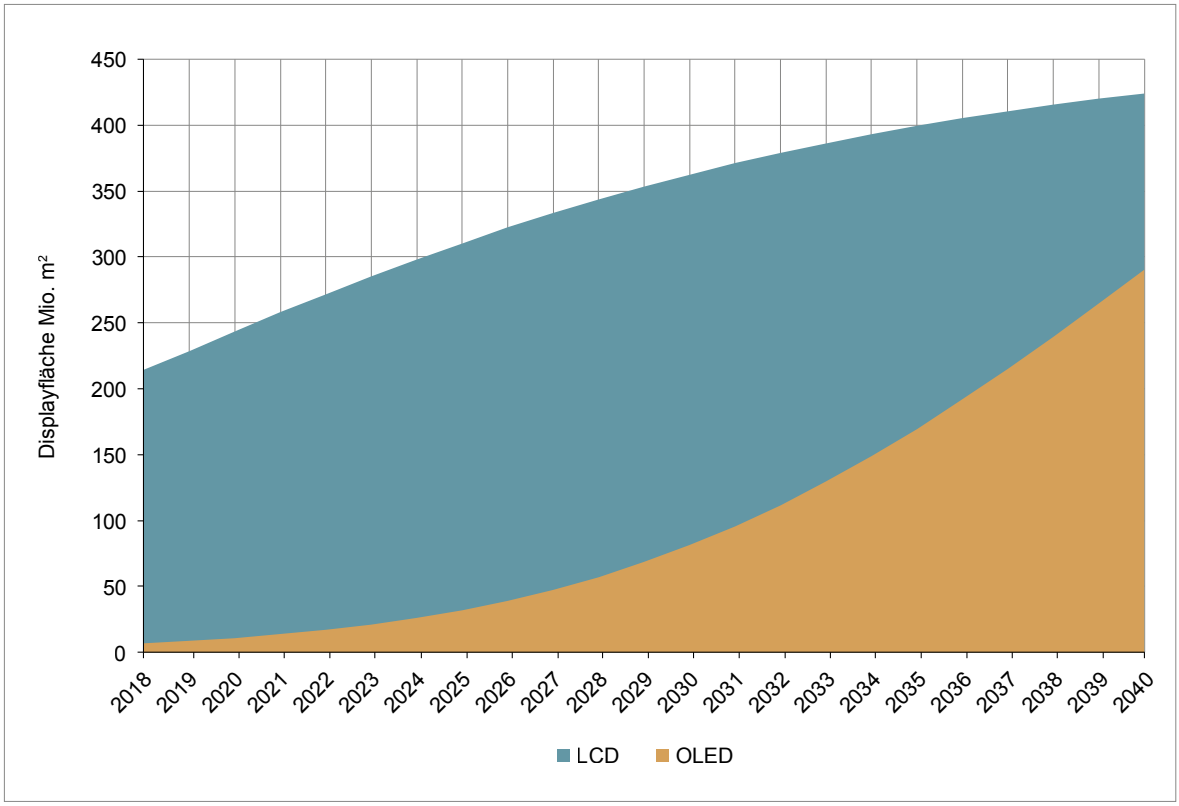


Abb. 3.20: Szenario A – Flachbildschirmgesamtfläche mit LCD und OLED Verteilung (Quelle: Eigene Darstellung)

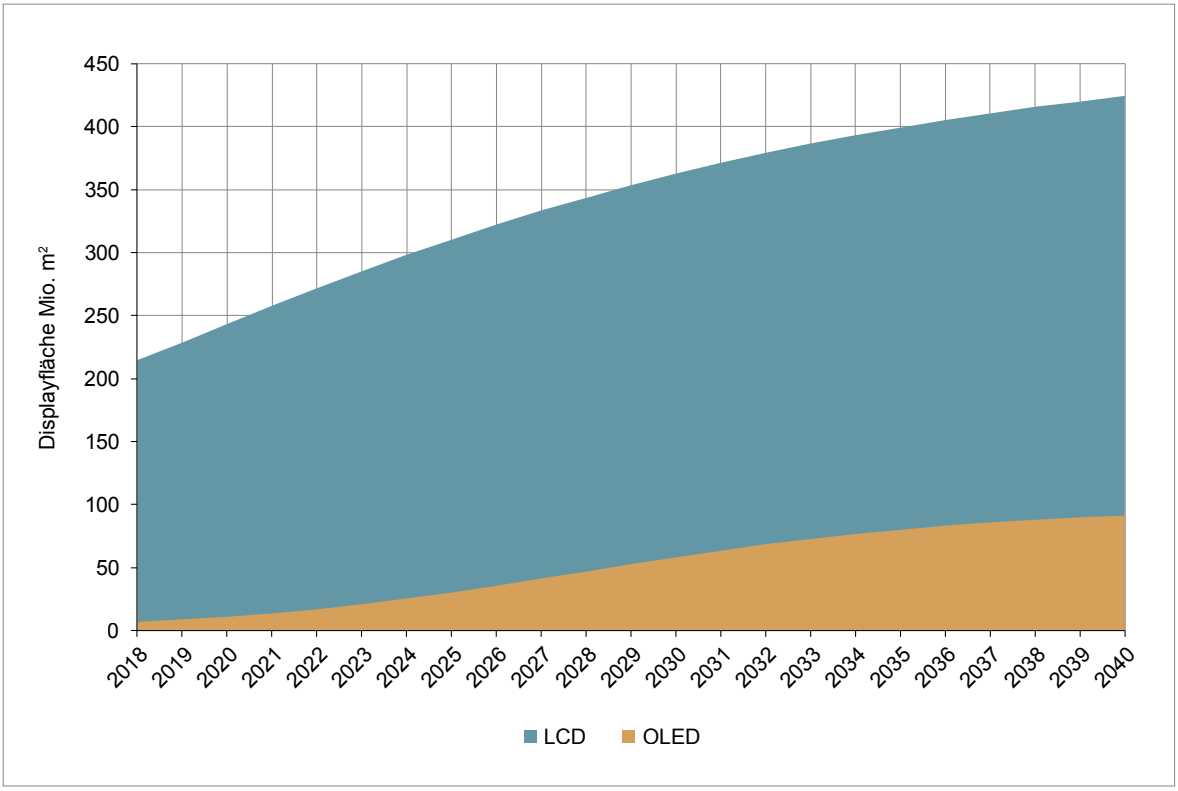


Abb. 3.21: Szenario B – Flachbildschirmgesamtfläche mit LCD- und OLED-Verteilung (Quelle: Eigene Darstellung)

Eine genaue Vorhersage ist, wie bereits erwähnt, schwierig zu treffen. Daher sollen die hier prognostizierten Szenarien eine große Bandbreite abdecken.

In Tab. 3.34 sind die Displayflächen für das Basisjahr 2018 und der verschiedenen Szenarien für das Jahr 2040 aufgeführt.

Tab. 3.34: Verkaufte Displayfäche OLED und LCD (Quellen für das Basisjahr 2018: DISPLAY DAILY 2020a, IHS MARKIT 2019)

	Basis-jahr	Szenario A	Szenario B
Jahr	**2018**	**2040**	**2040**
OLED (Mio. m²)	6,7	297	85
LCD (Mio. m²)	207,7	127	339
Gesamt (Mio. m²)	**214,4**	**424**	**424**

3.2.1.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der Rohstoffinhalt der verkauften Displays lässt sich über die Quadratmeterzahl der LCDs bzw. OLEDs mit der korrespondierenden Massenbelegung berechnen. Angelehnt an die Untersuchungen von MARWEDE & RELLER (2014) wurde für das Basisjahr 2018 eine Nettoeffizienz der Sputterprozesse zur Herstellung der Displays von 80 % festgelegt. Das heißt vom gesamten Materialeinsatz (Material im Sputtertarget) wird ca. 20 % weder recycelt (Produktionsabfallrecycling von Overspray und Targetresten) noch landet es im Produkt, d. h., es wird entsorgt. Mit fortschreitender technologischer Entwicklung und sich verbessernden Recyclingmaßnahmen innerhalb der Herstellungsprozesse wurde für alle drei Szenarien im Jahr 2040 eine Nettoeffizienz von 90 % angenommen. Diese 20 % bzw. 10 % müssen zu dem Indiumgehalt der Displays addiert werden, um den tatsächlichen Bedarf in der Produktion zu erhalten.

Tab. 3.35: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Indium in der Displaytechnik in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040	
			Szenario A	Szenario B
Indium	808 (R)	148 t (in Produkten) 185 t (in Produktion)	193 t (in Produkten) 214 t (in Produktion)	267 t (in Produkten) 297 t (in Produktion)

R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

In Tab. 3.35 sind die Weltproduktion an Indium sowie der Bedarf in Produkten als auch in der Produktion für das Basisjahr 2018 aufgeführt. Weiterhin lässt sich der prognostizierte Bedarf der verschiedenen Szenarien ablesen.

Anhand der berechneten Daten geht hervor, dass der Indiumbedarf innerhalb der Displayproduktion einen signifikanten Prozentsatz der Weltproduktion ausmacht. Für eine realistische Analyse wird der tatsächlich verbrauchte Indiumbedarf herangezogen (in Produktion) und beträgt 23 % im Basisjahr 2018. Im Vergleich zum Vorgängerbericht (Marscheider-Weidemann et al. 2016), welcher das Basisjahr 2013 betrachtete, stellt dies ein Mehrbedarf an Indium von über ca. 68 t dar, unter Betrachtung des damaligen Mittelwertes. Dieser rasante Anstieg beruht unter anderem auf der methodischen Datenerhebung des aktuellen Berichtes. So wurde im Vorgängerbericht die Gesamtfläche an Bildschirmpanelen über die Verkaufszahlen ermittelt. Durch dieses Vorgehen kann es möglich gewesen sein, dass manche Bildschirmgrößen oder Gerätetypen nicht miterfasst worden sind. Im aktuellen Bericht konnten Daten zur Gesamtfläche verkaufter Displays gefunden werden.

Da für beide Szenarien die gleiche Displaygesamtfläche angenommen wurde, lässt sich der höhere Indium-Bedarf in Szenario B lediglich auf die unterschiedliche Technologieverteilung zurückführen. Wie bereits erläutert, besitzt OLED eine geringere Indium-Massenbelegung. Daher wird für das Szenario A ein wesentlich geringerer Indium-Bedarf prognostiziert. Basierend auf diesen Prognosen läge der globale Indium-Bedarf im Szenario A bei 27 % und im Szenario B bei 37 %, bezogen auf die Weltproduktion 2018. Diese Zahlen reihen sich grob in die des Vorgängerberichtes für das Jahr 2035 ein: hier wurde allerdings von einer wesentlich höheren Indium-Massenbelegung für OLED-Displays bei geringeren Displaygesamtflächen ausgegangen, welche hier deutlich nach unten korrigiert wurden. Das Szenario B mit dem höheren Bedarf von 297 t geht in die Bedarfsabschätzung für Indium ein, siehe Kapitel 4.4.4.

Es wird deutlich, dass bei noch weiter steigenden Verkaufszahlen an Displayfläche Möglichkeiten zur Minimierung, Substitution oder einer verbesserten Kreislaufführung des Rohstoffs besser genutzt werden sollten. Auf diese Punkte wird im letzten Kapitel dieser Technologiesynopse eingegangen.

3.2.1.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Der Flachbildschirmindustrie ist die Kritikalität und die damit assoziierten Preisfluktuationen von Indium bekannt. Deshalb fokussieren sie Forschung und Entwicklung darauf, Alternativen zu ITO zu finden. Dabei spielen auch materialintrinsische Faktoren eine Rolle, und es lohnt nicht nur aufgrund der Seltenheit und damit verbundenen Wertes nach Alternativen zu suchen. Obwohl ITO durch einen geringen Flächenwiderstand und hoher Transparenz seine Vorteile hat, besitzt es schlechte mechanische Eigenschaften, Toxizität und hohe Verarbeitungskosten, welche zusätzlich zu einem hohen Preis des Metalls anfallen (Chen et al. 2016; Zhang et al. 2018).

Obwohl ITO aktuell noch einen Martkanteil von 90 % zumindest im TFT-Segment besitzt (Zhang et al. 2018), gibt es alternative Indium-freie TCOs, insbesondere Aluminium dotiertes Zinkoxid (AZO) oder Fluorine dotiertes Zinnoxid (FTO). Beide werden industriell zu günstigeren Kosten als ITO gefertigt, sind jedoch nicht genauso geeignet. Neue amorphe TCOs wie Gallium-Indium-Zink-

oxide (IGZO/IZGO), Indium-Zinkoxide (IZO) und Zink-Zinnoxide haben ähnliche oder sogar bessere Eigenschaften als ITO, brauchen allerdings noch mindestens fünf Jahre zur Markreife und verwenden zum Teil immer noch Indium. Neben TCOs werden eine Reihe weiterer transparenter und leitender Dünnschichttechnologien entwickelt, welche in Zukunft eine Alternative zu ITO bieten könnten:

– Ultradünne Metallfolien und Zink-Metall-Oxid-Multilayer.

– Kohlenstoffnanoröhrchen (CNT): Industrielle Erfahrung dieser Technik auf diesem Gebiet. CNT könnten mit Spitzenwerten an die Leistung von ITO herankommen. Allerdings könnte dies nicht ausreichen als direkter Konkurrent für ITO, weswegen die Industrie insbesondere aus der hohen Flexibilität des Materials Kapital schlagen möchte (Ghaffarzadeh 2018).

– Metall-Nanodrahtfolien: Hierbei werden insbesondere Silber-Nanodrahtfolien eine gewisse Erfolgschance als ITO-Alternative zugesprochen (Zhou & Lee 2020), diese bewegen sich Richtung kommerziellem Durchbruch. Bereits jetzt werden sie in kostengünstigen Handys sowie in großflächigen „multi touch displays“ eingesetzt. Mit einem steigenden Absatzmarkt an faltbaren Handys könnte sich dabei eine mittel- bis längerfristige Chance zu einer Etablierung auftun (Ghaffarzadeh 2018).

– Organische transparente Leiter (PEDOT:PSS): Poly-3,4-ethylendioxythiophen ist ein transparentes elektrisch leitfähiges Polymer, welches ebenfalls schon länger als ITO-Alternative bekannt ist. Frühere Generationen wiesen allerdings schlechte Eigenschaften auf. Wegen des geringen Materialpreises wurde weiterhin an Verbesserungen geforscht. Allerdings konnte PEDOT nie gänzlich an die Eigenschaften von ITO rankommen. Zum Zeitpunkt, als PEDOT merkliche Besserungen aufwies, sank der Preis für ITO ebenfalls, was zu einem Aus als Alternative führte (Ghaffarzadeh 2018).

– Gedruckte Metallgitter: Auch hier ließen sich bereits Erfolge in der Marktetablierung verzeichnen. So setzte Microsoft diese Technologie bereits bei ihrem Surface Modell ein sowie auch andere große Laptop-Hersteller. Hierbei ist anzumerken, dass gedruckte Metallgitter keine eigenständige Technologie darstellt, sondern lediglich ein Überbegriff verschiedener Herstellungsprozesse, welche in Metallgitter-Filmen resultieren. Im Folgenden zwar nicht aufgelistet, besitzt jedes Verfahren unterschiedliche Vor- und Nachteile sowie Marktreife (Ghaffarzadeh 2018).

Die Suche nach Alternativen zu ITO ging vom neuen Feld der flexiblen Elektronik (z. B. OLEDs auf Folien) aus. Die niedrige mechanische Stabilität von ITO schränkt die Display-Flexibilität ein. Ein organisches transparentes und leitendes PEDOT:PSS mit gedruckten Silberkontakten ersetzt ITO in einem Prototyp eines flexiblen OLED-Displays. Die starren OLED-Displays auf Glas, die derzeit schon für Mobiltelefone verwendet werden, nutzen nach wie vor ITO. Alternativen zu ITO-freien Displays sind LED-Displays für Schilder oder große „Leinwände“. Allerdings wird für die blaue bzw. weiße Diode InGaN verwendet. Schlussfolgernd lässt sich sagen, dass es derzeit keine Alternative zu ITO für die Flachdisplay-Industrie gibt (Tercero Espinoza et al. 2014).

Das Recycling von Displays mit anschließender Wiedergewinnung des Indiums ist in obigen Betrachtungen nicht berücksichtigt. Bei den bis dato marktdominierenden LCD-Panels, von denen beispielhaft herkömmliche LCD-CCFL-Fernseher und LCD-CCFL-Monitore jeweils eine durchschnittliche Lebensdauer von zehn bzw. acht Jahren besitzen und die bis zum Jahr 2009 96,9 % beziehungsweise 98,8 % der Verkaufszahlen ausmachten, wurde das Entsorgungsaufkommen in Deutschland für das Jahr 2020 auf 11 Millionen Stück prognostiziert (Wolf et al. 2017). Bei durchschnittlich 180 mg pro LCD-Fernseh-Panel sowie 60 mg Indium pro LCD-Monitor kämen dabei allein für dieses Marktsegment eine beträchtliche Menge auf. Im Bereich der OLED-Geräte ist momentan keine Aussage zukünftiger Entsorgungsaufkommen möglich. Dies liegt zum einen an der sich ständig verbessernden und anfänglich geringen Lebensdauer von 10.000 Betriebsstunden als auch an einer hohen Dynamik des Marktes (Wolf et al. 2017). Im Bereich des Indium-Recyclings existieren bereits mehrere Patente, welche sich um die Extraktion des wertvollen Metalls aus LCD-Altgerät-Panels fokussieren. Vorreiter auf diesem

Feld sind China, Südkorea und Taiwan (Amato & Beolchini 2018). Allerdings wird aufgrund der geringen anfallenden Menge an Indium als Zielelement pro Geräteeinheit eine Rückgewinnung als nicht wirtschaftlich betrachtet (Wolf et al. 2017). Eine Schweizer Studie von Groesser & Brechbuehler-Peskova (2015) kam zwar zu dem gleichen Ergebnis, stellte jedoch fest, dass dies nur bedingt zutrifft. Bei isolierter Betrachtung der Indium-Rückgewinnung wäre ein Verfahren zwar nicht kostendeckend, jedoch würden durch Integration des Indium-Recyclings in das bestehende Recyclingsystem die Kosten moderat ausfallen. Insbesondere bei Indium sind die Voraussetzungen des Recyclings am ehesten gegeben, im Vergleich zu den in Elektro- und Elektronikgeräten vorkommenden Metallen (Groesser & Brechbuehler-Peskova 2015). Dies lässt auf eine baldige flächendeckende Indium-Rückgewinnung hoffen, sowohl im Interesse der Ökologie, der Wirtschaft und des schrittweisen Zieles in Richtung Ressourcenunabhängigkeit. Da in der Zukunft die Rücklaufmengen weiter ansteigen werden, könnten Skaleneffekte ein Recycling des Indiums aus Displays evtl. in Kombination mit anderen Indiumhaltigen Abfallströmen wie CIGS-Solarzellen oder Produktionsabfällen wirtschaftlich werden lassen.

Abfälle aus der Beschichtung werden schon heute recycelt. In Zukunft kann die Rohstoffeffizienz durch zwei Technologiefortschritte deutlich erhöht werden. Zum einen wird durch die Verwendung von rotierenden statt planaren Sputtertargets erreicht, dass mehr Material abgetragen wird. Zum anderen ermöglicht eine optimierte Prozessführung, dass mehr Material auf dem Substrat landet.

3.2.2 Quantencomputer

3.2.2.1 Technologiebeschreibung

Quantencomputer gelten als die neue Generation von Computern, die bislang aus herkömmlichen Mikroprozessoren bestehen. Klassische Computersysteme, die auf CMOS[4]-Transistoren basieren und seit 1971 existieren, verarbeiten Daten auf der Grundlage Boolescher Logik auf elektronischen Schaltungen, die hauptsächlich auf Siliziumsubstraten entwickelt wurden. Die Architektur – in einfachen Worten – besteht aus Ein- und Ausgabegeräten für den Empfang von Daten und das Abrufen von Informationen, einem Prozessor als Rechenkern, Speicher und Pfade, die den Datenaustausch ermöglichen. Die Berechnung erfolgt durch Manipulation der elektrischen Spannung, so dass die Transistoren zwischen zwei Spannungswerten geschaltet werden, die als binäre Bits bekannt sind: den binären Werten logisch 1 und logisch 0.

Quantencomputer verwenden ein Paradigma des Rechnens jenseits der Booleschen Logik, deren Grundlagen in der Quantenphysik liegen. Die grundlegenden Recheneinheiten von Quantencomputern werden als Quantenbits oder Qubits bezeichnet. Qubits nehmen Energiezustände an, die ähnlich wie bei klassischen Computern als 0 oder 1 gemessen werden können. Vor den Messungen sind die Energiezustände von Qubits jedoch 0, 1 oder ein beliebiger Wert dazwischen, der als „Superposition“ bezeichnet wird. Diese gleichzeitigen Zwischenzustände, die durch Quantenphänomene ermöglicht werden, erlauben es, im Vergleich zu binären Systemen viel mehr Informationen zu speichern und zu verarbeiten.

Mit anderen Worten, ein einziges Qubit ermöglicht zwei gleichzeitige Berechnungen. Dies ermöglicht einen höheren Grad an parallelen Berechnungen, der sich mit jedem zusätzlichen Qubit verdoppelt und somit exponenziell zunimmt. Zum Beispiel erlauben drei Qubits acht parallele Berechnungen, während vier Qubits eine doppelte Anzahl von 16 Berechnungen ermöglichen. Mit 275 Qubits kann ein Quantencomputer mehr Berechnungen durchführen, als es Atome im sichtbaren Universum gibt (Villanueva 2009). Dies macht Quantencomputer leistungsfähiger als gewöhnliche Computer, so dass Quantencomputer potenziell Probleme mit hoher Komplexität lösen können, die kein klassischer Computer in einer begrenzten Zeit lösen kann. Dieses Konzept wird als „Quantenüberlegenheit (engl. Quantum Supremacy)“ bezeichnet.

Das Erreichen der Quantenüberlegenheit erfordert die Schaffung einer bestimmten Anzahl von Qubits, was jedoch mit mehreren Herausforderungen verbunden ist. Qubits können Dekohärenz erfahren, was bedeutet, dass sie ihr Quanten-

[4] Complementary Metal Oxide Semiconductor

verhalten verlieren, was den rechnerischen Vorteil unterdrückt. Ein Qubit kann aufgrund interner Unvollkommenheiten oder aufgrund schwacher Wechselwirkungen mit seiner Umgebung dekohärent werden. Bei Operationen mit Qubits können Fehler aufgrund von Dekohärenz und Quantenrauschen auftreten. Eine praktikable Strategie zur Fehlerkorrektur besteht darin, die Information eines Qubits (logisches Qubit) auf mehrere Qubits (physikalisches Qubit) gleichzeitig zu verteilen. Auf diese Weise wirken sich Störungen, die jedes Qubit einzeln betreffen, weniger stark auf den Quantenzustand als Ganzes aus (IBM o. J.). Dies erfordert jedoch einen erheblichen Overhead, der tausende physikalische Qubits erfordern kann, um ein fehlertolerantes logisches Qubit zu kodieren (Massimo et al. 2018).

Anwendungen

Quantencomputer können das Rechnen revolutionieren und in vielen Bereichen von wissenschaftlichem und praktischem Interesse neue rechnerische Erkundungen ermöglichen, die mit klassischen Computern nicht möglich sind. Finanzen, maschinelles Lernen, Kommunikationssysteme, Quantenkryptographie, virtuelle Quantenexperimente, Chemie und Materialwissenschaft können von Quantencomputern in hohem Maße profitieren. Viele dieser Anwendungen benötigen jedoch eine hohe Anzahl von Qubits im Bereich von mehreren hundert oder tausend, die noch nicht in Sicht sind. Quantencomputer, die stark genug sind, um diese anspruchsvollen Probleme zu lösen, erfordern eine skalierbare Entwicklung von Quantencomputern (Grumbling & Horowitz 2019).

Qubit-Technologien

Es gibt verschiedene Qubit-Technologien, darunter supraleitende, ionengefangene, photonische, Halbleiter-Spin- und topologische Technologien. Unter diesen Technologien sind supraleitende und gefangene Ionen-Qubits (trapped-Ion) die führenden Kandidaten (Savage 2018). Supraleitende Qubits, die bis nahe an den absoluten Nullpunkt abgekühlt werden, können leichter als andere Qubit-Typen kontrolliert und in Schaltungen integriert werden. Mit zunehmender Anzahl von Qubits ist es jedoch wahrscheinlicher, dass sie mit der Außenwelt interagieren und ihre Kohärenz verlieren (Savage 2018).

Der Quantencomputer für eingefangene Ionen verwendet hochpräzise isolierte Atomteilchen und führt Operationen mit Laser durch. Eingefangene Ionen als Qubits haben eine bessere Kohärenzzeit im Vergleich mit den supraleitenden (Ferraro & Prati 2020). Allerdings ist die Beherrschung bei dieser Technologie immer noch nicht auf dem Niveau supraleitender Qubits, und sie werden mit niedrigeren Geschwindigkeiten betrieben.

Photonen sind nicht wechselwirkend, und daher leiden sie als Qubits nicht unter der kurzen Kohärenzzeit, die durch die Wechselwirkung mit der Umgebung entsteht. Diese Eigenschaft macht es jedoch andererseits schwierig, Zwei-Qubit-Operationen durchzuführen. Diese werden durch die Wechselwirkung der Qubits untereinander ermöglicht und sind für die Quantum-Berechnung unerlässlich (Georgescu 2020). Darüber hinaus benötigen photonische Quantencomputer möglicherweise zusätzliche Geräte wie optische Quantenspeicher, um Photonen zu verzögern oder zu speichern. Jede dieser Überlegungen erfordert zusätzliche Ressourcen, wodurch ein großer Overhead entsteht (Slussarenko & Pryde 2019).

Halbleiter-Spine-Qubits bieten eine längere Kohärenzzeit, was sie für die Massenskalierbarkeit geeignet macht (Ferraro & Prati 2020). Sie erfordern jedoch nahezu perfekte Materialien und sie müssen mit sehr hoher Präzision betrieben werden. Die Technologie ist noch nicht ausgereift und benötigt Leistungsverbesserungen bei Verbindungen zwischen mehreren Qubits (IBM o. J.).

Die topologische Quantenberechnung ist ein Ansatz der Quanteninformationsverarbeitung, der die Dekohärenz eliminiert, da sie gegen alle Formen von Rauschen immun ist. Daher verspricht die Technologie im Falle einer erfolgreichen physischen Realisierung grundlegende Durchbrüche. Gegenwärtig sind die Modelle der topologischen Qubits nur theoretischer Natur.

3.2.2.2 Rohstoffinhalt

Der Rohstoffbedarf von Quantencomputern ergibt sich aus verschiedenen Teilen. In diesem Bericht liegt der Fokus auf die zentralen Bereiche des

Rohstoffbedarfs bei der Produktion von Qubits und der Kühlvakuumsysteme, die zum Betrieb von Quantencomputern notwendig sind.

Rohstoffe für Qubits

Supraleitende Qubits sind in bestehenden Implementierungen von Quantenprozessoren weit verbreitet. Die Bauelemente bestehen aus einem sogenannten Josephson-Übergang mit einer nanodünnen Isolatorschicht, die zwischen zwei supraleitenden Elektroden angeordnet ist.

Supraleitende Qubits für digitale Quantencomputer und Quantensimulation werden am häufigsten aus Aluminiumverdrahtung und Aluminium/Aluminiumoxid/Aluminiumübergängen auf Silizium- oder Saphirsubstraten hergestellt. Aluminium ist als nichtleitende Schicht in der Mitte des Übergangs weit verbreitet. Kommerzielle Versionen von supraleitenden Quantenprozessoren mit einer hohen Anzahl von Qubits verwenden entweder Aluminium oder Niob für die Verdrahtung und die Metallelektroden (Grumbling & Horowitz 2019).

Für ionengefangene Qubits wurden in einer kommerziellen Version Ytterbium-Atome verwendet. Ytterbium ist ein Seltenerdmetall, dessen Atome alle identisch sind und ihre Zustände über lange Zeiträume beibehalten werden können (IonQ o. J.). Das grundlegende Einfangen von Ionen und ihre Kontrolle wurden mit fast allen Erdalkali- und erdalkaliähnlichen Ionen nachgewiesen, die unterschiedliche Kompromisse für Quantensysteme bieten. Strontium, Kadmium, Beryllium, Barium, Kalzium und Magnesium sind weitere Elemente, die in ionisierter Form am häufigsten in Quantencomputern verwendet werden.

Verschiedene Materialien bieten bestimmte Vorteile für die Realisierung eines photonischen Quantencomputers. Lithiumniobat, ein Material, das in der klassischen integrierten Photonik bereits gut etabliert ist, bietet auch vorteilhafte Eigenschaften für optische Quantencomputer. Das Material ist eine effiziente und flexible Plattform für Photonenquellen, die eine schnelle elektro-optische Modulation on-chip ermöglicht. Die Silizium-Photonik bietet außerdem eine hohe Komponentendichte, geringe Verluste, fortschrittliche Integrationstechniken und industrielles Potenzial. Es gibt umfangreiche Forschungsarbeiten zu vielen anderen Materialplattformen, die für optische Quantencomputer nützlich sind (Slussarenko & Pryde 2019).

Topologische Quantencomputer nutzen nicht-abelsche Formen der Materie wie Majorana-Fermionen und Anyonen zur Speicherung von Quanteninformation. Die vielversprechendsten Entwicklungen im topologischen Quantencomputer gehen auf ein nicht-abelsches Geflecht aus Majorana-Fermionen zurück. Dabei handelt es sich um ein masseloses fermionisches Teilchen, das vor langer Zeit in der theoretischen Physik vorgeschlagen wurde (Lian et al. 2018; The Quantum Daily 2020).

Rohstoff für Kühl- und Vakuumsysteme

Die Qubits und dementsprechend die sie bildenden Metallteile befinden sich im Nanomaßstab. Obwohl sie das rechnerische Herzstück von Quantencomputern sind, stellen kleine Volumina des gesamten Systems dar. Die Menge ist z. B. etwa 10^{-13} g Aluminium für supraleitende On-Chip-Qubit-Designs aus reinem Aluminium (Winkel et al. 2020).

Der größte Teil des physikalischen Volumens von Quantencomputern wird für Kühlsysteme benötigt, da die Bauelemente vollständig von allen Rauschquellen isoliert und bis nahe an den absoluten Nullpunkt gekühlt werden müssen, um Fehler zu vermeiden (D-Wave Systems Inc. 2015). Kühlsysteme sind auch für andere Qubit-Technologien wie eingefangene Ionen und Halbleiter-Spine-Qubits erforderlich. Die genauen Arbeitstemperaturen variieren jedoch für verschiedene Quantencomputer, die z. B. für supraleitende Technologien im Milli-Kelvin-Bereich extrem niedrig sind.

Diese Kühlsysteme enthalten verschiedene metallische Komponenten, wie zum Beispiel Kupfer, Aluminium, Edelstahl und andere Materialien (Prouvé et al. 2007; Marx et al. 2014; Micke et al. 2019). Die Menge der benötigten Materialien hängt von der Größe, der Leistung und der Art der Kühlsysteme ab.

Grobe Schätzungen in dieser Studie für den durchschnittlich niedrigen und hohen Kupferbedarf als Hauptrohstoff auf der Basis verschiedener kryogener Kühlsysteme mit Anwendungen für Quantencomputer liegt zwischen 12 und 240 kg.

Diese geschätzte Menge für die betrachtete Produktionsmenge von Quantencomputern kann geringer sein, falls die Technologie robustere Qubits entwickelt, die bei höheren Temperaturen funktionieren können.

3.2.2.3 Foresight industrielle Nutzung

Quantencomputer befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium, aber sie haben in den letzten Jahren rasche Fortschritte gemacht. Die Anzahl der Qubits wurde stetig erhöht und erreichte im Jahr 2019 128, was über den früheren Erwartungen lag. Das nachstehende Diagramm (Abb. 3.22) zeigt den in den letzten Jahren erreichten Anstieg der Anzahl von Qubits unter Einbeziehung verschiedener Technologien.

Der Fortschritt bei den Quantencomputern macht es möglich, Probleme zu lösen, die klassische Computer nicht lösen können. Dies kann zu einem beträchtlichen Wachstum in verschiedenen Industriezweigen und Dienstleistungsbereichen führen, da neue Produkte und hochoptimierte Ansätze zu deren Entwicklung durch Quantencomputer ermöglicht werden. Insbesondere in den Bereichen Materialdesign, chemische und pharmazeutische Industrie sind umfangreiche, auf Versuch und Irrtum basierende Berechnungen erforderlich. Dadurch erhöht sich die Zeit, die für den Entwurf und die Modellierung neuer Produkte benötigt wird. Die Situation kann sich völlig ändern, wenn diese Laborprozesse durch Quantensimulation unterstützt werden könnten, die Versuch und Irrtum reduziert und die Entdeckung neuer Materialverbindungen und Produkte beschleunigt (Langione et al. 2019).

Die Boston Consulting Group (BCG) prognostiziert in ihrem Bericht (Langione et al. 2019) drei Phasen des Fortschritts für Quantencomputer. In der nächsten Phase des Fortschritts, d. h. in den nächsten drei bis fünf Jahren, wird erwartet, dass fehlerhafte Qubits weiterhin ein Thema sind. Während dieser Phase werden Verbesserungen der Fehlervermeidungstechniken eine wichtige Rolle beim Fortschritt hin zu Quantencomputern mittlerer Größe und bei der Maximierung ihres Nutzens spielen. Ein Wachstum in globaler Wertschöpfung kann in verschiedenen Endverbraucherindustrien erwartet werden, darunter materialorientierte Industrien, Finanzdienstleistungen, rechnergestützte Fluiddynamik, Pharmazie und andere Bereiche wie Transport und Logistik, Energie und Metrologie (Langione et al. 2019).

Die zweite Phase des Fortschritts bei den Quantencomputern würde in den nächsten zehn bis 20 Jahren stattfinden. Es wird erwartet, dass in diesem Zeitraum eine hohe Quantenskalierbarkeit und

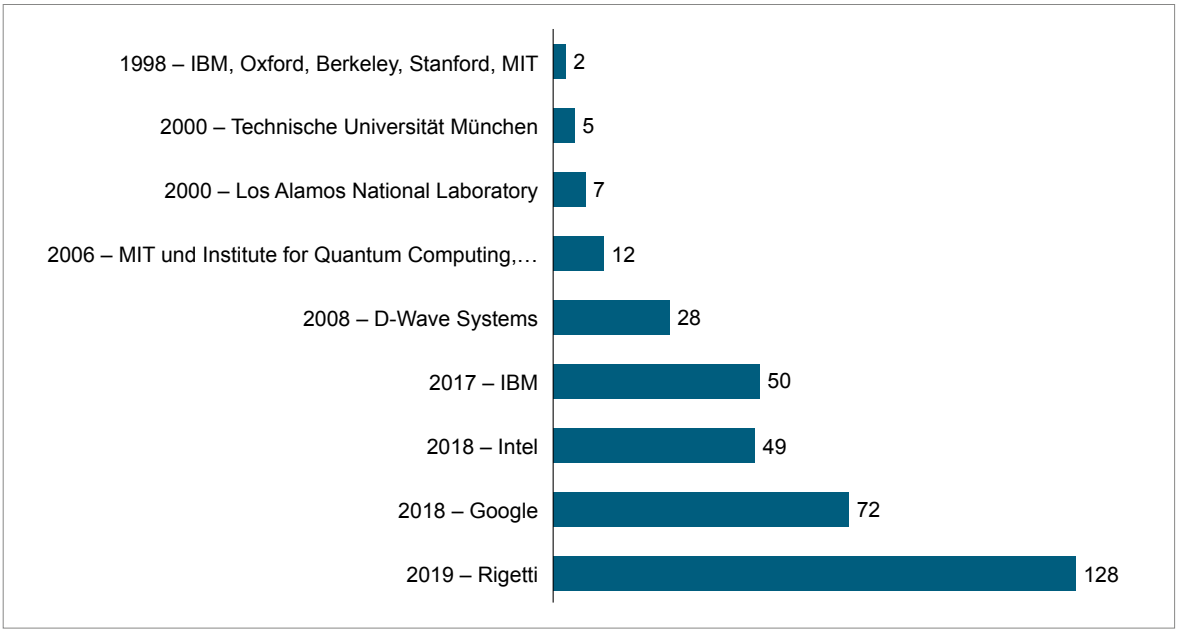


Abb. 3.22: Das Wachstum der Zahl der Qubits (Quelle: Abbildung nach Feldman 2019)

-zuverlässigkeit erreicht wird, die bedeutende experimentelle Vorteile ermöglicht. Diesem Szenario folgt eine dritte Periode umfangreicher Fortschritte, die zu vollständig skalierbaren und fehlertoleranten Quantencomputern führt. Diese Fortschritte würden eine enorme Verringerung der Rechenkomplexität versprechen und beträchtliche Kapazitäten für verschiedene Industriesektoren bieten. Für dieses Szenario wird bis 2050 ein beträchtlicher Anstieg der Betriebseinkommen im Bereich von Hunderten von Milliarden USD erwartet.

Die oben diskutierten Szenarien beruhen auf der Annahme, dass sich die Verbesserungen bei Material, Herstellung und Kontrolle der Qubits reibungslos fortsetzen würden. Im optimistischeren Fall können Quantencomputer aufgrund von Durchbrüchen, die das Gebiet und seine industriellen Endbenutzersektoren revolutionieren können, ein höheres Wachstum verzeichnen. Da sich die Quantencomputer noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden und noch keine Marktreife besitzen, sind Prognosen über das Marktwachstum nicht vergleichbar und die Auswirkungen sind schwer vorhersehbar. Ein Vergleich verschiedener Vorhersagen ist in Abb. 3.23 dargestellt und illustriert zweierlei. Einerseits wird dem Markt meist ein Volumen von Milliarden USD vorausgesagt, andererseits variiert die erwartete Marktgröße erheblich.

Verschiedene Szenarien, die auf der Grundlage der Expertenmeinungen entwickelt wurden, sehen erste Anwendungen von Quantencomputern mit einer Bandbreite von einem bis zu mehreren Tausenden von Qubits in den nahen bis mittleren Zeiträumen vor (Moore & Nordrum 2018; Budde & Volz 2019). Auf diesem Niveau des vorhergesagten Fortschritts ist zu erwarten, dass im Jahr 2040 viele Labors, Rechenzentren und Unternehmen weltweit mit Quantencomputern ausgestattet sein werden. Dementsprechend erscheint die Marktprognose von Yole Dévelopment, die eine moderate Wachstumsrate vorhersagt als eine solide Grundlage. Yole sagt für den Bereich des Quanten-Hardware eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR) von 27 % bis 2030 vorher (Yole développement 2020d).

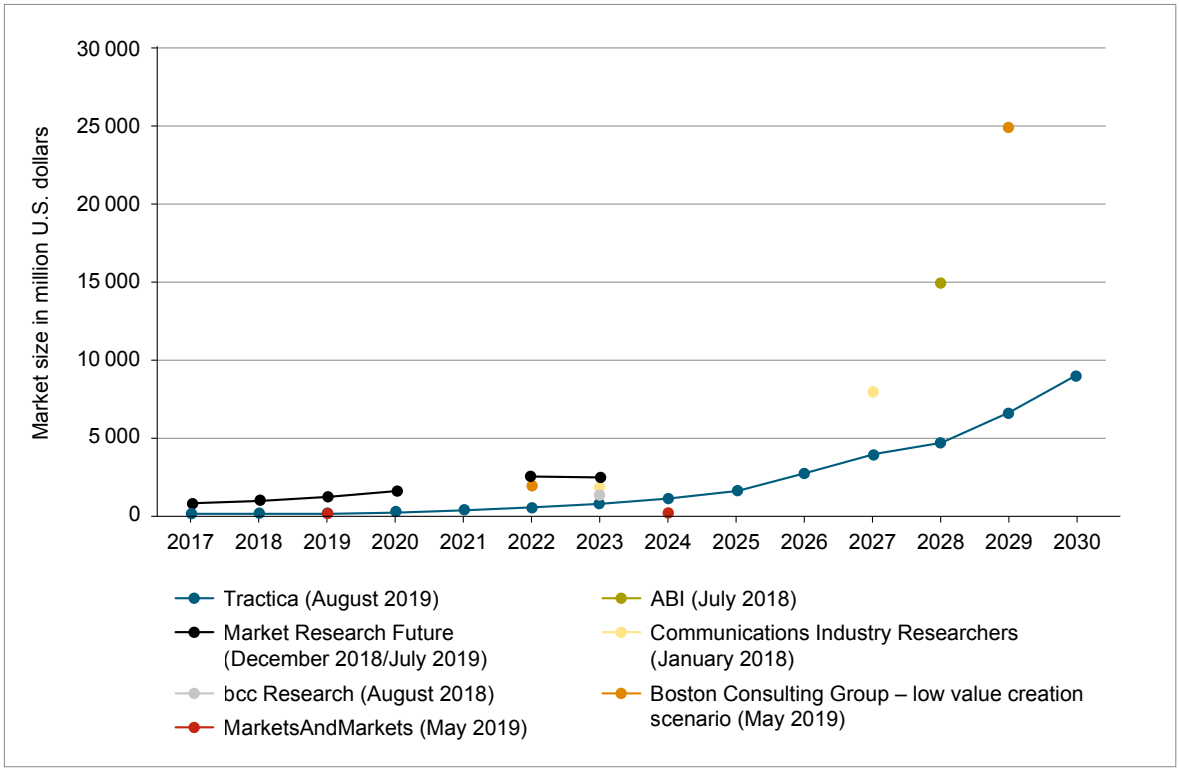


Abb. 3.23: Vergleich ausgewählter Marktgrößenprognosen und -projektionen für den globalen Quantencomputermarkt von 2017 bis 2030 (in Millionen US-Dollar) (Quelle: Statista 2019c)

Tab. 3.36: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Bedarfe an Kupfer für Quantencomputer in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040
Kupfer	20.590.600 (B) 24.137.000 (R)	0,3 – 6	57 – 1.153

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

3.2.2.4 Foresight Rohstoffbedarf

Eine Recherche zu existierenden Quantencomputern zeigt, dass im Jahr 2018 etwa 25 industrielle Quantencomputer einschließlich Supraleitungs- und Ionenfallentechnologien existierten. Tab. 3.36 zeigt den geschätzten Kupferbedarf für Quantencomputer im Jahr 2040. Die Schätzung basiert auf einem Kupferbedarf von 12 – 240 kg für die Kühl- und Vakuumsysteme jedes Quantencomputers und der Annahme, dass die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate bis 2040 bei etwa 27 % liegt (Yole développement 2020d).

3.2.2.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Gegenwärtig werden die Materialien, die in Verdünnungskühlschränken für Quantencomputer verwendet werden, nicht recycelt, da die Technologie neu ist und weiterentwickelt wird. Im Allgemeinen werden über 70 % des Kupfers in Altprodukten recycelt (EuRIC aisbl 2020).

3.2.3 Optoelektronik/Photonik

3.2.3.1 Technologiebeschreibung

Die Optoelektronik basiert auf den quantenmechanischen Effekten von Licht auf elektronische Materialien, insbesondere Halbleiter. Sie befasst sich mit der Lehre und der Anwendung von elektronischen Geräten, die Photonen erzeugen, detektieren und auf Elektronen in einem elektrischen Schaltkreis modulieren (Sweeney & Mukherjee 2017).

Optoelektronische Geräte haben bereits ihren Weg in viele verschiedene Aspekte unseres Lebens gefunden: Barcode-Scansysteme im Supermarkt, CD, DVD und Blu-ray für zu Hause, Computermaus-Positionierung und Laserdrucker in unseren Büros usw. Das bekannteste optoelektronische Objekt ist die Leuchtdiode (LED): eine LED kann ein brillantes Licht aussenden, indem sie einen elektrischen Strom anlegt, der durch ihre zahlreichen und komplexen Halbleiterschichten fließt. Alle optoelektronischen Bauelemente basieren auf der gleichen Art der Wechselwirkung zwischen Elektron und Photon in einem Halbleiter. Sie können Licht nicht nur emittieren (LED oder Laserdiode), sondern auch modulieren (Modulator) und detektieren (Photodiode).

Die Hauptanwendungsgebiete für optoelektronische Bauelemente sind:

- Beleuchtung (Allgemeinbeleuchtung, Automobil, Gartenbau und Displaybeleuchtung),
- Sensorik (Lidar, Kameras, Gassensoren etc.),
- Telekommunikation (optische Transceiver),
- Photovoltaik (Solarzelle).

Telekommunikation

Mit diesem Bericht wird der Fokus auf die Telekommunikationsanwendung gelegt, genauer gesagt, auf die optische Telekommunikation, da diese auf optoelektronische Komponenten beruht. Unter optischer Telekommunikation versteht man die Übertragung von Informationen über eine Distanz in Form von Licht.

Ein optisches Telekommunikationssystem besteht aus:

- einem Sender, der das elektrische Signal empfängt und es in ein optisches Signal umwandelt,

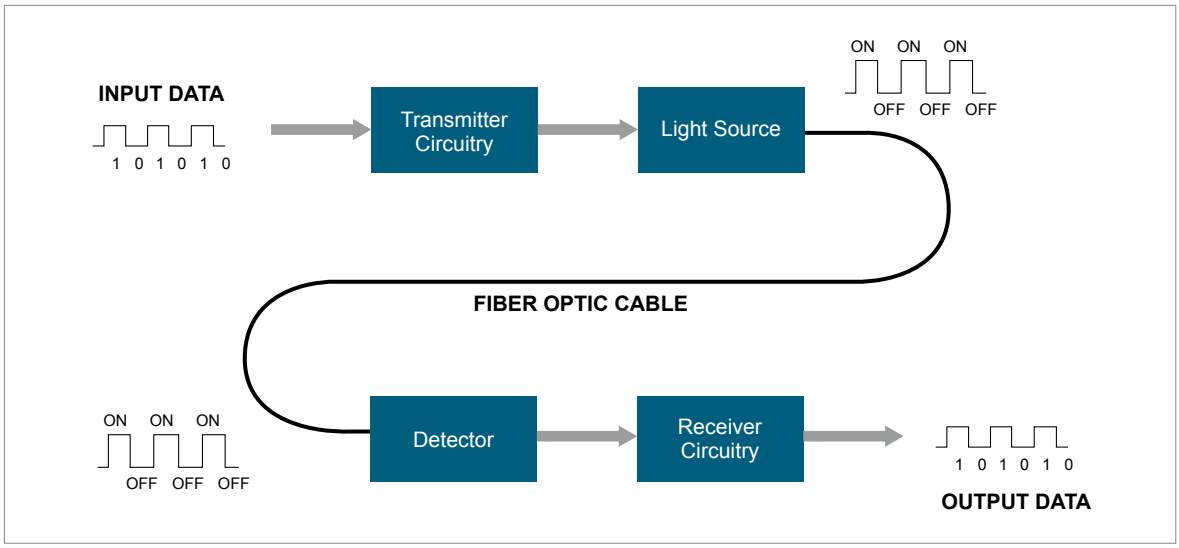


Abb. 3.24: Prinzip der optischen Kommunikation (Quelle: Massa 2000)

– einem Übertragungsmedium, das das Signal transportiert (Lichtwellenleiter),
– und einem Empfänger, der das optische Signal empfängt und es wieder in ein elektrisches Signal umwandelt.

Das Prinzip der optischen Kommunikation ist in der Abb. 3.24 zusammengefasst (Massa 2000).

Die Materialien für Lichtwellenleiter sind im Kapitel 3.5.2 zu Glasfaserkabeln aufgeführt.

Optische Transceiver

Ein optischer Transceiver enthält im Gehäuse einen Sender und einen Empfänger. Ein Beispiel wird in Abb. 3.25 aufgeführt. Ein optischer Transceiver enthält unter anderem einen Controller-Chip, einen RF (Radio Frequency, Hochfrequenz)-Schaltkreis, Linsen und Spiegel sowie eine Lichtquelle (Laserdiode) und einen Lichtdetektor (Photodiode). Bei den beiden letzten Komponenten handelt es sich um photonische Bauteile, deren Zusammensetzung später näher

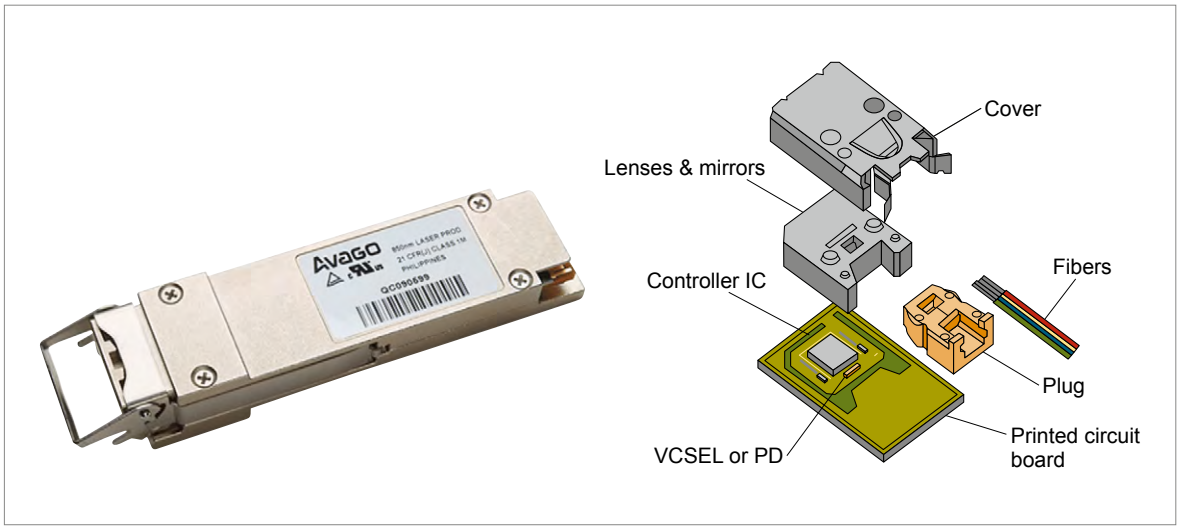


Abb. 3.25: Links: Abbildung eines optischen Transceiver von Broadcom, rechts: Schema zur Beschreibung der Hauptkomponenten eines optischen Transceivers von Murata (Quellen: links: Broadcom 2020, rechts: Murata 2007)

erläutert wird. Laut Yole développement (2020c) macht die Laserdiode 20 bis 30 % und die Photodiode 5 bis 20 % des Moduls aus.

Laserdiode als Lichtquelle: VCSEL und EEL

Eine Laserdiode kann elektrischen Strom direkt in Lichtphotonen umwandeln, indem sie die einzigartigen Eigenschaften einiger Halbleiterbauelemente, der sogenannten III-V-Verbindungen, wie GaAs, InP, GaSb, GaN und deren Legierungen, nutzt (Sweeney & Mukherjee 2017). Die aktive III-V-Schicht, deren Eigenschaften die Lasereigenschaften bestimmen, wird auf einem Substrat (Wafer genannt) aufgetragen. Das Substrat wird hauptsächlich als physikalischer Träger verwendet, deren Eigenschaften auch mit der aktiven Schicht kompatibel sein müssen (Kristallgitter und Wärmeausdehnungskoeffizient). Deshalb existiert eine große Vielfalt an Wafern, die in der Optoelektronik verwendet werden.

Es gibt zwei Technologien von Laserdioden auf dem Markt:

– Oberflächenemitter (VCSEL, aus dem Englischen Vertical-Cavity-Surface-Emitting-Laser),
– Kantenemitter (EEL, aus dem Englischen Edge-Emitting-Laser).

Abb. 3.26 zeigt, wie VCSEL Licht von der Oberseite des Chips emittieren, während EEL Licht von der Kante der Struktur emittieren.

VCSEL besteht aus zwei hochreflektierenden Bragg-Spiegeln (distributed Bragg reflector DBR) mit einer aktiven Region, die aus einem oder mehreren Quantentöpfen für die Laserlichterzeugung besteht (Abb. 3.27). Der DBR-Spiegel besteht aus Schichten von Materialien mit hohem und niedrigem Brechungsindex. Die beiden Spiegel sorgen für eine sehr hohe Reflektivität des Lichts zurück in den aktiven Bereich, wodurch der VCSEL die

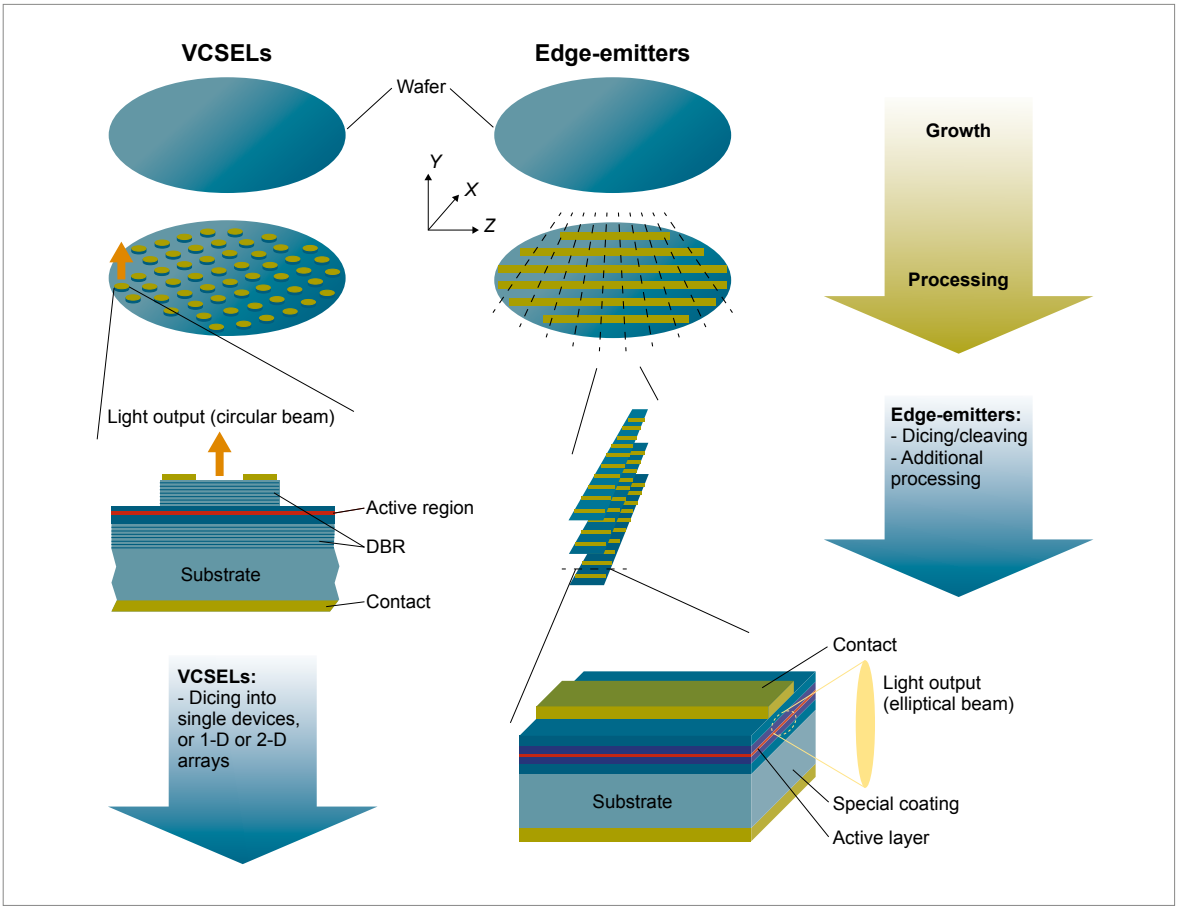


Abb. 3.26: Vergleich in der Funktionsweise von VCSEL- und EEL-Lasern (Quelle: Princeton Optronics o. J.)

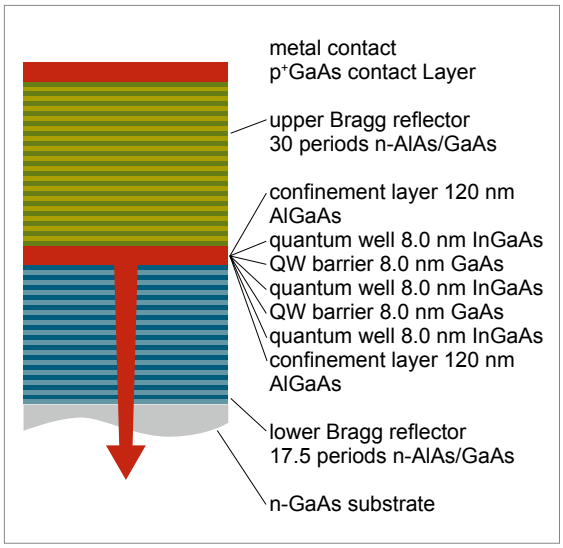


Abb. 3.27: Struktur eines verteilten Bragg-Reflektors (DBR) (Quelle: ENLITECH o. J.)

optische Leistung verstärken kann. Als Ergebnis schwingt das Licht senkrecht zu den Schichten und entweicht durch die Oberseite (oder Unterseite) des Bauelements (PRINCETON OPTRONICS o. J.). Diese Struktur ist weitaus komplexer als die von EEL.

Im Vergleich dazu bestehen EEL aus gespaltenen Stäben, die vom Wafer abgetrennt sind. Wegen des hohen Brechungsindexkontrastes zwischen Luft und dem Halbleitermaterial wirken die beiden gespaltenen Facetten wie Spiegel. Daher schwingt das Licht bei einem Kantenemitter parallel zu den Schichten und tritt seitlich aus. Dabei werden mehrere Bauformen von EEL unterschieden:

- Fabry-Pérot-Laser (FP),
- Bragg-Spiegel (DBR),
- Laser mit verteilter Rückkopplung (DF) (eng. Distributed Feedback Laser),
- Quantenkaskadenlaser.

Der Typ der für den optischen Transceiver verwendeten Laserdiode hängt von der Reichweite ab (YOLE DÉVELOPPEMENT 2020c):

- kurze Reichweite (0 – 100 m): GaAs-VCSEL Laserdiode,
- mittlere Reichweite (500 m – 10 km): Silizium-phontonik & InP-EEL-Laserdiode,
- hohe Reichweite: InP-EEL-Laserdiode (> 10 km).

GaAs-EEL werden auch für die Telekommunikation in Fasersensoren und in Telekommunikationsinstrumenten verwendet. Die Hauptanwendung von GaAs bleibt jedoch die Verwendung von 850nm-VCSELs für die Datenkommunikation, d. h. für die Telekommunikation auf kurzen Distanzen und unter Verwendung von Glasfasern (MUTIG 2010). Sie sind insbesondere mit Rechenzentren verbunden. Die Transceiver-Typen für die Datenkommunikation mit GaAs sind Ethernet, Fibre Channel und optische Interconnects (YOLE DÉVELOPPEMENT 2019a).

Photodiode als Lichtdetektor

Eine Photodiode detektiert das optische Signal und wandelt es in ein elektrisches Signal um. Je nach Halbleitertyp spricht die Photodiode auf unterschiedliche Wellenlängenbereiche an. In der Telekommunikation gibt es zwei Arten von Photodioden:

- Pin-Photodiode ist der gängigste optische Detektor. Der Aufbau wird in Abb. 3.28 dargestellt. Die absorbierten Photonen erzeugen Ladungsträger (Elektronen oder Löcher), die einen Strom generieren.
- Avalanche-Photodiode (APD) wird zur Detektion über große Entfernungen und mit geringer Leistung eingesetzt. In diesem Gerät findet ein „Lawinenprozess“ statt, d. h. angeregte Ladungsträger können weitere neue Ladungsträger erzeugen und so das elektrische Signal effektiv verstärken (RP PHOTONICS ENCYCLOPEDIA 2019).

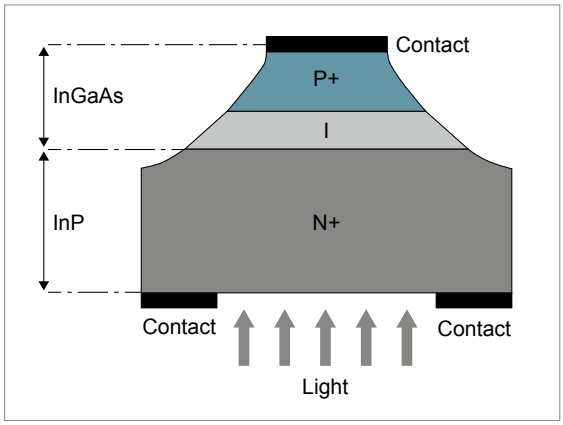


Abb. 3.28: PIN-Photodiodenstruktur (Quelle: ELECTRONICSNOTES 2021)

Für Telekommunikationszwecke sind InP und GaAs die beiden Arten von Substraten, die für das Wachstum der Photodioden-Bauelemente verwendet werden. InGaAs auf InP-Wafer ist heute das Standardmaterial für Hochgeschwindigkeitsanwendungen. Silizium und Germanium werden ebenfalls für Photodioden verwendet, aber eher für andere Anwendungen als die Telekommunikation.

Photonisch integrierte Schaltkreise (PIC): InP und Siliziumphotonik

Ein PIC ist ein Bauelement, das mindestens zwei photonische Funktionen integriert. Die am weitesten verbreitete Plattform für PIC ist auf InP-Substraten, die die Integration von aktiven Funktionen (z. B. Lichtemission, Detektion, Verstärkung) mit passiven Funktionen (Lichtführung, Filterung, Kopplung) ermöglicht. Die größten Vorteile von InP-PICs sind der geringe Verlust und die hohe optische Leistung, da alle Funktionen auf einem einzigen Chip integriert sind. Nachteile dieses Ansatzes sind zum einen die hohen Kosten und zum anderen die begrenzten Größe der InP-Wafer (Smit et al. 2019).

Eine weitere Plattform, die derzeit insbesondere für optische Transceiver verwendet wird, ist die Silizium-Plattform. Bei der Siliziumphotonik werden optische Bauelemente auf der Basis von InP (Laser und Detektor) in einen Siliziumchip integriert. Dieser Ansatz reduziert die Menge an III-V-Materialien im optischen Transceiver (siehe Kapitel 3.2.3.5 unter Substitution) und erhöht die Produktionskapazität durch die Fertigung auf 300 mm Siliziumwafern. Es gibt andere Plattformen wie Siliziumnitrid (SiN), Glas, Polymer, Siliziumdioxid (SiO_2) und $LiNbO_3$, aber sie sind weniger vielseitig anwendbar als Silizium und InP.

3.2.3.2 Rohstoffinhalt

Die Herstellung von Laserdioden und Photodioden erfordert ein Substrat (GaAs, InP im Falle der Telekommunikation), auf dem mehrere und komplexe aktive Schichten gewachsen sind (InGaAsP, InP, AlGaAs, GaAs etc.). Dieses Kristallwachstum wird Epitaxie genannt. Je nach Gerät kann die Epitaxieschicht bis zu 12 µm dick sein (Guina et al. 2017). Da die Epitaxieschichten noch viel dünner sind als die Substratdicke, wird in diesem Bericht nur das im Substrat enthaltene Material berücksichtigt. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass die Materialausnutzung bei der Epitaxie sehr gering sein kann. Ein Bericht aus dem Jahr 2013 erklärt, dass bei der MOCVD (Metallorganische Gasphasenepitaxie) eine Atom-für-Atom-Ausnutzung der III-Quellen (Indium und Gallium) von ca. 30 % und bei den V-Quellen (Arsen und Phosphor) von 20 % erreicht werden kann (Woodhouse & Goodrich 2013). Hinzu kommt, dass die Komplexität mancher Laser auch eine geringe Fertigungsausbeute zur Folge haben kann. Zum Beispiel können GaAs-VCSEL bis zu 10 µm dick sein mit bis zu 400 Schichten (Yole développement 2020b). Der Epitaxieprozess selbst führt zu einem signifikanten Materialverlust, aber aufgrund der Komplexität und Vielfalt der Schichtzusammensetzung wird dieser in diesem Bericht vernachlässigt.

Für die folgende Berechnung wird auf die Epitaxiematerialien verzichtet und lediglich die Substrate gezählt. Der Nettogehalt von Ga, As, In und P wird auf der Grundlage der Waferdicke (AXT 2020; Freiberger Compound Materials 2020a), der GaAs- und InP-Dichte (jeweils 5,315 g/cm³ und 4,81 g/cm³) und dem Molekulargewicht berechnet (siehe Tab. 3.37). Der Bruttoanteil des Halbleiterelements berücksichtigt den Materialverlust während der Waferherstellung. Bei der GaAs-Herstellung liegt die Materialausnutzungsrate bei etwa 45 % (Clemm et al. 2017). Diese Mate-

Tab. 3.37: Menge von Ga, As, In und P pro Wafer (Bruttobedarf)

	GaAs Wafer	InP Wafer
Wafergröße	6 Zoll	4 Zoll
Dicke	675 µm	600 µm
Materialausnutzungsrate der Waferherstellung	45 %	45 %
Galliumbedarf pro Wafer	70,1 g	
Arsenbedarf pro Wafer	75,3 g	
Indiumbedarf pro Wafer		42,7 g
Phosphorbedarf pro Wafer		115 g

Anmerkung: Bruttobedarf ist die Menge, die für die Wafer-Herstellung benötigt wird, einschließlich der Materialverluste bei der Herstellung.

rialausnutzungsrate beinhaltet bereits das „Inner Loop“-Recycling, bei dem Zwischenabfälle wieder in die Wafersynthese eingeführt werden. Für die InP-Wafer-Herstellung konnten keine Daten über die Materialausnutzung gefunden werden, weshalb die gleiche Rate wie bei der Herstellung von GaAs-Wafern unterstellt wird.

3.2.3.3 Foresight Industrielle Nutzung

Markt für die Datenkommunikation

Die Vorhersage in dieser Studie basiert auf der Einschätzung von Yole bis 2025. Der Trend zu optischen Hochgeschwindigkeits-Transceivern soll den InP-Absatz ankurbeln, da dieses Material besonders vorteilhaft für hohe Leistungen ist. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CAGR) des InP-Wafer-Umsatzes beträgt 31 % nur für die Kommunikation in Rechenzentren zwischen 2017 und 2023 (Yole développement 2019a). Die CAGR für InP-Wafer-Verkäufe für optische Transceiver mit einer Datenrate über 100 GB/s steigt sehr stark an: 149 %, von 150 auf 90.000 InP-Wafer-Einheiten zwischen 2017 und 2023. Für die Vorhersage des Wafer-Absatzes von 2026 bis 2040 wird das von Cisco (2018) prognostizierte Wachstum des Datenzentrumsverkehrs berücksichtigt, welches von 6,8 Zettabyte (ZB) im Jahr 2016 auf 20,6 ZB im Jahr 2021 steigen soll (Abb. 3.29). In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass sich dieses Wachstum bis zum Jahr 2040 linear fortsetzen wird. Der Wafer-Absatz wird nicht exakt dem Wachstum des Datenverkehrs in den Rechenzentren in Abb. 3.29 folgen, daher wird er mit einer zusätzlichen Rohstoffquote verringert. Diese Rohstoffquote ist für GaAs- und InP-Wafer unterschiedlich. Für GaAs ist es das Verhältnis des Wafer-Marktwachstums zum Wachstum des Rechenzentrumsverkehrs in 2019 und 2020 und ist gleich 0,3. Für InP ist es das gleiche Verhältnis, aber für das Marktwachstum in den Jahren 2023 und 2024 ist das Verhältnis 0,8.

Abb. 3.30 zeigt die voraussichtlichen GaAs-Wafer-Verkäufe für VCSEL in optischen Transceivern, die sich bis 2040 verdoppeln und im Jahr 2040 28.000 Wafer erreichen könnten. Der Wafer-Absatz für VCSEL bleibt im Vergleich zum

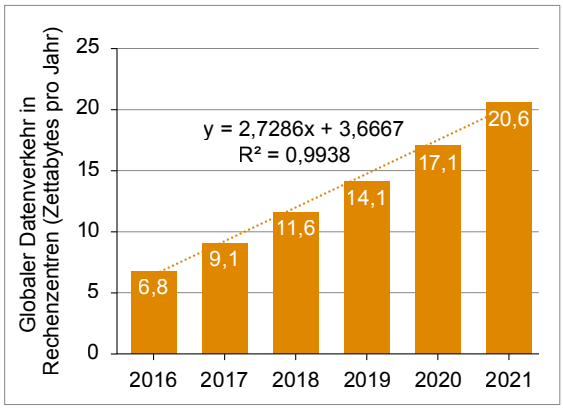


Abb. 3.29: Wachstum des weltweiten Datenverkehrs in Rechenzentren (Zettabytes pro Jahr) laut CISCO und Trend, der für die Prognose bis 2040 verwendet wurde (Quelle: Cisco 2018)

RF-Markt (siehe 3.2.5 Radiofrequenz-Mikrochips) mit potenziell 1,5 Mio. Wafern im Jahr 2040 klein. Abb. 3.31 zeigt die zukünftig benötigte Menge an InP-Wafern für die Datenkommunikation (in blau). Diese Prognose basiert auf der aktuellen Marktaufteilung zwischen InP und Silizium-Photonik. Der Markt der Silizium-Photonik könnte schneller wachsen als InP und in Zukunft Marktsegmente gegenüber InP gewinnen. Die Silizium-Photonik ist jedoch immer noch abhängig von InP-Wafern für die aktiven Komponenten (Lichtquelle und Detektion). Diese Prognose sollte als Worst-Case-Szenario betrachtet werden, bei dem der Einsatz von InP die Haupttechnologie bleibt. Die Menge an InP-Wafern für die Datenkommunikation wird laut Yole développement (2019a) bis 2024 schnell wachsen (CAGR 2017–2024 = 31 %). Im Jahr 2040 könnte der Absatz von InP-Wafern 27.000 Wafer pro Jahr erreichen, wenn die Nachfrage nach optischen Transceivern in Rechenzentren so hoch bleibt.

Markt für die Telekommunikation

Die 5G-Technologie wird zu viel mehr Basisstationen führen als bei 4G. Dies wird Dutzende Millionen von Transceivern erfordern, die eine erhebliche Anzahl von InP-Wafern verbrauchen werden, die sowohl für Laser- als auch für Fotodetektoren verwendet werden. In dieser Studie wird die gleiche Marktentwicklung von InP-Wafern für die

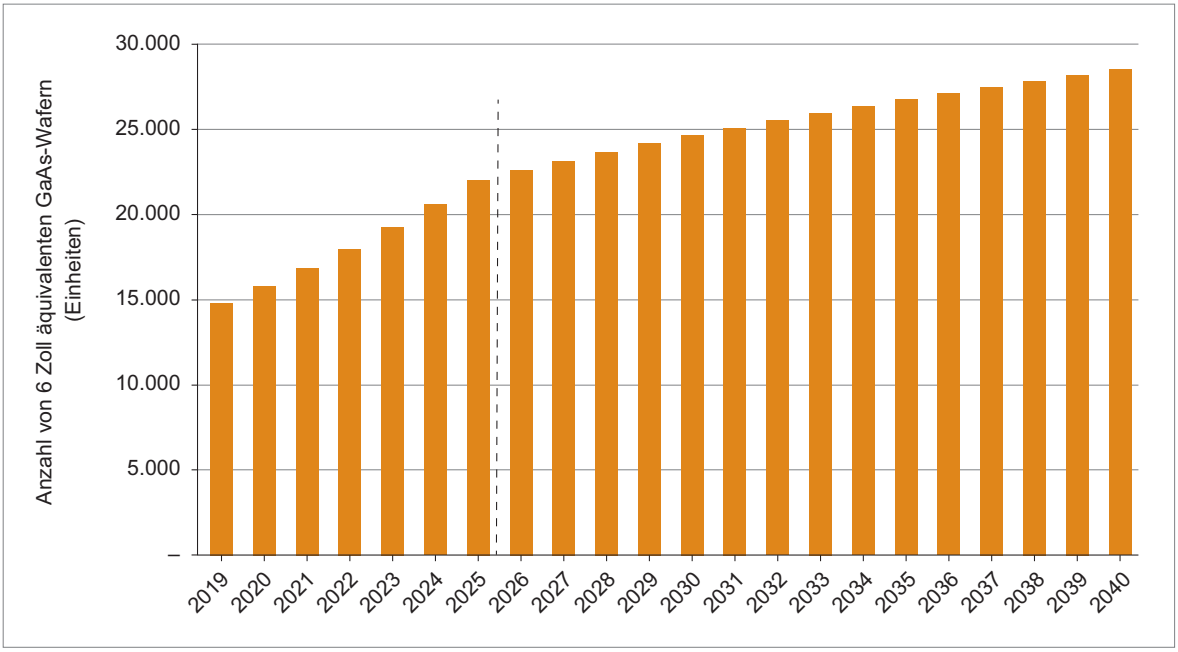


Abb. 3.30: Markt für GaAs-Wafer in verkauften Einheiten (Quelle: 2019 – 2025: YOLE DÉVELOPPEMENT 2019a, 2026 – 2040: eigene Prognose)

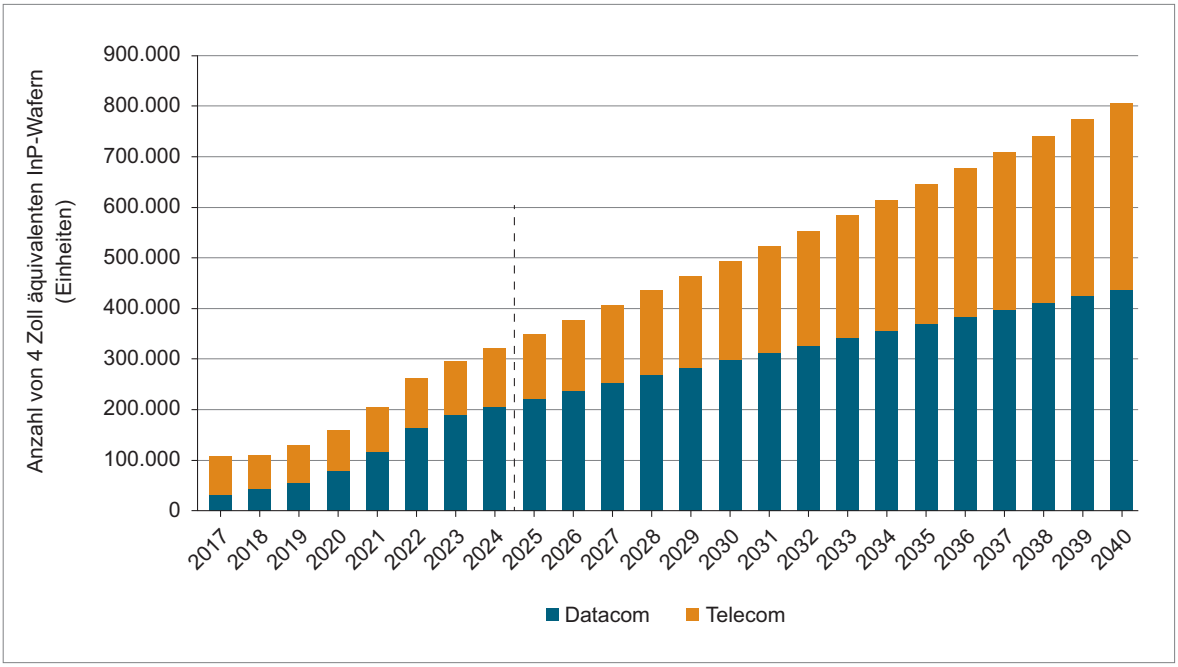


Abb. 3.31: Markt für InP-Wafer in verkauften Einheiten (Quelle: 2017 – 2024: YOLE DÉVELOPPEMENT 2019a, 2025 – 2040: eigene Prognose)

Telekommunikation wie die für RF-Geräte (siehe Kapitel 3.2.5 Radiofrequenz-Mikrochips) erwartet, da 5G der Haupttreiber ist. Yole prognostiziert ein jährliches Wachstum von 9 % zwischen 2019 und 2024, das durch 5G-Anwendungen angetrieben wird (YOLE DÉVELOPPEMENT 2019a). Zwischen 2025 und 2040 wird unterstellt, dass der Absatz von InP-Wafern für die Telekommunikation dem jährlichen Wachstum der mobilen Internetdaten folgen wird (siehe Kapitel 1.4 Digitalisierungs-

szenarien). Der Wafer-Absatz wird nicht exakt diesem Wachstum wie in der Rechenzentrumsgrafik folgen, daher wird das Wachstum mit einer zusätzlichen Rohstoffquote veringert. Es ist das Verhältnis zwischen dem Wachstum des Waferverkaufs und dem mobilen Internetverkehr in 2023 und 2024 und ist gleich 0,3. Abb. 3.31 zeigt die Prognose für den Absatz von InP-Wafern für die Daten- und Telekommunikation. Die drei Szenarien zeigen keinen signifikanten Unterschied für die Wachstumsraten des mobilen Internetverkehrs, daher wird nur ein Szenario in dieser Berechnung berücksichtigt.

3.2.3.4 Foresight Rohstoffbedarf

Basierend auf dem Rohstoffbedarf von Wafern (Tab. 3.37) und auf Wafer-Vorhersagen (Abb. 3.30 und Abb. 3.31) können im Folgenden die Rohstoffbedarfe für 2040 abgeschätzt werden.

Tab. 3.38 vergleicht für jedes Element die Weltproduktion im Jahr 2018, die Materialmenge für den optischen Transceivermarkt im Jahr 2018 sowie die Bedarfsprognose für 2040. Es wird nicht erwartet, dass die Mengen an Gallium und Arsen in der Zukunft signifikant ansteigen. Die Mengen bleiben an Waferverkäufen im Vergleich zum RF-Markt klein (s. Kapitel 3.2.5 Radiofrequenz-Mikrochips). Andererseits, wird sich die Nachfrage nach Indium, das für Photodioden und Laserdioden unerlässlich ist, bis 2040 verdreifachen. Diese Prognose basiert auf einem Worst-Case-Szenario, bei dem die InP-Technologie die Hauptplattform bleiben wird. Die Silizium-Photonik ersetzt derzeit die InP-Plattform, um die Kosten zu senken und die Leistung zu erhöhen (s. Kapitel 3.2.3.5 unter Substitution). Da keine speziellen Hinweise aus den Narrativen der SSPs vorliegen und die Mengen vergleichsweise gering sind, erfolgt keine weitere Differenzierung nach den SSPs.

3.2.3.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Recycling

Ein Recycling von Gallium und Indium aus Elektronikprodukten nach ihrer Nutzung findet derzeit nicht statt; unter anderem weil der ökonomische Anreiz größer ist, die in den Komponenten enthaltenen Edelmetalle pyrometallurgisch zu recyceln (European Commission 2020b). Das hydrometallurgische Recycling von Gallium aus Produktionsabfällen der Photovoltaikproduktion ist technisch möglich (Marwede 2013). Bisher existieren jedoch keine Versuche, ob eine Extraktion auch aus Bauteilen möglich ist. Die Vielzahl der chemischen Elemente im Bauteil, die geringe Konzentration von Gallium und Indium im Bauteil und die vorher notwendige Detektion und Trennung der Bauteile aus dem Elektronikschrott stellt die ökonomische Machbarkeit in Frage. Die Feinverteilung dieser Elemente in unterschiedlichen Produkten und Komponenten macht zudem die Sammlung ausreichender Mengen für das Recycling schwierig.

Das pre-consumer Recycling (aus Industrieabfällen) ist jedoch eine wichtige Sekundärquelle für Gallium und Indium. Ein „geschlossener Recyclingkreislauf“ (closed loop recycling) tritt in der Branche häufig hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen auf. Die Herstellungsprozesse von GaAs- und GaN-Wafern werden als wich-

Tab. 3.38: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe für GaAs und InP für den optischen Transceivermarkt in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Gallium	413 (R)	1	2	2	2
Arsen	32.783 (B)	1	2	2	2
Indium	808 (R)	5	35	35	35

B: Bergwerksförderung (t As_2O_3 Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

tigste Sekundärquelle des Metalls angesehen, wobei etwa 60 % Schrott in einem „geschlossenen Kreislauf" erzeugt und recycelt werden (Licht et al. 2015; European Commission 2020b). Eine Materialflussanalyse der GaAs-Waferproduktion der Freiberger Compound Materials GmbH zeigt, dass 55 % des im Herstellungsprozess eingeführten Ga und As nicht im Wafer enthalten sind. Aus diesen Abfällen kann Gallium durch elektrochemische Prozesse gewonnen und wiederverwendet werden (Clemm et al. 2016).

Substitution und Ressourceneffizienz: Siliziumphotonik

Eine weitere Plattform, die derzeit insbesondere für optische Transceiver verwendet wird, ist die Silizium-Plattform. Bei der Siliziumphotonik werden optische Bauelemente auf der Basis von InP (Laser und Detektor) in einen Siliziumchip integriert. Die größten Vorteile von InP-PICs sind der geringe Verlust und die hohe optische Leistung, da alle Funktionen auf einem einzigen Chip integriert sind.

Siliziumphotonik-PICs verwenden III-V-Materialien nur für die aktiven Funktionen und nutzen Silizium für die anderen Funktionen. In der Tat sind Si-basierte Laser sehr ineffiziente Lichtemitter und -detektoren. Dieser Ansatz reduziert die Menge an III-V-Materialien im optischen Transceiver und erhöht die Produktionskapazität durch die Fertigung auf 300 mm Siliziumwafern. Es gibt andere Plattformen wie Siliziumnitrid (SiN), Glas, Polymer, Siliziumdioxid (SiO_2) und $LiNbO_3$, aber sie sind weniger vielseitig anwendbar als Silizium und InP.

3.2.4 Mikroelektronische Kondensatoren

3.2.4.1 Technologiebeschreibung

Kondensatoren dienen der Speicherung von elektrischer Ladung und werden u. a. zur Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Stromes in Integrierten Schaltkreisen (ICs) verwendet. Der Trend zur Miniaturisierung in der Mikroelektronik begünstigt kompakte Bauformen und damit indirekt Dielektrika in Kondensatoren mit einer hohen Dielektrizitätszahl.

Eine wichtige Unterscheidungslinie sind elektrolyt- und keramikbasierte Kondensatortechnologien. Es gibt Elektrolytkondensatoren mit Aluminium-, Tantal- oder Niob-Elektroden. Tantal-Elektrolytkondensatoren erreichen die höchste Ladungsdichte pro Volumen, während keramikbasierte Kondensatoren die günstigsten sind. Elektrolytkondensatoren mit Ta_2O_5 als Dielektrikum sind schon 50 bis 60 Jahre auf dem Markt. In den 1980ern wurden die ersten für die Oberflächenmontage (SMD) geeigneten Bauteile eingeführt. Die extrem zyklischen Marktentwicklungen mit entsprechenden Preis- und Verfügbarkeitsthemen sowie ethische Bedenken hinsichtlich des Konfliktmaterials Tantal haben seit ca. 2007 Substitutionsbemühungen hervorgerufen (ZVEI 2019). So haben Multi-Layer-Ceramic-Capacitors (MLCCs) durch technische Verbesserungen sowie damit einhergehende Erweiterungen des Anwendungsspektrums Tantalkondensatoren in vielen Anwendungen, vor allem in tragbaren IKT-Endgeräten, ersetzt (Roskill 2018; Zednicek 2019; ZVEI 2019). Allerdings hat vermutlich die hohe Innovationsdynamik der Branche bereits zu einer hohen Ausschöpfung des Substitutionspotenzials geführt (Damm 2018).

Abb. 3.32 zeigt Applikationsbeispiele verschiedener Kondensatortechnologien in Abhängigkeit von der Spannung und Kapazität.

Im Leistungsbereich von tantalbasierten Elektrolytkondensatoren, also Niederspannung mit mittlerer Kapazität, gibt es insbesondere Überlappungen mit niobbasierten Elektrolytkondensatoren, aber auch mit aluminiumbasierten Elektrolytkondensatoren und Keramikkondensatoren.

Im Folgenden sind Aufbau und Funktionsweise der beiden Haupttypen tantal-/niobbasierte Elektrolytkondensatoren (Abb. 3.33) und MLCC (Abb. 3.34) beschrieben.

Die relative Dielektrizitätskonstante von Ta_2O_5 liegt bei 27, die von Nb_2O_5 bei 41. Die größere Dielektrizitätskonstante von Nb_2O_5 wird allerdings durch die größere Dicke der Oxidschicht mehr als kompensiert, so dass die Bauformen mit Tantal kompakter ausgelegt werden können. Beim Tantal-Elektrolytkondensator (Ta-Kondensator) besteht die Anode aus Tantal, auf dem durch anodische Oxidation eine gleichmäßige, dielektrische Schicht aus Tantalpentoxid erzeugt wurde. Ein flüssiger bzw. fester Elektrolyt wie Braunstein

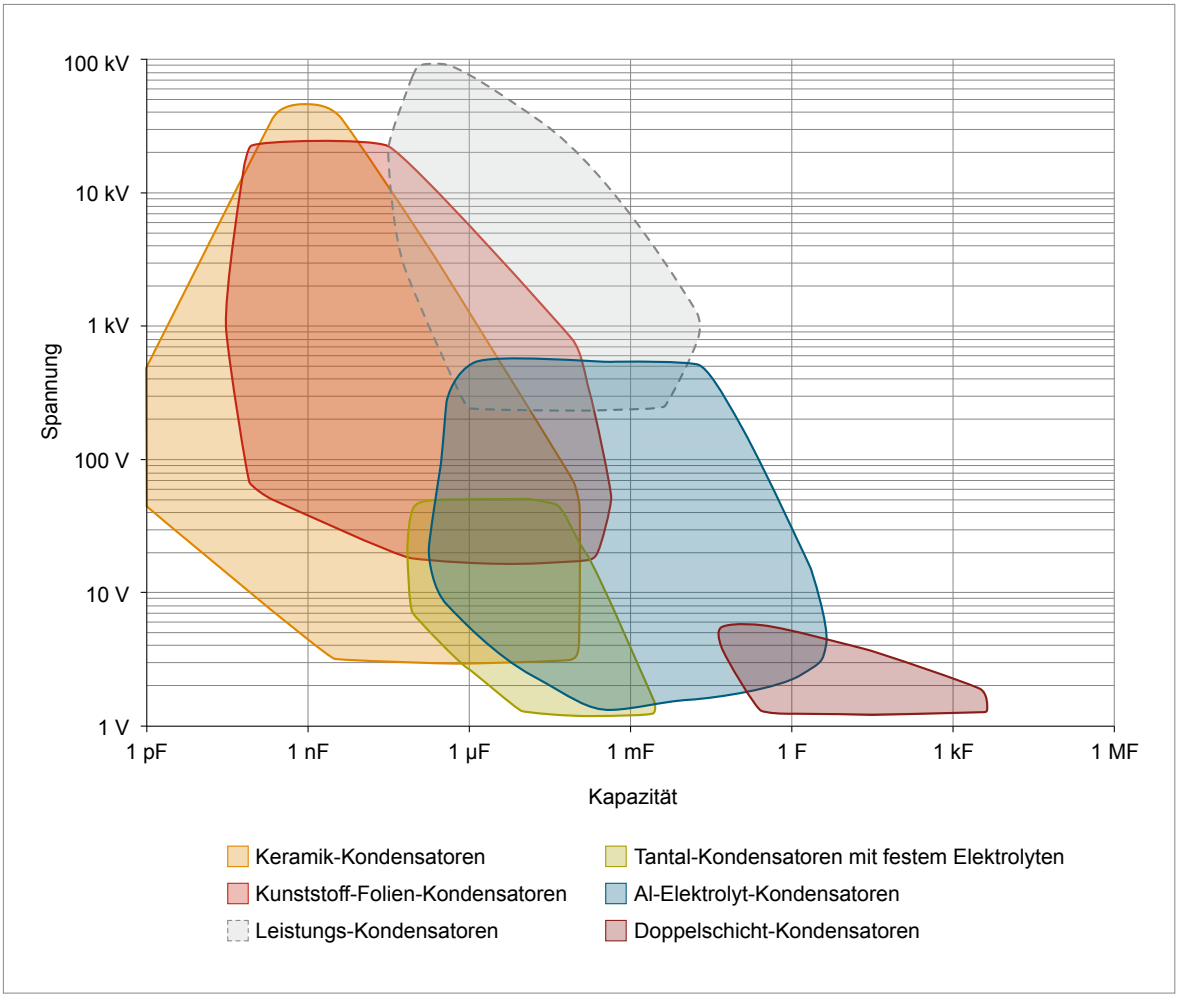


Abb. 3.32: Applikationsbeispiele verschiedener Kondensatortechnologien (Quelle: Elcap, Cepheiden, Wikimedia)

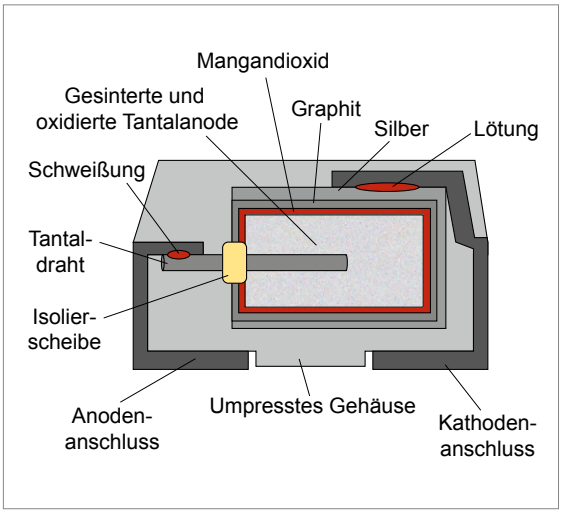


Abb. 3.33: Aufbau eines tantal-/niobbasierten Elektrolytkondensators (Quelle: Elcap, Wikimedia)

(Mangandioxid) bildet die Kathode. Bei Polymerkondensatoren ersetzt ein leitendes Polymer (Polypyrrole (PPy) oder Polythiophene (PEDOT)) das Elektrolyt (Avnet Abacus 2020).

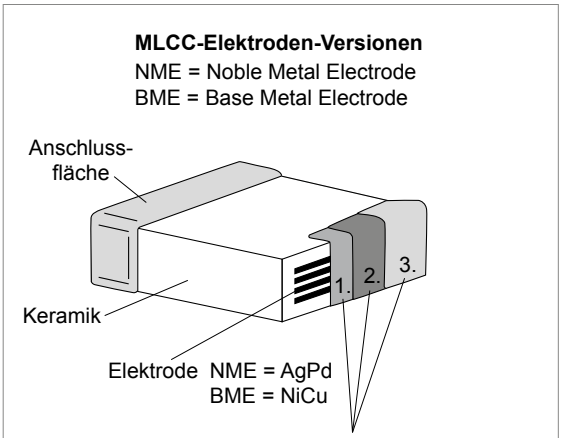
Im Vergleich von Tantal- mit Niobkondensatoren zeigen sich folgende Eignungspräferenzen (Zednicek 2006):

– Tantalkondensatoren mit MnO_2-Elektrode sind für Anwendungen bei hohen Temperaturen (bis 200 °C), hohen Spannungen (bis 50 V) und Zuverlässigkeitsanforderungen geeignet. Deshalb wird man sie insbesondere in Segmenten mit hohem Qualifizierungsaufwand beispielsweise in der kommerziellen und militärischen Luft- und Raumfahrt, in Medizinanwendungen sowie in Teilbereichen der Industrieelektronik finden (ZVEI 2019).

– In den Jahren vor 2000 wurden von verschiedenen Herstellern Kondensatoren mit einem leitfähigen Polymer als Kathodenmaterial entwickelt (Polymerkondensatoren). Hierbei wurde das bislang verwendete Mangandioxid (MnO_2) durch ein leitfähiges Kunststoffmaterial substituiert (ZVEI 2019). Tantalkondensatoren mit Polymerelektrode eignen sich für Anwendungen mit geringeren elektrischen Anforderungen wie DC/DC-Konvertern in Notebooks, PDA, Telekommunikation und anderen Anwendungen (ZVEI 2019).

– Nioboxidkondensatoren sind eine Alternative zu Tantalkondensatoren mit gutem Preis-Leistungsverhältnis. Wegen ihrer Zuverlässigkeit werden sie nicht nur im Consumer-, sondern auch im High-End-Segment benutzt. Niobkondensatoren sind derzeit allerdings noch in ihrer Spannungsfestigkeit beschränkt (Stenzel 2021). Stenzel (2021) geht daher davon aus, dass Niob Tantal nicht großflächig verdrängen wird, u. a. aufgrund der limitierten Anzahl an Herstellern.

Ein MLCC-Kondensator besteht aus einer Vielzahl von einzelnen Keramikkondensatoren, die übereinandergeschichtet und über die Anschlussflächen kontaktiert werden. Ausgangsmaterial aller MLCCs ist ein feingemahlenes Gemisch ferroelektrischer Grundstoffe wie Bariumtitanat ($BaTiO_3$), modifiziert durch Beimengungen von Zirkonium, Niob, Magnesium, Kobalt und Strontium, aus denen Folien hergestellt werden. Diese werden dann durch Elektrodendruck, Laminieren, Sintern usw. weiterverarbeitet. Dabei stellen die Zusammensetzung und Größe der Pulverpartikel ein wichtiges Know-how der Hersteller von Keramikkondensatoren dar.



Anschluss-Metallisierung	NME	BME
1) Elektrodenkontaktierung	Ag	Cu
2) Sperrschicht	Ni	Ni
3) Äußere Anschlussfläche	Sn	Sn

Abb. 3.34: Aufbau eines keramischen Vielschichtkondensators MLCC (Quelle: Elcap, J. Both, Wikimedia)

Hinsichtlich des Elektrodenmaterials von MLCCs haben Silber-Palladium-Elektroden gegenüber Nickelelektroden und Kupferelektroden an Marktanteilen eingebüßt. Der Marktanteil von Pd-basierten MLCCs hat von ca. 85 % in der Mitte der 1990er Jahre bis zu 10 – 15 % in den späten 2000er-Jahren abgenommen (Nassar 2015). Palladium in MLCCs wird heutzutage nur noch in high-end-Produkten im Automobil-, Medizin- und Militäranwendungen verwendet, so dass hier sogar ein schmaler Rückgang der Nachfrage aus dem Elektroniksektor zu beobachten war (JM 2019). Im Vorgängerbericht „Rohstoffe für Zukunftstechnologien“ (Marscheider-Weidemann et al. 2016) wurde noch angenommen, dass 50 % der MLCC-Kondensatoren AgPd-Elektroden besitzen. Somit war in der Prognose von 2016 von allen für MLCC benutzten Materialien nur die prognostizierte Palladiummenge im Jahr 2035 signifikant im Vergleich zur Weltproduktion im Jahr 2013. Da heutzutage MLCC mit AgPd-Elektrode nur in Spezialanwendungen verwendet werden, werden in diesem Update für MLCC keine Bedarfsszenarien erstellt. Zudem fielen in den Prognosen auch Silber und Mangan aus Ta-Kondensatoren bzw. Niob aus Nb-Kondensatoren nicht ins Gewicht, so dass in diesem Bericht nur Tantal in Tantalkondensatoren betrachtet wird.

3.2.4.2 Rohstoffinhalt

Nach Untersuchungen der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) wurde für einen Tantalkondensator mit den Abmessungen 3,9 mm x 3,1 mm x 2,3 mm (L x B x H) ein Tantalgehalt von 53 Gew.-% ermittelt. Es wurden jedoch nur zwei Messungen vorgenommen, demzufolge ist der Wert nicht als stellvertretend anzusehen (Bookhagen et al. 2018). Weitere Analysen von Tantalkondensatoren aus Smartphones mit den Abmessungen 2 mm x 1,25 mm x 1 mm (L x B x H) ergaben einen Tantalgehalt von maximal 40 Gew.-% pro Kondensator (Reinhold 2020). Dieser Wert vali-

diert den Maximalgehalt von 42,6 Gew.-% Tantal pro Kondensator (ZVEI 2003).

Da es keine öffentlich verfügbaren Marktzahlen zu den Umsätzen des Kondensatormarktes gibt (gemessen in verkauften Kondensatoren) und die Schwankungsbreite von Tantalmenge pro Kondensator auch aufgrund der unterschiedlichen Größen bzw. Kapazitäten sehr hoch ist, wird die Menge über das verkaufte „Cap-grade Ta powder" abgeschätzt, wobei nicht alle Hersteller in der Statistik vom „Tantalum-Niobium International Study Centre" (TIC) vertreten sind. TIC (2020b) gibt an, dass 2018 573 t „Cap-grade Ta powder" verkauft worden sind. Allerdings gab es im Jahr 2018 eine Verknappung von MLCC Kondensatoren (Stenzel 2021) und somit eine höhere Nachfrage nach Ta-Kondensatoren, so dass die verkaufte Menge in 2018 eher hoch ist. Die Zahlen schwanken sehr. Deswegen wird im Rahmen dieser Studie davon ausgegangen, dass auf Basis der Zahlen des (TIC 2020b) die Nachfrage im Schnitt um 3,1 % seit 2009 gewachsen ist. Wenn man die 475 t „cap-grade Ta powder" im Jahr 2009 als Bezugsjahr nimmt (TIC 2020b), wurden im Jahr 2018 ca. 630 t „Cap-grade" Tantal verkauft. Dazu kommt noch der Bedarf für den Tantaldraht, der laut Reinhold (2020) etwa 9 % des Gesamtinhalts des Kondensators ausmacht. Stenzel (2021) geht eher davon aus, dass der Draht aufgrund der immer kleineren Baugröße 15 – 20 % Massenanteil hat. Somit kommt man rechnerisch auf einen Gesamtbedarf von ca. 725 – 760 t in 2018. In dieser Studie wird von einem Mittel von 740 t ausgegangen, wobei, wie schon erwähnt, die Nachfrage im Jahr 2018 besonders hoch war. Somit ergibt sich eine rechnerische Lücke von ca. 130 t im Vergleich zu den 815 t Tantalbedarf für Kondensatoren in 2018, die von Roskill (2018) angegeben werden.

3.2.4.3 Foresight Industrielle Nutzung

Kondensatoren sind laut Roskill der Hauptanwendungsmarkt für Tantal (Roskill 2020c). Wegen der angehenden Elektrifizierung von Fahrzeugen und Haushalten werden Tantalkondensatoren wegen ihrer hohen Zuverlässigkeit in harschen Umgebungen auch in Zukunft trotz der höheren Kosten eine wachsende Bedeutung haben. Die Hauptanwendungsmärkte sind medizinische Anwendungen wie Hörgeräte und Herzschrittmacher, automobile Anwendungen, und IKT-Endgeräte sowie Mobilfunkmasten (TIC 2020a). So werden u. a. durch 5G die Anforderungen an die Elektronik von Smartphones erhöht, die schnellere Downloads und Reaktionszeiten erfordern (Roskill 2020b; Roskill 2020c).

Die fehlenden Angaben zum Gesamtmarkt und zur Zukunft des Kondensatormarktes lassen lediglich eine grobe Quantifizierung der Stoffströme zu (Damm 2018). Der Verband „Tantalum-Niobium International Study Centre" bringt jährliche Zahlen zum Verkauf von unterschiedlichen Tantal-Materialien heraus, u. a. „Cap-grade Ta powder", welches als Sinterprodukt für die Kondensatoren benötigt wird (TIC 2020b). Die Zahlen schwanken sehr. Nimmt man aber an, dass sie den Nachfragemarkt reflektieren, ist dieser in dem Zeitraum von 2010 – 2018 im Schnitt um 3,1 % jährlich gewachsen. Diese Zahl entspricht fast dem weltweiten BIP-Wachstum von 3 % im gleichen Zeitraum, woraus sich folgern lässt, dass der Ta-Kondensatormarkt abhängig vom weltweiten Marktwachstum ist. Allerdings gab es 2018 aufgrund der MLCC Knappheit ein Nachfragehoch. Stenzel (2021) geht daher eher von einem zweiprozentigen jährlichem Wachstum aus. Trotz der „Covid-19-Krise" wird für 2020 kein Einbruch des Marktes erwartet, sondern eher eine stärkere Nachfrage aufgrund des Digitalisierungstrends (Endgeräte und Infrastruktur) (Damm 2020; Stenzel 2021).

3.2.4.4 Foresight Rohstoffbedarf

Es wird angenommen, dass das Wachstum im Jahr 2020 nicht einbricht, sondern wegen des starken Digitalisierungstrends während der Covid-19-Krise weiterhin um 2 % steigt. Ab dem Jahr 2020 wird sich auf die den SSP zugrundeliegenden Wachstumszahlen für das globale BIP bezogen (Riahi et al. 2017), die je nach Szenario und Zeitabschnitt zwischen 2,5 und 5,1 % liegen. Damit passen insbesondere SSP1 und SSP5 zum Korridor von 4 – 5 % jährlichem Nachfragewachstum des Gesamttantalbedarfs aus allen Anwendungen bis 2026 laut DERA (Damm 2018; TIC 2020c), wobei bei SSP2 mit im Schnitt 3,1 % das geringste Markwachstum zu erwarten ist.

Der Tantalbedarf für Kondensatoren im Jahr 2040 kann laut den Szenarien auf 94 – 110 % der heuti-

Tab. 3.39: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Mikroelektronische Kondensatoren in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Tantal	1.832 (B)	740	1.716	1.459	2.013

B: Bergwerksförderung (t Inh.)

gen Weltproduktion steigen. Allerdings sind diese Prognosen mit hohen Unsicherheiten behaftet, da schwierig abzusehen ist, welche Kondensator-Technologien bzw. Materialien (z. B. Niob) sich auf Dauer in welchen Anwendungen durchsetzen werden. Außerdem gibt es noch Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Speicherdiche (Farad/Gewicht Tantal), welche grob geschätzt um 6 % pro Jahr in den letzten 7 Jahren gesteigert wurde (von 100 µF pro Kondensator im Jahr 2013 (Zogbi 2013) auf 150 µF bei ca. gleicher Baugröße (AVX 2021). Das heißt, gemessen an der Stückzahl der verkauften Kondensatoren, ist der Markt deutlich schneller gewachsen als die Nachfrage nach dem Rohstoff Tantal. Diese Materialeffizienzgewinne werden sich auch auf den zukünftigen Rohstoffbedarf auswirken. Im Vergleich zu den Projektionen laut Marscheider-Weidemann et al. (2016) fällt der projizierte Tantalbedarf deutlich höher aus – u. a., weil der Bedarf für 2013 mit 130 t deutlich unterschätzt wurde (der Bedarf für allein „Cap-grade Ta powder" Betrug im Jahr 2013 540 t laut TIC (2020b)).

3.2.4.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Ein Recycling von Tantal aus Endverbraucherabfällen findet kaum statt und liegt weltweit bei unter 1 %. Das Recycling von Produktionsabfällen hingegen gehört zu den gängigen Verfahren, womit etwa 10 bis 25 % des Primärrohstoffes ersetzt werden können (Wilts et al. 2014). Das Recycling von Tantal aus Altschrotten konzentriert sich hauptsächlich auf post-industriellen und post-consumer-Schrott, dort wo Tantal in größeren Mengen anfällt, beispielsweise als Superlegierung in Turbinenschaufeln, Sputtertargets aus der Halbleiterindustrie, Komponenten für den Anlagenbau, Prozessschrotte wie Produktionsabfälle und Tantalcarbide aus der Hartmetallindustrie (Gille & Meier 2012; Damm 2018). Post-industrielle Abfälle entstehen bereits während der Produktion oder Herstellung, während Post-consumer-Abfälle bei den Endverbrauchern anfallen. Im Jahr 2016 wurden laut BGR (2018) 275 t Tantal aus der Sekundärproduktion gewonnen. Die Rückgewinnung von Tantal aus Elektrogeräten wie Mobiltelefonen ist aufgrund einer hohen Verdünnung des Wertmetalls, mangelnder Prozessentwicklungen und niedriger Sammelraten aktuell nicht ökonomisch umsetzbar (Damm 2018). Die geringe Konzentration von Tantal in IKT-Endgeräten, d. h., die hohe Dissipation, stellt nach Gille & Meier (2012) eine große Herausforderung für eine effiziente Materialrückgewinnung dar. Es existieren keine Anlagen im industriellen Maßstab, da hohe Konzentrationen und Reinheiten für das Recycling von Tantalkondensatoren sowie die Separation der Bauteile von der Leiterplatte erforderlich sind (Sander et al. 2018). Lösungen für die automatisierte Entstückung, Erkennung und Sortierung von Bauteilen hat das europäische Forschungsprojekt ADIR entwickelt (Noll et al. 2020).

3.2.5 Radiofrequenz-Mikrochips

3.2.5.1 Technologiebeschreibung

Radiofrequenzkommunikation

Radiofrequenz(RF)Chips werden für die drahtlose Telekommunikation eingesetzt, die auf einem elektromagnetischen Signal zur Kommunikation basieren. Die Radiofrequenzen reichen von 3 kHz bis 300 GHz. Die RF-Technologie wird in vielen Anwendungen wie Mobiltelefonen, WLAN, Satelliten- und Fernerkundung eingesetzt. Das breite Anwendungsspektrum wird in Abb. 3.35 dargestellt.

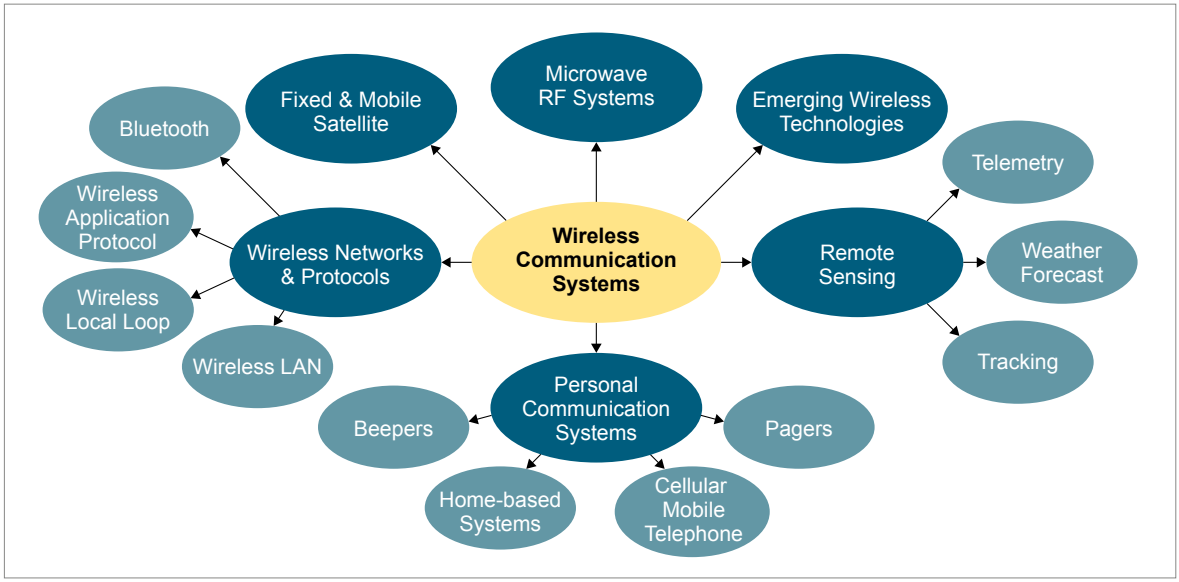


Abb. 3.35: Anwendungen der RF-Kommunikation (Quelle: Ugweje 2004)

Abb. 3.36 zeigt ein vereinfachtes Modell der drahtlosen RF-Kommunikation. Die Quelle liefert die Informationen an den Sender (Audio, Video, Daten). Der Sender sendet am Ende des Signals die Informationen über eine Antenne an den Empfänger. Die Funktionen des Sendeprozesses können Modulation, Codierung, Analog-Digital-Wandlung und die Umkehrfunktionen für den Empfänger sein (Decodierung, Demodulation). Für ein effektives Senden und Empfangen umfassen Sender und Empfänger auch eine Signalverstärkung, eine Frequenzfilterung und eine Übersetzung des Signals von einer Frequenz in eine andere usw.

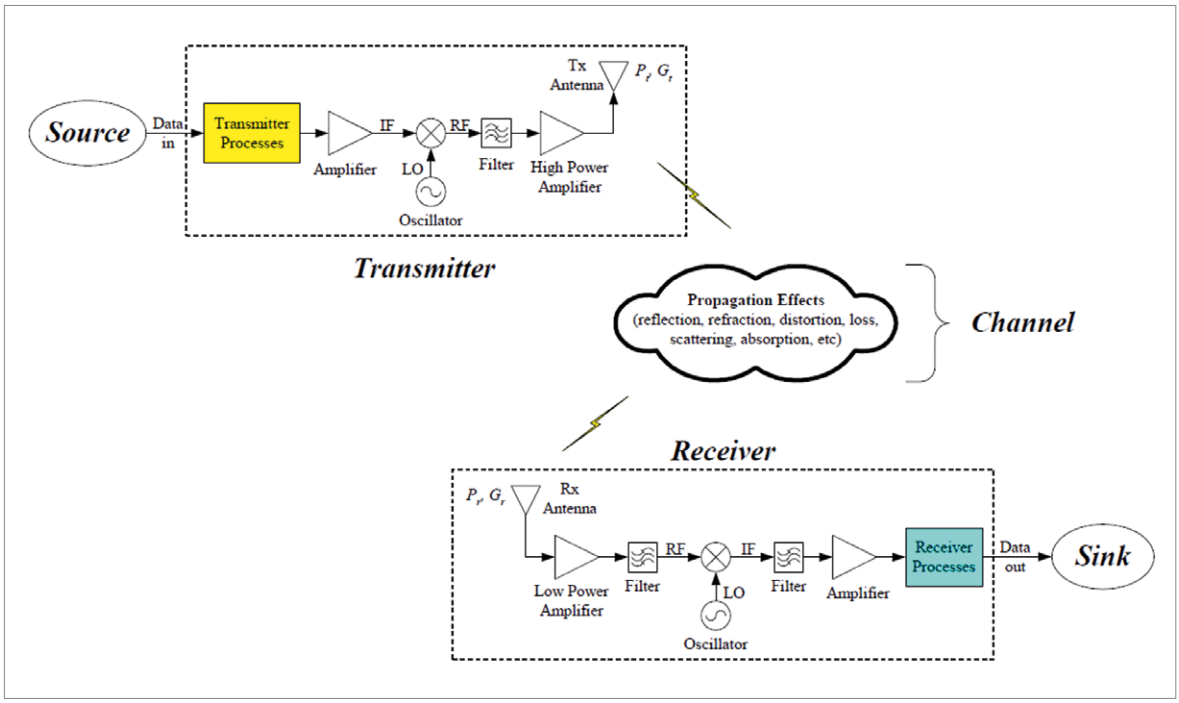


Abb. 3.36: Vereinfachtes Modell der terrestischen drahtlosen RF Kommunikation (Quelle: Ugweje 2004)

RF-Halbleiterbauelemente

Ein RF-System erfordert zwei Arten von Hardware-Subsystemen zur Übertragung der Informationen: einen Sender und einen Empfänger. Sie bestehen aus vielen Komponenten, von denen die wichtigsten folgend aufgelistet sind:

- Leistungsverstärker: sie verstärken das ausgehende Signal und machen es stark genug, um die Basisstation zu erreichen.
- Rauscharme Verstärker: sie verstärken das eingehende Signal.
- Filter: sie wählen Signale nach ihren Frequenzen aus.
- Schalter: sie pendeln Signale von einem RF-Pfad zu einem anderen.

Es gibt natürlich viel mehr Komponenten in RF-Systemen, die vorliegende Studie konzentriert sich aber auf diejenigen, die kritische Materialien enthalten. Bei diesen Komponenten handelt es sich um integrierte Schaltkreise bestehend aus Halbleiterbauelementen. Der Transistor ist das wichtigste Halbleiterbauelement. Es gibt viele Arten von Transistoren, die von der Art der Anwendung abhängig sind.

Integrierte Schaltkreise werden in und auf Waferoberflächen hergestellt. Die Fläche auf dem Wafer, die das Halbleiterbauteil oder der integrierte Schaltkreis einnimmt, heißt „chip“, „microchip“, „die“ oder „bar“. Am Anfang der Produktion (front end of the line – FEOL) werden die Transistoren und andere elektronische Bauteile auf der Waferoberfläche hergestellt. Unternehmen wenden in einer Vielzahl von Abfolgen und Variationen vier Basisoperationen an, um Mikrochips zu produzieren. Diese sind Beschichten („layering“), Musterung („paterning“), Dotierung („doping“) und Hitzebehandlung („heat treatment“).

Aktive Schichten/Substrate für RF

Die Herstellung von integrierten Schaltkreisen erfordert ein Substrat (Si, GaAs, InP, SiC oder Saphir), auf dem eine aktive Schicht gewachsen ist. Dieses Kristallwachstum wird Epitaxie genannt. Ein Beispiel wird in Abb. 3.37 gezeigt. In diesem Fall ist das Substrat GaAs und die aktive Schicht GaAs oder InGaAs. Die Eigenschaften der aktiven Schicht bestimmen die Leistungsfähigkeit des Bauelements. Das Substrat wird als physikalischer Träger für den Bau des Bauelements verwendet, aber seine physikalischen Eigenschaften (Kristallgitterkonstante, Wärmeausdehnungskoeffizient) müssen ebenfalls an die aktive Schicht angepasst werden, um die beste Kristallqualität und Bauelementleistung zu erhalten. Aus diesem Grund wird eine große Vielfalt von Substraten verwendet. Im Falle von GaN werden in der Produktion Substrate aus GaN, Si oder SiC verwendet, da GaN-Substrate sehr teuer und in der Größe begrenzt sind. In Abb. 3.37 sind die wichtigsten Substrate pro Substrattyp aufgelistet. RF-Bauelemente basieren auf vielen Halbleitern wie Silizium (Si und SOI, Silicon-On-Isolator), Galliumarsenid (GaAs), Galliumnitrid (GaN), Siliziumkarbid (SiC), Indiumphosphid (InP) und Siliziumgermanium (SiGe).

Als piezoelektrische Materialien werden Lithiumniobiat und Lithiumtantalat ($LiNbO_3$ und $LiTaO_3$) verwendet. Sie werden als Bulk-Wafer hergestellt (Nakamura 2012).

Betrachtet man die Dicke der auf dem Wafer abgeschiedenen Materialien (wenige Nanometer bis zu einigen Mikrometern), so stammen die meisten Materialien tatsächlich vom Wafer selbst (Dicke etwa 500 – 700 µm). Man muss jedoch berücksichtigen, dass die Epitaxieprozesse manchmal sehr ineffizient sein können, was zu hohen Materialverlusten führt (bis zu 70 % Materialverlust) (Horowitz, et al. 2018). Dies sind jedoch geringe Mengen im Vergleich zum Materialbedarf für die Waferherstellung. Aus diesem Grund wird in den folgenden Abschnitten nur der Wafer betrachtet.

Galliumarsenid (GaAs)

Einige elektrische Eigenschaften von Galliumarsenid (GaAs) sind besser als die von Silizium. Die Elektronengeschwindigkeit und die Elektronenmobilität sind höher, was dazu führt, dass Transistoren hergestellt werden können, die bei mehreren hundert GHz arbeiten. Außerdem haben sie bei diesen hohen Frequenzen weniger Rauschen als Silizium-Bauteile und können bei höheren Leistungsstufen arbeiten, da sie eine höhere Durchschlagsspannung besitzen. Bauteile aus Galliumarsenid sind zehnmal schneller als Silizium-Bauteile. Außerdem sind sie weniger störanfällig und haben einen geringeren Energiebedarf.

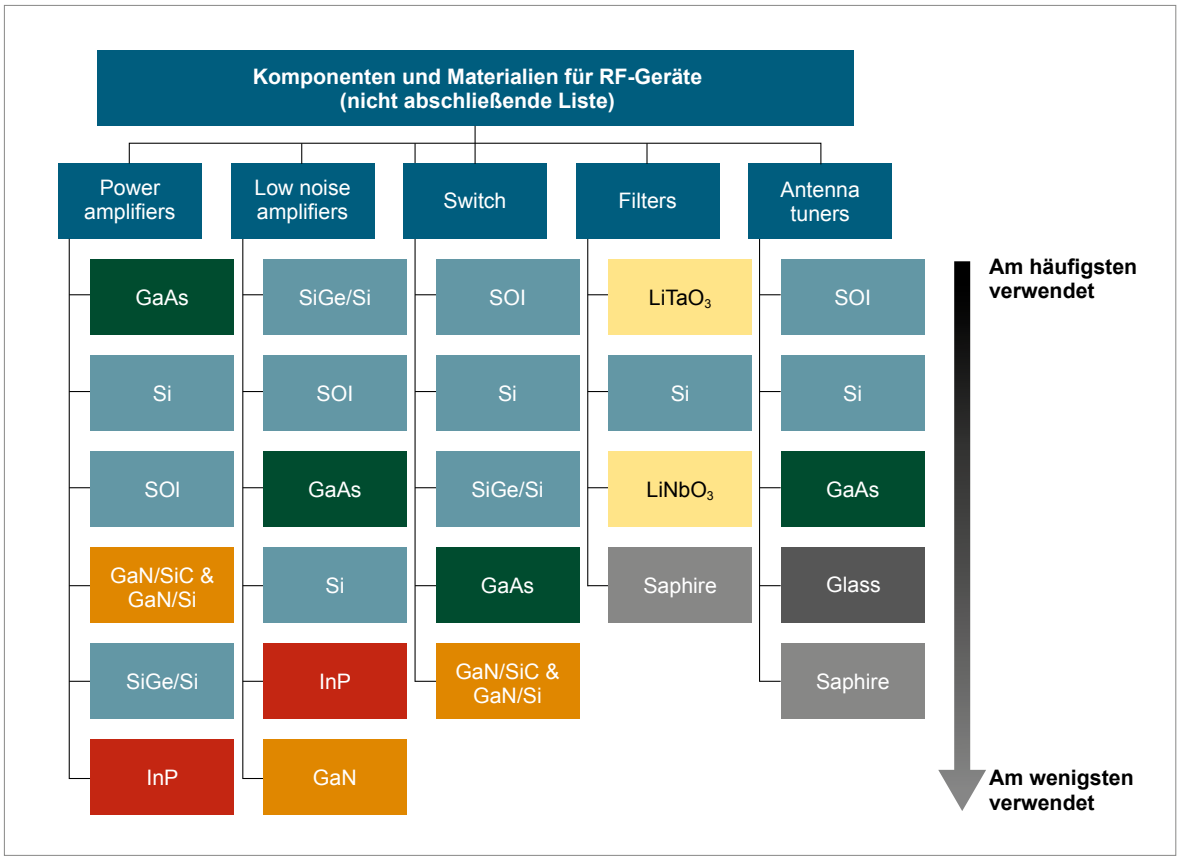


Abb. 3.37: Liste der Substrate, die für die Hauptkomponenten von RF-Geräten verwendet werden (Quelle: Eigene Darstellung)

Anmerkung: SOI bedeutet Silizium-auf-Isolator. GaN/Si bedeutet, dass eine GaN-Schicht auf einem Si-Wafer aufgetragen wurde.

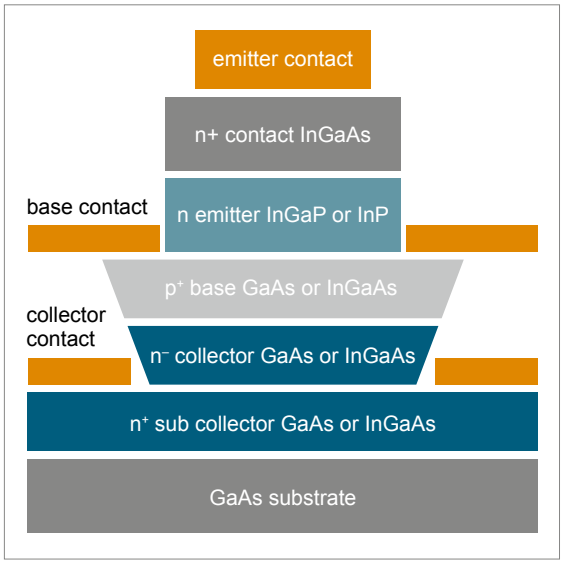


Abb. 3.38: Schema eines HBT (Heterojunction Bipolar Transistor) auf einem GaAs-Substrat (Quelle: Freiberger Compound Materials 2020b)

Wegen dieser Eigenschaften sind GaAs-Schaltkreise (GaAs-ICs) für Hochfrequenzleistungsanwendungen in Mobiltelefonen, für drahtlose lokale Netze (WLAN) und Global Positioning Systeme (GPS) besonders geeignet. GaAs-ICs werden zudem in der Mikrowellenelektronik, in Kabelfernsehempfänger, in Telekommunikationsgeräten und beim Militär und in der Raumfahrt angewendet (Yole développement 2020b). Abb. 3.38 zeigt ein Schema des GaAs-Transistors.

Indiumphosphid (InP)

Heterojunction Bipolar Transistoren (HBT) und High Electron Mobility Transistoren (HEMT) auf Indiumphosphid-Basis (InP) bieten bessere Leistungen als GaAs (höhere Elektronenbeweglichkeit und bessere Wärmeableitung) und sind daher ideal für Hochgeschwindigkeits-RF-Anwendungen. Abb. 3.39 zeigt einen Querschnitt eines

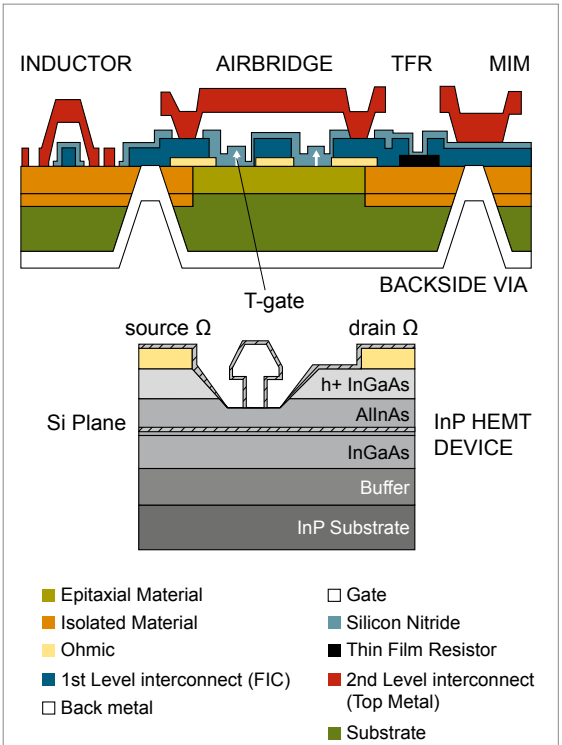


Abb. 3.39: Querschnitt eines InP-HEMT-Gerätes (Quelle: DEAL 2014)

InP-HEMT-Bauelements. Hohe Kosten und die begrenzte Größe des Substrats beschränken den InP-Markt auf einen RF-Nischenmarkt und eine geringe Menge. InP-HF-Geräte werden derzeit in automatischen Testgeräten, Militär- und Verteidigungsanwendungen, Radargeräten und Sicherheitsanwendungen eingesetzt.

Germanium (Ge)

Reine Germaniumwafer werden hauptsächlich als Substrat für III-V-Solarzellen benutzt. Ge-Wafer des Durchmessers von 300 mm können mit Hilfe des Czochralski-Kristallzuchtverfahrens hergestellt werden. Wird Germanium epitaxisch auf Siliziumwafern gezüchtet, spricht man von epitaxischen Ge-Wafern. Ge bzw SiGe wird mittels chemischer Beschichtung aus der Gasphase (chemical vapour deposition) auf einem Siliziumsubstrat abgeschieden (siehe Abb. 3.40). Mit Siliziumgermanium (SiGe) wird die Legierung Si1-xGex bezeichnet, welche aus einem molaren Verhältnis von Silizium und Germanium besteht.

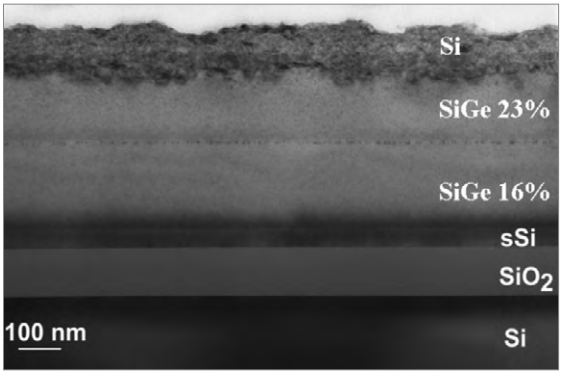


Abb. 3.40: Querschnittsansicht von SiGe-Schichten unterschiedlicher molarer Verhältnisse auf einem Siliziumwafer (Quelle: CISCO 2018)

SiGe-Bauteile werden für drahtlose Geräte, drahtlose lokale Netzwerke (WLANs), optische Kommunikationssysteme, Festplatten, Automobilchips und Global Positioning Systeme (GPS) benutzt. SiGe-Transistoren sind klein, rauschen wenig und sind energieeffizient, so dass sie die Batterielaufzeiten von mobilen Geräten verlängern. Sie arbeiten stabiler bei hohen Temperaturen und im ultra-hochfrequenten Bereich. Sehr schnelle SiGe-Chips können mit bekannten Produktionstechnologien, wie der Siliziumchipindustrie, hergestellt werden. SiGe-Prozesse sind ähnlich teuer wie die zur Silizium-CMOS-(Complementary metal-oxide-semiconductor)-Herstellung, sind jedoch billiger als andere Heteroübergangstechnologien wie GaAs.

Galliumnitrid (GaN)

Der Großteil der Galliumnitrid-RF-Bauelemente sind Leistungsverstärker. LNA (Low Noise Amplifier) und Schalter auf der Basis von GaN sind ebenfalls erhältlich, jedoch eher für Nischenmärkte (hauptsächlich militärische Anwendungen). Die drahtlose Infrastruktur ist der wichtigste Antriebsmarkt für das GaN-RF-Geschäft in Zukunft (YOLE DÉVELOPPEMENT 2019b) (s. Kapitel 3.5.3 5G/6G). Die Entwicklungen von 5G und 6G werden in den nächsten Jahren zunehmen und das Volumen von GaN antreiben.

Silizium (Si)

Silizium ist das Hauptmaterial für die RF-Kommunikation und ist laut EU auch ein kritisches Material (European Commission 2020b). Dennoch wird Si in allen Arten von integrierten Schaltkreisen verwendet, nicht nur für RF. Es wäre sinnvoll, die Menge an Si für die globale mikroelektronische Fertigung zu berechnen, nicht nur für RF. Das ist nicht der Gegenstand dieser Zusammenfassung.

Lithiumniobiat (LN) und Lithiumtantalat (LT)

Lithiumniobiat ($LiNbO_3$) (auch als LN bezeichnet) und Lithiumtantalat ($LiTaO_3$) (auch als LT bezeichnet) sind piezoelektrische Materialien, die ein elektrisches Signal in mechanische Energie, z. B. Schallwellen, umwandeln können und umgekehrt. Die Filter können auf Bulk-Wafern von 4,5 oder 6“ LN oder LT hergestellt werden. Die Mehrzahl der Wafer basiert auf $LiTaO_3$. Ein neuer Ansatz von Piezoelektrik auf Isolator (POI) nur für $LiTaO_3$ wurde kürzlich von der Fa. SOITEC herausgebracht (Butaud et al. 2020). Das POI-Volumen ist derzeit noch gering, könnte aber in Zukunft noch zunehmen. SOITEC unterzeichnete im Juli 2020 eine Vereinbarung mit Qualcomm Incorporated über die Lieferung von POI-Substraten für 4G- und 5G-RF-Filter (Joosting 2020). Ein Bulk-LT-Wafer wird auf einen Si-Wafer gebondet. Nach dem Debonding verbleibt nur eine dünne Schicht LT auf dem Si-Wafer für die Bauelementherstellung. Der Rest des LT-Wafers kann theoretisch zur Herstellung eines neuen POI-Substrats wiederverwendet werden (siehe Abb. 3.41). Eine reduzierte Verwendung von Lithium-Tantalit-Materialien könnte zukunftsweisend sein, jedoch konnten keine Informationen über die Materialwiederverwendung gefunden werden. Das Verfahren ist auch auf $LiTaO_3$- und SAW-(surface acoustic wave) Filter beschränkt.

Erwähnenswert ist, dass Yttrium (ein Element der Seltenen Erden) und Thallium (hochgiftiges Material) dank ihrer Mikrowellensupraleitung auch in Filtern eingesetzt werden, die als „Hochtemperaturfilter“ (HT-Filter) bezeichnet werden. $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) oder $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ (TBCCO)-Schichten werden auf Keramiksubstrate, wie $LaAlO_3$, MgO oder Saphir (2 Zoll Substrat für Massenproduktion) aufgetragen. HT-Filter sind wegen ihrer erhöhten Empfindlichkeit zur Verbesserung des Signalempfangs und ihrer außergewöhnlichen Selektivität zur Unterdrückung von Störsignalen attraktiv. Sie weisen auch einen sehr niedrigen Widerstand auf, wodurch es möglich ist, sehr viel kompaktere Geräte zu bauen als die entsprechenden Geräte mit herkömmlichen Materialien. HT-Filter müssen jedoch mit einem Kühlsystem kombiniert werden, da sie bei niedrigen Temperaturen optimal arbeiten (Simon et al. 2004). Die Hauptanwendungen von HT-Filtern liegen in der Basisstation der Mobilkommunikation,

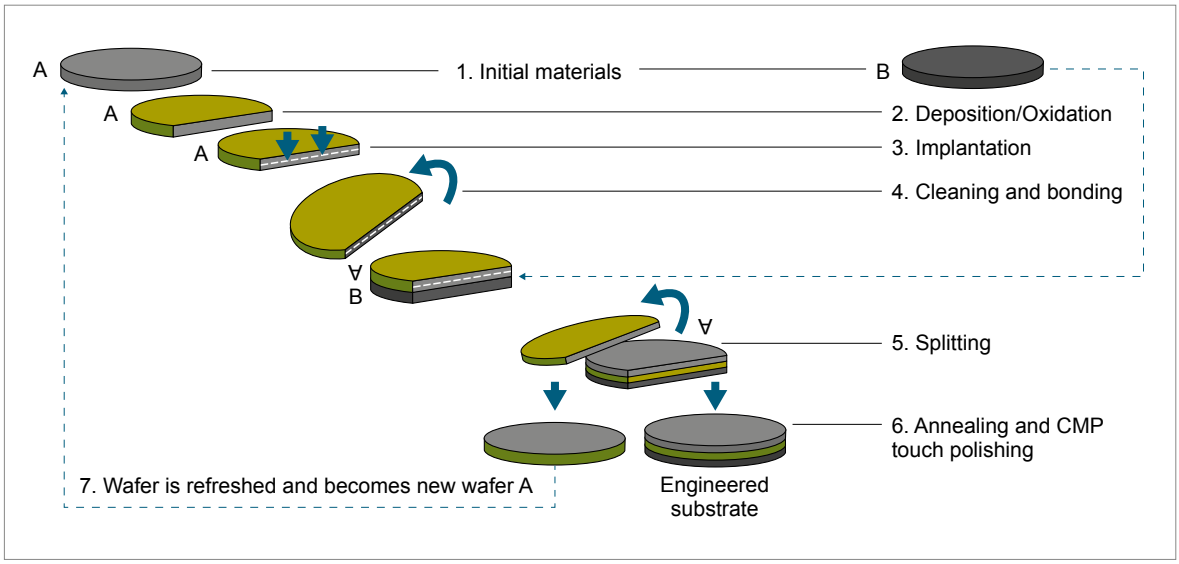


Abb. 3.41: Piezoelektrik-auf-Insulator (POI) smart cut ™ Prozessschema von SOITEC (Quelle: Butaud et al. 2020)

in Radarsystemen und in der Radioastronomie (Sun & He 2014). Die Menge an Yttrium und Thallium konnte nicht abgeschätzt werden, sollte aber im Vergleich zu Gallium und Arsen klein sein.

3.2.5.2 Rohstoffinhalt

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf GaAs- und InP-Substrate sowie auf die piezoelektrischen Substrate.

Halbleiter Wafer

Der Nettogehalt von Ga, As, In und P wird auf der Grundlage der Waferdicke (AXT 2020; Freiberger Compound Materials 2020a), der GaAs- und InP-Dichte (jeweils 5.315 g/cm³ und 4.81 g/cm³) und dem Molekulargewicht berechnet (siehe Tab. 3.40). Der Bruttoanteil des Halbleiterelements berücksichtigt den Materialverlust während der Waferherstellung. Bei der GaAs-Herstellung liegt die Materialausnutzungsrate bei etwa 45 % (Clemm et al. 2017). Diese Materialausnutzungsrate beinhaltet bereits das „Inner Loop"-Recycling, bei dem Zwischenabfälle wieder in die Wafersynthese eingeführt werden. Für die InP-Wafer-Herstellung konnten keine Daten über die Materialausnutzung gefunden werden, so dass die gleiche Rate wie bei der Herstellung von GaAs-Wafern unterstellt wird.

Tab. 3.40: Menge von Ga, As, In und P pro Wafer für die RF-Anwendung (Bruttobedarf)

	GaAs-Wafer	InP-Wafer
Wafergröße	6 Zoll	4 Zoll
Dicke	675 µm	600 µm
Materialausnutzungsrate der Wafer-Herstellung	45 %	45 %
Galliumbedarf pro Wafer	70,1 g	
Arsenbedarf pro Wafer	75,3 g	
Indiumbedarf pro Wafer		42,7 g
Phosphorbedarf pro Wafer		11,5 g

Anmerkung: Bruttobedarf ist die Menge, die für die Wafer-Herstellung benötigt wird, einschließlich der Materialverluste bei der Herstellung.

Keramikwafer

Der Nettoanteil von Li, Nb und Ta, der in Tab. 3.41 dargestellt ist, wurde auf Grundlage der Größe und Dicke des Wafers sowie der Materialdichte (jeweils 4.64 g/cm³ und 7.46 g/cm³ für $LiNbO_3$ und $LiTaO_3$) berechnet. Die Bruttomenge der Elemente konnte, aufgrund fehlender Informationen über die Materialausnutzung während des Waferherstellungsprozesses, nicht berechnet werden.

Tab. 3.41: Menge von Li, Nb und Ta pro Keramikwafer (Nettoanteil)

	$LiNbO_3$-Wafer	$LiTaO_3$-Wafer
Wafergröße	6 Zoll	6 Zoll
Dicke	500 µm	500 µm
Lithium	n: 2,0 g	n: 2,0 g
Niob	n: 26,6 g	
Tantal		n: 52,2 g

Anmerkung: Nettoanteil ist die Masse der Elemente, die im Wafer enthalten ist. Sie stellt nicht für die Herstellung erforderliche Masse dar.

3.2.5.3 Foresight Industrielle Nutzung

InP

InP-RF-Geräte werden derzeit in automatischen Testgeräten, Militär- und Verteidigungsanwendungen, Radargeräten und Sicherheitsanwendungen eingesetzt. Aufgrund der begrenzten Größe und der hohen Kosten gibt es derzeit keinen Marktdruck für hochvolumige RF-Anwendungen. Es wird nicht davon ausgegangen, dass InP bis 2040 in den Massenmarkt eintreten wird, daher wird die Menge an InP-Wafern für diese Anwendung wahrscheinlich sehr niedrig und bis 2040 stabil bleiben (Yole développement 2019a). Die Masse an Indium, die für die eigentliche InP-Produktion für RF-Chips benötigt wird, wird für 2018 auf etwa 1 Tonne geschätzt und sollte stabil bleiben. Die Hauptanwendung für InP-Wafer sind die optoelektronischen Bauelemente.

GaN

Die Kristallzucht von Galiumnitrid (GaN) steht derzeit noch am Anfang. Als Substrat für Halbleiterelektronik ist GaN noch nicht verfügbar. GaN-Bauteile werden auf Silizium- (6 Zoll) oder Siliziumkarbid- (SiC) (4 Zoll) Wafern aufgebaut. Die GaN-Schicht beträgt auf SiC etwa 3 µm. Auf Si ist eine Pufferschicht aus $Al_xGa_{1-x}N$ notwendig, um die Gitterfehlanpassung zwischen GaN und Si auszugleichen, so dass die AlGaN/GaN-Schicht dicker ist (~5 µm). Die Fertigungsausbeute ist dann auch geringer, da die Epitaxie aufwendiger ist. Die Ga-Masse pro Wafer berechnet sich nach den Parametern in Tab. 3.42. Die Anzahl der Silizium- und Siliziumkarbid-Wafer für GaN-Bauelemente bleibt im Vergleich zu GaAs-Wafern gering. Im Jahr 2018 wurden etwa 48 000 SiC-Wafer und 400 Siliziumwafer für GaN-Bauelemente für RF verkauft. Es wird erwartet, dass der Markt in den nächsten Jahren aufgrund von 5G (siehe Kapitel 3.5.3 5G/6G) mit einer CAGR von 116 % zwischen 2018 und 2024 schnell wachsen wird.

Als Worst-Case-Szenario für das Jahr 2040 kann davon ausgegangen werden, dass der Markt für GaN-Geräte direkt mit dem Wachstum der Mobiltelefonverkäufe verbunden ist, der in der Technologiesynopse „5G/6G“ (siehe Kapitel 3.5.3) vorgestellt wurde. In der Tat sollten GaN-Bauteile massiv in der 5G/6G-Infrastruktur eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.5.3). Wenn die Anzahl der verkauften Si/SiC-Wafer mit diesem Wachstum korreliert wird, lässt sich abschätzen, dass im Jahr 2040 zwischen 1 und 2 Tonnen Ga (je nach Szenario SSP1-2-5) für GaN-HF-Bauteile benötigt werden. Selbst wenn man einen extremen Anstieg der Wafer-Verkäufe durch das exponenzielle Wachstum des mobilen Internetverkehrs in Betracht zieht, bleibt die Menge an Ga in Verbindung mit GaN-HF-Geräten im Vergleich zu GaAs-Geräten gering.

Tab. 3.42: Menge von Ga pro Wafer für die RF-Anwendung (Bruttobedarf)

	GaN-on-Si	GaN-on-SiC
Wafergröße	6 zoll	4 zoll
GaN Dicke	5 µm	3 µm
Ga Masse in Wafer	0,5 g	0,1 g
Materialausnutzungsrate der WaferHerstellung	80 %	80 %
Herstellungausbeute	70 %	90 %
Galliumbedarf pro Wafer	0,6 g	0,2 g

Anmerkung: Bruttobedarf ist die Menge, die für die Wafer-Herstellung benötigt wird, einschließlich der Materialverluste bei der Herstellung.

GaAs

Gemäß Yole développement (2020b) ist der Bedarf an Frequenzfiltern mit GaAs-basierten Verstärkern weitgehend abhängig von der Anzahl der Mobiltelefone, da ca. 93 % dieser Filter in Mobiltelefonen verwendet werden. In den vergangenen Jahren nahm die Anzahl der Mobilfunkanschlüsse stark und stetig zu (Statista 2021a), in den letzten zehn Jahren allerdings mit deutlich abnehmenden Wachstumsraten. Seit 2019 hat die Anzahl kaum mehr zugenommen. Sie übertrifft mit ca. 8,2 Milliarden Anschlüssen die Weltbevölkerung von ca. 7,8 Milliarden Menschen (Statista 2019b). Das Wachstum bei den Anschlüssen wurde in den letzten Jahren vor allem von den Ländern in Asien und Afrika getragen. In Europa und Nord- und Lateinamerika hingegen wuchs die Zahl der Mobilfunkanschlüsse nur noch langsam, hier ist mittlerweile eine Sättigung erreicht. Aufgrund dieser Entwicklung des Mobilfunkmarktes in den letzten Jahren und aufgrund der Tatsache, dass die Anzahl der Mobiltelefone die Weltbevölkerung beträchtlich übersteigt, wird für die Berechnungen des Rohstoffbedarfes für GaAs-basierte Verstärker in Mobiltelefonen davon ausgegangen, dass die Gesamtzahl an Mobiltelefonen von 2026 an mit dem Bevölkerungswachstum ansteigt.

Yole développement (2020b) prognostiziert für GaAs-Halbleiter in mobilen Endgeräten ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 6 % von 2019 bis 2025. Für den Zeitraum von 2019 bis 2025 wurde aus den Prognosen der verkauften Mobiltelefone verschiedener Generationen (Yole développement 2020b) eine durchschnittliche jährliche Steigerungsrate von 81 % für 5G-Mobiltelefone errechnet. Dieses Wachstum bei den 5G-Mobiltelefonen verursacht also die 6 % jährlichen Zuwachs bei den GaAs-Verstärkern.

Um den Bedarf an Gallium im Jahr 2040 in den verschiedenen SSPs zu ermitteln, wird für den

Zeitraum von 2019 bis 2025 die Yole-Prognose zugrunde gelegt. Danach wird davon ausgegangen, dass der unterschiedliche Datenverkehr der Digitalisierungsszenarien SSP1, SSP2 und SSP5 den Zuwachs der 5G-tauglichen Mobiltelefone und somit der GaAs-Halbleiter nach 2025 bestimmt, wenn die 5G-Netze weitgehend ausgebaut sein sollen. Für die einzelnen Szenarien wurden folgende Zuwachsraten zwischen 2025 und 2040 angenommen:

– SSP5: Der Anteil 5G-tauglicher Mobiltelefone an den Mobiltelefonverkäufen nimmt von 2019 bis 2025, beginnend mit 19 Millionen Stück, um jährlich durchschnittlich 81 % jährlich zu. Dies setzt sich nach 2025 fort, bis zur Marktsättigung, d. h., dass 100 % der neu verkauften Mobiltelefone 5G-tauglich sind. Dieses Wachstum entspricht laut Yole Développement (2020b) einem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs an GaAs-Verstärker von 6 %. Durch Einführung von 6G ab 2030 wiederholen sich diese Wachstumsraten, so dass ab 2039 alle verkauften Mobiltelefone 6G-tauglich sind.
  Weil jedoch die Verstärker für Frequenzen jenseits der 6Hz auch in Siliziumtechnik ausgeführt sein können (Integration in Siliziumtechnologie), wird für den Zeitraum ab 2030 alternativ nur mit einem Wachstum der 5G/6G-Mobiltelefone von 0,7 % gerechnet, was der jährlichen Zunahme der Weltbevölkerung in diesem Zeitraum entspricht. Die jährliche Zunahme der GaAs-Halbleiter beträgt damit 0,14 % in diesem Zeitraum.

– SSP2: Der Anteil 5G-tauglicher Mobiltelefone an den Verkäufen wächst nach 2025 um durchschnittlich 40 % jährlich bis zur Marktsättigung. Ab 2030 soll der Anteil der dann 6G-tauglichen Mobiltelefone beginnend mit 9,5 Millionen Stück wiederum um durchschnittlich 40 % jährlich zunehmen bis maximal zur Marktsättigung.
  Alternativ wird davon ausgegangen, dass ab 2030 die weitere Zunahme nur gemäß dem Weltbevölkerungswachstum erfolgt, da die 6G-spezifischen Frequenzen jenseits der 6 GHz in siliziumbasierter Technologie ausgeführt bzw. darin integriert werden.

– SSP1: Der Anteil 5G-tauglicher Mobiltelefone wächst nach 2025 nur um jährlich 0,7 %, was der Zunahme der Weltbevölkerung laut Statista (2019b) entspricht. Die Einführung von 6G ab 2030 bis 2036 verursacht wie in SSP2 eine jährliche Zunahme von 40 % beginnend mit 9,5 Millionen Stück. Danach wächst der Anteil dieser Telefone wieder analog zur Zunahme der Weltbevölkerung in diesem Zeitraum.
  Auch hier wird das bei SSP2 und SSP5 beschriebene Alternativszenario berücksichtigt, so dass ab 2030 die weitere jährliche Zunahme der GaAs-Verstärker mit 0,14 % angesetzt wird, ausgelöst durch das Wachstum der Weltbevölkerung.

Die Verkaufsprognosen von GaAs-Wafern (mit dem Szenario ohne Integration in Siliziumtechnologie) werden in Abb. 3.42 dargestellt.

$LiTaO_3$/$LiNbO_3$

LT/LN-Substrate werden nach wie vor einen wichtigen Teil des Waferverbrauchs ausmachen, aber das Verhältnis von LT/LN-Wafern wird, im Vergleich zum übrigen Waferverbrauch, aufgrund von Filtern auf Siliziumbasis abnehmen (Yole Développement 2020a). Die Verkaufsprognosen von $LiTaO_3$-und $LiNbO_3$-Wafer (in 6” Äquivalenz) werden in Abb. 3.43 und Abb. 3.44 abgebildet. Yole prognostiziert eine CAGR von jeweils 6 % und 17 % für $LiTaO_3$ und $LiNbO_3$ zwischen 2020 und 2025 im RF-Markt. Für den Zeitraum 2026 – 2040 werden die gleichen Szenarien (SSP1-2-5) betrachtet, wie für GaAs-Wafer beschrieben (siehe oben).

3.2.5.4 Foresight Rohstoffbedarf

Basierend auf dem Rohstoffbedarf für Wafer (Tab. 3.40 und Tab. 3.41) und auf Vorhersagen für den Wafer-Bedarf (Abb. 3.42, Abb. 3.43 und Abb. 3.44) kann die benötigte Menge an Rohstoffen für 2040 abgeschätzt werden. Der jährliche Galliumbedarf ist in Abb. 3.45 dargestellt. Bei der Produktion von GaAs-Halbleitern gelangen laut Clemm et al. (2016) nur ca. 45 % des eingesetzten Galliums in das Produkt. Neben dem Gallium in den Wafern sind deshalb die Mengen dargestellt, die bei der Produktion nicht ins Produkt gelangen (55 %). Gemäß Clemm et al. (2016) werden galliumhaltige Abfälle in Recyclingprozessen behandelt und dabei auch Gallium zurückgewonnen.

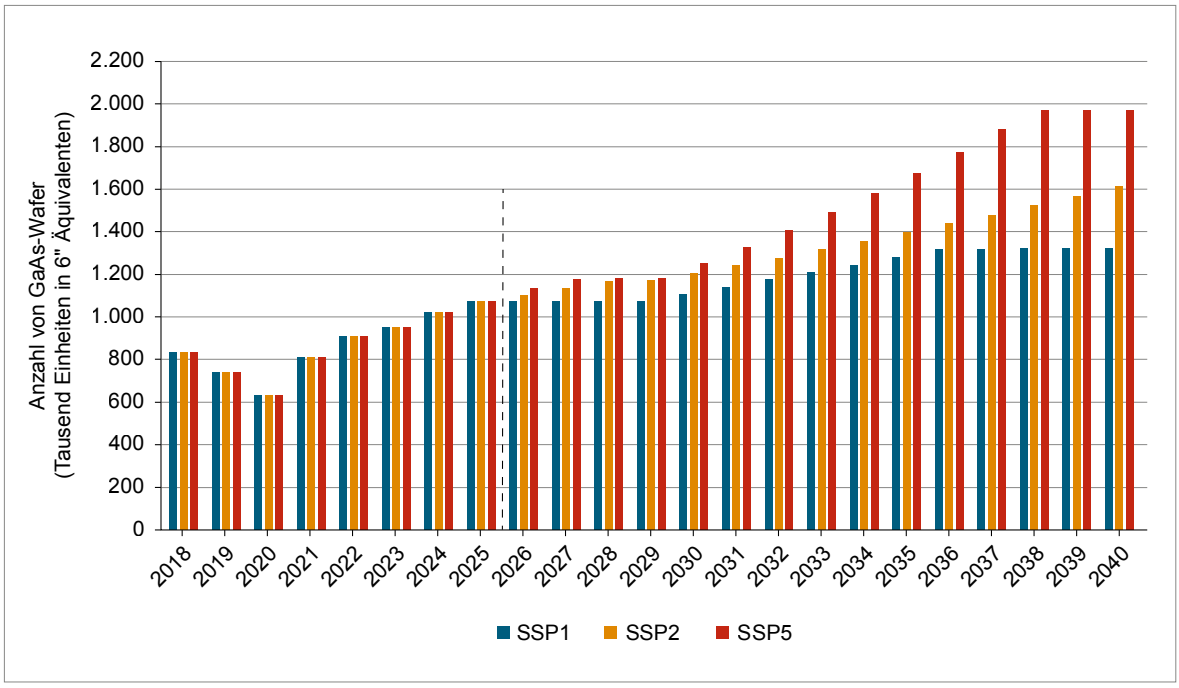


Abb. 3.42: Markt für GaAs-Wafer (Szenario ohne Integration in Siliziumtechnologie) in Tausenden verkaufter Einheiten (Quelle: 2018–2025: YOLE DÉVELOPPEMENT (2020b), 2026–2040: eigene Prognosen)

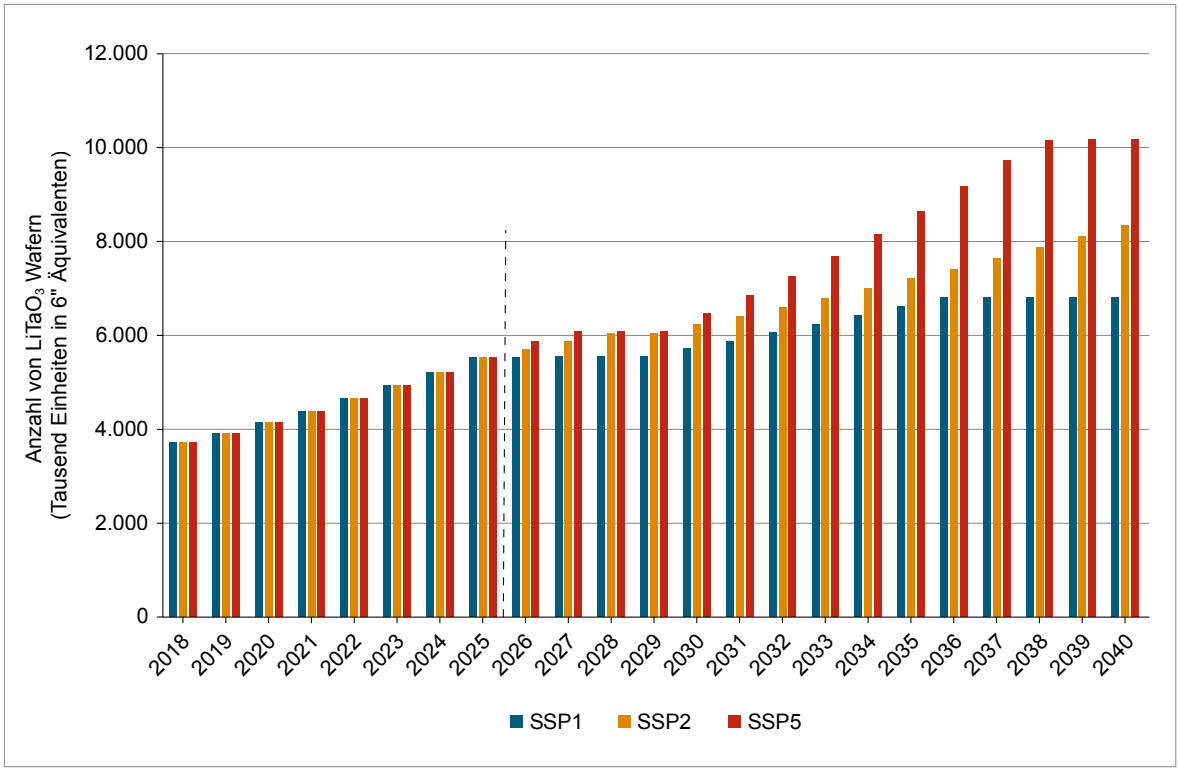


Abb. 3.43: Markt für $LiTaO_3$-Wafer in tausenden verkaufter Einheiten (Quelle: 2018–2025: YOLE DÉVELOPPEMENT (2020b), 2026–2040: eigene Prognosen)



Abb. 3.44: Markt für $LiNbO_3$-Wafer in tausenden verkaufter Einheiten (Quelle: 2018 – 2025: YOLE DÉVELOPPEMENT (2020b), 2026 – 2040: eigene Prognosen)

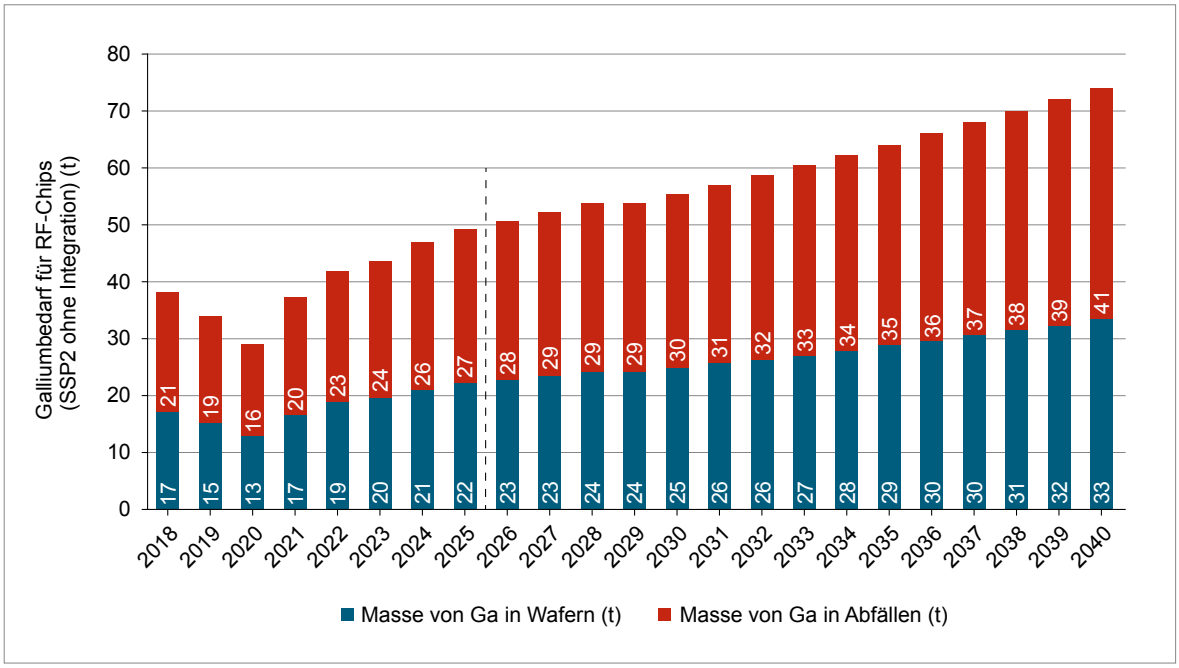


Abb. 3.45: Entwicklung des Galliumbedarfes für RF-Chips (Quelle: 2018 – 2025: YOLE DÉVELOPPEMENT (2020b), 2026 – 2040: eigene Prognosen)

Tab. 3.43: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für GaAs, $LiTaO_3$ und $LiNbO_3$ Wafer in t

Rohstoff	2018		2040 (keine Integration)			2040 (mit Integration)		
	Produktion 2018	Bedarf 2018	SSP1	SSP2	SSP5	SSP1	SSP2	SSP5
Gallium (gesamt)	413 (R)	38	60	74	90	49	54	54
Ga in Halbleitern		17	27	33	41	22	24	24
Ga in Abfällen (min.)		21	33	41	50	27	30	30
Lithium	95.170 (B)	8	15	18	22			
Niob	68.200 (B)	5	12	15	18			
Tantal	1.832 (B)	194	356	435	531			

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Es ist aber nicht bekannt, welche Recyclingraten hierbei für Gallium erzielt werden. Der Galliumbedarf in Abb. 3.45 stellt deshalb ein Worst-Case-Szenario dar unter der Annahme, dass dieses Gallium nicht oder nur zu sehr geringen Anteilen recycelt wird, da auch das Gallium in den GaAs-Halbleitern bisher nicht recycelt wird. Der Galliumgehalt in den Halbleitern repräsentiert somit den „Best Case“ unter der Annahme, dass Gallium mit sehr hohen Raten aus den Produktionsrückständen recycelt wird und somit über den Galliumbedarf in den GaAs-Halbleitern netto kaum Gallium verbraucht wird.

Tab. 3.43 vergleicht die Weltproduktion im Jahr 2018, die Menge des Materials für den RF-Markt im Jahr 2018, sowie die Prognose des Bedarfs für 2040 für verschiedene Materialien. Die größten Mengen an Halbleitermaterialien für RF-Komponenten sind Silizium (Mengen werden in diesem Bericht nicht abgeschätzt) und GaAs. Der Absatz mit GaAs-Leistungsverstärkern ist mit denen im Kapitel 3.5.3 „5G (6G)“ identisch, da das Mobiltelefon der Hauptmarkt für GaAs ist. Gallium wird auch in GaN-Schichten in einigen RF-Komponenten verwendet. Diese Galliummenge wurde jedoch in dieser Schätzung nicht berechnet, da sie sehr gering ist.

Piezoelektrische Materialien stellen ebenfalls eine bedeutende Menge an Materialien dar, obwohl sie nur in einer Art von Bauteil, dem Filter, eingesetzt werden. Es soll beachtet werden, dass für Tantal, Niob und Lithium nur die Nettomenge (nur das im Wafer enthaltene Material) berücksichtigt wird, während für Halbleiter die Bruttomenge (unter Berücksichtigung der Herstellungsverluste) angegeben wird. Diese Prognose unterschätzt wahrscheinlich die tatsächlich benötigte Menge an Lithium, Tantal und Niob für RF-Chips.

3.2.5.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Recycling

Ein Recycling von Gallium und Indium, Lithium und Niob aus Elektronikprodukten nach ihrer Nutzung findet derzeit nicht statt; unter anderem weil der ökonomische Anreiz größer ist, die in den Komponenten enthaltenen Edelmetalle pyrometallurgisch zu recyceln (European Commission 2020b). Das hydrometallurgische Recycling von Gallium aus Produktionsabfällen der Photovoltaikproduktion ist technisch möglich (Marwede 2013). Bisher existieren jedoch keine Versuche, ob eine Extraktion auch aus Bauteilen möglich ist. Die Vielzahl der chemischen Elemente im Bauteil, die geringe Konzentration von Gallium und Indium im Bauteil (Clemm et al. 2016) und die vorher notwendige Detektion und Trennung der Bauteile aus dem Elektronikschrott stellt die ökonomische

Machbarkeit in Frage. Die Feinverteilung dieser Elemente in unterschiedlichen Produkten und Komponenten macht zudem die Sammlung ausreichender Mengen für das Recycling schwierig.

Das pre-consumer Recycling (aus Industrieabfällen) ist jedoch eine wichtige Sekundärquelle für Gallium und Indium. Ein „geschlossener Recyclingkreislauf" (closed loop recycling) tritt in der Branche häufig hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen auf. Die Herstellungsprozesse von GaAs- und GaN-Wafern werden als wichtigste Sekundärquelle des Metalls angesehen, wobei etwa 60 % Schrott in einem „geschlossenen Kreislauf" erzeugt und recycelt werden (Licht et al. 2015; European Commission 2020b). Eine Materialflussanalyse der GaAs-Waferproduktion zeigt, dass 55 % des im Herstellungsprozess eingeführten Ga und As nicht im Wafer enthalten sind. Post-industrielle Abfälle aus der GaAs-Wafer-Produktion können zur Rückgewinnung von Gallium behandelt werden (Clemm et al. 2016). Es ist aber nicht bekannt, welche Recyclingraten hierbei für Gallium erzielt werden (Licht et al. 2015).

Ressourceneffizienz

Wie aus Abb. 3.37 der Technologiebeschreibung (3.2.5.1) zu entnehmen ist, gibt es für alle RF-Komponenten viele Technologien, die teilweise nicht die in dieser Studie genannten kritischen Materialien beinhalten. GaAs, InP, $LiTaO_3$ und $LiNbO_3$ weisen jedoch besondere Eigenschaften auf, die derzeit den Anforderungen des Marktes entsprechen. Dieser Markt kann jedoch sehr volatil sein und eine Technologie kann schnell durch eine andere ersetzt werden, wenn Kosten gesenkt oder die Leistung verbessert werden. Es ist fast unmöglich vorherzusagen, welches Material in Zukunft zum Einsatz kommen wird.

Erwähnenswert ist ebenfalls, dass GaAs-, InP- und piezoelektrische Wafer durch Siliziumwafer ersetzt werden könnten, auf die eine dünne Schicht aus GaAs, InP oder piezoelektrischem Material aufgebracht wird. In der Tat ist der wichtigste Teil des Materials die Oberflächenschicht, auf der das Bauelement hergestellt wird. Piezoelektrische Substrate auf Isolator (POI) und GaN auf Si sind bereits in Produktion (hergestellt von SOITEC, wie in Abb. 3.41 dargestellt). Es wird auch intensiv daran geforscht GaAs oder InP auf Siliziumsubstrat herzustellen, vor allem um die Kosten zu senken, entweder durch Heteroepitaxie (Li & Lau 2017) oder durch Schichttransfer (Di Cioccio et al. 2005). Diese beiden Ansätze könnten ein Weg sein, die Menge an III-V-Elementen deutlich zu reduzieren, würden aber auch den Bedarf an Silizium erhöhen, welches laut EU ebenfalls ein kritisches Material ist.

Substitution

Auch die Möglichkeit der Substitution von Gallium und Indium in ICs ist begrenzt, da die III-V-basierte ICs extra für die Applikationen entwickelt wurden, für die siliziumbasierte Halbleiter nicht ausreichen, so dass die Substitution dieser Komponenten ohne Funktions- oder Leistungsverlust nicht möglich ist (Graedel et al. 2014).

3.2.6 Industrielle Robotik und Industrie 4.0

3.2.6.1 Technologiebeschreibung

Der Begriff „Industrie 4.0" wurde in Deutschland im Jahr 2011 etabliert. Industrie 4.0 bezeichnet die massenhafte Verbindung von Informations- und Kommunikationstechnologien mit der industriellen Produktion. Neben dieser technischen Transformation, sind eine organisatorische und kulturelle Transformation erforderlich, um die Vision eines agilen Unternehmens, das über einen hohen Grad an automatisierter Entscheidungsfindung und -ausführung verfügt, realisieren zu können (Schuh et al. 2020).

Aus technologischer Perspektive bezeichnet Industrie 4.0 keine einzelne Technologie, sondern lässt sich nur durch das Zusammenspiel vieler Technologien umsetzen. Abb. 3.46 zeigt anhand einer schematischen Zeitachse die vier industriellen Revolutionen und die zugehörigen auslösenden Technologien. Anhand der Abbildung wird ersichtlich, dass Industrie 4.0 durch viele verschiedene Technologien getrieben wird. Alle diese Technologien werden stetig weiterentwickelt und lassen sich oftmals nur schwer eingrenzen. Gleichzeitig sind sie eng miteinander verflochten und können nicht sauber voneinander abgegrenzt werden, u. a. bedingt durch ihre historische Entwicklung (Aceto et al. 2019).

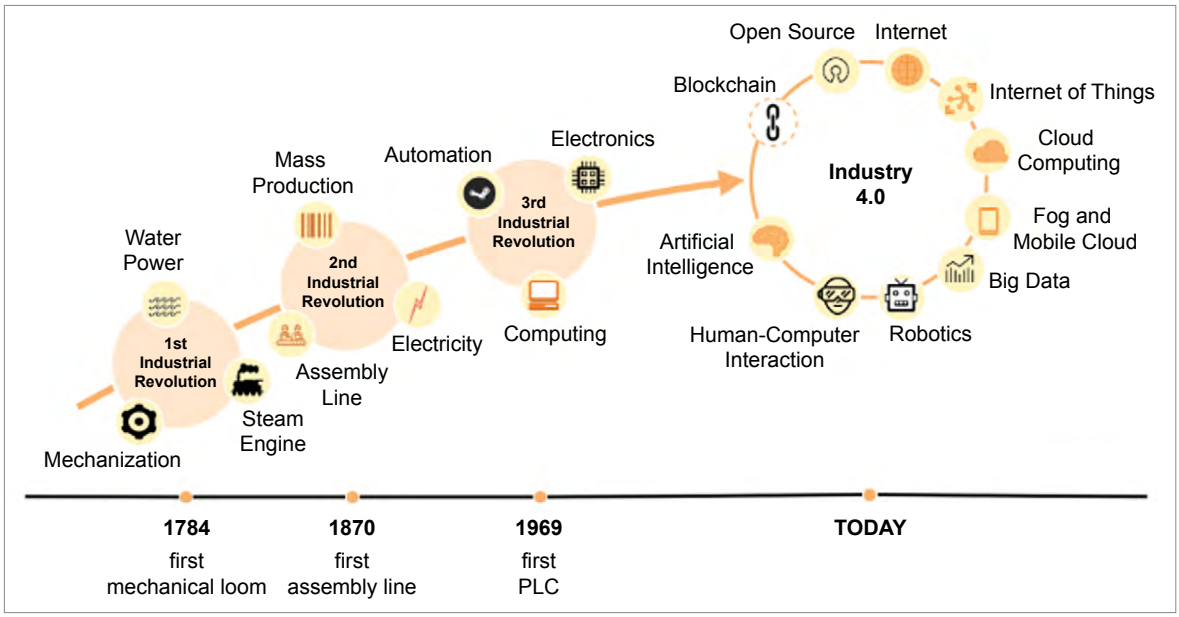


Abb. 3.46: Auslösende Technologien der verschiedenen industriellen Revolutionen (Quelle: ACETO et al. 2019)

Anmerkung: Die Technologie Blockchain ist noch in der Phase der Erforschung und Einführung und daher in gestrichelter Linie dargestellt.

Einige Bestandteile von Industrie 4.0 werden durch andere Technologiesynopsen abgedeckt; dazu zählen Kapitel 3.2.8 Geräte im Internet der Dinge (IoT), Kapitel 3.5.3 5G (6G), und Kapitel 3.5.4 Rechenzentren. Überschneidungen ergeben sich zudem mit den Technologiesynopsen Autonomes Pilotieren von Kraftfahrzeugen (Kapitel 3.1.4) und Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL) (Kapitel 3.1.5). Im Folgenden werden industrielle Roboter als ein wichtiger Bestandteil von Industrie 4.0 untersucht.

Definition

Nach VDI-Richtlinie werden Industrieroboter folgendermaßen definiert: „Universell einsetzbarer Bewegungsautomat mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (das heißt ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Industrieroboter sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsarbeiten ausführen“ (VDI-GESELLSCHAFT TECHNOLOGIES OF LIFE SCIENCES 2013).

Anwendungsgebiete

Roboter werden in vielen verschiedenen Bereichen eingesetzt, z. B. Automobilhersteller und -zulieferer, Luft- und Raumfahrt, Nahrungs- und Genussmittel, Textil, Holz und Möbel, Druck und Papier, Gummi und Kunststoff, Chemie und Pharmazie, Haushaltsgeräteindustrie, Feinmechanik, Bau, Gießerei, Keramik und Stein, aber auch in der Landwirtschaft. Sie werden für viele unterschiedliche Tätigkeiten genutzt, z. B. Schweißen, Kommissionieren, Lackieren, Laserschneiden, Demontieren oder Messen. Im nicht-industriellen Bereich finden sich Roboter z. B. im Bereich der Medizintechnik, im Entertainmentgeschäft oder Servicerobotik (DGUV 2015). Innerhalb dieses Beitrags werden jedoch nur industrielle Roboter untersucht.[5]

[5] Traditionell wird der Robotikmarkt in zwei große Segmente, Industrielle Roboter und Service-Roboter, aufgeteilt. Unter Service-Robotern werden alle Roboter zusammengefasst, die Menschen assistieren, hierzu zählen z. B. Roboter im medizinischen Bereich, im Haushalt, Logistik-Roboter, Drohnen oder autonome Fahrzeuge (MEWAWALLA 2019; BLAGOEVA et al. 2019). Im Unterschied werden als Industrieroboter solche bezeichnet, die einen Teil des Produktionsprozesses automatisieren. Die Übergänge zwischen den beiden Klassen werden jedoch zunehmend fließend (MEWAWALLA 2019).

Aufbau eines Industrieroboters

Industrieroboter haben i. d. R. drei Hauptachsen und drei Nebenachsen. In Abhängigkeit der ausführbaren Achsbewegung (translatorisch und rotatorisch) werden verschiedene Robotertypen unterschieden. Serielle Kinematiken bestehen aus einer Anzahl von Armgliedern, die mit Gelenken verbunden sind, das letzte Gelenk trägt das Werkzeug. Im Gegensatz dazu sind die Arme eines Parallelroboters auf einer gemeinsamen Platte gelagert und kommen in einem Endeffektor zusammen, dadurch wird eine dreidimensionale Bewegung ermöglicht (DGUV 2015). Zudem gibt es stationäre und mobile Industrieroboter (Oubbati 2007).

Ein Industrieroboter ist i. d. R. nach der folgenden Struktur aufgebaut. Er verfügt über einen Antrieb zur Bewegung der verschiedenen Glieder und bei mobilen Robotern zur Fortbewegung. Der Antrieb besteht aus Regelung, Getriebe und Motor. Mithilfe der Steuerung werden erfasste Informationen verarbeitet und Aktionen vorgegeben. Die internen Sensoren erfassen onboard-Daten zur Position und Ausrichtung des Roboters, zum Effektor, aber auch zum allgemeinen Betriebszustand, z. B. dem Batterieladestand. Externe Sensoren geben Rückmeldung zur Umwelt; es kann so auf Unvorhergesehenes aus der Umwelt reagiert werden. Beispiele sind Bildverarbeitungssysteme, Lichtschrankenfunktionen oder Ultraschallsensoren. Das Werkzeug des Roboters wird Effektor genannt, meist ein Greif-, Bearbeitungs- oder Montagewerkzeug. Der Manipulator, der Roboterarm, führt die Bewegungen des Effektors im Raum durch (Oubbati 2007; DGUV 2015).[6]

Arten von Industrierobotern

Innerhalb der industriellen Roboter werden „caged robots“ und kollaborative Roboter (Cobots) unterschieden. Caged robots sind traditionelle Industrieroboter, die zum Einsatz in der Massenfertigung entwickelt wurden, sie sind in der Lage, repetitive Tätigkeiten sehr präzise auszuführen. Sie sind oftmals stationär und mit einem Gitter eingezäunt, um keine Mitarbeitenden zu gefährden (Mewawalla 2019). Im Gegensatz dazu sind Cobots so entworfen, dass sie mit Menschen zusammenarbeiten können, bei spezifischen Aufgaben, z. B. in der Montage, beim Verpacken oder beim Löten. Sie sind oftmals deutlich kleiner, mobiler und können Bewegungen schneller abbremsen, sodass das Verletzungsrisiko minimiert ist. Sie verfügen im Unterschied zu den traditionellen Industrierobotern über sehr viele Sensoren, um mit der Umgebung interagieren zu können. Cobots lassen sich i. d. R. leicht programmieren, sie setzen somit keine umfassenden Programmierkenntnisse voraus (rggroup 2020) oder können mit der Hand geführt werden zum Erlernen einer Bewegung (Kräusslich 2020). Untersuchungen der TU Berlin zeigen jedoch, dass Cobots momentan ähnlich wie klassische Industrieroboter statisch und in Koexistenz statt in kollarborativer Arbeit eingesetzt werden (Kluy 2020).

3.2.6.2 Rohstoffinhalt

Es konnten fast keine Literaturquellen gefunden werden, die Rohstoff- und Materialbedarfe für Roboter zusammentragen. In ihrer Veröffentlichung „Materials dependencies for dual-use technologies relevant to Europe‘s defence sector“ präsentiert die JRC (Joint Research Centre, EU-Komission) eine Übersicht zu benötigten Rohstoffen, verarbeiteten Materialien und Komponenten für Roboter im Allgemeinen, siehe Abb. 3.47.[7] Die Autoren listen 44 Rohstoffe für die Herstellung von Robotern auf.[8] Als kritisch, d. h. von Lieferengpässen bedrohte, Rohstoffe sind rot eingefärbt (Blagoeva et al. 2019).

2020 greift die JRC in ihrer Veröffentlichung „Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU“ die Rohstoffübersicht von 2019 wieder auf und ergänzt sie um eine Abbildung, die relevante Rohstoffe für Roboter einzelnen Komponenten zuordnet, siehe Abb. 3.48. Es ist jedoch nicht ersichtlich, anhand welcher Kriterien sie die relevanten Rohstoffe ausgewählt haben.

---

[6] In dieser Technologiesynopse wird die Vernetzung der Roboter untereinander und mit zentraler Steuerung nicht betrachtet, siehe hierzu die Technologiesynopse IoT.

[7] JRC scheint jedoch auch schon mit einer schlechten Quellenlage konfrontiert, sie zitieren u. a. die Seite „battlekit“ als Quelle für Materialien zur Herstellung von Robotern im Bereich Verteidigung und Sicherheit (Blagoeva et al. 2019), S. 98.

[8] Seltene Erden sind in dieser Aufzählung als ein Rohstoff aufgeführt.

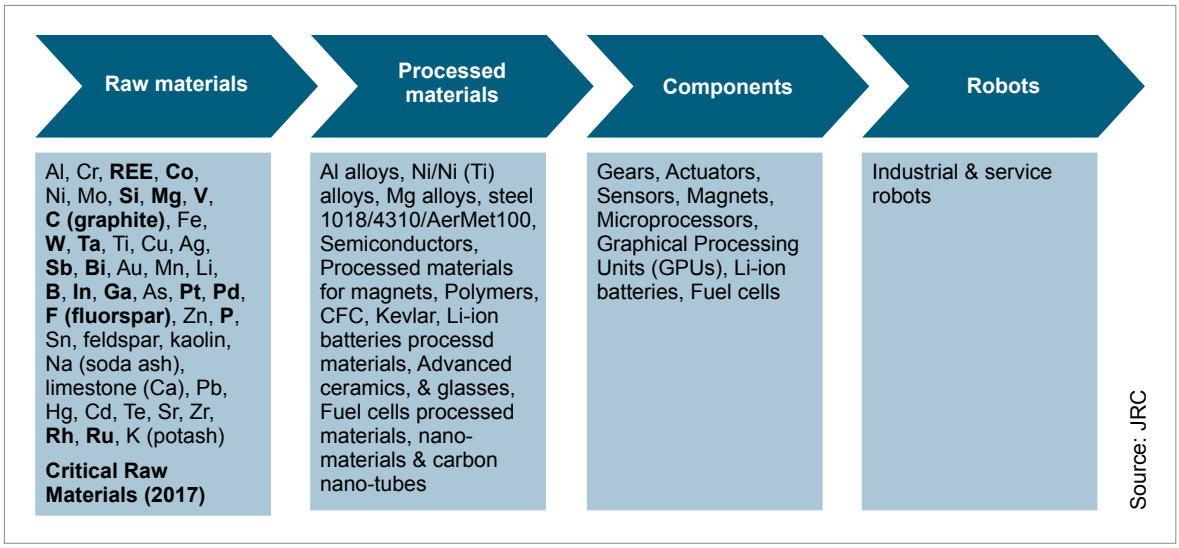


Abb. 3.47: Roboter: ein Überblick über Rohstoffe, verarbeitete Materialien und Komponenten (Quelle: Blagoeva et al. 2019)

Aus dieser Abbildung lassen sich benötigte Rohstoffe für einzelne Komponenten ableiten[9]:

- Elektronikkabel: Cu
- Elektrooptische Systeme: Be, Ga, In
- Energiesystem: Ga
- Galvanik: Ni
- Manipulator: Ti
- Permanentmagnet: B, Dy, Nd, Pr
- Sensoren: In
- Verschiedene Komponenten[10]: Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Nb, Ni

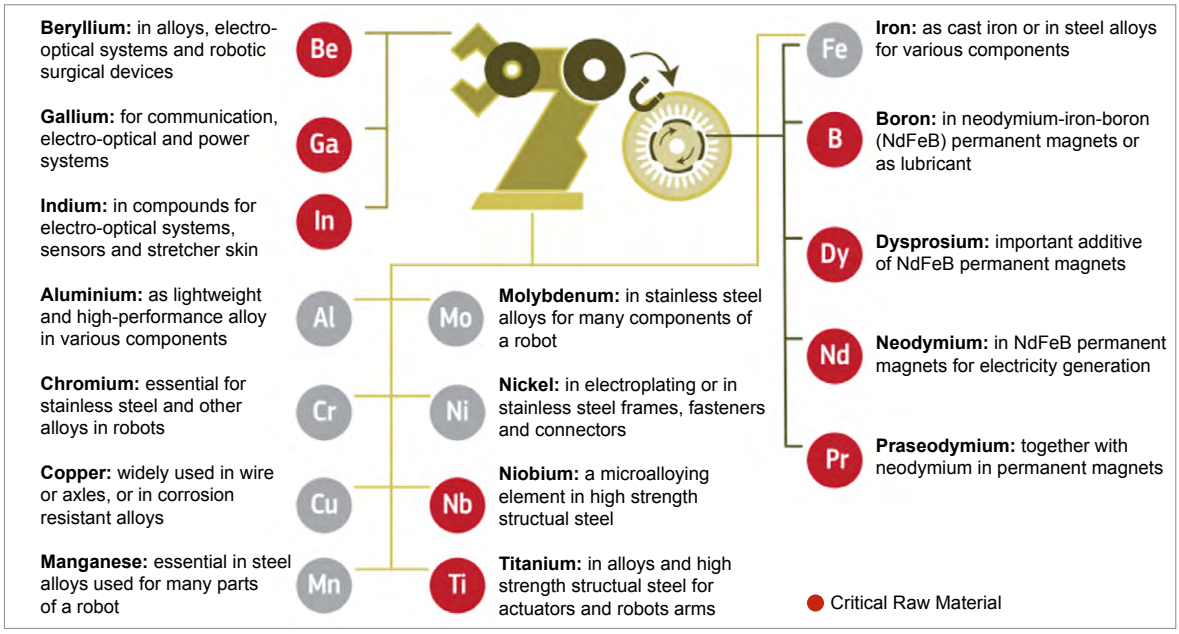


Abb. 3.48: Relevante Rohstoffe in Robotern (Quelle: European Commission 2020a)

[9] Komponenten und Rohstoffe, die für andere Roboterarten, z. B. medizinische Roboter für die Chirurgie, benötigt werden, werden nicht aufgeführt.

[10] Eine genauere Zuordnung wird in der Abbildung nicht vorgenommen.

Kopacek & Kopacek (2013) setzen sich mit dem Lebenszyklusende-Management von Industrierobotern auseinander. Hierzu zerlegen sie einen Sony SRX-611 SCARA und berichten dessen Komponenten und die enthaltenen Materialien. Im Wesentlichen sind Stahl, Aluminium, Plastik und Kabel enthalten. Laut Autoren ist der Sony SRX-611 SCARA hinsichtlich des Recyclings vergleichbar mit einem Standardroboter.[11] Nach Angaben von KUKA besteht ein Manipulator im Wesentlichen aus Aluminium-, Eisenguss-, Stahl- und Kunststoffwerkstoffen (KUKA 2021). Umso geringer das Eigengewicht eines Roboters, umso höher die Nutzlast, die er tragen kann. Zur Reduktion des Eigengewichts arbeitet KUKA daher schon seit Langem mit Faserverbundwerkstoffen. Allerdings haben Faserverbundwerkstoffe auch Nachteile gegenüber anderen Werkstoffen, z. B. eine aufwändige Verarbeitung, eine schwierige Anbindung an andere Materialien und einen verhältnismäßig hohen Preis (Schmirgel 2021).

Die bisherigen Ausführungen zeigen den starken Forschungsbedarf hinsichtlich der Rohstoffbedarfe für die Mindestkomponenten eines Industrieroboters auf. Zudem muss eine Unterscheidung in Abhängigkeit von Robotertypen (min. kollaborative Roboter und traditionelle Industrieroboter) vorgenommen werden, da die benötigten Rohstoffe je nach Konfigurationen stark variieren. Außerdem nimmt die Vernetzung und die sensorische Ausstattung von Industrierobotern immer weiter zu, siehe hierzu den folgenden Abschnitt.

3.2.6.3 Foresight Industrielle Nutzung

Technologie Trends

Im Folgenden werden aktuelle Trends in der (Industrie-)Robotik aufgeführt:

- Neue Materialien: kleinere und leichtere Komponenten, z. B. Vanadium-basierte Materialien oder leichte Metalllegierungen aus Titan, Aluminium oder Magnesium (European Comission 2020),
- Energiegewinnung aus der Umgebung, Materialwissenschaften (OECD 2021),
- Soft Robotics: „(...) Klasse von verformbaren und nachgiebigen Robotern, die sich quetschen, strecken, klettern, ihre Form verändern und sich selbst heilen können (Terryn et al. 2017). Die Forschung in der Soft-Robotik zielt darauf ab, Fähigkeiten zum Wachsen, Entwickeln, zur Selbstheilung und zum biologischen Abbau weiterzuentwickeln (Laschi et al. 2016). Viele Entwicklungen in der Soft-Robotik sind von Beispielen aus der Natur inspiriert.“ (OECD 2021),
- Lasersysteme mit verbesserter Reichweite und Winkelauflösung, Sensorik (OECD 2021),
- LiDar-Technologie als Anti-Kollisions-System, ursprünglich bei autonomen Fahrzeugen, werden sie vermehrt bei Robotern eingesetzt. Dennoch ist es unklar ob sie sich durchsetzen werden im Vergleich zu 3D-Kameras und Ultrasound (Mewawalla 2019).
- Cloudbasierte Roboter und vorausschauende Steuerung (Mewawalla 2019; OECD 2021),
- Edge Computing (Mewawalla 2019),
- Neuromorphe Prozessoren: besonders geeignet zur Mustererkennung und -analyse, geringer Energieverbrauch (Mewawalla 2019),
- Feinfühligere Greifer, Aktuatoren (OECD 2021),
- Miniaturisierung: „(...) In einem der bisher eindrucksvollsten Beispiele für Miniaturisierung haben Forscher am MIT kürzlich selbstangetriebene Roboter von der Größe einer menschlichen Zelle gebaut. Diese Roboter sind in der Lage, vorprogrammierte Anweisungen zu befolgen sowie Informationen über ihre Umgebung zu erfassen, aufzuzeichnen und zu speichern und Daten zu sammeln, die nach Abschluss einer Aufgabe heruntergeladen werden können. Während sich diese Roboter im Laborstadium befinden, gibt es potenzielle Anwendungen in der medizini-

[11] Der Sony SRX-611 wurde jedoch schon 1990 hergestellt. Es existieren laut Autoren keine Statistiken zum Lebensalter von Robotern; anhand ihrer Erfahrung schätzen sie es auf durchschnittlich 12 Jahre.

schen Diagnostik und der Industrie." (OECD 2021; Chandler 2918).

– Intelligenz: „Die Kombination von KI mit anderen Innovationen verleiht Robotern eine Vielzahl neuer Fähigkeiten, einschließlich größerer Autonomie. Zu den wichtigsten Entwicklungen gehören besseres Sehen, Lerntransfer zwischen Robotern und über Roboterschwärme hinweg, Lernen in virtuellen Umgebungen, Lernen durch Tun, Lernen durch Neugier, emotionales Bewusstsein, bessere Objektmanipulation und mehr kollaborative Roboter („Cobots")." (OECD 2021). Selbstlernende Roboter reduzieren den Programmieraufwand, insbesondere den Parametrieraufwand (Schmirgel 2021).

– Cobots: „Mit der Fähigkeit, im Tandem mit dem Menschen zu arbeiten, sind moderne Robotersysteme in der Lage, sich an eine sich schnell verändernde Umgebung anzupassen. Die Palette der kollaborativen Anwendungen, die von Roboterherstellern angeboten werden, wird immer größer. Derzeit sind Anwendungen mit geteiltem Arbeitsbereich am weitesten verbreitet. Roboter und Arbeiter arbeiten nebeneinander und erledigen ihre Aufgaben nacheinander. Anwendungen, bei denen Mensch und Roboter gleichzeitig am selben Teil arbeiten, sind noch anspruchsvoller. Forschung und Entwicklung (F&E) konzentrieren sich auf Methoden, die es Robotern ermöglichen, in Echtzeit zu reagieren." (Heer 2020). Nach Götz (2018) und Schmirgel (2021) ist das Ziel vieler Industrieunternehmen Roboter ohne Schutzzäune einsetzen zu können, da sie unflexibel sind und viel Platz benötigen. Es können zudem mehrere Stufen in der „Mensch-Roboter-Zusammenarbeit" unterschieden werden, mit jeder Stufe steigt der Grad der Zusammenarbeit: getrennte Arbeitsbereiche, Koexistenz, Kooperation und zuletzt Kollaboration. Die letzte Stufe Kollaboration, das gleichzeitige Arbeiten an einem Teil, ist in der Industrie jedoch noch sehr selten. Je nach zu automatisierender Tätigkeit eignet sich eine unterschiedliche Stufe. Mittlerweile ist auch die Zusammenarbeit mit größeren Industrieroboter ohne Schutzzaun möglich, z. B. in der Endmontage im Automobilbau. Die Produktionsstationen von morgen werden daher in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen, wie Taktzeiten, Losgrößen, Mitarbeiterverfügbarkeit und Prozessen, ausgestaltet sein (Götz 2018). Wenn in Zukunft immer mehr Menschen mit Robotern arbeiten werden, bedingt das auch den einfachen und intuitiven Umgang mit Robotern (Schmirgel 2021).

Marktentwicklung

Laut IFR (2020) wurden in 2019 weltweit 373.240 Industrieroboter mit einem Gesamtwert von 13,8 Mrd. USD (ohne Software und Peripherie) installiert, der Bestand wird auf 2.722.077 Industrieroboter geschätzt. Seit 2010 steigt die Nachfrage nach Industrierobotern kontinuierlich an; die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate zwischen 2014 und 2019 betrug 11 %. In 2019 sanken die Absatzahlen weltweit jedoch um 12 %, insbesondere in den beiden Hauptabsatzbranchen Automobil- und Elektronikindustrie. Dies reflektiere die „schwierigen Zeiten" dieser beiden Sektoren und hänge auch mit dem Handelskonflikt zwischen den USA und China zusammen. Die Automobilindustrie ist dennoch auch in 2019 der größte Abnehmer von Industrierobotern (28 %), gefolgt von Elektronikindustrie (24 %), Metall und Maschinenbau (12 %), Plastik und chemische Industrie (5 %), Nahrungsmittelindustrie (3 %), sonstige (8 %) und ohne spezifische Branche (20 %) (Statista 2019a; IFR 2020). Es gibt fünf (Haupt-) Absatzländer für Industrieroboter, in denen 2019 73 % aller Industrieroboter installiert wurden: China, Japan, USA, Korea und Deutschland.

Die Absatzprognosen der International Federation of Robotics für 2020 – 2023 sind vage; aufgrund der Covid-19-Pandemie erwarten sie einen starken Absatzrückgang für 2020. Für die mittlere Frist erwarten sie einen Digitalisierungsboom und damit eine exzellente Perspektive für den Absatz von Industrierobotern. Tractica prognostiziert für 2025 einen Umsatz von 18,25 Mrd. USD, die Prognose stammt von 2018 (Statista 2020), siehe Abb. 3.49. Unter Berücksichtigung ihrer Umsätze ergibt sich eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 4,03 % zwischen 2019 und 2025. Im Gegensatz dazu schätzen (Frost & Sullivan 2020a) für das Jahr 2024 einen Umsatz von 38,3 Mrd. USD mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 12,2 % zwischen 2019

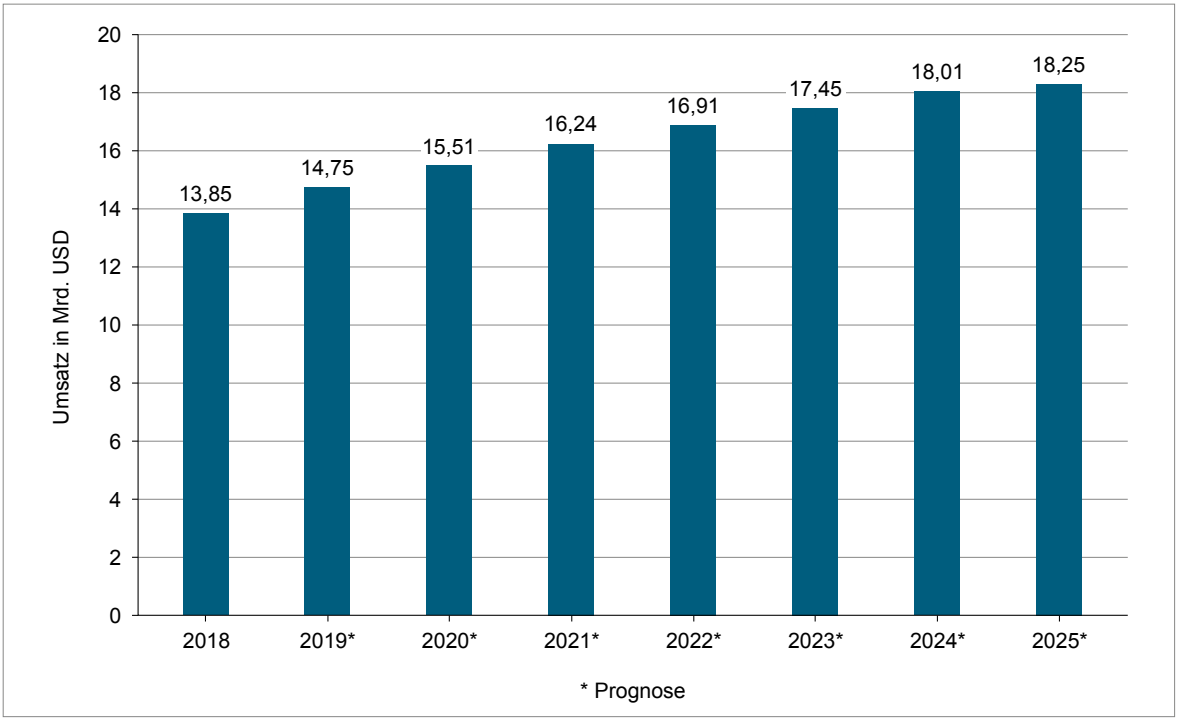


Abb. 3.49: Umsatz mit Industrierobotern weltweit in den Jahren von 2018 bis 2025 (in Mrd. USD) (Quelle: STATISTA 2020)

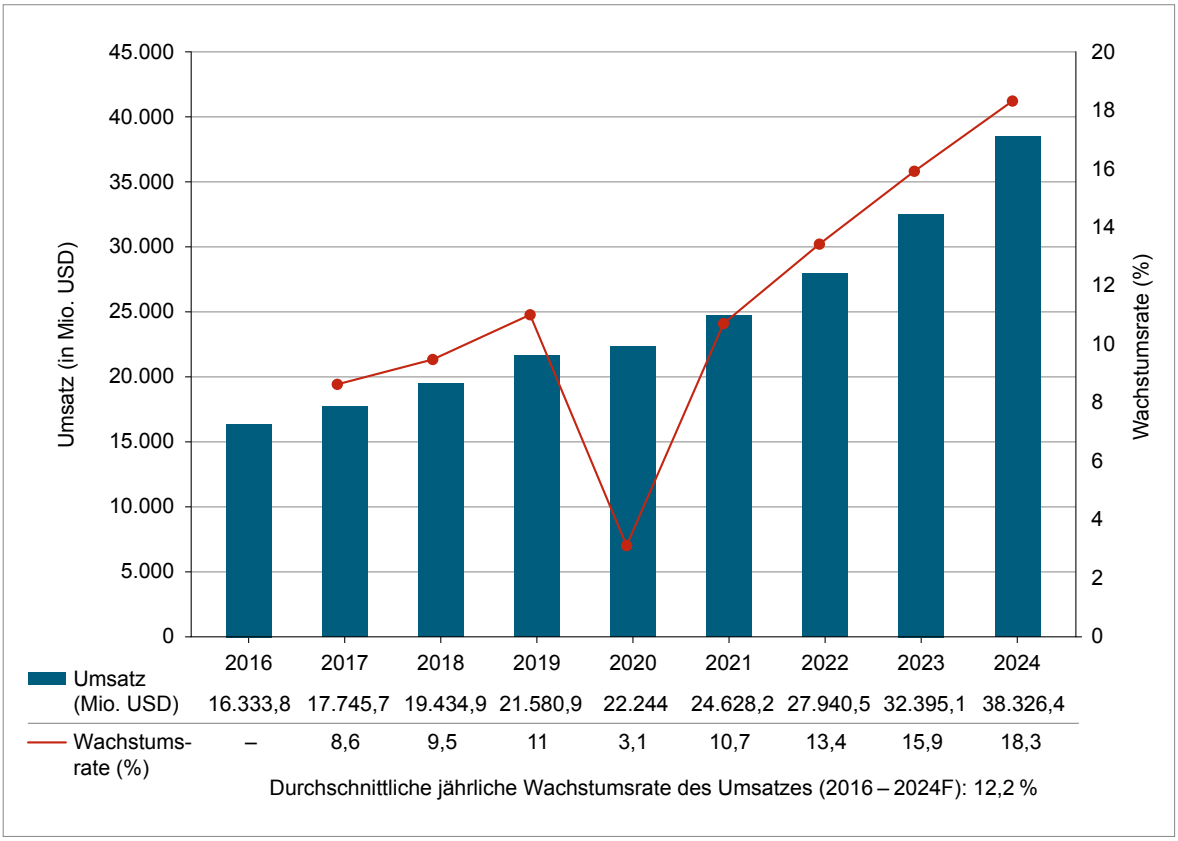


Abb. 3.50: Umsatzprognose mit Industrierobotern weltweit in den Jahren 2016 bis 2024 (in Mio. USD) (Quelle: FROST & SULLIVAN 2020a)

und 2024, siehe Abb. 3.50. Frost & Sullivan (2020a) prognostizieren damit einen mehr als doppelt so hohen Umsatz für 2024, zu dem steigen ihre prognostizierten jährlichen Wachstumsraten kontinuierlich an, mit der höchsten Rate von 18,3 % für 2024. Die Wachstumsraten von Tractica sinken hingegen kontinuierlich bis zu einer prognostizierten Wachstumsrate von 1,33 % für 2025.[12]

Laut IFR (2020) beträgt der Anteil Cobots innerhalb der Industrieroboter in 2019 ca. 4,83 %. Innerhalb des Segments Industrieroboter sind Cobots jedoch das am stärksten wachsende Seg-

Tab. 3.44: Umsatzentwicklung Industrieroboter weltweit bis 2040 (Quelle: Riahi et al. 2017)

Jahr	SSP1		SSP2		SSP5	
	Umsatz in Mrd. USD	Wachstumsrate	Umsatz in Mrd. USD	Wachstumsrate	Umsatz in Mrd. USD	Wachstumsrate
2018	13,85	–	13,85	–	13,85	–
2019*	14,75	6,50 %	14,75	6,50 %	14,75	6,50 %
2020*	15,51	5,15 %	15,51	5,15 %	15,51	5,15 %
2021*	16,24	4,71 %	16,24	4,71 %	16,24	4,71 %
2022*	16,91	4,13 %	16,91	4,13 %	16,91	4,13 %
2023*	17,45	3,19 %	17,45	3,19 %	17,45	3,19 %
2024*	18,01	3,21 %	18,01	3,21 %	18,01	3,21 %
2025*	18,25	1,33 %	18,25	1,33 %	18,25	1,33 %
2026	19,01		18,84		19,18	
2027	19,81		19,46		20,16	
2028	20,63	4,18 %	20,09	3,26 %	21,19	5,11 %
2029	21,50		20,75		22,27	
2030	22,39		21,43		23,41	
2031	23,26		22,02		24,54	
2032	24,16		22,64		25,73	
2033	25,10	3,87 %	23,27	2,79 %	26,97	4,83 %
2034	26,07		23,92		28,27	
2035	27,08		24,59		29,64	
2036	28,00		25,21		30,88	
2037	28,95		25,85		32,18	
2038	29,93	3,40 %	26,51	2,54 %	33,53	4,19 %
2039	30,95		27,18		34,93	
2040	32,00		27,87		36,40	

*Anmerkungen: Die Zahlen für die Jahre 2018 – 2025 stammen von Tractica, bei den mit * gekennzeichneten Jahren handelt es sich um Umsatzprognosen. Ab 2026 wurde angenommen, dass sich die Umsätze entsprechend des globalen BIP-Wachstums des jeweiligen SSPs entwickeln. Die Wachstumsraten stammen aus der öffentlich zugänglichen zugehörigen Datenbank. In der Datenbank werden die Wachstumsraten in fünf Jahresabständen berichtet; zur Berechnung der Umsatzprognosen je SSP wurden sie in durchschnittliche jährliche Wachstumsraten aufgesplittet.*

[12] Gewisse Unterschiede lassen sich vermutlich mit unterschiedlich gewählten Systemgrenzen erklären, z. B. inwiefern Software miteinbezogen ist. Denn schon die Umsätze in 2018, bei denen es sich nicht um Schätzwerte handelt, geht Tractica von 13,85 Mrd. USD aus und Frost & Sullivan von 19,43 Mrd. USD.

ment (Mewawalla 2019). Nach Neumeier (2020) und Schmirgel (2021) ist der Trend zu Cobots hin klar erkennbar, insbesondere auch aufgrund der einfachen Bedienung und Programmierung sowie der schnellen Einrichtungsmöglichkeiten von Cobots. Zudem werden Cobots in Bezug auf das Preis-Leistungs-Verhältnis attraktiver bei gleichzeitiger technischer Verbesserung (Schmirgel 2021). Frost & Sullivan (2020a) weisen für Cobots ein exponenzielles Wachstum innerhalb ihrer Prognosen bis 2024 aus. Da sie jedoch noch relativ neu sind im Vergleich zu traditionellen Industrierobotern, bleibt ihr Anteil am Industrierobotikmarkt trotz des hohen Wachstums gering (Mewawalla 2019).

Führende Unternehmen im Bereich der Industrierobotik sind ABB, Fanuc, Kuka, Yaskawa, Estun und Siasu. Daneben sind Unternehmen im Bereich der Soft- und Hardware-Entwicklung für Robotik von Bedeutung (Mewawalla 2019; Frost & Sullivan 2020a).

Umsatzentwicklung bis 2040

In Abhängigkeit der drei Rahmenszenarien SSP1, 2 und 5, wurde die Entwicklung des weltweiten Umsatzes mit Industrierobotern bis 2040 ermittelt. Das Vorgehen wird im Folgenden beschrieben. Für die Jahre 2018–2024 wurden die Daten von Tractica verwendet. Der für das Jahr 2018 bezifferte weltweite Umsatz mit Industrierobotern von 13,85 Mrd. USD deckt sich mit der Angabe der IFR.[13] Für die Jahre 2025–2040 wurde angenommen, dass sich der weltweite Industrieroboterumsatz entsprechend des globalen BIPs im jeweiligen SSP entwickelt. Die unterschiedlichen Wachstumsraten für Industrieroboter lassen sich folgendermaßen plausibilisieren: Für SSP5 wird angenommen, dass sich ein sehr hoher Digitalisierungsgrad des industriellen Sektors einstellt, dies schließt auch industrielle Roboter ein (im relativen Vergleich der Szenarien höchste Wachstumsraten bis 2040). Für SSP1 wird ein hoher Digitalisierungsgrad des Industriellen Sektors angenommen, wobei insbesondere ein Fokus auf Technologien und Innovation zur Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs gelegt wird (Wachstumsraten etwas geringer als für SSP5). Für SSP2 wird ein mittlerer Digitalisierungsgrad des industriellen Sektors angenommen (Wachstumsraten im relativen Vergleich am geringsten).

3.2.6.4 Foresight Rohstoffbedarf

Aufgrund der Vielfalt an Industrierobotern, mangelnder Daten zu den Rohstoffbedarfen von Industrierobotern und den benötigten Rohstoffmengen je Industrieroboter sowie fehlender Absatzprognosen für die Anzahl an Industrierobotern war es nicht möglich, den Rohstoffbedarf in 2040 abzuleiten.

Nach Einschätzung von KUKA (2021) werden die wesentlichen Bestandteile eines Manipulators, d. h. Aluminium-, Eisenguss-, Stahl- und Kunststoffwerkstoffe auch in Zukunft gut verfügbar sein. In erster Näherung ergeben sich hier auch keine wesentlichen Unterschiede zwischen (traditionellen) Industrierobotern und Cobots. Im Gegensatz zu den mechanischen Bestandteilen enthalten die elektronischen Bestandteile Rohstoffe, die deutlich seltener sind (KUKA 2021). Hier sind je nach Bauteil und enthaltener Rohstoffe tiefergehende Analysen zur Beurteilung der Rohstoffverfügbarkeit und des Bedarfs erforderlich.

3.2.6.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Schon 2013 schreiben Kopacek & Kopacek (2013), dass sich Roboterhersteller zukünftig mit den Gesetzen und Regulativen zum Lebenszyklusende von Robotern als auch mit ethischen Grundsätzen zum Schutz der Umwelt auseinandersetzen müssen. Auch die Europäische Kommission empfiehlt, dass für das Öko-Design von Robotern Anreize geschaffen werden sollten, um eine effizientere Nutzung von Materialien und Energie, eine einfache Zerlegung der Komponenten, Materialidentifikation, Wiederverwendung und Recycling zu ermöglichen (European Commission 2020a).

Laut ihrer Website betreibt ABB seit über 25 Jahren die Wiederaufbereitung von Robotern zur Lebensdauerverlängerung von Robotern. Sie würden so die Verschrottung oder Nicht-Nutzung alter Roboter verhindern. Für ihre Kunden bedeutete das insbesondere eine Maximierung ihrer Kapitalrendite (Return on investment). Die Wiederaufbereitung

[13] Aufgrund dieser Übereinstimmung wurden die Umsatzprognosen von Tractica verwendet statt der Prognosen von Frost & Sullivan.

findet in Tschechien, USA, China, Brasilien, Mexiko, Deutschland und Vietnam statt (O'Donnell 2020). Auch KUKA bietet gebrauchte generalüberholte Industrieroboter und Ersatzteile an. Gebrauchte Roboter gibt es auch für Spezialanwendungen z. B. in den Bereichen Schutzgasschweißen, Gießerei, Palettieren, Be- und Entladen, Montage, Einlegen und Bestücken. Gebrauchte Industrieroboter können gemietet, gekauft oder auch an KUKA verkauft werden. So können auch kleinere Unternehmen zu geringeren Kosten Industrieroboter einsetzen (Schmirgel 2021).

Nach Kopacek & Kopacek (2013) ist die Lebensdauer eines Roboters theoretisch unbegrenzt. Sie wird jedoch beschnitten durch die Steuerungshardware und -software und die mechanische Konstruktion. Nach ihrer Einschätzung werden vor allem wenig genutzte Industrieroboter, die älter als zehn bis 15 Jahre sind, demontiert, denn die meisten Komponenten, z. B. Getriebe, Steuerungen oder Greifer haben einen angemessen hohen Preis auf dem Ersatzteilmarkt. Anhand ihrer Zerlegung des Sony SRX-611 SCARA leiten sie ab, dass in den meisten Fällen die mechanischen Teile, Motorachsen, die harmonischen Antriebe, die Getriebe und einige andere Teile wiederverwendbar sind. Zudem können die meisten Komponenten mit derzeit verfügbaren Recycling- und Demontagetechnologien effizient recycelt werden. Nur elektrische Getriebe, Bedienpanels und bestimmte Kabel aus der Steuereinheit sind derzeit nicht wirtschaftlich recyclebar.

3.2.7 Additive Fertigung von Metallbauteilen („3D-Drucker“)

3.2.7.1 Technologiebeschreibung

Additive Fertigung bezeichnet verschiedene Verfahren, bei denen ein Werkstoff schichtweise zu einem Bauteil zusammengefügt wird. Im Gegensatz dazu werden bei der subtraktiven Fertigung Bauteile durch Abtragen von Material aus einem massiven Körper hergestellt (z. B. durch Bohren, Stanzen oder Schneiden).

Additive Fertigung eignet sich besonders zur Herstellung kleiner Stückzahlen und/oder kundenspezifisch angepasster Produkte (Mass Customization), Fertigung nach Bedarf (z. B. Pilotserie) bzw. vor Ort (z. B. kundennah), Fertigung von Ersatzteilen (z. B. älterer Serienprodukte), Rapid Prototyping (u. a. zur Verkürzung der Produktentwicklung) und zur Fertigung filigraner und geometrisch komplexer Strukturen mit geringem spezifischem Gewicht (z. B. für den Leichtbau). Neben den verbesserten Funktionalitäten treiben das Auslaufen des Patentschutzes für wichtige Verfahren, die Beschleunigung der Produktionsgeschwindigkeit, das breite Einsatzspektrum von Einzel- bis zu Serienfertigung sowie der Preisverfall für Geräte und Materialien die Verbreitung der Additiven Fertigung an.

Additive Fertigung von Kunststoff-, Metall- und Keramikbauteilen ist Stand der Technik in zahlreichen Industriebranchen. Zu den relevanten Märkten gehören Medizintechnik, die Luft- und Raumfahrt, die Automobil- und sonstige Industrie sowie der Einzelhandel. Die größte Wachstumsgeschwindigkeit haben die Medizintechnik (Zahnmedizin und Orthopädie) und die Luft- und Raumfahrt (Struktur- und Maschinenteile), hier wird die additive Fertigung zur Gewichtssenkung und damit zur Senkung der Transportkosten einsetzt (Auer 2019).

Laut VDI (2014) erfolgt additive Fertigung meist in vier Phasen (Abb. 3.51): Zunächst wird mit Hilfe von CAD ein dreidimensionales Modell des Bauteils erstellt (I), optional unterstützt durch 3D-Scannen eines vorhandenen Bauteils. Die Datenverarbeitung (II) umfasst die Auftrennung des Bauteils in übereinanderliegende Schichten („Slicen“), die Prozessvorbereitung und Parametereinstellung im Steuerrechner der Anlage. Beim eigentlichen additiven Prozess (III) wird das Bauteil durch Phasenübergang eines flüssigen oder pulverförmigen Materials in den festen Zustand gefertigt. In der Regel schließt sich eine Nachbearbeitung, z. B. Säuberung, Nachhärtung, Beschichtung, mechanische Nachbearbeitung, an (IV).

Eine Vielzahl an additiven Fertigungsverfahren steht für den eigentlichen additiven Prozess zur Verfügung, darunter: VAT Photopolymerisation, Powder Bed Fusion (PBF), Direct Energy Deposition (DED), Material Extrusion, Binder Jetting, Material Jetting, Sheet Lamination. In der öffentlichen Diskussion werden all diese Verfahren oft als „3D-Drucken“ bezeichnet; im engeren Sinne handelt es sich jedoch nur beim Binder Jetting um 3D-Drucken.

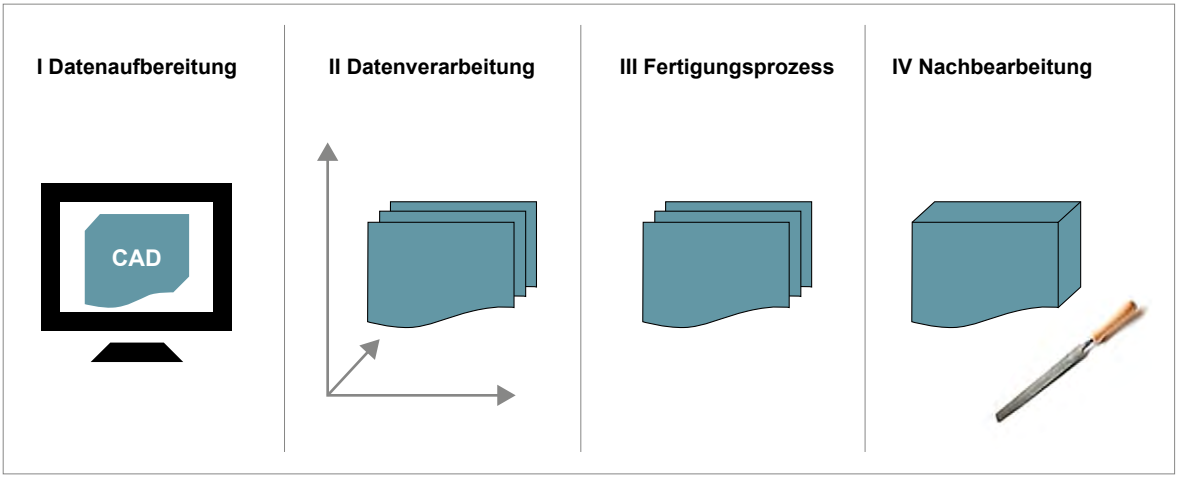


Abb. 3.51: Phasen der additiven Fertigung (Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf VDI-Richtlinie 3405, VDI 2014)

Die Nutzung von Polymeren in der additiven Fertigung übersteigt diejenige von Metallen, wobei sich aber der Abstand verringert und Metalle Polymere von 2021 an überflügeln könnten (Global Data 2019).

Diese Technologiesynopse fokussiert auf die additive Fertigung von metallischen Bauteilen. Bauteile aus Metalllegierungen lassen sich derzeit mit Power Bed Fusion, Direct Energy Deposition, Binder Jetting oder Sheet Lamination, zukünftig gegebenenfalls auch mittels Fluidic Forece Microscopy, additiv fertigen (Caviezel et al. 2017). Grundsätzlich kommt eine große Bandbreite an Bauteilen für die additive Fertigung in Frage. Beispiele für die beiden Wachstumsbranchen Medizintechnik sowie Luft- und Raumfahrt sind:

– Hüftgelenke auf Basis von Titanlegierungen,
– Treibstoffdüsen für Flugzeuge aus Kobalt-Chrom-Legierungen.

Basis für die additive Fertigung von Metallbauteilen sind überwiegend Vorprodukte in Pulverform, daneben auch als Filament. Derzeit werden ca. 4.500 Tonnen Metallpulver pro Jahr für die additive Fertigung produziert, eine vergleichsweise geringe Menge angesichts einer Gesamtproduktion von ca. 700.000 Tonnen Metallpulver pro Jahr (MPIF & APMI International 2020).

Der Gesamtmarkt für additive Fertigung kann in Hardware, Materialien, Software und Services eingeteilt werden. Zu den führenden Unternehmen im Bereich Hardware gehören Desktop Metal, GE Additive, Markforged, EOS, HP, 3D Systems, Ultimaker, EnvisionTEC, Stratasys und im Bereich Materialien BASF, Henkel, GKN, Sandvik, Solvay, Höganäs (Global Data 2019).

Zu den Akteuren in der Wertschöpfungskette additiv gefertigter metallischer Bauteile gehören u. a. die Unternehmen VDM Metals (unlegierte reine Metalle), Heräus (Pulver und Filament), EOS und ExOne (additive Fertigungssysteme) sowie Thyssen Krupp und Airbus (Hersteller von Komponenten).

3.2.7.2 Rohstoffinhalt

Tabelle 3.45 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Rohstoffe für die additive Fertigung (European Commission 2020a):

Metallpulver und -filamente für die additive Fertigung können auf sehr unterschiedlichen Legierungen beruhen. Für eine Abschätzung des zukünftigen Rohstoffbedarfs muss deshalb eine Engführung auf konkrete Legierungen in konkreten Einsatzgebieten erfolgen.

EOS führt in seinem Portfolio Metalllegierungen basierend auf Stahl, Nickel, Kobalt/Chrom, Kupfer, Titan, Aluminium und Wolfram (EOS 2020). Die spezifischen Eigenschaften des Werkstoffs ergeben sich durch die Legierung des Basismetalls mit anderen Elementen:

Tab. 3.45: Rohstoffe für die additive Fertigung (Quelle: European Commission 2020a)

Rohstoff	Einsatzgebiete
Al	Al-Legierungen für Aerospace, leichtes und steifes Kabineninterieur
Fe	Korrosionsfeste Fe-Legierungen für Struktur- und Maschinenbauteile
Ni	Ni- und NiTi-Legierungen, duktil und korrosionsfest, für Turbinen- und Maschinenbauteile
Ti	Hochfeste Ti-Legierungen für Aerospace und den Medizinbereich
Mg	Hochleistungs AlMg-Legierungen
Cr	Korrosionsfeste CoCr-Legierungen in Gasturbinen, Maschinen, Medizin- und Dentaltechnik
Co	Superlegierungen, Korrosionsfeste CoCr-Legierungen in Gasturbinen, Maschinen, Medizin- und Dentaltechnik
Cu	Superlegierungen, Ni-Legierungen
Hf	Ni-basierte Superlegierungen, hochfeste Hochtemperaturanwendungen
Mn	Ni-Legierungen
Mo	Ti-Legierungen zur Erhöhung der Festigkeit
Nb	Superlegierungen, TiAlNb-Legierungen, in Maschinen, Schaufeln, Ventilen und Rotoren
Sc	Leichte hochfeste Bauteile und Formteile
Si	Al-Mg-Legierungen
W	Warmfeste Superlegierungen, in korrosionsfesten und Werkzeugstählen, Turbinenschaufeln und Leitblechen
V	TiAl-Legierungen
Zr	Ti-Legierungen, metallische Gläser, Zahnkränze, Federn, Getriebe und Sensoren

Tab. 3.46: Materialzusammensetzung von ausgewählten Metalllegierungen für die additive Fertigung [Gew.-%] (Quelle: European Commission 2020a)

Rohstoff	EOS Ni Hx	EOS Ti
Co	0,5–2,5	
Ni	Balance	
Fe	17–20	0,3
Ti		Balance
Cr	20,5–23	
Mo	8–10	
Mn	1,0	
W	0,2–1,0	
Cu		
Nb		
Sonstige	a)	b)

Anmerkungen: a) C 0,1 %, S 1,0 %; b) C 0,08 %, H 0,015 %, O 0,25 %

Weitere Angaben zu Legierungszusammensetzungen bieten die Produktdatenblätter für Metallpulver für die additive Fertigung, unter anderem von GKN für Ti6Al4V und AlSi10Mg.

Die spezielle Zusammensetzung der Metalllegierung verleiht dem additiv gefertigten Bauteil die gewünschten Produkteigenschaften und dem Werkstoff die für seine Formgebung mit dem jeweiligen technischen Verfahren erforderlichen Prozesseigenschaften.

Luftfahrttechnik

Huang et al. (2016) schätzen für ein 40,6 Tonnen schweres Passagierflugzeug das Gewichtseinsparpotenzial durch additive Fertigung auf 9–17 %. 4–5 % können Aluminiumlegierungen, 2–5 % Nickellegierungen, 3–6 % Titanlegierungen und 0,4–1 % Stahllegierungen zugewiesen werden. Speziell für die additive Fertigung von Turbinenschaufeln wird die Legierung Ti6Al4V

verwendet, aufgrund ihrer kombinierten Eigenschaften von hoher Festigkeit und Bruchzähigkeit, geringer Dichte und niedriger Wärmeausdehnungskoeffizienten. Darüber hinaus kommen im Flugzeugbau additiv gefertigte Bauteile auf Basis von Edelmetallen (Gold, Silber, Platingruppenmetalle) zum Einsatz (Yusuf et al. 2019).

Hettesheimer et al. (2018) gehen zur Abschätzung des Energiebedarfs für den Bereich der Luftfahrt durchgängig von Ti6Al4V aus. Der Titangehalt wird für Langstreckenflugzeuge mit einem Gewicht von 145 Tonnen und für Kurzstreckenflugzeuge mit einem Gewicht von 40 Tonnen auf 7 % geschätzt. Die Gewichtseinsparung durch additive Fertigung wird mit 20 % pro Komponente beziffert.[14] Verhoefa et al. (2018) geben mit 21,3 % Gewichtseinsparung pro Komponente einen ähnlichen Wert an. Referenzmodell ist hier ein Airbus A320 mit 42,4 Tonnen Gewicht.

Für die Titannutzung im Aerospace-Sektor werden Projektionen für eine Business-As-Usual-Entwicklung und für eine Entwicklung, die mit additiver Fertigung korrigiert ist, simuliert. Die Korrekturkurve liegt im Jahr 2018 nur wenige Prozentpunkte unter der Business-As-Usual-Entwicklung, im Jahr 2028 soll additive Fertigung aber bereits über 15 % der Nachfrage nach Titan im Aerospace-Sektor einsparen (Titanium USA 2018).

Die Legierungen für subtraktive bzw. formative Fertigung und additive Fertigung sind für ein Basismetall nicht unbedingt identisch, weshalb für die Legierungsbestandteile trotz sinkender Basismetallnachfrage dennoch zusätzliche Nachfrageimpulse entstehen können.

Orthopädietechnik

Additive Fertigung in der Gefäßchirurgie erstreckt sich auf drei Hauptanwendungen: anatomische Modelle, chirurgische Werkzeuge sowie Implantate und Prothesen (Marti et al. 2019). In der Orthopädietechnik geht es um additiv gefertigte Implantate und Prothesen.

Eine konventionelle Hüftprothese hat ein Gesamtgewicht von ca. 450 bis 900 g, je nach Materialauswahl und Größe (DePuy Orthopaedics 2008). Bei Kniegelenkprothesen liegt das Gewicht bei ca. 280 bis 425 g (bonesmart.org 2015), bis zu 500 g inkl. Zement (Lee et al. 2005). Für beide konventionell hergestellte Prothesenarten kommen kobalt- und titanbasierte Legierungen zum Einsatz (Marscheider-Weidemann et al. 2016).

3.2.7.3 Foresight industrielle Nutzung

Die globale Nachfrage nach Metallen für die additive Fertigung wurde für 2017 mit 780 Tonnen Pulver und 62 Tonnen Filament angegeben. Mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 33,5 % und 27,8 % wird im Jahr 2025 eine Nachfrage von 7.872 Tonnen Metallpulver und 445 Tonnen Filament erwartet (Kreft & Jackel 2019).

Die Nachfrage wurde 2017 von Luftfahrt- und Verteidigungstechnik mit 41,6 Gew.-% sowie von Medizin- und Dentaltechnik mit 29,9 Gew.-% dominiert. Bis 2025 soll der Anteil von Luftfahrt- und Verteidigungstechnik auf 48,2 % deutlich steigen, während die relativen Anteile der anderen Abnehmerbranchen sinken (Medizin- und Dentaltechnik, Automobilindustrie) oder stagnieren (andere) (Kreft & Jackel 2019).

Hauptlegierungsmetalle für die additive Fertigung waren im Jahr 2017 Titan und Nickel mit 38,1 Gew.% bzw. 29,0 Gew.% Anteil an der Gesamtnachfrage. Im Jahr 2025 soll sich diese mengenmäßige Dominanz auf 43,4 Gew.-% (3.612 Tonnen titanbasierte Legierungen) bzw. 30,9 Gew.-% (2.570 Tonnen nickelbasierte Legierungen) weiter verstärken (Kreft & Jackel 2019).

Luftfahrttechnik

Huang et al. (2016) simulieren die zeitliche Verfügbarkeit und Adoption von additiv gefertigten Bauteilen in Flugzeugen. In ihrer langsamsten Variante wird die Adoptionsrate von 80 % additiv hergestellten Teilen nach 28 Jahren erreicht (nur für neue

[14] Entsprechend auch das Vorgehen für den Automobilbereich, einschließlich Traktoren, mit AlSi10Mg. Der Aluminiumgehalt in Fahrzeugen mit 1,6 Tonnen Gewicht bzw. Traktoren mit acht Tonnen Gewicht beträgt schätzungsweise jeweils 9 Gew.-%. Die Gewichtseinsparung durch additive Fertigung beträgt wie bei Flugzeugkomponenten 20 %.

Flugzeuge), in den anderen Varianten wird auch der additiven Fertigung von im Betrieb ersetzten Bauteilen Rechnung getragen (5 – 15 Jahre bis zum Erreichen der Adoptionsrate von 80 %).

Die typische Lebensdauer eines Verkehrsflugzeugs liegt bei etwa 20 bis 30 Jahren. Hettesheimer et al. (2018) geben sowohl für Kurz- als auch für Langstreckenflugzeuge eine Lebensdauer von 26 Jahren an. Bei einem Bestand von 500 Kurzstrecken- und 125 Langstreckenflugzeugen errechnet sich – ausschließlich bei Ersatzkäufen – eine jährliche Registrierung von etwa 20 Langstrecken- und 125 Kurzstreckenflugzeugen.[15] Verhoefa et al. (2018) geben für 2036 – 2050 eine jährliche Steigerung der weltweiten Flottengröße um 4 % an, woraus sich im Vergleich zu heute eine Verfünffachung der weltweiten Flugzeugflotte ergäbe.

Für den Bedarf nach additiv gefertigten Bauteilen ist auch die planmäßige Wartung zu berücksichtigen. Es gibt typischerweise über 30.000 Einzelkomponenten allein im Antriebssystem eines Flugzeugs, das regelmäßig gewartet und repariert werden muss (Matthews 2018).

Die Titanindustrie rechnet mit einem Bedarf von über 40.000 Flugzeugen zwischen 2018 und 2038 (Titanium Asia 2018) und diskutiert die nachfragemindernden Effekte von additiver Fertigung pro Flugzeug und sich erhöhende Marktanteile titanarmer Flugzeuge.

Orthopädietechnik

In der Vorgängerstudie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016“ wurde die Entwicklung des Bedarfs nach orthopädischen Implantaten anhand der prognostizierten Steigerung der Zahl an Hüftgelenkoperationen zwischen 2005 und 2030 abgeschätzt (Wittenauer et al. 2013). Im Ergebnis gehen (Marscheider-Weidemann et al. 2016) für das Jahr 2035 von 3 Mio. Hüftoperationen und 2,7 Mio. Kniegelenkoperationen aus.

Für Zahnimplantate gilt als Faustregel eine Haltbarkeit von 15 Jahren. Bei künstlichen Hüft- und Kniegelenken (Endoprothesen) beträgt die Lebensdauer 15 – 20 Jahre, in manchen Fällen sogar 25 Jahre und länger.

Die Gesamtverwendung an Titan für medizinische Produkte lag 2017 bei geschätzten 1.700 Tonnen. Das Wachstum für Titan in medizinischer Qualität soll in den nächsten Jahren bei 3 – 5 % pro Jahr liegen (Titanium Asia 2018).

3.2.7.4 Foresight Rohstoffbedarf

Angesichts der Vielzahl an additiven Fertigungsverfahren, verarbeiteten Materialen, unsicheren Zukunftsentwicklungen und vielschichtigen Effekten auf die Rohstoffnachfrage kann eine Abschätzung des Rohstoffbedarfs für Bauteile in dieser Studie nur illustrativ und nicht prognostizierend sein. Der Fokus der Vorausschau liegt auf den Märkten Luftfahrt- und Orthopädietechnik mit nickel- und titanbasierten Legierungen.

Zur Berechnung des Bedarfs 2018 werden die Nahprojektionen für Titan- und Nickellegierungen von Kreft & Jackel (2019) zugrunde gelegt und die Masseanteile der einzelnen Metalle anhand der Zusammensetzung der Legierungen EOS Ti und EOS Ni Hx errechnet (bei Bandbreiten: Mittelwert von Minimum- und Maximumwert). Eine Allokation der Legierungen auf die Anwenderbranchen liegt nicht vor, weshalb mit einer differenzierten Extrapolation des Marktpotenzials anstelle einer Analyse der maximalen Marktpotenziale gearbeitet wird.

Für den zukünftigen Rohstoffbedarf wird vereinfacht von einem im Vergleich zu Kreft & Jackel (2019) verzögerten Wachstum ausgegangen, das sich danach bis zum Erreichen des Marktpotenzials sättigt. Dieses Marktpotenzial liegt im Referenzfall (SSP2) etwa beim Dreifachen des für 2025 prognostizierten Wertes. Die Ersatzkäufe im Bereich Gesundheit sind mit 15 Jahren angesetzt und im Bereich Flugzeuge mit 20 Jahren. Hinsichtlich der Materialnachfrage wird vereinfacht von einer unveränderten stofflichen Zusammensetzung der Legierungen im Jahr 2040 ausgegangen.

[15] Die Lebensdauer von Automobilen ist mit neun Jahren, die von Traktoreinheiten mit 4,2 Jahren angegeben. Für die Skalierung auf Deutschland wird eine jährliche Produktion von 5,7 Mio. Automobilen (3,2 Mio. jährliche Registrierungen) und 125.000 Traktoreinheiten angesetzt.

Annahmen aus Tab. 3.47 führen zu Differenzen zwischen dem Foresight für den Rohstoffbedarf unter den Bedingungen der drei SSP-Szenarien SSP1, SSP2 und SSP5. Unter Berücksichtigung dieser Annahmen errechnen sich in Tab. 3.48 dargestellten Bedarfe für 2040.

Insgesamt zeigen sich in dieser Abschätzung des Rohstoffbedarfs 2040 für die additive Fertigung zwar in Bezug auf den Bedarf für das Basisjahr 2018 deutliche, aber in Bezug auf die Weltproduktion 2018 nur sehr moderate Impulse auf die Nachfrage nach Metallen. Die Unterschiede zwischen den Szenarien sind zwar uneinheitlich, aber gering.

Lediglich für Titan liegt die Bedarfsvorschau im Jahr 2040 in einer nennenswerten Größenordnung: Je nach Szenario beträgt der zukünftige Nachfrageimpuls 3,3 – 3,5 % der Titanschwammproduktion bzw. 2,5 – 2,7 % der Titanraffinadeproduktion im Jahr 2018. Für alle anderen untersuchten Rohstoffe liegt der zukünftige Nachfrageimpuls deutlich unter 0,5 % der Bezugswerte im Jahr 2018.

Es handelt sich hierbei sicherlich um eine vorsichtige Abschätzung, aber selbst bei einer Verdopplung des Bedarfs 2040 dürften nach den heute verwendeten Nickel- und Titanlegierungen keine gravierenden Nachfragesteigerungen entstehen. Trägt man dem Substitutionspotenzial von Bau-

Tab. 3.47: Annahmen für den zukünftigen Rohstoffbedarf unter den Bedingungen ausgewählter SSP-Szenarien

Faktor	Szenario		
	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Marktpotenzial Titanbasiert relativ zu SSP2	120 %	100 %	80 %
Marktpotenzial Nickelbasiert relativ zu SSP2	120 %	100 %	80 %
Materialeffizienzsteigerung 2018 – 2040	50 %	35 %	20 %

Tab. 3.48: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für additive Fertigung in Luftfahrt und Medizintechnik in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Titan	198.050 (Schwamm) 260.548 (R)	308	6.460	6.998	6.890
Nickel	2.327.500 (B) 2.189.313 (R)	108	2.153	2.333	2.297
Chrom	27.000.000 (B)	50	2.012	1.677	1.342
Eisen	1.520.000.000 (B)	43	1.712	1.426	1.141
Molybdän	265.582 (B)	21	833	694	555
Kobalt	151.060 (B) 126.019 (R)	3,5	138,8	115,7	92,5
Mangan	20.300.000 (B)	2,3	92,5	77,1	61,7
Wolfram	77.080 (B)	1,4	55,5	46,3	37

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

teilen aus formativer bzw. subtraktiver Fertigung durch additive Fertigung Rechnung, so sind bei den hier untersuchten Metallen sogar Nettoverringerungen der Nachfrage zu erwarten.

3.2.7.5 Recycling, Ressourceneffizienz, Substitution

Im Januar 2016 veröffentlichte der Bundesverband der Deutschen Industrie ein Positionspapier zu den Implikationen des 3D-Drucks für die Rohstoffsicherung der deutschen Industrie (BDI 2016). Positive Wirkungen im Vergleich zur subtraktiven Produktion sind u. a. abfallarme Produktion und Leichtbau. Negative Wirkungen sind u. a. die unklare Rezyklierbarkeit der Objekte, Mehrproduktion durch einfache Herstellung, Herstellung fehlerhafter Produkte oder „Crapjekts“ (Kreiger & Pearce 2013; IÖW 2014).

Der Energie- und Materialbedarf in der Fertigungsphase von Bauteilen hängt von einer Reihe von technischen und morphologischen Spezifikationen der Bauteile, von Maschinenparametern und Fertigungseinstellungen ab, insbesondere von der Schichtdicke, Geometrie, Positionierung und der Fertigungszeit (Bourhis et al. 2013). Produktionsabfall aus der Verarbeitung von metallischen Legierungen lässt sich grundsätzlich technisch gut und meist auch ökonomisch recyceln (Meteyer et al. 2014).

Aufgrund der langen Lebensdauern der additiv gefertigten Bauteile in den untersuchten Anwendungen ist eine Einschätzung des End-of-Life-Recyclings mit großen Unsicherheiten behaftet, denn es liegen bislang kaum Erfahrungen mit dem End-of-Life-Recycling von additiv gefertigten Implantaten und Flugzeugbauteilen vor. Ein Haupthemmnis dürfte die Erfassung der Bauteile für das End-of-Life-Recycling sein, während das metallurgische Recycling unter der Annahme akzeptabler Sekundärrohstoffpreise plausibel erscheint.

3.2.8 Geräte im Internet der Dinge (IoT)

3.2.8.1 Technologiebeschreibung

ISO/IEC 20924 (2018) definiert das Internet der Dinge (engl. Internet of Things, IoT) als „ Infrastruktur aus miteinander verbundenen Objekten, Menschen, Systemen und Informationsressourcen zusammen mit Diensten, die Informationen aus der realen und virtuellen Welt verarbeitet und auf sie reagiert” (engl. “infrastructure of interconnected entities, people, systems and information resources together with services which processes and reacts to information from the physical world and virtual world“). Das IoT kann als Gesamtheit der Komponenten, Layer und Plattformen aufgefasst werden, die im Vergleich zum Internet der Menschen einen Mehrwert erzielen. Das Feld des IoT, seiner Anwendungen bzw. technischen Lösungen ist weit und heterogen (vgl. Krause et al. 2017).

In dieser Technologiesynopse liegt das Hauptaugenmerk auf den physischen IoT-Modulen, für deren Klassifizierung es verschiedene Systematiken gibt.

An IoT-Geräte werden besondere Anforderungen gestellt: Hohe Reichweite, geringe Datenrate, geringer Energieverbrauch und Kosteneffektivität

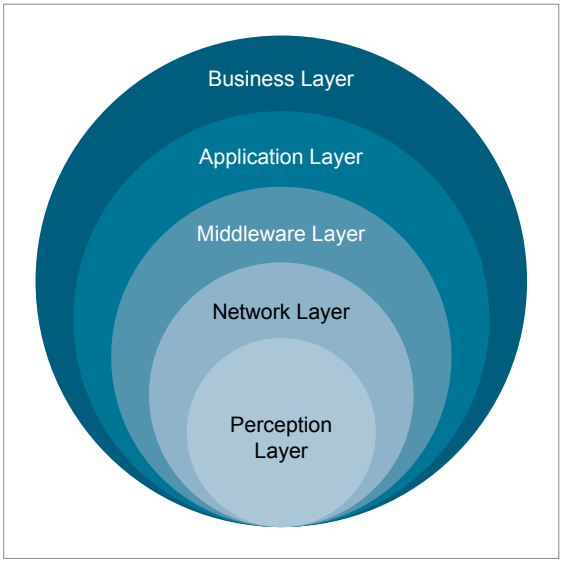


Abb. 3.52: Referenzmodell für die IoT-Architektur (Quelle: Antão et al. 2018)

(nach Mekki et al. 2019). Ojo et al. (2018) teilen IoT-Geräte beispielsweise hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit in Low-End, Middle-End und High-End ein. Low-End-IoT-Geräte dienen meist für das einfache Aufnehmen von Informationen und kleinste Steuerungsprozesse. Middle-End-IoT-Geräte bieten erweiterte Verarbeitungsmöglichkeiten, beispielsweise Algorithmen für einfache Visualisierungen, und können mehr als eine Kommunikationstechnologie beherbergen. High-End-IoT-Geräte sind meist Single Board Computers (SBC), die aufwändigere Berechnungen im Edge-Bereich vornehmen können (z. B. Machine Learning), über hohe Konnektivität und hochwertige Schnittstellen zur Umwelt verfügen (z. B. Kameras). High-End-IoT-Geräte werden auch als IoT-Gateways benutzt.

Nach Mekki et al. (2019) lässt sich die Kommunikationstechnologie des IoT in die Bereiche Short-Range-Technologien (z. B. ZigBee, Bluetooth, Bluetooth Low Energy (BLE), Near Field Communication, Radio Frequency Identification (RFID)), Zellulare Kommunikation (Wifi, 2G (GSM), „2.5 G“ (GPRS), 3G (UMTS), 4G (LTE), 5G (NR)) und kabellose Low Power Wide Area Networks (LPWAN) einteilen. Satelliten werden als möglicher Game Changer für das IoT gehandelt (Urlings 2019).

Von besonderer Bedeutung sind aktuell:

– Mit BLE gibt es eine Bluetooth-Variante speziell für stromsparende IoT-Geräte (Sainathan 2018). Im Vergleich zu passiver RFID ist die Reichweite des Lesegerätes von BLE deutlich größer, aber die Tag-Kosten sind deutlich höher.

– LPWAN beschreibt Kommunikationslösungen, die kabellose long-range-Kommunikation von 10 – 40 km auf dem Land und 1 – 5 km in der Stadt ermöglichen. Die Kommunikationsform ist vergleichsweise energieeffizient und kostengünstig. Heute gibt es drei verbreitete und breit beforschte Technologien: Sigfox, LoRa und NB-IoT.

– Von 5G wird erwartet, dass es die IoT-Marktentwicklung wesentlich antreibt. Vorteilhaft gegenüber 4G sind die geringe Latenz und die hohen Datenübertragungsraten, nachteilhaft die geringere Reichweite. Zu 5G gibt es eine separate Technologiesynopse (s. Kapitel 3.5.3).

Nach Krause et al. (2017) wird zwischen drei Vernetzungstypen unterschieden: „(1) Verbindung eines Produkts zu einem Hersteller, Nutzer oder einem anderen Produkt (One-to-One, wie die Diagnosefunktion bei Fahrzeugen). (2) Ein zentrales System, das ständig/zeitweilig Verbindung zu mehreren Produkten aufnimmt (One-to-Many, wie zusätzliche intelligente Services zur vorhersagbaren Wartung und Updates). (3) Die Verbindung von vielen Produkten mit anderen Produkten und externen Informationsquellen zur Erstellung von Ökosystemen (Many-to-Many, wie die Nutzung von Wetterdaten zur Vorhersage und Optimierung des Energieverbrauchs).“

Die Architektur der Datenverarbeitung im IoT wird mit den Begriffen Edge Computing, Cloud Computing und Fog Computing gefasst. Die Daten können dezentral in der Nähe der Gewinnung der Daten (Edge Computing), oder zentral (Cloud Computing) verarbeitet werden. Es kann auch eine dezentrale Vorverarbeitung mit anschließender zentraler Weiterverarbeitung stattfinden (Fog Computing). Je nach Kosten und Effizienzentwicklung entscheidet sich, welche Architektur gewählt werden wird (McKinsey & Company 2019; Chiang & Zhang 2016).

IoT-Anwendungen finden sich bereits heute in einer Vielzahl von Branchen. Aus dem Blickwinkel des Umsatzes sind nach Statista (2018) Connected Cities (38,8 Mrd. USD) und Industrial Internet (35,9 Mrd. USD) die größten Segmente, weit vor Wearable Systems (11,8 Mrd. USD), Connected Vehicles (4,5 Mrd. USD) und Connected Homes (2,9 Mrd. USD) (Daten jeweils aus dem Jahr 2018). Nach Stückzahlen der IoT-Geräte ergibt sich für 2018 folgendes Bild: Smart Cities (473,2 Mio.), Industrial IoT (440,8 Mio.), Personal IoT (472,6 Mio.), Medical IoT (125,4 Mio.), Connected Vehicles (64,7 Mio.) und Connected/Smart Home (1,2 Mrd.), wobei auch die Einsatzfelder Smart Agriculture, Commercial Transport, Intelligent Retail, Smart Energy Management und Smart Buildings benannt, aber nicht quantifiziert sind (Columbus 2018).

Global Data (2018) zufolge sind bei den vier Hauptlayern des IoT folgende Unternehmen am Markt aktiv: Qualcomm, Intel, NXP, Infineon, Mic-

rochip, Analog Devices und STMicroelectronics auf Geräte-Ebene; Cisco, Nokia, Ericsson und Huawei, auch AT&T, NTT und Vodafone auf Netzwerkebene; Amazon, Microsoft, Google, SAP, Software AG und Alibaba auf der Datenebene; Apple und Google im Consumer-Internet und GE und IBM im Industrie-Internet.

Die Technologiesynopse Geräte im IoT hat aufgrund ihrer Breite und Vielschichtigkeit zahlreiche Bezüge zu anderen Technologiesynopsen. An dieser Stelle erfolgt eine Engführung auf Mindestkomponenten für IoT-Geräte, um erstens dem besonderen Massencharakter des IoT gerecht zu werden und zweitens, um Überschneidungen mit Technologiesynopsen wie Rechenzentren (Kapitel 3.5.4), Radiofrequenz-Mikrochips (Kapitel 3.2.5) und Automatisches Pilotieren von Karftfahrzeugen (Kapitel 3.1.4) zu vermeiden.

3.2.8.2 Rohstoffinhalt

Nach Krause et al. (2017) werden folgende Mindestkomponenten für IoT-Objekte benötigt: Sensoren zur Aufnahme von Informationen, für die spezifische Aufgabe angemessener Mikroprozessor, eine Einrichtung zur Energieversorgung, eine Vernetzungskomponente sowie gegebenenfalls Aktuatoren, die je nach Anwendungsfeld basierend auf ausgewerteten Sensorinformationen Aktionen auslösen. Alle eingebetteten Systeme sind zudem mit einer eindeutigen Identifikation, z. B. RFID oder IP-Adresse), ausgestattet. Zukünftig können theoretisch alle ausreichend großen physischen Objekte mit den IoT-Mindestkomponenten versehen werden.

In Tab. 3.49 wird ein Eindruck von der physischen Beschaffenheit der IoT-Geräte in einer Basiskonfiguration, ihrer Energieversorgung und Konnektivität sowie der geschätzten Kostenentwicklung, vermittelt.

Diese Aufstellung ist nicht vollständig, es gibt andere und neuere Systematisierungen. Diese Systematisierung (Sparks 2017) hat jedoch den Vorteil, dass sie die einzig kostenlos verfügbare ist, für die eine langfristige mengenmäßige Abschätzung der IoT-Mindestkomponenten vorliegt.

Tab. 3.49: Basiskonfiguration des IoT (Quelle: Sparks 2017)

Modultyp (1)	Energie-versorgung	Konnektivität	Kosten BOM für ein IoT Basismodul (2)	
			Ist-Zustand 2017	Projektion 2035
Smart Tag	RF Energy Harvesting	NFC oder RFID	0,40 USD	0,15 USD
Smart Sensor	Solarzellen, Knopfzelle	Unlizensierte Radiofrequenz (3) oder LPWAN(4)	4 USD	1,5 USD
Smart Camera	Stromnetz	WiFi, LTE oder Ethernet	8 USD	3 USD
IoT Beacon	Solarzellen, Knopfzelle	Unlizensierte Radiofrequenz (3)	3 USD	1 USD
IoT Receiver	Solarzellen, Knopfzelle	Unlizensierte Radiofrequenz (3) oder LPWAN (4)	3 USD	1 USD
IoT Gateway	Stromnetz	Unlizensierte Radiofrequenz (3) oder Internetzugang	8 USD	3 USD

Anmerkungen: (1) Smart Tags für das IoT zeichnet aus, dass sie Daten für die Analyse in Echtzeit generieren. Smart Sensors messen die Eigenschaften ihrer unmittelbaren Umgebung und leiten Informationen zur Verarbeitung weiter. Smart Cameras sind spezielle visuelle Smart Sensors, und auch Smart Tags können durch Kombination mit Sensoren und Datenloggern zu einer Art Smart Sensors avancieren. Ein IoT Beacon sendet immer wieder ein kleines Signal wie zum Beispiel eine ID-Nummer oder eine Web-Adresse. Wenn ein kompatibles IoT-Objekt in die Nähe des IoT-Beacons kommt, wird automatisch eine Aktion ausgelöst. Ein kontrolliertes IoT-Objekt erhält seine Steuerungsinstruktion von einem IoT-Receiver, der gegebenenfalls auch mit langwelligen Radiofrequenzen operieren kann. IoT-Objekte, die im unlizensierten Radiofrequenzbereich operieren, verbinden sich mit dem Internet über IoT-Gateways. (2) BOM – Bill of Materials, d. h. ohne Fertigungskosten; (3) Bluetooth, WiFi, Zigbee; (4) Low Power Wide Area Network, z. B. NB-IoT, LoRa, Sigfox.

Die Bestimmung des Rohstoffinhalts der Mindestkomponenten für IoT-Objekte trifft auf eine Reihe von Schwierigkeiten. Während die stoffliche Zusammensetzung von IoT Beacons, IoT Receivern und IoT Gateways mittels Standardelektronik angenähert werden könnte, zeigte sich in der ersten (Angerer et al. 2009) bzw. der zweiten Auflage (Marscheider-Weidemann et al. 2016) der Studie „Rohstoffe für Zukunftstechnologien", dass für den Teilbereich RFID von Smart Tags die erhofften Marktdurchbrüche auf Einzelstückebene (insbesondere für Supermarkt- und Drogerieartikel, sogenannte Fast Moving Consumer Goods, FMCG) ausblieben, und auch für die Industrie 4.0 Sensorik gelang aufgrund unzureichender Informationslage keine Quantifizierung. Die Datenlage zu allen IoT-Mindestkomponenten ist lückenhaft (z. B. zu BLE, Bluetooth Low Energy) und oft veraltet (z. B. Low-End Mikrochips). Das weite Feld der Realisierungsmöglichkeiten des IoT erlaubt derzeit keine plausible Aufschlüsselung der Marktanteile der technischen Basiskonzepte für die einzelnen Mindestkomponenten. Es sind zudem zahlreiche neue stoffliche Entwicklungen plausibel, die eine Abschätzung der Rohstoffnachfrage für 2040 aus heutiger Sicht kurzsichtig erscheinen lassen. Hieraus lässt sich ein Bedarf formulieren, die stofflichen Bedarfe für heutige und zukünftige IoT-Mindestkomponenten zu bestimmen.

Die einzig kostenlos verfügbare aktuelle Quelle zum Rohstoffbedarf für das IoT fokussiert auf Speichertechnologie. Die Speichertechnologie ist nicht spezifisch für die Geräte im IoT, sondern erstreckt sich insbesondere auch auf die Rechenzentren (s. Kapitel 3.5.4). Während HDD und Flash Memories als etablierte Baseline angesehen werden können, handelt es sich bei FeRAM (ferroelektrisch), MRAM (magnetisch), PCM (Phasenaustauschmaterial), 3D XP (stacked PCM) und RRAM (resistive – widerstandfähig) um Zukunftstechnologien.

Tabelle 3.50 zeigt den Bedarf an Rohstoffen für verschiedene Speichertechnologien (Materialgehalt) in t/ZB:

Nennenswerte Effekte auf die Rohstoffnachfrage können – über die bekannte Thematik des FeNdB-Bedarfs für HDD hinaus – nach Ku (2018) im Falle einer massenhaften Verbreitung von FeRAM auf Platingruppenmetalle entstehen. Die Verwendung von RRAM im Zettabyte-Bereich vermag die Nachfrage nach Hafnium merklich zu steigern. Alle anderen Speichertechnologien scheinen im Hinblick auf die Rohstoffnachfrage unproblematisch zu sein. Die Zukunftstechnologien PCM und 3D XP sowie MRAM sind leistungsfähige Alternativen zu den etablierten Speichertechnologien HDD und Flash, ohne große Impulse auf die Rohstoffnachfrage auszulösen.

Tab. 3.50: Rohstoffbedarf für verschiedene Speichertechnologien im IoT in t/ZB (Quelle: Ku 2018)

Speichertechnologie	Komponente (Auswahl)	Material (Auswahl)	t/ZB
Ferroelectric RAM	Kontrollgate	Pt oder Ir	Ir: 49 – 246 Pt: 47 – 236 Zr: 14 – 54
	Eisenschicht	$Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$	
	Elektrode	Pt	
Magnetic RAM	Leiter	TaN	Ta: 7,7
	Pinning/Antipinning	$Fe_{60}Co_{40}$ / $Ir_{20}Mn_{80}$	Co: 0,5 – 0,6 Ir: 0,9 – 2,7
	Elektrode	W	W: 7,7
PCM	Phasenwechselmaterial	$Ge_2Sb_2Te_5$	Ge: 0,05 Sb: 0,08 Te: 0,21
3D XP	PC Element	SiGe	Ge: 0,1 – 0,3
Resistive RAM	Dielektrikum	HfO_2	Hf: 3,3

Anmerkungen: Für PCM werden auch andere chalkogenide Gläser verwendet, die kumulierten Rohstoffbedarfe liegen jedoch in einer minimalen Größenordnung.

Der Autor Ku (2018) schließt, dass die Materialbedarfe durch Speichertechnologien im IoT nicht allzu alarmierend sind und dass es nicht klar ist, ob die Speichertechnologie überhaupt die dringendsten Materialprobleme im Hinblick auf eine Hochskalierung von IKT verursacht und nicht etwa die Datenverarbeitung oder die Datenübertragung. Vor diesem Hintergrund unterbleibt in dieser Studie eine eigenständige Abschätzung des Rohstoffbedarfs für Speichertechnologien. Gleichwohl kann mit den im folgenden Abschnitt formulierten mengenmäßigen Zukunftsprojektionen von IoT-Objekten der Bedarf nach einer komponentenbezogenen Analyse des Rohstoffgehalts für IoT-Objekte spezifiziert werden. Dies erforderte jedoch eine eigenständige Untersuchung.

3.2.8.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Schätzungen zur Marktentwicklung von Komponenten im IoT variieren stark, je nachdem was dem IoT zugerechnet wird und welche Zeiträume abgedeckt sind.

Es liegen nur wenige langfristige Schätzungen für die Stückzahlen von Komponenten für das IoT vor:

– ARM Limited (Sparks 2017) schätzt die kumulierte potenzielle Produktion von 2017 bis 2035 auf 1 Billion Stück, wovon 500 Mrd. auf Tags, 250 Mrd. auf Sensoren, 10 Mrd. auf Kameras sowie 100 Mrd. auf IoT Beacon, 120 Mrd. auf IoT Receiver und 20 Mrd. auf IoT Gateways entfallen sollen.

– Angaben der DBS Bank zufolge (Columbus 2018) betrug die installierte Basis an aktiven IoT Einheiten im Jahr 2016 6,4 Mrd. Stück (Consumer Devices: 62 %). Im Jahr 2030 sollen es bereits 125 Mrd. Stück sein (Consumer Devices: 60 %).

– Transforma Insights (Morrish 2020) beziffert die installierte Basis an aktiven IoT-Geräten Ende 2019 auf 7,6 Mrd. Stück. Dieser Wert soll im Jahr 2030 bereits 24,1 Mrd. Stück betragen (CAGR 11 %). In diesem Zeitraum von 2019 bis 2030 sollen sich die Anteile der Technologien für den Nahbereich (Wi-Fi, Bluetooth und Zigbee) von 74 % auf 72 % ändern, bei öffentlichen Netzen (v. a. zelluläre Netze) von 16 % auf 20 % und privaten Netzen von 10 % auf 8 %.

Die International Data Corporation (IDC) schätzt bereits für 2025, dass es 41,6 Mrd. verbundene Geräte geben wird, die 79,4 Zettabyte (ZB) Datenverkehr generieren (IDC 2019).

Sicherlich sind solche illustrativen Schätzungen nur unter großen Vorbehalten aufzugreifen. Dennoch vermitteln sie ein Bild über die zukünftig zu erwartenden Größenordnungen an IoT-Devices.

3.2.8.4 Foresight Rohstoffbedarf

Je nach SSP-Szenario sind unterschiedliche Ausprägungen der IoT-Adoption und des Rohstoffinhaltes denkbar. Die Informationslage zum Rohstoffinhalt und zum Foresight industrielle Nutzung reicht jedoch selbst für eine illustrative Abschätzung des zukünftigen Rohstoffbedarfs nicht aus.

3.2.8.5 Recycling, Ressourceneffizienz, Substitution

Einige erste Studien befassen sich mit den Umweltauswirkungen des IoT. Ihre Schwerpunkte liegen jedoch auf Fragen des Energieverbrauchs und der Kreislaufwirtschaft (vgl. u. a. International Telecommunication Union & WEEE Forum 2020) und nicht auf dem Materialgehalt und der Ressourceneffizienz.

Wesentliches Charakteristikum der Mindestkomponenten im IoT ist, dass sie miniaturisiert, weit verteilt und in andere Objekte eingebettet sind. Aus Kostengründen wird für den Massenmarkt druckbare Elektronik mit minimalem Materialinhalt entwickelt und eingesetzt. Für eine Wiedergewinnung der Inhaltsstoffe aus den IoT-Mindestkomponenten bestehen nur minimale Marktanreize, und auch die ökologische Sinnhaftigkeit ist angesichts der hohen Entropie zweifelhaft.

Unter Umständen kann der Eintrag von IoT-Mindestkomponenten in andere Recycling-Stoffströme zu Werkstoffunverträglichkeiten führen. Dann wäre ein Design der IoT-Mindestkomponenten für das Recycling wichtig, indem diese von den Hauptobjekten getrennt oder massenstromtauglich gestaltet werden können.

3.3 Cluster: Energietechnologien und Dekarbonisierung

3.3.1 Thermoelektrische Generatoren

3.3.1.1 Technologiebeschreibung

Thermoelektrische Generatoren (TEG) setzen Temperaturunterschiede direkt in elektrischen Strom um. Dabei benötigen sie keine beweglichen Teile oder Betriebsmittel (und dadurch keinen Wartungsaufwand), sind verlässlich, langlebig, und verursachen keinen Lärm (Champier 2017). Bei vielen technischen Prozessen, insbesondere Verbrennungsprozessen, entsteht Abwärme, die als Energiequelle für TEG dienen kann. Dieses Anwendungsgebiet – die Abwärmenutzung – birgt große Potenziale etwa für Treibstoffeinsparungen in Kraftfahrzeugen oder höhere Wirkungsgrade für Blockheizkraftwerke und zentrale Heizungsanlagen im Gebäudebereich (Fraunhofer IPM 2017). Beim sogenannten Energy Harvesting werden kleine TEG eingesetzt, z. B. um Sensoren mit Strom aus vorhandenen Wärmequellen wie Heizungsröhren oder gar Körperwärme zu versorgen. In der Raumfahrttechnik werden Radioisotope als Wärmequelle, gekoppelt mit TEG, zur Energieversorgung von Satelliten und Sonden seit Jahrzehnten genutzt (Champier 2017; Beretta et al. 2019; Freer & Powell 2020; Jouhara et al. 2021).

Die Umwandlung von Wärme zu Strom durch thermoelektrische Generatoren beruht auf dem Seebeck-Effekt: Zwischen zwei Stellen eines elektrisch leitenden Materials entsteht eine elektrische Potenzialdifferenz (Spannung), wenn diese unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Im Bereich höherer Temperaturen bewegen sich die für die elektrische Leitung zuständigen Elektronen schneller als im Bereich niedrigerer Temperaturen. So kommt es zu einer Anreicherung der Elektronen im kälteren Bereich. Die entstehende Potenzialdifferenz bewirkt einen Rückfluss von Elektronen, der die Anreicherung ausgleicht. Es entsteht eine für das spezifische Leitermaterial charakteristische Spannung. Für einen hohen Wirkungsgrad sollte ein thermoelektrisches Material bei einer bestimmten Temperaturdifferenz eine möglichst hohe Spannung liefern. Dafür sollte seine elektrische Leitfähigkeit möglichst hoch sein, um einen ausreichenden Elektronenfluss zu garantieren. Gleichzeitig sollte die thermische Leitfähigkeit möglichst gering sein, um die Temperaturdifferenz aufrecht zu erhalten. Als Kennzahl für die thermoelektrische Leistungsfähigkeit eines Stoffes wird meist der dimensionslose „ZT-Wert“ angegeben (Beretta et al. 2019):

$$ZT = \alpha^2 \frac{\sigma}{\kappa} T$$

- α Seebeck-Konstante in V K^{-1}
- σ elektrische Leitfähigkeit in Ω^{-1} m^{-1}
- κ Wärmeleitfähigkeit in W m^{-1} K^{-1}
- T Mittelwert der Temperaturen an der heißen und kalten Seite in K

Der ZT-Wert ist somit nicht nur materialabhängig, sondern auch temperaturabhängig. Für konkrete Anwendungen ist deshalb wichtig, dass der temperaturabhängige ZT-Wert des Materials auch im relevanten Temperaturbereich hoch ist.

Für thermoelektrische Generatoren geeignete Materialien mit hoher elektrischer, aber geringer Wärmeleitfähigkeit, sind selten, da eine gute Elektronenleitung in der Regel mit einer guten Wärmeleitung einhergeht. So sind bei Metallen Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit hoch, bei Isolatoren sind beide gering. Halbleiter haben

Tab. 3.51: Thermoelektrische Eigenschaften von Isolatoren, Metallen und Halbleitern bei Raumtemperatur (Quelle: Sparks 2017)

	Einheit	Isolatoren	Metalle	Halbleiter
Seebeck-Konstante α	10^{-6} V K^{-1}	1.000	5	200
Elektrische Leitfähigkeit σ	Ω^{-1} m^{-1}	10^{-10}	10^{8}	105
Wärmeleitfähigkeit κ	W m^{-1} K^{-1}	0,1 – 1	10 – 1.000	1 – 100
Kennzahl ZT	–	10^{-14}	10^{-3}	0,1 – 2,2

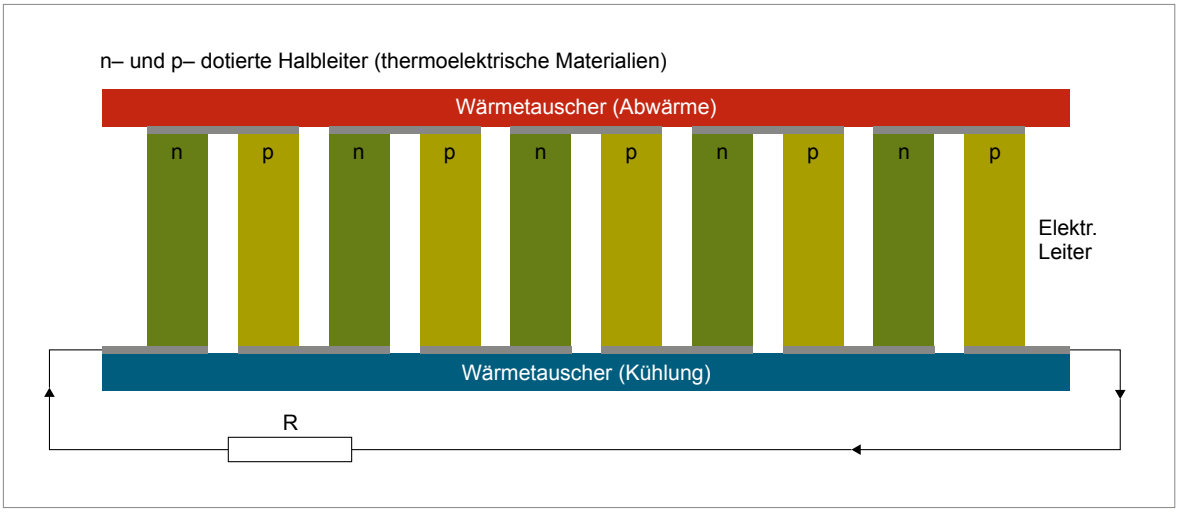


Abb. 3.53: Aufbau eines thermoelektrischen Generators (Quelle: Eigene Darstellung)

bei beiden Größen mittlere Werte und erreichen die besten ZT-Werte, wie aus Tab. 3.51 hervorgeht. Zur Maximierung von ZT-Werten wird derzeit intensive Materialforschung betrieben (Freer & Powell 2020).

Im thermoelektrischen Generator werden n- und p-leitende Halbleiterschichten eingesetzt, bei denen durch Fremdatome in einem Kristallgitter zusätzlich Leitungselektronen (n-Leiter) oder Löcher (p-Leiter) erzeugt werden. Diese Halbleiterschichten werden über Drähte verbunden und elektrisch in Reihe geschaltet, wodurch ein kontinuierlicher Stromfluss ermöglicht wird. Der Stromkreis ist senkrecht zum Temperaturgefälle angeordnet (s. Abb. 3.53). Über Wärmetauscher wird an der heißen Seite des Generators Wärme antransportiert, an der kalten Seite gekühlt bzw. Wärme abtransportiert (Jaziri et al. 2020). Die thermoelektrischen Module müssen große Temperaturgradienten und entsprechende Belastungen und Verformungen über viele Erwärmungs- und Abkühlungsdurchgänge aushalten, sowie stabil gegenüber der Einsatzumgebung (chemisch, mechanisch) sein (Freer & Powell 2020).

Deshalb muss neben den Eigenschaften der thermoelektrischen Materialien (s. Kapitel 3.3.1.2) auch das gesamte Moduldesign optimiert werden. Dazu zählen elektrische Verbindungselemente („Drähte“), Wärmetauscher und der Wechselrichter zur Umwandlung des erzeugten Gleichstroms in Wechselstrom (Champier 2017). Wichtige Kenngrößen für TEG sind die Leistungsdichte (in W cm^2 angegeben; je höher die Leistungsdichte, desto weniger Gewicht hat der thermoelektrische Generator) sowie die Kosten pro Leistung (€ pro Watt).

Gegenüber anderen Technologien zur Umwandlung von Abwärme in Elektrizität haben thermoelektrische Generatoren einen geringeren Wirkungsgrad. Vorteilhaft ist jedoch der einfache Aufbau der thermoelektrischen Generatoren, aus dem sich eine hohe Verlässlichkeit und Lebensdauer sowie ein geringer Wartungsaufwand ergibt. Zudem sind thermoelektrische Generatoren skalierbar und können dezentral an die jeweilige Anwendung angepasst eingesetzt werden. Sie eignen sich außerdem für Anwendungen, bei denen bewegliche Teile ausgeschlossen sind und arbeiten geräuschlos. Im Temperaturbereich unter 100 °C wären thermoelektrische Generatoren konkurrenzlos (Wietschel et al. 2010).

3.3.1.2 Rohstoffinhalt

Verschiedene Materialien haben jeweils Vor- und Nachteile bezüglich der in Kapitel 3.3.1.1 aufgezählten Eignungskriterien. Bereits kommerziell eingesetzt werden Materialien auf Basis von PbTe, Bi_2Te_3, BiSb, SiGe, wobei PbTe und SiGe in der Raumfahrt Anwendung finden und nur Bi_2Te_3 in anderen Anwendungen wie z. B. der Abwärmenutzung kommerziell relevant ist (Champier 2017; Cramer et al. 2018; Jouhara et al. 2021). In der Erforschung und Entwicklung befinden sich folgende Materialklassen (Beretta et al. 2019; die

Schreibweise [X,Y,Z], bedeutet, dass X, Y, und Z sich gegenseitig substituieren und daher in variablen Mengen enthalten sein können; vgl. Freer & Powell 2020):

- Oxide, z. B. $Zn_{0.96}Al_{0.02}Ga_{0.02}O$, $NaCo_2O_4$,
- Silizide, z. B. $FeSi_2$, $Mg_2[Si,Ge,Sn]$; $Ru_{0.1}Mn_{0.9}Si_y$; $MnSi_{1,73}$,
- Skutterudite, $X_yCo_4Sb_{12}$, X: Sr, Ba, La, Yb, Ce, Nd, Er, In; $Yb_{12}Ca_2MnSb_{11}$,
- Half-Heusler-Materialien, [Hf,Zr][Co,Ni,Fe][Sn,Sb],
- Sulfosalze, z. B. $Cu_{12}[S|(SbS_3)_4]$,
- Nanostrukturiertes Silizium,
- Polymere.

In kommerziell umgesetzten thermoelektrischen Generatoren werden ZT-Werte von ca. 1 erreicht, was u. a. auch aufgrund verbesserungswürdiger Kontaktsysteme zu Gesamtwirkungsgraden von 2 – 8 % führt. In der Forschung wurden bereits ZT-Werte von bis zu 2,4 erreicht. Für die großflächige Anwendung von TEG sind jedoch höhere Werte (ZT-Werte > 3) notwendig (Freer & Powell 2020; Jouhara et al. 2021).

Jetzige Anwendungen für TEG außerhalb der Luft- und Raumfahrt bauen exklusiv auf Bi_2Te_3 (Champier 2017; Cramer et al. 2018). Für zukünftige thermoelektrische Generatoren kommen zurzeit sehr unterschiedliche Materialien in Betracht, in welchen wiederum viele verschiedene Elemente enthalten sein können. Zusätzlich befindet sich die Mehrzahl der oben genannten Werkstoffe in einem frühen Entwicklungsstadium, so dass nicht abgeschätzt werden kann, welche Rohstoffe für TEG in Zukunft wichtig sein werden. Einige der oben aufgezählten Werkstoffe enthalten Elemente, die als potenziell rohstoffkritisch angesehen werden (Te, Sn, Co, In, Ga, Er, Ru, Hf). Sowohl Toxizität (z. B. Pb) als auch potenzielle Begrenzungen durch Rohstoffverfügbarkeit (z. B. Te) sind derzeit ein wichtiges Thema in der Forschung zu thermoelektrischen Materialien (Jouhara et al. 2021; Ying et al. 2021).

3.3.1.3 Foresight industrielle Nutzung

Die Nutzung von thermoelektrischen Generatoren in potenzielle Massenmärkte wie die Automobilbranche ist technisch möglich (HEATRECAR Consortium 2013). Momentan erreichen kommerziell eingesetzte TEG auf Basis von Bi_2Te_3 reale Wirkungsgrade von 2 – 8 %. Daraus ergeben sich Kosten von ca. 3 – 8 €/W. Dabei sind die Kosten für das thermoelektrische Material signifikant, z. B. 20 % bei Bismuttellurid (HEATRECAR Consortium 2013). Als konkurrenzfähig werden die thermoelektrischen Generatoren ab Kosten von ca. 1 €/W eingeschätzt (Wietschel et al. 2010), wobei höhere (bis zu 3 €/W) oder niedrigere (ab 0,5 €/W) je nach Anwendung genannt werden (HEATRECAR Consortium 2013). Laut König et al. (2015) könnte der Preis für TEG-erzeugten Strom durch Skaleneffekte und Leistungssteigerungen (Material-, Modul und Generatorverbesserungen, Materialeinsparungen) auf ca. 0,5 USD/W gesenkt werden. Verschiedene Forschungsprojekte und Demonstratoren haben die technische Umsetzbarkeit gezeigt (HEATRECAR Consortium 2013; z. B., Champier 2017). Allerdings ist der erhoffte Durchbruch in der Abwärmenutzung von Fahrzeugen in den letzten Jahren nicht gekommen. Das Thema wird in der Forschung weiter vorangetrieben, wird jedoch von der Entwicklung neuer thermoelektrischer Materialien abhängen (Cramer et al. 2018; Beretta et al. 2019; Freer & Powell 2020). Das Zeitfenster für die Anwendung thermoelektrischer Generatoren im Fahrzeugbau hängt ebenfalls stark mit der Nutzung von Verbrennungsmotoren zusammen, die derzeit durch Elektroantriebe nach und nach ersetzt werden.

Anwendungen in industriellen Anlagen umfassen sowohl die direkte Verstromung von Abwärme (z. B. aus der Stahlherstellung, Kuroki et al. 2015) als auch als Stromquelle für Sensoren und Aktoren. Beides ist möglich und wurde bereits demonstriert, jedoch deutet die Produktpalette der TEG-Hersteller darauf hin, dass letzteres die größere kommerzielle Relevanz hat (EnOcean 2021; TEC Microsystems 2021; z. B. TEGnology 2021). Anwendungen in der Mess- und Regeltechnik sind auch im Gebäudebereich relevant und werden bereits kommerziell vertrieben (EnOcean 2020). Allerdings bleibt dieser Anwendungsbereich eine Nische, denn die Stromversorgung kleinerer Sensoren und Aktoren kann i. d. R. auch durch Stromleitung oder Batterien erfolgen. In Fällen, in denen dies unpraktisch ist (z. B. wegen häufigem Batteriewechsel), können TEG trotz der höheren Kosten ihre Vorteile entfalten und eingesetzt werden (Perpetua 2021).

Um für zukünftige Massenanwendungen tauglich zu sein, müssen die vielversprechenden ZT-Werte der momentan im Labor untersuchten thermoelektrischen Materialien auch in der Praxis realisiert werden. Neben diesen Materialien gilt es auch, den gesamten Modul- und Generatoraufbau zu optimieren. Daneben können thermoelektrische Generatoren in Kraftwerken, Fertigungseinrichtungen und Rechenzentren Verwendung finden. Entscheidend ist dabei, ob es zum Temperaturniveau der jeweiligen Anlage passende TEG gibt. Bei vielen Industrieanlagen ist eine großflächige Anordnung der TEG potenziell gut zur Abwärmenutzung geeignet.

Auch Endverbraucheranwendungen (TEG-angetriebene Kochsensoren zur Energieeinsparung, körperwärmeangetriebene Uhren und Smartphones, Kleidung mit Sensoren zur Überwachung von Körperfunktionen, etc.) werden als zukünftige Einsatzgebiete von TEG diskutiert. Flexible Substrate werden derzeit erforscht (Du et al. 2018; Wang et al. 2019; Fan et al. 2021).

3.3.1.4 Foresight Rohstoffbedarf

Thermoelektrische Generatoren haben großes Potenzial in verschiedenen Anwendungssegmenten. Der ursprünglich im Kraftfahrzeugbereich erwartete Markt durch Nutzung der Abwärme aus Verbrennungsmotoren ist aufgrund der Verkehrswende verschwunden. Gegenwärtig stellt der Bereich Mess- und Regelungstechnik eine attraktive Nische dar (auf Bi_2Te_3-Basis), die jedoch für ihre weitere Ausbreitung auf neue Materialien angewiesen ist. Obwohl thermoelektrische Anwendungen ca. 30 % der Te-Nachfrage darstellen (Europäische Kommission 2020a), handelt es sich hier v. a. um Peltier-Kühlelemente (z. B. zur Kühlung von PCR-Geräten zur Gensequenzierung) oder Digitalkameras für Spezialanwendungen (Gärtner et al. 2003; vgl. Selenium-Tellurium Development Association 2021) und nicht um TEG. Die Nutzung in der Raumfahrt bleibt ebenfalls bestehen, aber der Rohstoffbedarf hierfür ist gering. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums und der verschiedenen konkurrierenden Materialsysteme der nächsten Generation kann der Rohstoffbedarf 2040 nicht seriös abgeschätzt werden.

3.3.1.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Obwohl das Recycling grundsätzlich möglich ist, wird es desto aufwändiger sein, je komplexer die chemische Zusammensetzung der thermoelektrischen Materialien ist. Die oben genannten Materialien können sich gegenseitig substituieren.

3.3.2 Dünnschicht-Photovoltaik

3.3.2.1 Technologiebeschreibung

Dünnschichttechnologien bezeichnen Verfahren, bei denen feste Stoffen im Mikro- bzw. Nanometerbereich bis hin zu monomolekularen Schichten, aufgetragen werden. Diese Stoffe weisen ein physikalisches Verhalten (Festigkeit, optische Eigenschaften, elektrische Leitfähigkeit usw.) auf, das vom massiven Körper aus demselben Material abweicht. Dünnschichttechnologien umfassen nicht nur das Auftragungsverfahren selbst, sondern auch die anschließende Bearbeitung bzw. Strukturierung der aufgebrachten Schichten.

Als Oberflächentechnik hat sich die Dünnschichttechnologie in vielen industriellen Bereichen zu einer zukunftsweisenden Schlüsseltechnologie entwickelt. Von daher ist die Dünnschichttechnik als Querschnitttechnologie aufzufassen. Die folgende Abbildung gibt einen groben Überblick über die Differenzierung der verschiedenen Dünnschichttechnologien und ihre beispielhafte Anwendung in der Photovoltaik (PV).

In Abgrenzung zu den Massivzellen der kristallinen Silizium-Wafer-Technologie ist bei Dünnschicht-PV das photovoltaisch aktive Material auf einem Träger (Substrat) aufgebracht. Während das Substrat für die mechanische Stabilität sorgt, richtet sich die Dicke des photovoltaischen Materials danach, dass möglichst viel Licht absorbiert wird. Der Aufbau einer Dünnschichtzelle besteht im einfachsten Falle aus Substrat, Elektrode, Halbleiter I, Halbleiter II und Elektrode. Mindestens eine Elektrodenschicht muss dabei durchsichtig sein.

Bei Dünnschichtzellen gibt es eine Vielzahl von photovoltaisch aktiven Materialien. Zudem werden für die Ladungstrennung nicht nur p-n-Über-

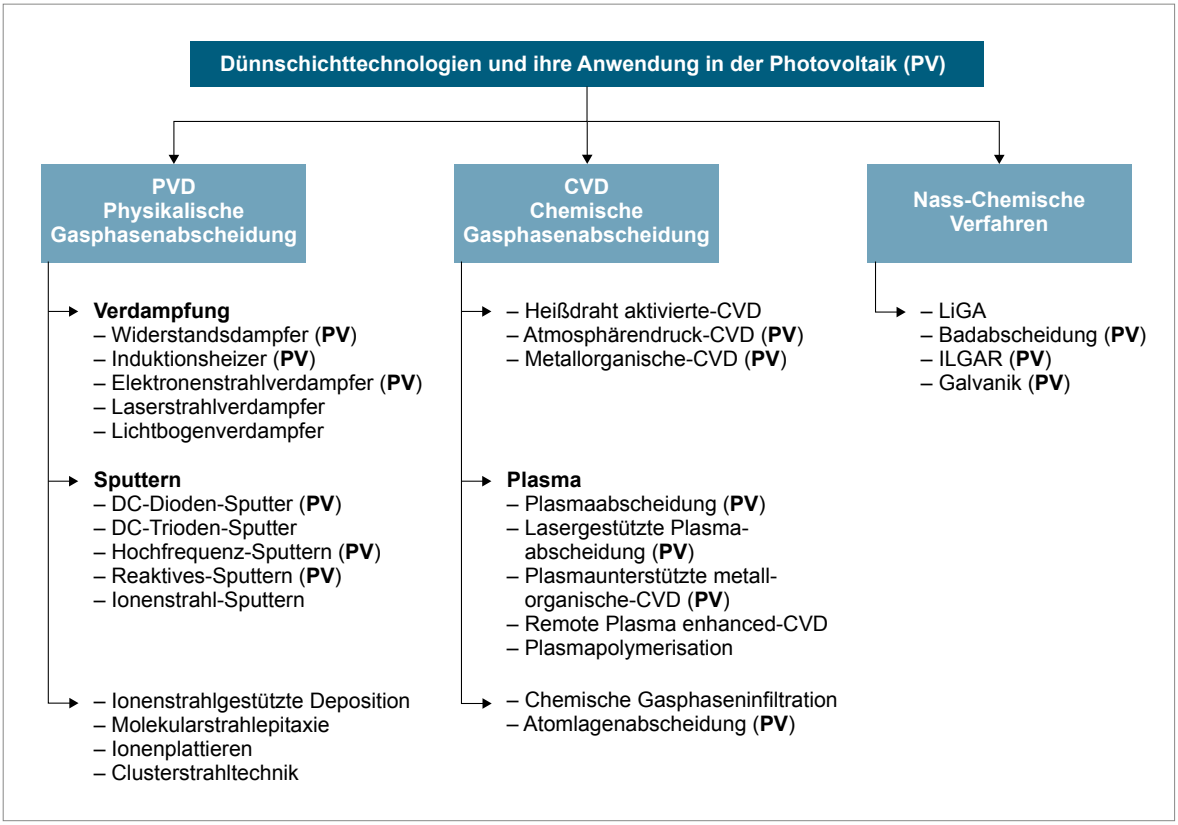


Abb. 3.54: Überblick über die verschiedenen Dünnschichttechnologien (Quelle: Eigene Darstellung basierend auf Chen et al. 1996 und Kamalasanan 1996)

gänge verwendet, sondern auch Heteroübergänge zwischen den verschiedenen Halbleitern. Als Heteroübergang (auch Heterostruktur, engl. Heterojunction) wird die Grenzschicht zweier unterschiedlicher, nicht ideal leitender Materialien (Halbleitermaterialien) bezeichnet. Anders als bei einem p-n-Übergang ist hier nicht die Dotierungsart, sondern die Materialart verschieden. Die Halbleiter besitzen deshalb i. A. eine unterschiedliche Energie der Bandlücke. Heteroübergänge finden sich bei III-V-Halbleitern oder bei II-VI-Halbleitern Folgende Varianten lassen sich unterscheiden:

- Amorphes Silizium (a-Si) mit p-n-Übergang oder mit Heteroübergang zu a-Si:C,
- Kristallines Si mit p-n-Übergang,
- CdTe mit Heteroübergang zu CdS,
- $CuInSe_2$ (In wird z. T. durch Ga und Se durch S ersetzt) mit Heteroübergang zu CdS (CIS) und
- GaAs mit p-n-Übergang oder mit Heteroübergang.

Innerhalb der Photovoltaik werden den Dünnschichttechnologien seit langem größere Potenziale zugeschrieben. Zurzeit dominieren zwar Solarzellen aus Siliziumwafern im Jahr 2018 mit fast 96 % der ausgelieferten Module den photovoltaischen Markt, allerdings besitzen Dünnschichtzellen technologische Vorteile (Fraunhofer ISE 2020). Zu den genuinen Vorteilen zählen insbesondere die geringen Material- und Energieintensitäten bei der Produktion und die sich daraus ergebenden Kostenvorteile. Ein weiterer Vorteil ist die relativ beliebige Zellgröße. Während man bei Massivzellen bei der Größe auf die Wafergröße und damit auf ca. 21 cm beschränkt ist (Modulgröße M12), hat man bei Dünnschichtsolarzellen die Möglichkeit zur großflächigen Herstellung, die nur durch die Größe der Beschichtungseinrichtung limitiert ist. Außerdem sind die vielfältigen Möglichkeiten im Bereich der Substratmaterialien von Vorteil, bis hin zu Roll-to-Roll-Verfahren sowie die Herstellung transparenter Zellen, die besonders für die Gebäudeintegration geeignet sind.

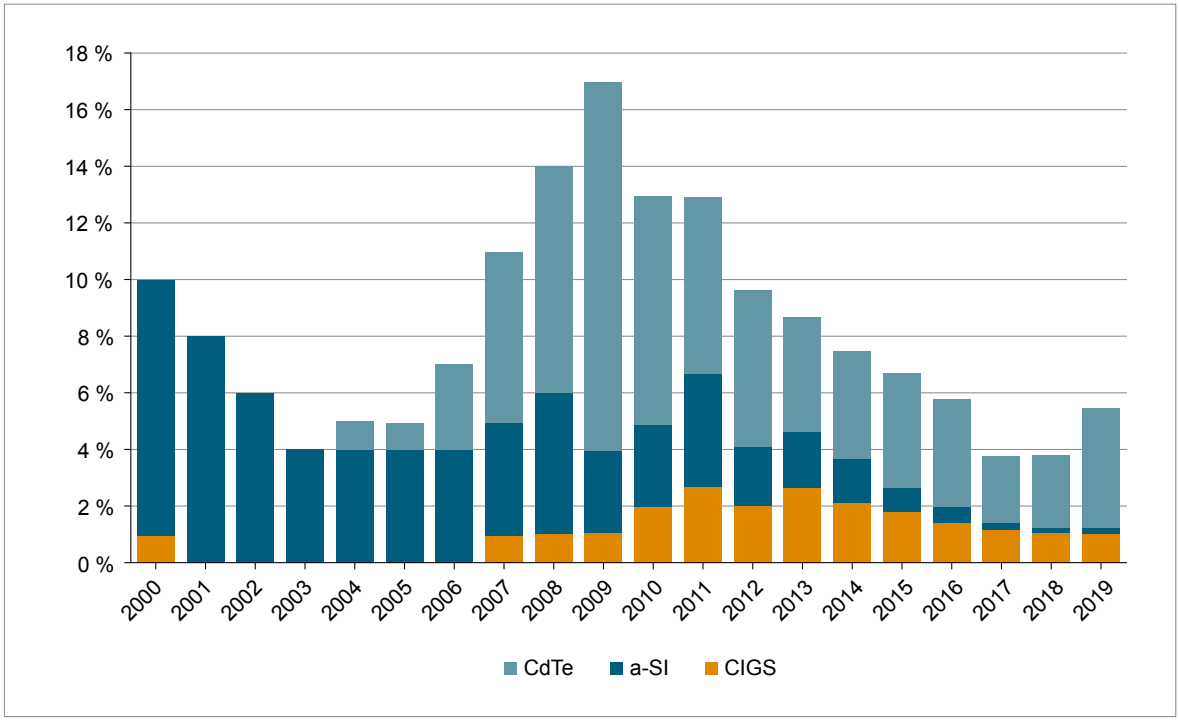


Abb. 3.55: Marktanteil der verschiedenen Dünnschicht-Zelltypen am gesamten PV-Markt (hellblau: CdTe; dunkelblau a-SI; orange: CIGS) mit einer globalen PV Gesamtproduktion von 102 GWp im Jahr 2018 (Quellen: Fraunhofer ISE 2020; Statista 2021b)

Die Vorteile der Dünnschichtzellen können auch als Nachteile betrachtet werden. Der Markt ist dadurch sehr heterogen und Herstellungsverfahren und Modulgrößen nicht angeglichen, wie bei den klassischen PV-Anlagen. Dies könnte sich einschränkend auf die kommende Marktentwicklung der Dünnschichttechnologie auswirken (Von Ardenne GmbH 2020). Die Dünnschicht-Zelltypen CdTe, CI(G)S und a-Si haben einen Marktanteil am gesamten PV-Markt von zusammen rund 4 % im Jahr 2018 (Fraunhofer ISE 2020), s. Abb. 3.55.

Im Folgenden werden die Dünnschicht-Technologien im Einzelnen beschrieben.

3.3.2.1.1 Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium (a-Si)

Der Aufbau einer klassischen Dünnschicht-PV-Zelle aus amorphem Silizium (a-Si) unterscheidet sich dahingehend von dem der kristallinen Solarzelle, dass die Siliziumschicht viel dünner ist und zwischen dem p- und dem n-leitenden Silizium eine intrinsische Siliziumschicht zwischengeschaltet ist, die als Absorber dient. Zellen aus amorphem Silizium können so dünn sein, weil der Absorptionskoeffizient für Licht viel größer als beim kristallinen Silizium ist. Als Substrat wird Glas verwendet, durch das auch die Beleuchtung erfolgt. Die aktuellen und konventionellen a-Si-Zellen bzw. Module besitzen, wie in Abb. 3.56 in

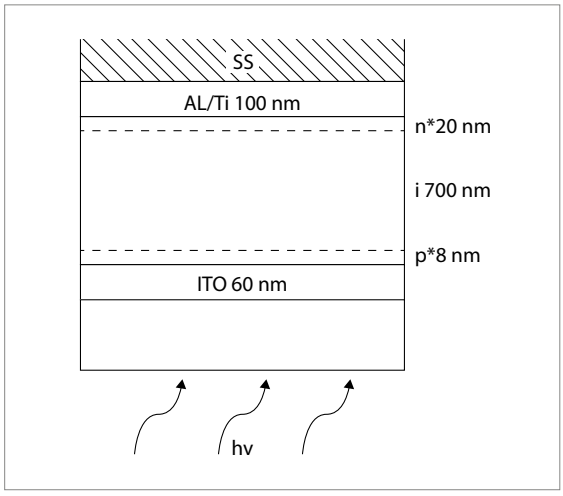


Abb. 3.56: Aufbau einer Solarzelle aus amorphem Silizium (Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an Falk 2006)

der Substratkonfiguration dargestellt, meist ZnO oder Aluminium dotiertes ZnO (AZO) als TCO (Transparent Conductive Oxide), anstatt des damals eingesetzten Indiumzinnoxid (ITO). Durch die Nutzung von Basismetallen unterliegt die Produktion von a-Si-Zellen geringeren Preisrisiken (Kowsar et al. 2019).

Eine wesentliche Eigenart von a-Si-Zellen ist die Degradation unter Lichteinfluss („Staebler-Wronski-Effekt"). Demzufolge sinkt der Wirkungsgrad nach einigen Stunden bis Tagen Bestrahlung dauerhaft um absolut 2 bis 3 %. Der Wirkungsgrad von 1 cm^2 Laborzellen liegt unstabilisiert bei 13,4 % (Kowsar et al. 2019) und stabilisiert bei 9,5 %. Kommerzielle Module erreichen stabilisiert ca. 7,5 % Wirkungsgrad (Mahmoudi et al. 2019). Die Tendenz geht dahin, Tandem- oder Stapelzellen zu entwickeln, bei denen mehrere Zellen mit verschiedener Bandlücke hintereinandergeschaltet werden. Zellen aus amorphem Silizium werden insbesondere für kleinere Leistungen eingesetzt, z. B. die Versorgung von Taschenrechnern. In diesem Leistungssegment beherrschen a-Si-Zellen den Markt völlig. Für höhere Leistungen werden sie dagegen kaum eingesetzt. Aufgrund des sehr geringen Energiebedarfs bei der Herstellung von a-Si-Zellen ist deren energetische Amortisationszeit trotz des geringen Wirkungsgrades mit ca. einem Jahr lediglich halb so groß wie bei kristallinen Zellen.

3.3.2.1.2 Dünnschichtzellen aus kristallinem Silizium

Mit der Entwicklung von Dünnschichtzellen aus kristallinen Zellen ist das Motiv verbunden, sie sowohl so kostengünstig herzustellen wie Zellen aus amorphem Silizium als auch die Wirkungsgrade der polykristallinen Massivzellen zu erreichen. Damit ließen sich die Vorteile der beiden konventionellen Zelltypen aus Silizium vereinigen und die jeweiligen Nachteile ausschließen.

Wesentliche Herausforderung dieser Technologie ist die Frage nach der richtigen Korngröße sowie der erforderlichen Schichtdicke. Dabei sind zwei Entwicklungsstrategien zu unterscheiden: Die eine versucht große Körner herzustellen, die andere die Rekombination an den Korngrenzen kleiner Körner durch Passivieren (meist durch Absättigen mit Wasserstoff) zu verringern.

Für die Zellen wird Glas als Substrat eingesetzt. Sie haben meist einen Aufbau wie die Zellen aus amorphem Silizium. Als Elektrode wird auf der einen Seite TCO, auf der anderen eine Metallschicht, meist Aluminium, verwendet. Die Schichtdicke ist mit einigen µm relativ gering, da der effektive Absorptionskoeffizient, insbesondere aufgrund des amorphen Materials zwischen den Körnern, in diesem Material hoch ist und die Streuung an den kleinen Körnern den Lichtweg verlängert. Zellen dieser Art erreichten bereits einen Wirkungsgrad von bis zu 13,4 % (Kowsar et al. 2019).

3.3.2.1.3 Galliumarsenid-Zellen (GaAs)

Galliumarsenid ist ein ideales Material für Solarzellen. Seine Energielücke ist optimal für Sonnenlicht, und als direkter Halbleiter absorbiert GaAs das Licht schon in wenigen µm Schichtdicken vollständig. Die Kristallzüchtung von Galliumarsenid ist trotz ständig verbesserter Verfahren jedoch technisch aufwändig. Anwendung finden die GaAs-Module in der Raumfahrt zur Energieerzeugung für Satelliten, da sie zum einen eine

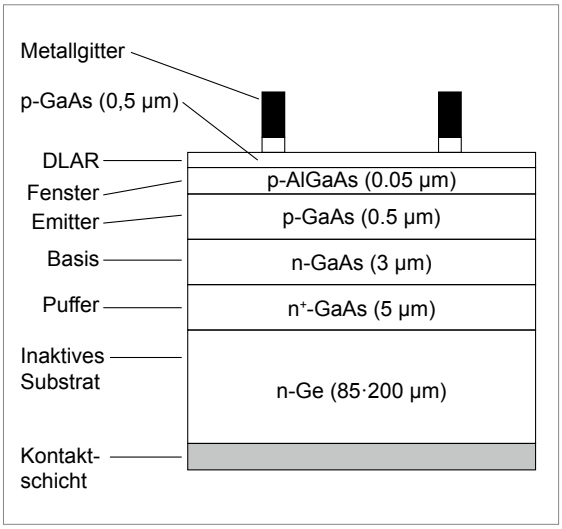


Abb. 3.57: Aufbau einer GaAs-Zelle (Quelle: Eigene Darstellung angelehnt an Falk 2006)

Anmerkung: DLAR sind Anti-Reflexionsschichten, die bei hocheffizienter multi-junction GaAs-Technologie zum Einsatz kommen, z. B. auf Basis von TiO2/MgF2 oder ZnS/MgF2. Neben den hier genannten Varianten gibt es noch zahlreiche weitere Kombinationen wie Galliumindiumphosphid, (Ga, In), P/Galliumarsenid oder GaAs/Germanium.

besondere Resistenz gegenüber kosmischer Strahlung besitzen und zum anderen eine hohe Effizienz aufweisen. Heutige GaAs-Zellen sind kristalline Dünnschichtzellen, die im Labor auf 4 cm^2 Wirkungsgrade von 30 % und mehr erreichen. Polykristalline GaAs-Zellen sind deutlich schlechter, da sich die Korngrenzen von GaAs nicht so leicht passivieren lassen wie in Silizium und daher eine hohe Oberflächenrekombination auftritt. Die günstigste Variante sind kristalline GaAs-Dünnschichten auf einkristallinem Germanium-Wafern, wo aufgrund der ähnlichen Gitterkonstanten Epitaxie möglich ist. Die Dotierung erfolgt mit Zn(p) oder Te(n), die als Äthyl-Verbindungen gasförmig zugesetzt werden.

3.3.2.1.4 Kadmiumtellurid-Zellen (CdTe)

Kadmiumtellurid ist ein direkter Halbleiter mit einer vorteilhaften Bandlücke und einem hohen Absorptionskoeffizienten. Der Vorteil der CdTe-Zellen besteht in ihrer geringeren Temperaturempfindlichkeit sowie in ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber diffuser Solarstrahlung.

In früheren CdTe Konfigurationen wurde eine CdS Grenzfläche mittels Vakuum Gasphasenabscheidung sowie eine CdTe Schicht mittels chemischer Gasphasenabscheidung auf das Molybdän-Substrat abgeschieden. Anstelle einer Substratkonfiguration kommen in modernen CdTe-Zellen Superstratkonfigurationen zum Einsatz. Mittlerweile fungiert die TCO-Schicht jedoch als Fenster und CdS wird als Pufferschicht eingesetzt. SnO_2, In_2O_3: Sn, ZnO, Cd_2SnO_4 werden häufig als TCO in der Literatur verwendet. Das TCO dient als Frontkontakt und seitlicher Leiter. Die CdS-Fensterschicht kann durch Nass-Chemische Badeabscheidung, Sputtern und Closed-Space-Sublimation Prozess (CSS) aufgetragen werden. Oft wird die CdTe-Absorberschicht durch CSS auf das Glassubstrat abgeschieden und daraufhin durch CSS mit $CdCl_2$-Dampf behandelt. Durch $CdCl_2$-Behandlung wird die Korngröße erhöht, was zu einer signifikanten Effizienzerhöhung führt (Kowsar et al. 2019).

Für die Akzeptanz der CdTe-Zellen ist der Kadmiumgehalt ungünstig. Aufgrund der Toxizität von Kadmium ist dessen Substitution Gegenstand intensiver Forschung. Allerdings ist das Schwermetall Kadmium in einer CdTe-Zelle relativ immobil. Gleichwohl ist die Mobilisierung von Kadmium bei extrem-Situationen wie Gebäudebrand möglich. Ferner liegen toxische Risiken bei der Modul-Herstellung und beim Recycling von Altmodulen vor.

Eine typische CdTe-Solarzelle besteht aus fünf Einzelschichten: einer ca. < 2 µm dicken CdTe-Absorberschicht, einer ca. 100 nm dicken CdS-Zwischenschicht sowie zwei 20 bzw. 100 nm dicken Tellur- und Antimontellurid (Sb_2Te_3)-Schichten. Abb. 3.58 stellt den Aufbau einer CdTe-Zelle schematisch dar.

3.3.2.1.5 CIGS-PV

CIS (Kupfer-Indium-Diselenid bzw. Disulfid) oder auch CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid bzw. Disulfid) ist eine photovoltaische Dünnschichtzelle auf Basis von Chalcopyrit Verbindungshalbleitern (Cu(In, Ga)(Se, $S)_2$). Der prin-

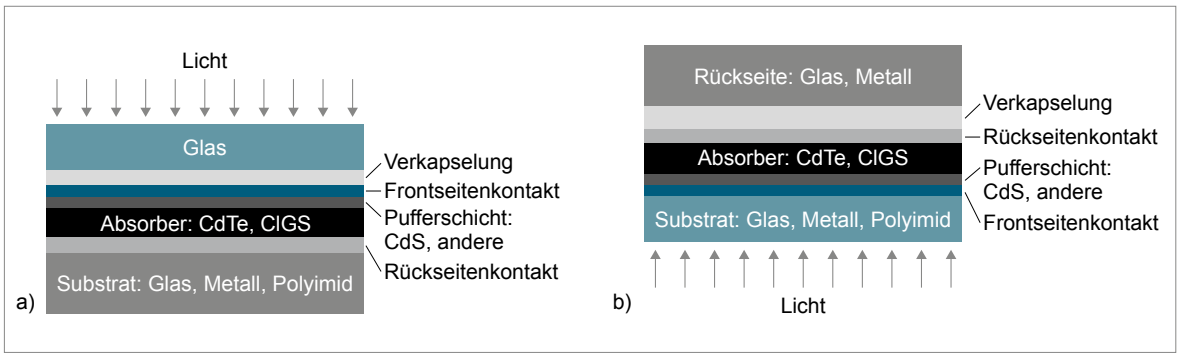


Abb. 3.58: a) Substrat- und b) Superstrat-Aufbau von Chalcogenid-Solarzellen (CdTe, CIGS) (Quelle: Marwede 2013)

zipielle Aufbau einer klassischen CIS-Solarzelle wird in Abb. 3.58 gezeigt.

In der Regel erfolgt der Zellaufbau auf Molybdän beschichteten Glassubstraten. Die Molybdänschicht übernimmt dabei die Funktion des Rückkontaktes. Die Molybdänschicht bewirkt darüber hinaus, dass unabsorbiertes Licht zurück in die Absorberschicht reflektiert wird. Die Grenzfläche zwischen der p-leitenden Cu(In, Ga)Se_2- oder $CuInS_2$-Schicht und der schwach n-leitenden Schicht aus CdS oder ZnS stellt den Heteroübergang dar. CdS ist durchsichtig und dient als Fenster. Darauf befindet sich die transparente zweite Elektrode als Frontkontakt. Die Funktion des Frontkontaktes wird durch transparentes, n-leitendes ZnO übernommen.

Beim Herstellungsprozess wird die Molybdänschicht auf das Substrat durch Kathodenzerstäubungsverfahren (Sputtern) abgeschieden. Auf die Molybdänschicht wird die p-dotierte CIGS Absorberschicht aufgetragen. Beim momentanen Stand der Technik für hocheffiziente CIGS-Solarzellen wird diese Schicht mittels physikalischer Gasphasenabscheidung bei hohen Temperaturen aufgetragen (~600 °C) und weiterhin in einem zweistufigen Prozess, z. B. Sputtern gefolgt von einer Selenisierung mittels Se Dampf oder H_2Se Gas fortgeführt (Kowsar et al. 2019). Sowohl der Frontkontakt aus ZnO als auch der Rückkontakt aus Molybdän werden gesputtert.

3.3.2.1.6 Sonstige Dünnschichtzellen

Neben den hier aufgeführten Zellen gibt es noch weitere Zelltypen, die ebenfalls zur Dünnschichtfamilie zählen. Zu erwähnen sind hierbei insbesondere die organischen Solarzellen. Motivation bei der Entwicklung dieses Zelltyps ist die Nutzung deutlich kostengünstigerer Materialien und Fertigungsverfahren, wobei teilweise auch teure Rohstoffe wie Platin und Ruthenium zum Einsatz kommen. Allerdings sind die Wirkungsgrade bisher sehr gering und die Lebensdauer ist mit zurzeit ca. 5.000 Stunden zudem recht kurz. Es gibt noch keine kommerziell erhältlichen Zellen oder Module mit dieser Technologie. Ein Beispiel für diesen Zelltyp ist die Farbstoffzelle (DSSC). Dieser, auch „Grätzel-Zelle“ genannte Zell-Typ, nutzt ähnlich wie in der Photosynthese, organische Farbstoffe zur Umwandlung von Licht in elektrische Energie. Die Zellen sind meistens lila und liefern den besten Wirkungsgrad aller organischen Solarzellen von über 15 %, haben jedoch aufgrund aggressiver Elektrolyte ebenfalls eine begrenzte Lebensdauer. Jüngste Forschung bezüglich Polymere oder Metallfolien anstelle eines Glassubstrats könnten der DSSC-Zellen zukünftig in Richtung eines kommerziellen Durchbruchs verhelfen (Kowsar et al. 2019).

Eine weitere Dünnschichttechnologie der vergangenen Jahre, welche enorme Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat, sind Perowskit-Solarzellen (PSC). Mit anfänglichen Wirkungsgraden von ca. 10 % und 500 h stabiler Funktionsdauer sind diese noch nicht wettbewerbsfähig. Aufgrund ihrer photoelektrischen Eigenschaften, zu welchen mitunter ein hoher Absorptionskoeffizient, lange Trägerdiffusionslänge und einer geringen Exzitonen-Bindungsenergie zählen, stellen Perowskit-Solarzellen einen idealen Kandidaten für lichtabsorbierende Materialien dar. Mittlerweile sind Zellen im Labormaßstab mit 25,2 % Wirkungsgrad hergestellt worden (Zhang & Park 2020). Darüber hinaus wurde den Perowskit-Solarzellen in einer Ökoblianz aus mehreren aufkommenden Dünnschichttechnologien die größte Nachhaltigkeit zugestanden (Gok 2020).

3.3.2.2 Rohstoffinhalt

Im Weiteren werden nur die Technologien CI(G)S und CdTe betrachtet, weil sie seit mehreren Jahren kommerziell verfügbar sind und auf wichtige Rohstoffe angewiesen sind. Darüber hinaus stellen sie momentan mit 97 % der verkauften Dünnschicht PV-Module die überwiegende Mehrheit des Marktes dar (Fraunhofer ISE 2020). Die grobe Zusammensetzung von CdTe- bzw. CIGS-Dünnschichtmodulen ist in Abb. 3.59 dargestellt.

Abb. 3.59 veranschaulicht die Dominanz von Glas und Rahmenkonstruktion. Der Gehalt an Halbleiterverbindungen, die unter „Dünnschichtelemente“ subsumiert wurden, ist dagegen relativ gering. Insbesondere bei den Sputterprozessen gelangt nur ein Teil des eingesetzten Targetmaterials auf das Substrat. Ein Teil wird nicht abgetragen und bleibt auf dem Target, welches dem Recycling zugeführt wird. Ein anderer Teil des eingesetzten Targetmaterials schlägt sich auf

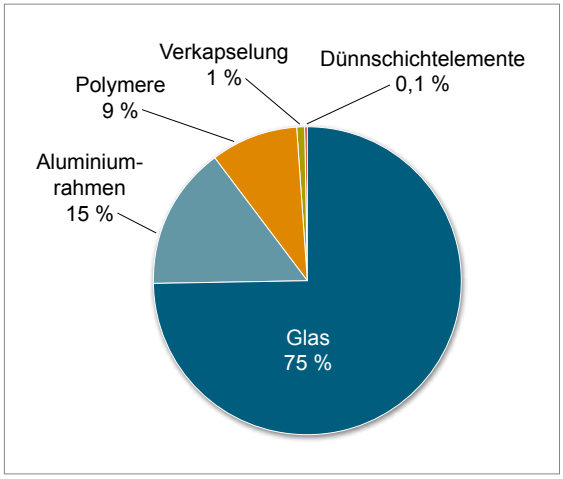


Abb. 3.59: Zusammensetzung eines Dünnschicht PV-Moduls (Quelle: SANDER et al. 2007)

den Kammerwänden bzw. Blenden nieder, was zum Teil auch recycelt werden kann. Somit ist u. a. beim Sputtern die Substratgröße ausschlaggebend für die Materialeffizienz. Da beim Sputtern pauschal über den Substratrand (ca. 0,15 m) hinaus Material zerstäubt wird (Overhang), ist demnach das Verhältnis zwischen Overhang zu Substratgröße bestimmend, wie viel vom eingesetzten Material tatsächlich auf dem Substrat endet. Eine breitere Substratgröße würde dieses Verhältnis verbessern. Allerdings sind bezüglich der zu besputternden Substratgröße technische Grenzen gesetzt (VON ARDENNE GMBH 2020).

Schließlich ist noch zu beachten, dass bei einigen PV-Zellen die Frontelektrode statt aus ZnO als ITO-Schicht ausgeführt wird, was in diesen Fällen eine weitere Indium-nutzende Komponente darstellt. MARWEDE & RELLER (2014) entwickelten Szenarien für Materialeffizienz entlang des Lebenszyklus' beider Dünnschichttechnologien. Sie betrachteten auch Materialverluste während der Beschichtung bzw. durch Ausschussware und das Recycling dieser Verluste. Die Materialnutzung der Produktion wird dabei definiert als produktspezifischer Rohstoffbedarf durch den Rohstoffeinsatz für die Produktion minus des recycelten Materials aus Produktionsabfällen. Das heißt, es erfolgt eine Gutschrift für das recycelte Material. Aus den berechneten Materialnutzungseffizienzen lässt sich ableiten, um wieviel mehr der Rohstoffbedarf für die Produktion den eigentlichen Materialinhalt der Module übersteigt.

Der produktspezifische Rohstoffinhalt pro Wp ist abhängig von der Schichtdicke, der stöchiometrischen Zusammensetzung der Schichten, des Wirkungsgrades der Solarzelle sowie der Materialeffizienz. Für die Solarkonstante wurde ein Wert von 1.000 W/m² angenommen. Die Berechnungen wurden mittels unten stehender Formel vorgenommen.

Der Wirkungsgrad bestimmt, wie viel Quadratmeter Fläche pro Watt Nennleistung benötigt wird. Hierbei können kleinflächige CIGS-Module (841 cm²) mittlerweile 19 % erreichen, wie von Solar Frontier bewiesen wurde. Für größere Module von MiaSolé, welche auf einer Fläche von 9703 cm² hergestellt werden, können hier Werte von 15 % erreicht werden. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Stabilität der Module vergleichbar, wenn nicht sogar höher als in c-Si-Modulen ist (SHAH 2020). Für die aktuellen Berechnungen für CIGS im Jahr 2019 wird demnach mit einer Moduleffizienz von 17 % gearbeitet. Hingegen kann der Wirkungsgrad fertiger CdTe-Module 18 % (von First Solar mit einer Fläche von

$$W_{p,x} = \frac{\rho_{A,x}}{\sigma \cdot \eta_M \cdot \eta_{MNE}}$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
$W_{p,x}$	Produktspezifischer Rohstoffinhalt des Elementes x in Abh. der Leistung	t/GW
$\rho_{A,x}$	Massenbelegung des Elementes x in Abh. der Schichtdicke und des stöchiometrischen Vorkommens	g/m²
σ	Solarkonstante	GW/m²
η_M	Moduleffizienz	%
η_{MNE}	Produktionsspezifische Material-Netto-Effizienz	%

7.038 cm²) (Shah 2020) bis hin zu 19 % (Fraunhofer ISE 2020) überschreiten. In der Vergangenheit gab es Probleme mit der Beständigkeit der Solarzelleneffizienz; dies war mit der Diffusion von Kupfer verbunden, welches notwendig ist, um einen geeigneten Rückkontakt bereitzustellen. Jedoch wurde in den letzten Jahren durch die Einbettung von Kupfer in eine ZnTe-Schicht dieses Problem praktisch gelöst, was bei der hohen Zuverlässigkeit von First Solar Modulen zu beobachten ist (Shah 2020). Daher wird ebenfalls für jetzige Berechnungen des Jahres 2019 mit einem Wirkungsgrad von 19 % ausgegangen.

Derzeitige Materialeffizienzen bei gängigen Herstellungsprozessen liegen bei 70 %. Zur Ermittlung diese Wertes wurden sowohl persönliche Mitteilungen als auch eigene Abschätzungen auf Basis verschiedener Studien (Zuser & Rechberger 2011; Cichy 2017) genutzt. In diesem Wert sind Materialwiederverwertungsraten durch Rückgewinnung von Herstellungsabfällen nicht enthalten. Daher wurde, angelehnt an die Forschungsergebnisse von Marwede & Reller (2014), eine Nettomaterialeffizienz von 80 % für das Jahr 2018 für die Berechnung verwendet. Für das Jahr 2040 werden für das SSP1 Szenario 95 % und für das SSP2 Szenario 90 % Nettomaterialeffizienz angenommen.

Da für die Absorberschichtdicken ebenfalls eine hohe Variation zwischen den Herstellern und Herstellungsverfahren existiert, wurde eine lineare Abnahme der Schichtdicken für CIGS (1,4 µm) und CdTe (1,7 µm) im Jahr 2018 aus dem Vorgängerbericht übernommen. Für die schnelle und langsame Entwicklung der beiden Modelle im Jahr 2040 wurden die Werte aus dem Vorgängerbericht für das Jahr 2035 von 0,5 µm und 1,0 µm erneut verwendet. Dies liegt an der enormen Unsicherheit einer Prognose über einen so langen Zeitraum. Diese Zahlen widersprechen der bisherigen Literatur, z. B. der umfangreichen Recherche von Cichy (2017), welcher für das Jahr 2040 eine Schichtdicke von 0,8 µm prognostizierte. Allerdings wird bereits jetzt im Rahmen des EU-Forschungsprojekts ARCIGS-M mit CIGS Absorberschichtdicken von 0,5 µm geforscht. Diese Zahlen werden mittels einer Silberschicht anstatt einer Molybdänschicht realisiert, da diese nicht absorbiertes Licht wieder in die Absorberschicht schickt und eine vollständigere Absorption des Sonnenlichts stattfindet (Europäische Union 2020). Ebenso berichtet Diermann (2019) im PV-Magazine, dass ähnliche Forschung auch auf CdTe übertragbar ist. Hierbei kommt ebenfalls ein nanostrukturierter Rückspiegel zum Einsatz, mit dem Ziel, Licht länger in der Halbleiterschicht zu behalten.

Aus den oben genannten Daten lassen sich Parameter zur Berechnung des produktionsspezifischen Rohstoffbedarfs im Jahr 2018 ableiten. Diese sind die Ausgangspunkte für zwei unterschiedliche Technologieszenarien für das Jahr 2040 entwickeln (siehe Tab. 3.52).

Tab. 3.52: Produktionsspezifischer Rohstoffbedarf abhängig von Absorberschichtdicke, Wirkungsgrad und Materialineffizienz

	2018		2040			
			SSP1 Nachhaltigkeit		SSP2 Mittelweg	
	CIGS	CdTe	CIGS	CdTe	CIGS	CdTe
Absorberschichtdicke	1,4 µm	1,7 µm	0,5 µm	0,5 µm	1 µm	1 µm
Wirkungsgrad	17 %	19 %	25 %	25 %	21 %	22 %
Materialeffizienz	80 %		95 %		90 %	
Rohstoffbedarf [t/GWp]	Cu: 11,3 In: 14,3 Ga: 3,8 Se: 27,8	Cd: 27,5 Te: 31,3	Cu: 2,5 In: 2,9 Ga: 0,8 Se: 5,9	Cd: 5,9 Te: 6,7	Cu: 6,1 In: 7,8 Ga: 2,2 Se: 15,6	Cd: 15,0 Te: 17,2

Anmerkung: Stöchiometrie Cu(In0,7Ga0,3)Se2

Die Daten in Tab. 3.52 ergeben sich aus der beispielhaften Betrachtung gängiger Beschichtungsprozesse für CdTe- und CIGS-Module. Insgesamt unterliegen die zellspezifischen Gehalte an Halbleitermaterialien erheblichen Unsicherheiten. Schichtdicken und Beschichtungsverfahren haben einen wesentlichen Einfluss auf den tatsächlichen Bedarf von Halbleitermaterial und variieren von Hersteller zu Hersteller. Ferner unterscheiden sie sich erheblich zwischen Labormaßstab und Pilotanlagen und ändern sich auch während der anschließenden Prozessausweitung hin zur Massenfertigung.

3.3.2.3 Foresight Industrielle Nutzung

Wirksame und wesentliche Nachfrageeffekte der Dünnschicht-Photovoltaik nach hochreinen Halbleitermaterialien hängen entscheidend vom Marktwachstum der Dünnschicht-Photovoltaik ab. Die zukünftige Marktentwicklung der Dünnschicht-Photovoltaik hängt wiederum entscheidend von der Gesamtentwicklung bei der Energienachfrage (u. a. Preisen für fossile Energieträger), der erneuerbaren Energieträger im Besonderen (u. a. Technologieförderung und Vergütungsbedingungen) und der Photovoltaik ganz konkret (u. a. Stand der Dünnschichttechnologie) ab. Für die Vorschau zur industriellen Nutzung werden hier das IMAGE SSP1-19 und MESSAGE-GLOBIOM SSP2-26 Szenario benutzt, vergleiche Kapitel 1.1.1. Im REMIND-MAGPIE SSP5-Baseline wird zwischen den Jahren 2030 – 2040 keine zusätzliche Photovoltaikkapazität installiert (Bauer et al. 2017a).

Im Jahr 2018 betrug die weltweite Solarzellenproduktion 102 GWp (Statista 2021b). Der Marktanteil von CdTe betrug 2,6 % (mit 2,7 GWp), von CIGS 1,1 % (mit 1,2 GWp) (Fraunhofer ISE 2020). Um den zukünftigen Rohstoffbedarf abzuschätzen, wurde angenommen, dass im SSP1-19 beide Technologien im Jahr 2040 je einen Marktanteil von 8 % der jährlich installierten Kapazität von 390 GW_p erreichen. Im SSP2-26 entwickelt sich der Gesamtmarkt und auch der Dünnschichtmarkt langsamer: so wird angenommen, dass jede Technologie einen Marktanteil von 2 % der jährlich installierten Menge (65,7 GW_p) im Jahr 2040 erreicht.

Tab. 3.53 fasst die weltweit jährlich installierte Leistung von PV und den jährlichen Zubau für die vertieft untersuchten Dünnschicht-PV Zelltypen CIGS und CdTe zusammen. Für den Ausbau der GaAs-Zellen, die hauptsächlich für Weltraumanwendungen genutzt werden, konnten keine sinnvollen Projektionen vorgenommen werden.

3.3.2.4 Foresight Rohstoffbedarf

Durch Multiplikation des produktionsspezifischen Rohstoffbedarfs (Tab. 3.52) mit der jährlich installierten Leistung (Tab. 3.53) erhält man den zukünftigen Rohstoffbedarf (Tab. 3.54).

Betrachtet man die Rohstoffbedarfe im Jahr 2018 der einzelnen Absorberschichtmaterialien in Tab. 3.54 im Vergleich zu den letzten Jahren bzw. mit den Zahlen für 2013 in der Vorgängerstudie (Marscheider-Weidemann et al. 2016), haben sich diese reduziert. Dies lässt sich unter Berücksichtigung der Formel für den produktspezifischen Rohstoffinhalt pro Wp auf drei Fortschritte der Dünnschichttechnologien zurückführen. Zum einen haben sich die Wirkungsgrade der CIGS- und CdTe-PV Anlagen deutlich verbessert; dabei wurden im Jahr 2013 für beide Technologien Wirkungsgrade von nur 12 % veranschlagt. Mittlerweile können für gute Module Wirkungsgrade von 17 % (CIGS) und 19 % (CdTe) angenommen werden. Des Weiteren sind mit fortlaufenden Innova-

Tab. 3.53: Jährliche Installation von CdTe- und CIGS-Solarmodulen in Megawatt Peak in den Szenarien SSP1-19 und SSP2-26

Jährliche Installation	2018	2040	
		SSP1-19 Nachhaltigkeit	SSP2-26 Mittelweg
CdTe (MWp)	2.700	31.200	1.300
CIGS (MWp)	1.200	31.200	1.300

Tab. 3.54: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Dünnschicht-PV in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040	
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg
Kupfer	20.591.000 (B) 24.137.000 (R)	14	79	8
Indium	808 (R)	17	92	10
Gallium	413 (R)	5	26	3
Selen	3.677 (R)	33	184	20
Kadmium	26.670 (R)	74	184	20
Tellur	595 (R)	84	210	22

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

tionen die Absorberschichten dünner geworden, was zu einer geringeren Massenbelegung der einzelnen Elemente geführt hat. Außerdem gab es deutliche Fortschritte in den Herstellungsprozessen, was dazu führte, dass heutzutage Materialeffizienzen von 80 % angenommen werden können. Hinzu kommt, dass im direkten Vergleich zur Vorgängerstudie die jährlich installierte Leistung von CIGS und CdTe leicht zurückgegangen ist. Beruft man sich jedoch auf die historischen Daten aus Fraunhofer ISE (2020) ist dies nicht der Fall. Daher wird vermutet, dass die Zahlen für das Jahr 2013 zu hoch angesetzt wurden.

Für die Bedarfsvorschau im SSP1-19 wird im Vergleich zum Durchbruchszenario 2035 eine Verringerung der Rohstoffbedarfe erwartet, wenn auch nur geringfügig. Vergleicht man das SSP2-26-Szenario mit dem damaligen Szenario („Langsamen Entwicklung“ 2035), ist hier eine deutliche Reduktion erkennbar, was an den sehr geringen Verkaufszahlen der Marktprognose im SSP2-26-Szenario liegt.

Für die Abschätzungen für das Jahr 2040 lässt sich jedoch eine gravierende Diskrepanz zwischen den Rohstoffbedarfen beider Szenarien feststellen (Tab. 3.54). Hierbei ist trotz schlechter prognostizierter Absorberschichtdicken, Materialeffizienzen und Wirkungsgrade der „langsamen Entwicklung“ (SSP2-26) die jährlich installierte Leistung ausschlaggebend für den Rohstoffbedarf. Während für das Szenario-Modell SSP2-26 eine jährlich installierte Leistung von 1.300 MWp veranschlagt, beläuft sich die Prognose für die „schnelle Entwicklung“ (SSP1-19) auf 31.200 MWp, was einen Unterschied um den Faktor 24 darstellt. Sämtliche Vorhersagen der Rohstoffbedarfe für das SSP2-26-Modell stellen im Vergleich zum Jahr 2018 einen nahezu gleichbleibenden oder geringeren Bedarf in Relation zur Weltproduktion 2018 dar. Daher wird im Folgenden detaillierter auf die „schnelle Entwicklung“ und die damit verbundenen gesteigerten Rohstoffbedarfe des SSP1-19 Modell eingegangen.

Aufgrund der stark ansteigenden Verkaufszahlen von CdTe für das SSP1-19-Modell im Vergleich der jährlich installierten Leistung des Jahres 2018, steigt die Nachfrage von Tellur in Relation zu der im Jahr 2018 geförderten Menge beträchtlich. Hierbei wurden 14 % der Weltproduktion im Jahr 2018 für CdTe eingesetzt und ein Anstieg auf 35 % der Weltproduktion 2018 im Jahr 2040 vorhergesehen. Dabei wird bei der Massenproduktion von CdTe-Modulen ein möglicher Engpass von Tellur kritisch diskutiert. In Modellrechnungen unter Einbeziehung aller Aspekte des Recyclings und verschiedener Marktentwicklungen wurde allerdings gezeigt, dass Tellur ausreichend vorhanden sei, um eine akkumulierte Leistung von 2 TWp bis zum Jahr 2050 installieren zu können (Powalla et al. 2018). Fthenakis (2009) erwartet, dass allein durch das Wachstum der Kupferproduktion, bei der Tellur als Beiprodukt gewonnen wird, das Tellurangebot in Zukunft deutlich erweitert werden und somit der zukünftige Rohstoffbedarf der Photovoltaik gedeckt werden kann.

Der Bedarf von Kadmium dürfte gleichermaßen stark ansteigen. Der prognostizierte Bedarf für Photovoltaiktechnologien von 74 t/a (2018) dürfte

auf 184 t/a (2040) anwachsen. Beide Werte der Szenarien stellen jedoch nur einen Bruchteil von 0,1 % bzw. 0,7 % der jährlichen Weltproduktion 2018 dar. Hier spielt eher die Frage der Toxizität der Halbleiterverbindung CdTe eine Rolle, die bisher noch nicht ausreichend untersucht worden ist. Bisher fällt CdTe-PV (noch) nicht unter das Verbot der europäischen RoHS Richtlinie (RoHS-Directive 2011). Falls in Zukunft das Inverkehrbringen von CdTe-PV Modulen in Europa verboten wird, wird das eine direkte Auswirkung auf die Rohstoffnachfrage haben. Dies wird vor allem für Tellur ausschlaggebend sein, da für Tellur die CdTe-PV-Industrie einer der Hauptnachfrager ist.

Für die Absorbermaterialien Indium, Gallium und Selen der CIGS-Module lassen die Prognosen einen deutliche Anstieg der Bedarfe für das Jahr 2040 erwarten. Trotzdem besitzen laut der Foresight Studie der Europäischen Kommission im Einklang mit hiesiger prognostizierter Berechnungen besonders Tellur und Indium das kritischste demand-to-supply-Verhältnis (European Commission 2020a).

Die zukünftige Entwicklung von CIGS-Dünnschichtphotovoltaik ist auch davon abhängig, wie sich die Rohstoffnachfrage bei anderen Technologien wie LEDs, Displays oder ICs für die Materialien Indium und Gallium entwickeln. So dürften zum Beispiel LCD-TV-Hersteller Preissteigerungen von Indium deutlich besser verkraften, weil der Wertanteil des Indiums, gemessen am Verkaufspreis, deutlich niedriger als bei CIGS-Solarmodulen ist. Zudem können LCD-Hersteller auf mögliche Substitute zurückgreifen, wenn die Indiumpreise zu hoch werden, was CIGS-Herstellern nur bedingt möglich ist: durch die Substitution von Indium mit Gallium verschlechtert sich die Bandlücke und außerdem ist Gallium ähnlich teuer und kritisch wie Indium.

3.3.2.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Der weltweite Einsatz von Photovoltaikanlagen nimmt rasant zu. Die heute hergestellten Module werden voraussichtlich in 25 bis 30 Jahren das Ende ihrer Lebensdauer erreichen und 78 Mio. Tonnen PV-Abfall werden bis zum Jahr 2050 anfallen, bzw. Masse an Modulen außer Betrieb genommen. First Solar, der auf die Masse bezogen weltweit größte PV-Modul Recycler, gewinnt Glas, Metalle und Kunststoff aus Schrott der Herstellungsprozesse sowie Abfall-CdTe-Module durch eine Kombination mechanischer und chemischer Prozesse. First Solar recycelt eine jährliche Menge von 25.000 Tonnen alter CdTe-Module. Für Kadmium und Tellur wird eine Recyclingausbeute von 95 % erreicht (Ravikumar et al. 2020). Eine sichere Rücknahme und gute Recyclingverfahren sind insbesondere für CdTe-Module notwendig, da hier neben Rohstoffaspekten hinaus auch die hohe Toxizität der Halbleitermaterialien eine Rolle spielt.

Ein besonderes Interesse am Recycling von CIGS-Modulen besteht darin, die kritischen und wertvollen Metalle Gallium und Indium aus Altmodulen zu extrahieren. Durch die hohe Konzentration beider Elemente von 600 ppm (Ga) und 90 ppm (In) besitzen CIGS-Altmodule damit eine höhere Konzentration als dies in Erzen vorkommt. Die momentane Forschung zeigt bereits Rückgewinnungsraten von 90 % im Pilotmaßstab und setzt damit einen Startpunkt für weitere Versuche und Überlegungen, um Indium und Gallium besser als Sekundärrohstoff zurückzugewinnen. Allerdings wird man auch hier mit der Problematik konfrontiert, dass große Mengen an Altmodulen erst in einigen Jahrzehnten zurücklaufen werden, wenn man von einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 Jahren ausgeht. Erneut sind es nicht nur die wertvollen Metalle, die ein Recycling zu einer Voraussetzung machen, sondern auch eine Vielzahl an giftigen Stoffen. Eine bessere Vernetzung von CIGS-Herstellern und Recyclern sollte zukünftig ausgebaut werden, um den Zielen einer Kreislaufwirtschaft näher zu kommen (Amato & Beolchini 2019). Durch die Vorreiterrolle der Europäischen Kommission, neue rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen bereitzustellen, um einer Kreislaufwirtschaft für PV Anlagen näher zu kommen, könnte es gut sein, dass CIGS in naher Zukunft ebenfalls unter diese rechtlichen Regelungen fallen wird. CIGS-Zellen sind durch ihre gute Recyclingfähigkeit dafür prädestiniert, die Standards hinsichtlich einer Kreislaufführung der Rohstoffe zu erfüllen (ESS 2017; Heske et al. 2019).

Bei CIGS-Solarmodulen ist die Gallium- und Indiumkonzentration in den Modulen für eine wirtschaftliche Rückgewinnung zu gering. Recycler prüfen daher die Möglichkeit, das Recycling

von LCDs (Indium) mit dem Recycling von CIGS-Solarzellen zu kombinieren, was den Prozess kurzfristig tragfähig machen könnte (EU 2014). Außerdem wird angestrebt, auch das Substratglas hochwertig zu recyceln, um einen mengenmäßig wichtigen Rohstoff wieder in den Markt zu bringen.

Als Alternative zu GIGS und CdTe werden Solarzellen mit günstigeren und besser verfügbaren Halbleiterverbindungen wie CuZnSnS, CuN oder FeS_2 entwickelt. Außerdem stehen noch andere Technologien zur Auswahl, wie organische oder Fabstoffsolarzellen. Insbesondere Perowskit-Solarzellen punkten mit einem niedrigen Energiebedarf und niedrigen Produktionskosten, einer hohen Effizienz und damit einer kürzeren Energieamortisationszeit im Vergleich zu anderen konventionellen PV-Technologien. Außerdem zeigen sie Vorteile bei der Umweltverträglichkeit (Zendehdel et al. 2020).

In der Foresight-Studie der Europäischen Kommission bezüglich kritischer Rohstoffe in der PV-Produktion wurde sich ebenfalls kritisch mit der Frage auseinandergesetzt, wie etwaigen Engpässen beim Bezug von Rohstoffen entgegenzuwirken ist. Laut Studie könnte der EU zugutekommen, dass bereits früh gemeinsame Recycling- und Wiedergewinnungsziele definiert wurden. Wünschenswert wären jedoch noch weitere einheitliche Abfallklassifizierungen bezüglich PV Anlagen (European Commission 2020a).

3.3.3 Wasser-Elektrolyse

3.3.3.1 Technologiebeschreibung

Die Wasser-Elektrolyse zerlegt mit elektrischer Energie Wasser in seine Bestandteile Sauerstoff und Wasserstoff. Diese emissionsfreie Produktion von Wasserstoff bei Nutzung erneuerbarer Energien gilt als eine der Schlüsseltechnologien für die weitere Dekarbonisierung des Energiesystems. Hohe Wasserstoffproduktionskosten im Vergleich zu Alternativtechnologien sorgten in der Vergangenheit jedoch dafür, dass Wasser-Elektrolysen nur sehr vereinzelt zum Einsatz gekommen sind, z. B. in Cuzco in Peru bzw. dem Assuan Staudamm in Ägypten. Veränderte Rahmenbedingungen sorgten nun jedoch zuletzt für ein zunehmendes Interesse.

Das Grundprinzip der Wasser-Elektrolyse besteht darin, dass eine Spannungsquelle an zwei sich in Wasser befindenden Elektroden angeschlossen und durch Ionenwanderung ein Stromkreislauf aufgebaut wird. Als Folge dessen entsteht an einer Elektrode Wasserstoff und an der anderen Elektrode Sauerstoff. Das grundsätzliche Funktionsprinzip ist in Abb. 3.60 illustriert. Es handelt sich damit um das umgekehrte Prinzip der Brennstoffzelle, wenn man dieser Sauerstoff und Wasserstoff zuführt. Ähnlich wie bei den Brennstoffzellen unterteilt man die Wasser-Elektrolysen auch nach ihren verwendeten Elektrolyten bzw. Membranen. Hierbei sind insbesondere die für den großindustriellen Einsatz verfügbaren Alkalischen Elektrolysen (AEL) und Polymerelektrolytmembran Elektrolysen (PEMEL) zu nennen. Etwas weniger technisch ausgereift gibt es die Festkörperoxid-Elektrolyse (SOEL). Darüber hinaus spricht man häufiger von der Anionenaustausch-Membran Elektrolyse (AEMEL), welche versucht, die Vorteile der AEL und PEMEL ohne deren Nachteile zu kombinieren. Aufgrund des technologischen Reifegrades wird diese Technologie in diesem Kapitel jedoch nicht weiter betrachtet. Ein Überblick zum aktuellen Stand der Technologien kann (Irena 2020a) entnommen werden.

Die AEL setzt auf eine alkalische Elektrolytlösung, die häufig aus einer 20 – 40 % KOH-Lösung besteht. Die Anode und Kathode werden durch eine nichtleitende poröse Membran, dem sogenannten Diaphragma, verbunden. Das Diaphragma ist durchlässig für OH^--Ionen, aber elektrisch nichtleitend und undurchlässig für Wasserstoff und Sauerstoff. Beim Anlegen von Strom an die Elektroden bilden sich unter Abspaltung von Wasserstoff an der Kathode die OH^--Ionen aus. Diese wandern durch das Diaphragma zur positiv geladenen Anode und bilden dort Sauerstoff durch die Abgabe der elektrischen Ladung aus. Es entstehen dabei doppelt so viele Wasserstoff- wie Sauerstoffmoleküle. Die Stromdichten liegen dabei meist zwischen 0,2 – 0,8 A/cm^2. Die sich bei hohen Stromdichten ausbildenden Gasblasen erhöhen den Elektrolytwiderstand und stellen damit eine Begrenzung dar. Eine Reduzierung der Dicke des Diaphragmas ist dabei nur begrenzt möglich, da es ansonsten die Produktgase hindurchdiffundieren lassen würde. Wirkungsgrade von 50 – 78 % können bei Temperaturen von 70 – 90 °C und Drücken von weniger als 30 bar erreicht werden. Durch den Einsatz der alkali-

schen Lösung besteht keine große Korrosion an der Zelle und es müssen keine Edelmetalle verwendet werden.

Bei der PEMEL kommt eine protonendurchlässige Feststoff-Polymer-Membran meist aus der Gruppe der Sulfansäuren zum Einsatz. An der mit Wasser gefluteten Anode bildet sich am katalytisch wirkenden Edelmetall ein H^+-Ion aus, welches bei angelegter Spannung durch die Membran zur Kathode wandert. Dort bildet sich durch das an der porösen Elektrode zufließende geladene Teilchen Wasserstoff aus. Um eine Kontamination und damit Verringerung der Lebensdauer von Elektroden und der Membran zu verhindern, wird meist auf vollentsalztes Wasser zurückgegriffen. Bei der PEMEL können durch das direkte Anliegen der Elektroden an der Membran höhere Stromdichten als bei der AEL mit 1 – 2 A/cm² erreicht werden. Die höheren Stromdichten erlauben dadurch auch ein kompakteres Design. Der Wirkungsgrad liegt bei 50 – 83 % bei ähnlichen Drücken wie der AEL. Die Betriebstemperatur fällt etwas geringer mit 50 – 80 °C aus. Verfahrensbedingt können meist etwas höhere Reinheiten des Wasserstoffes erreicht werden. Zudem können die PEMEL besser auf Lastschwankungen reagieren und sind schneller einsatzfähig. Viele Zelltypen bauen aufgrund der historischen Entwicklung noch auf den PEM-Brennstoffzellen auf,

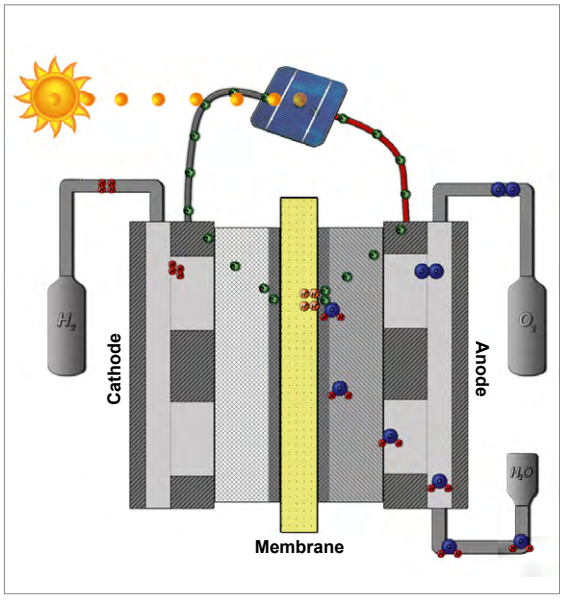


Abb. 3.60: Aufbau und Funktion einer PEMEL (Quelle: Davidlfritz, PEM Elektrolyse 5, Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

wodurch meist auch ähnliche Materialien zum Einsatz kommen.

Da die SOEL häufig auch im reversiblen Betrieb gefahren werden kann, was einer Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC, s. Kapitel 3.3.5) entspricht, sind sowohl die Funktionsprinzipien als auch die eingesetzten Materialien und Bauweisen häufig identisch. Die Zuführung von Wasser sowohl auf der Anode als auch auf der Kathode macht es jedoch interessant, dafür verstärkt auf die anodengestütze Zellbauweise zu setzen, da dadurch ohmsche Verluste im Elektrolyt verringert werden können. Wie auch bei der SOFC wird auf ein Festkörperoxid als Elektrolyt gesetzt. An der Kathode wird Wasser in Wasserstoff und ein O^{2-}-Ion zerlegt. Das Ion wandert durch das Elektrolyt zur Anode und bildet durch die Abgabe der elektrischen Ladung Sauerstoff aus. Damit die elektrochemische Reaktion ablaufen kann, sind hohe Betriebstemperaturen von 700 – 850 °C nötig. Die hohen Betriebstemperaturen lassen langfristig aber hohe Wirkungsgrade erwarten, auch wenn diese aktuell bei 45 – 55 % liegen. Für die SOEL wird mit Stromdichten von 0,3 – 1 A/cm² gerechnet. Durch die teilweise mögliche Nutzung von Abwärme kann der Strombedarf jedoch etwas reduziert werden. Aktuelle Stackgrößen fallen jedoch noch deutlich kleiner aus als bei AEL und PEMEL. Dies trifft auch auf die Lebensdauer zu, die mit weniger als 20.000 Stunden deutlich geringer ausfällt.

Ein Vergleich dieser drei Wasser-Elektrolyse-Technologien zeigt, dass es viele überlagernde Einsatzfelder für diese drei Optionen gibt und häufig eine Substitution einer der Technologien durch eine andere möglich ist. Insbesondere gilt dies für die AEL und PEMEL. Zu einem gewissen Grad kann dies auch Materialnachfragen ausgleichen. Als vorteilhaft bei der AEL kann jedoch angesehen werden, dass sie aktuell ökonomische Vorteile bei der Investition besitzt und langjährige Erfahrungen mit der Technologie vorhanden sind. Auch fallen die maximalen Stackgrößen bisher noch etwas größer aus. Die PEMEL kann deutlich kompakter gebaut werden und kann besser auf Lastwechsel reagieren, was insbesondere für die Integration fluktuierender erneuerbarer Energien als hilfreich angesehen wird. Die Verwendung von Edelmetallen erschwert jedoch die kostengünstige Skalierung. SOEL besitzen aufgrund ihrer hohen Betriebstemperatur ein großes

Potenzial hohe Wirkungsgrade zu erreichen, was jedoch wirtschaftlich die Verfügbarkeit von günstigen Abwärmequellen voraussetzt. Lastwechsel sorgen zudem für hohe thermische Belastungen, weshalb eher ein Dauerbetrieb bei der SOEL anzustreben ist. Basierend auf den aktuellen Forschungsaktivitäten, ist jedoch langfristig mit einer weiteren Annäherung insbesondere der AEL und PEMEL zu rechnen.

In den letzten Jahren haben sich zunehmend Hersteller neu positioniert. Brennstoffzellenhersteller versuchen ihre Produktpalette zu erweitern. Start-ups bzw. kleinere als auch erfahrene Hersteller hoffen durch die anziehende Nachfrage stark wachsen zu können. Etablierte Produzenten im Gasmarkt wie Linde oder Air Liquide suchen sich strategische Partnerschaften bzw. gründen Joint Ventures. Einige Unternehmen wie Thyssenkrupp oder Siemens fokussieren sich auf eine Technologie wie AEL bzw. PEMEL. Andere Hersteller wie NEL versuchen beide Technologien anzubieten. Über den weltweiten Markt lässt sich sagen, dass die PEMEL stark von den Europäern forciert wird, während in anderen Ländern wie China sich mehr auf die AEL konzentriert wird. Trotz zunehmender Nachfrage scheint es kurzfristig zu keinen Problemen bzw. nur leichten Einschränkungen bei der SOEL bei den Fertigungskapazitäten der Hersteller zu geben, wie eine Befragung ergeben hat (NOW GmbH 2018). Neu errichtete Elektrolyseure können durch den modularen Aufbau mittlerweile deutlich größer als 100 MW sein.

3.3.3.2 Foresight Industrielle Nutzung

Die bisher installierten Wasser-Elektrolyse-Kapazitäten waren aufgrund der wirtschaftlichen Herausforderungen gegenüber Alternativtechnologien gering. So gab es den Zahlen von IEA (2020b) folgend in den letzten Jahren nur Zubauten im Bereich um die 10 MW pro Jahr. Beginnend mit 2019 nimmt die Anzahl an Ankündigungen zu installierenden Leistungen jedoch sehr stark zu, was bis 2023 zu einer ungefähren jährlichen Verdoppelung der zugebauten Kapazitäten führen würde, vergleiche Abb. 3.61. Dabei ist zudem noch unberücksichtigt, dass weitere Installationen für diese Jahre angekündigt werden können.

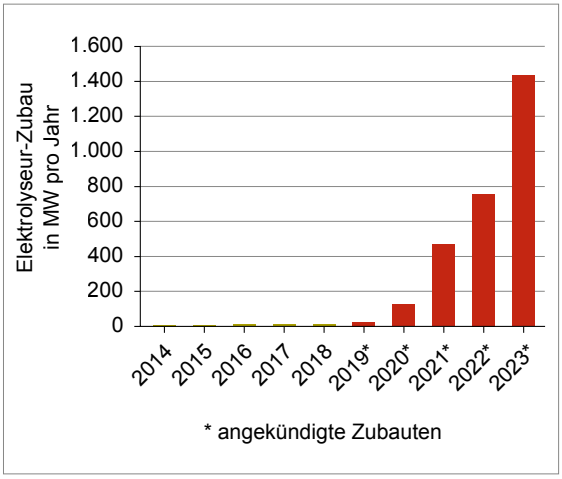


Abb. 3.61: Elektrolyseur-Zubau (Quelle: IEA 2020b)

In der Vergangenheit wurde hauptsächlich auf die AEL zurückgegriffen. Die PEMEL konnte jedoch seit 2000 kontinuierlich Marktanteile gewinnen und hat aktuell ungefähr einen Anteil von 45 %. Neuankündigungen setzen zu einem überwiegenden Anteil auf die PEMEL. SOEL-Anlagen sind bisher nur vereinzelt und zudem meist nur als Demonstrationsanlage existent (Staffell et al. 2019; IEA 2020c).

Wie an den Ankündigungen für den Zubau neuer Elektrolyseurskapazitäten zu erkennen ist, ist nicht zuletzt aufgrund der verstärkten Förderung in den nächsten Jahren mit einem deutlichen Marktwachstum zu rechnen. Ein Fortschreiben dieses sich ankündigenden Marktwachstums über die nächsten Jahre ist jedoch eher unwahrscheinlich, weshalb in dieser Studie etwas konservativere Werte angenommen werden. Große Unsicherheiten existieren dabei zudem beim langfristigen Bedarf und damit der zukünftigen Bedeutung von Wasserelektrolyseuren.

Für diese Studie werden die installierten zukünftigen Leistungen auf Basis der grünen Wasserstofferzeugungen der SSP-Szenarien abgeleitet, s. Kapitel 1.1. Die SSP-Szenarien werden so ausgelegt, dass ein möglichst breiter Entwicklungskorridor dargestellt wird, welcher die Entwicklungsannahmen anderer Studien berücksichtigt, z. B. Weltenergierat – Deutschland e. V. & Frontier Economics (2018), Irena (2020a). Dabei wird angenommen, dass die Elektrolyseure langfristig mit 3.500 Volllaststunden betrieben werden. Da

die SOEL aktuell noch nicht in industriellen Maßstäben betrieben wird und ein Marktwachstum erst mittelfristig zu erwarten ist, die Rohstoffe (Iridium und Platin) für die PEMEL, trotz der derzeitig geplanten Projekte, nicht in hinreichend großer Menge zur Verfügung stehen und die AEL aktuell ökonomische Vorteile bei den Investitionskosten besitzt, wird vereinfachend ein konstanter Technologiemix mit 85 % AEL, 10 % PEMEL und 5 % SOEL angenommen.

Die Annahmen zu den installierten Leistungen und den jährlichen Elektrolyseur Zubauten kann für die SSP Szenarien der Abb. 3.62 entnommen werden. Der Bedarf in 2040 ist mit einem Bestand von rund 100 GW im SSP5 deutlich geringer als im SSP1-19 mit rund 1.700 GW. Das SSP2-26 bewegt sich mit 430 GW dazwischen, wobei dies in etwa zeitgleich auch dem jährlichen erforderlichen Zubau im SSP1-19 entspricht. Die Bandbreite zwischen den Szenarien fällt dadurch sehr groß aus.

Die möglichen unterschiedlichen Marktentwicklungen haben entsprechend auch einen größeren Einfluss auf die Weiterentwicklung der Technologien. Bei großen Stückzahlen an Elektrolyseuren sind damit deutlichere Fortschritte bei der Einsparung von Materialien und der Bauform zu erwarten bzw. auch erforderlich. Zudem nimmt das regulatorische Umfeld direkten Einfluss auf die Marktentwicklung. Unterschiedliche politische Zielsetzungen können dadurch lokal zu unterschiedlichen Entwicklungen führen. Alternative Technologien wie die Direktelektrischen Verfahren können langfristig dazu beitragen, dass der Bedarf nach Elektrolyseuren wieder sinken kann.

3.3.3.3 Rohstoffinhalt

Die drei Elektrolyseurtypen stellen unterschiedliche Anforderungen an die Rohstoffe und im Speziellen an die Katalysatoren (Khan et al. 2018). Für die AEL kann auf unedle Metalle zurückgegriffen werden (David et al. 2019). Als Elektrolyt wird meist eine wässrige Kalilauge eingesetzt, es kann aber auch eine Natronlauge verwendet werden. Beim Diaphragma wird in der Regel auf Zirfon (beschichtetes Polysulfongewebe mit ZrO_2) zurückgegriffen. Alternativmaterialien bzw. polymere Membrane konnten sich hier bisher nicht durchsetzen. Aufgrund der Anforderungen an die Gasdurchlässigkeit sind hier jedoch keine großen Einsparungen in der Materialdicke (250 µm) zu erwarten. Sowohl für die Anode als auch Kathode

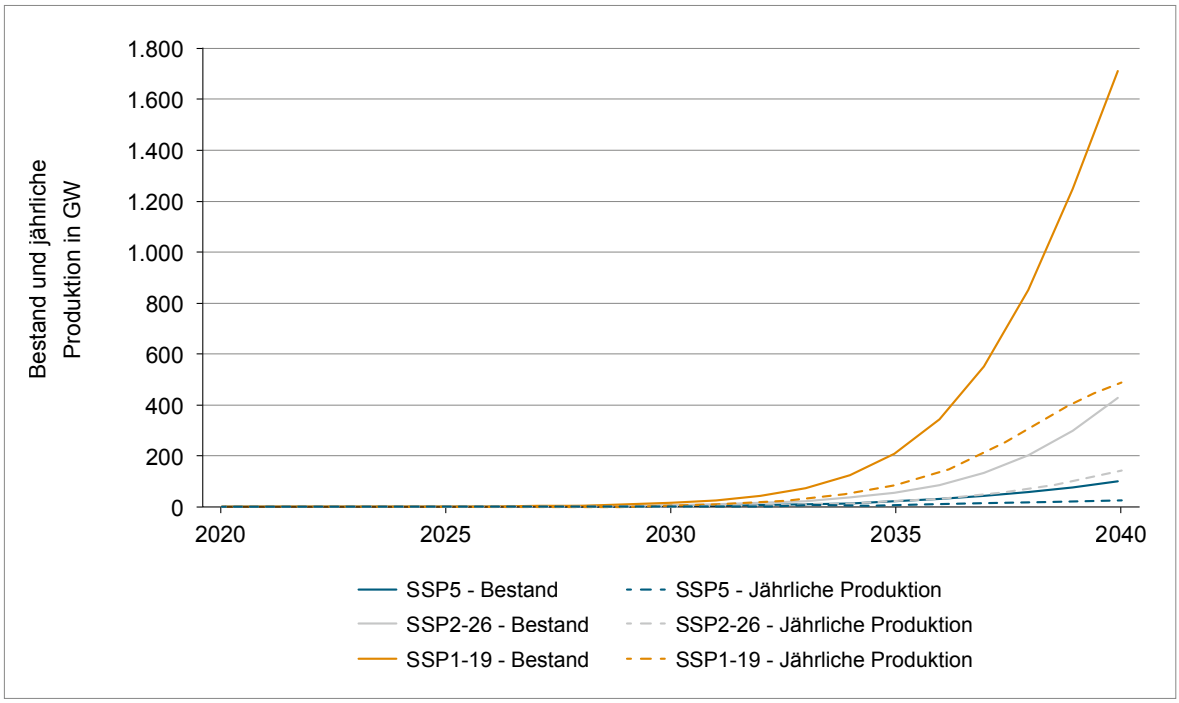


Abb. 3.62: Produktion und Aufbau des Bestandes an Elektrolyseuren für die Szenarien SSP5, SSP2-26 und SSP1-19 (Quelle: Eigene Darstellung)

werden hauptsächlich Nickel-Materialien z. B. Raney-Nickel oder auch beschichteter Edelstahl eingesetzt. Zur Erhöhung der Stromdichten und Verbesserungen des dynamischen Verhaltens werden jedoch auch Edelmetalle in die Untersuchungen und Weiterentwicklungen mit einbezogen. So kann es auch zur Platinverwendung in den Elektroden kommen.

Die PEMEL verwendet als Elektrolyt meist eine Variante des Nafions (Perfluorsulfonsäure-(PFSA) Polytetrafluorethylen-(PTFE)-Kopolymer). Alternativen hierzu können hydrocarbonbasierte Materialien sein. Im Gegensatz zur AEL ist die PEMEL jedoch auf Edelmetalle aufgrund der sauren Umgebung in der Nähe der Membran angewiesen. So benötigt die Anode meist Iridiumoxid (IrO_2). Iridium gilt zurzeit auch als unersetzbar, da kein Alternativmaterial bisher die erforderlichen Eigenschaften mitbringt, z. B. Rutheniumoxid (RuO_2) mit einer deutlich höheren Korrosionsrate. Aufgrund der raren Materialverfügbarkeit wird jedoch versucht, die Elektrodenbeladung zu verringern und Material einzusparen. Sowohl für Ir als auch Ru sind Materialbedarfe von 0,5 – 1,5 g/kW erforderlich, wobei aktuell ungefähr 1 g/kW benötigt wird. Bei der Kathode wird vorwiegend auf Metalle der Platingruppe gesetzt, wobei Platin besonders häufig mit Kohlenstoffträgermaterial mit 0,05 – 0,2 g/kW zum Einsatz kommt. Auch hier findet eine kontinuierliche Reduzierung statt. Dieses besitzt einen guten Korrosionsschutz und hat eine gute Leitfähigkeit. Alternativ kommen aber auch Palladium oder entsprechende Legierungen zum Einsatz (Shiva Kumar & Himabindu 2019). Darüber hinaus besteht meist noch ein Platin und Titanbedarf bei den Transportschichten und Bipolarplatten der Elektroden.

Da sich die SOEL und SOFC häufig nur in der Betriebsweise unterscheiden, entsprechen die benötigten Materialien denen der SOFC (Chen & Jiang 2016; Hussain & Yangping 2020; Beiderbeck et al. 2020). Dies heißt, dass als Elektrolyt in der Regel ein yttriumdotiertes Zirkoniumdioxid (YSZ) zum Einsatz kommen kann. Für die Anode wird auf Nickel-YSZ Materialien und für die Kathode auf perowskitische Materialien wie Lanthan-Strontium-Manganat (LSM) zurückgegriffen. Sofern die Weiterentwicklungen für anodengestütze Zellen gut voranschreitet, so könnte es zu einer leichten Materialverschiebung hin zu anodengestützen SOEL kommen, da hierdurch ohmsche Verluste eingespart werden können. Die aktuell meist angestrebte mittlere Betriebstemperatur der SOEL lässt jedoch auch Optionen wie scandiumdotiertes Zirkoniumdioxid (ScSZ)/Scandium-Cer-stabilisiertes Zirkoniumdioxid (ScCeSZ) für das Elektrolyt als möglich erscheinen.

Tab. 3.55: Spezifische Rohstoffbedarfe für die Wasserelektrolyseure in g/kW (Quellen: Koj et al. 2015, Häfele et al. 2016; Koj et al. 2017; Bareiss et al. 2019; Carmo et al. 2019; Shiva Kumar & Himabindu 2019; Lotrič et al. 2021)

Rohstoff	g/kW
Iridium	0,1
Platin	0,01
Titan	28,3
Aluminium	112,6
Kupfer	229,1
Zirkonium	83,7
Scandium	0,1
Yttrium	5,9
Lanthan	0,8
Nickel	423,1
Kobalt	0,3
Mangan	0,9
Cer	9,3
Chrom	131,1

Für die in Tab. 3.55 angegebenen Werte wurden die spezifischen Beladungen der Elektroden der PEMEL und die LCA Untersuchungen in Koj et al. (2015), Häfele et al. (2016), Koj et al. (2017), Bareiss et al. (2019), Carmo et al. (2019), Shiva Kumar & Himabindu (2019), Lotrič et al. (2021) verwendet. Für die SOEL wurden zudem die Erkenntnisse der SOFC mit einbezogen und anschließend Mittelwerte gebildet. Extremwerte blieben dabei unberücksichtigt und zur Abbildung der zukünftigen Entwicklung Annahmen zu einem verringerten Materialverbrauch der elektrochemischen Zelle angenommen.

3.3.3.4 Foresight Rohstoffbedarf

Basierend auf den Annahmen zum spezifischen Rohstoffbedarf und den festgelegten Szenarien zum Wasserstoffbedarf und den daraus abgeleiteten Produktionsmengen ergibt sich der folgende in Tab. 3.56 dargestellte Rohstoffbedarf für die Wasserelektrolyseure. Es zeigt sich, dass die meisten Rohstoffe alleine betrachtet unkritisch bzgl. der produzierten Mengen sind. Dies gilt aber nicht für Iridium und Scandium. Bei Iridium ist der Bedarf für das Jahr 2040 in zwei Szenarien (SSP1 und SSP2) deutlich höher als die Produktion im Jahr 2018. Scandium wird, sofern die Annahmen zum aktuellen Bedarf stimmen (siehe auch das Kapitel 3.3.5 zur SOFC), im SSP1 Szenario im Jahr 2040 deutlich mehr benötigt werden, als es aktuell gewonnen wird. Dabei ist auch zu beachten, dass der Anteil der SOEL, bei der es zum Einsatz kommt, in den Szenarienannahmen nur mit einem geringen Anteil angenommen wurde.

Da die verschiedenen Verfahren der Wasser-Elektrolyse unterschiedliche Rohstoffe benötigen, aber zeitgleich einen teilweise überschneidenden Einsatzbereich besitzen, können Materialengpässe zu einem gewissen Grad durch den Einsatz eines alternativen Wasserelektrolyseurtyps gemildert werden. Im Speziellen gibt es auch bei der SOEL Materialien, die grundsätzlich als Ersatz für Scandium verwendet werden bzw. dieses gar substituieren können.

Anzumerken ist, dass in den letzten Jahren die Forschungsaktivitäten insbesondere zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Wasserelektrolyseuren deutlich erhöht wurde. Damit der Bau wirtschaftlicher wird, sind Reduzierungen im Bedarf von Edelmetallen unausweichlich. Es ist daher davon auszugehen, dass dies einen positiven Effekt auf den zukünftigen Rohstoffbedarf haben wird.

Tab. 3.56: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Wasserelektrolyseure in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Iridium	6,8[1] (R)	0,01	34	10	2
Platin	190 (B)	0,00	6	2	0,33
Titan	260.548 (R)	3,55	13.600	3.900	720
Aluminium	63.756.000 (R)	14,20	54.200	15.400	2.900
Kupfer	20.591.000 (B) 24.137.000 (R)	28,80	110.400	31.300	5.800
Zirkonium	1.256.362[2] (B)	10,50	40.300	11.400	2.100
Scandium	9,1 (B)	0,01	24	7	1
Yttrium	7.600 (R)	0,74	2.800	800	150
Lanthan	35.800 (R)	0,10	370	100	20
Nickel	2.327.500 (B) 2.189.313 (R)	53,20	203.870	57.900	10.800
Kobalt	151.060 (B) 126.019 (R)	0,04	160	40	8
Mangan	20.300.000 (B)	0,12	450	130	24
Cer	58.800 (R)	1,20	4.490	1.270	240
Chrom	27.000.000 (B)	16,5	63.200	17.900	3.300

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

[1] *Quelle: JM 2020*
[2] *Produktion Zirkoniumminerale*

3.3.3.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Durch die Ähnlichkeit der Wasser-Elektrolyse zur Brennstoffzelle haben sie bei der Materialverwendung einige Gemeinsamkeiten. Grundsätzlich hat der Zelltyp und die Bauform aufgrund des Einsatzes unterschiedlicher Materialien einen großen Einfluss auf die Recyclingquote. Auch führen unterschiedliche Herstellungsverfahren und Größen zu unterschiedlichen Materialverlusten. Bei AEL und PEMEL liegen die Materialverluste tendenziell im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Sofern ein Material anfällt, welches einen hohen Wert hat, sind die Recyclingbestrebungen hoch. Da Keramiken nicht hierunter fallen, werden diese meist über eine Zweitnutzung als Auffüllmaterial entsorgt. Für die meisten Metalle hingegen können Recyclingquoten von bis zu 100 % erreicht werden. Schwierigkeiten gibt es jedoch noch bei den Übergangsmetallen mit einer Recyclingquote von teils nur 30 % und den Platinmetallen mit einer Quote von 50 – 90 % (Environment Park SPA et al. 2018; Environment Park SPA et al. 2019; Lotrič et al. 2021). In neueren Verfahren können aber auch für Platin und Iridium Recyclingquoten von mehr als 90 % erreicht werden (Carmo et al. 2019). Bei größeren Mengen von Altanlagen ist davon auszugehen, dass bei entsprechenden ökonomischen Anreizen die Rückgewinnung gerade bei den SOEL noch weiter verbessert wird.

3.3.4 Direct-Air Capture (DAC)

3.3.4.1 Technologiebeschreibung

Direct-Air Capture (DAC) bezeichnet das Filtern von CO_2 aus der Umgebungsluft mit einer beispielhaft in Abb. 3.63 dargestellten Anlage. Durch DAC kann somit der CO_2-Gehalt der Atmosphäre gesenkt werden, was dem Treibhauseffekt, welcher für die globale Erwärmung verantwortlich ist, entgegenwirkt. Das gefilterte CO_2 kann zu unterschiedlichen Zwecken genutzt werden. Eine Möglichkeit ist die langfristige Speicherung des CO_2, um dieses dauerhaft der Atmosphäre zu entziehen. In diesem Fall spricht man von „negativen Emissionen“. Die Speicherung des Treibhausgases hat das Potenzial, ein wesentlicher Baustein in der Einhaltung des Pariser Klimaabkommens zu werden (Gambhir & Tavoni 2019). Denkbare langfristige CO_2-Speicher sind geologische Lagerstätten wie tiefe Salzgesteine oder Basalte, in welchen das CO_2 mineralisiert und somit sicher und langfristig gespeichert wird (Fasihi et al. 2019). Des Weiteren kann das CO_2 für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe oder Kohlenwasserstoffe für die Kunststoffproduktion genutzt werden. Dabei kommt die Fischer-Tropsch-Synthese zum Einsatz, durch welche aus dem CO_2 und Wasserstoff beispielsweise Benzin, Diesel, Kerosin oder andere Kraftstoffe hergestellt werden (Liu et al. 2020a). Bei Verbrennung dieser Treibstoffe entstehen zwar lokal wieder Emissionen, der gesamte Kohlenstoffkreislauf kann jedoch geschlossen werden, wenn für die Wasserstoffherstellung erneuerbare Energie eingesetzt wird. Insbesondere für schwer zu elektrifizierende Verkehrsmittel wie Flugzeuge kann somit eine klimaneutralere und somit umweltfreundlichere Alternative geschaffen werden. Das gewonnene CO_2 kann auch zur Anreicherung der Luft in Gewächshäusern genutzt werden, in welchen das CO_2 durch den Stoffwechsel von den Pflanzen aufgenommen wird und zu einer Düngewirkung führt. Eine weitere Einsatzmöglichkeit des CO_2 ist die Enhanced Oil Recovery. Dabei wird CO_2 in Erdöllagerstätten gepumpt, um das Erdöl an die Oberfläche zu fördern. Insbesondere in den USA ist dies derzeit eine profitable Einsatzmöglichkeit, da durch Steuervergünstigungen auf die negativen Emissionen der Preis des Öls, welches durch Enhanced Oil Recovery in Verbindung mit DAC gewonnen wird, sinkt (Mulligan & Lashof 2019; IEA 2020a). Demgegenüber bestehen jedoch Bedenken bezüglich der Sicherheit und der Dauerhaftigkeit des Speichers, welche noch weitergehend untersucht werden müssen (IEA 2015).

Um das CO_2 der Umgebungsluft zu entziehen, werden große Mengen Luft durch Ventilatoren in die DAC-Anlage zu einem Sorptionsmittel geleitet. Derzeit existieren zwei unterschiedliche Verfahren zur Filtrierung von CO_2 aus der Luft, das Adsorptionsverfahren und das Absorptionsverfahren. Bei der Adsorption lagert sich das CO_2 an der Oberfläche eines Feststoffes an, wird also adsorbiert. Nach einer bestimmten Zeit erreicht der CO_2-Gehalt auf der Oberfläche einen Sättigungszustand, sodass die Adsorptionskörper regeneriert werden müssen. Für die Regeneration wird der gesättigte Festkörper mit einem ungesättigten ausgetauscht und anschließend gewaschen, um

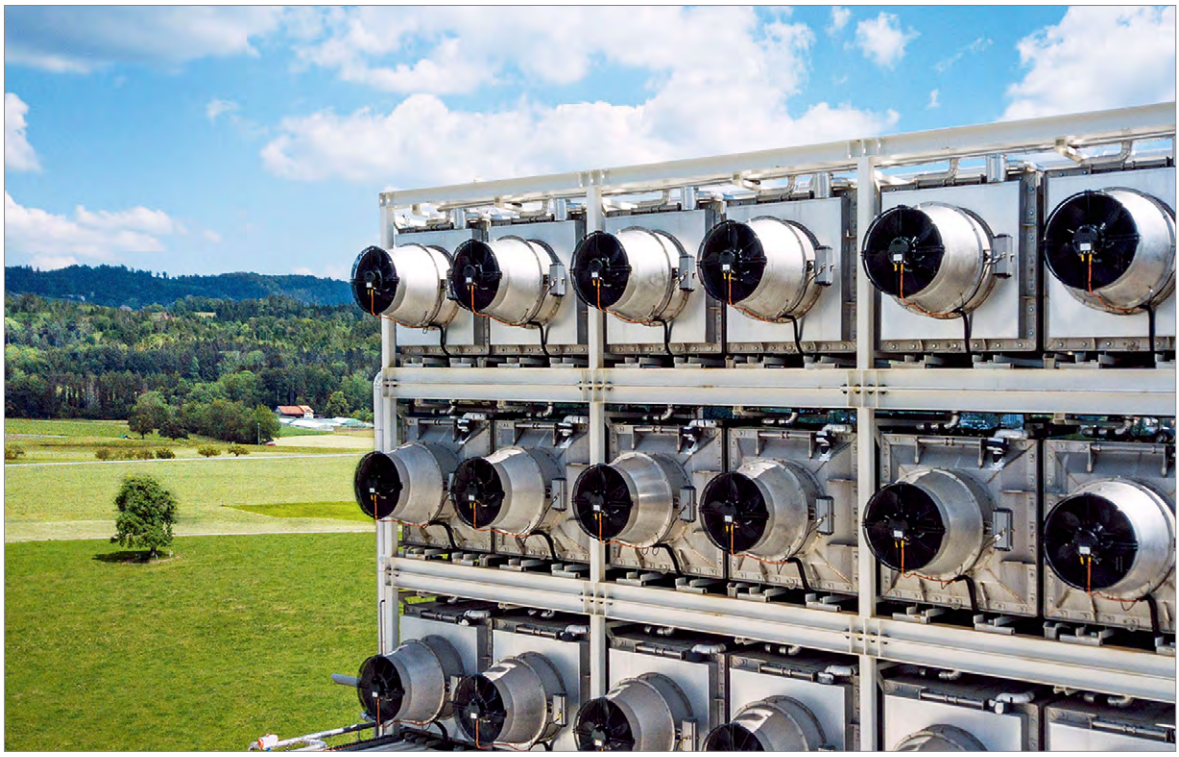


Abb. 3.63: Direct-Air Capture Anlage (Quelle: Climeworks)

das CO_2 zu gewinnen (Martin et al. 2017). Der Prozess läuft somit diskontinuierlich ab. Das Adsorptionsverfahren ist mit vergleichsweise niedrigen Kosten und Energieverbrauch verbunden und wird im Gegensatz zum Absorptionsverfahren ohne fossile Brennstoffe betrieben.

Für das Absorptionsverfahren werden zwei miteinander verbundene Kreisläufe – der Laugen-Kreislauf und der Calcium-Kreislauf – eingesetzt, sodass das CO_2 erst chemisch gebunden und daraufhin gewonnen wird. Das Verfahren basiert auf der Absorption des CO_2 in einer wässrigen basischen Lösung, meist Kalilauge. Die basische Lösung wird dabei in einem Laugen-Kreislauf (links in Abb. 3.64) kontinuierlich zu- und abgeführt. Das in der Lauge gelöste CO_2 reagiert mit der Kalilauge zu Kaliumkarbonat, welches zur Regeneration zu einer Reaktionseinheit geführt wird, die die Schnittstelle zwischen den beiden Kreisläufen darstellt. In dieser wird der Kohlenstoff in Form von Calciumcarbonat gefällt, welches in den Calcium-Kreislauf (rechts in Abb. 3.64) übergeht, während die entstehende Kalilauge zurück zur Absorptionseinheit geleitet wird. Das Calciumcarbonat wird im nächsten Schritt geglüht, um CO_2 zu gewinnen, welches dann abgeschieden werden kann. In diesem Schritt wird meist Erdgas zur Wärmeerzeugung eingesetzt, was für einen großen Teil des Energieaufwands des Prozesses verantwortlich ist. Das bei der Verbrennung freigesetzte CO_2 kann jedoch durch die DAC-Anlage abgeschieden werden, sodass keine zusätzlichen Emissionen entstehen. Es bestehen Bestrebungen, diesen Prozessschritt in Zukunft zu elektrifizieren, um nicht von fossilen Brennstoffen abhängig zu sein. Um den zweiten Kreislauf zu schließen wird das bei dem Glühen entstehende Calciumoxid zu Calciumhydroxid hydratisiert (Keith et al. 2018). Im Gegensatz zum konventionellen Adsorptionsverfahren handelt es sich bei dem Absorptionsverfahren somit um ein kontinuierliches Verfahren. Auch ist dieses Verfahren besser skalierbar und die Empfindlichkeit gegenüber Luftverunreinigungen ist geringer.

Dittmeyer et al. (2019) entwickelten ein Konzept zur dezentralen Nutzung von DAC. Dieses zielt darauf ab, bestehende Belüftungssysteme von größeren Gebäuden für DAC zu nutzen. Beispielsweise könnten die Klimaanlagen urbaner Hochhäuser genutzt werden, um CO_2 aus der Luft zu filtern. Durch dieses Konzept könnte ein Teil der benötigten Ressourcen und Energie ein-

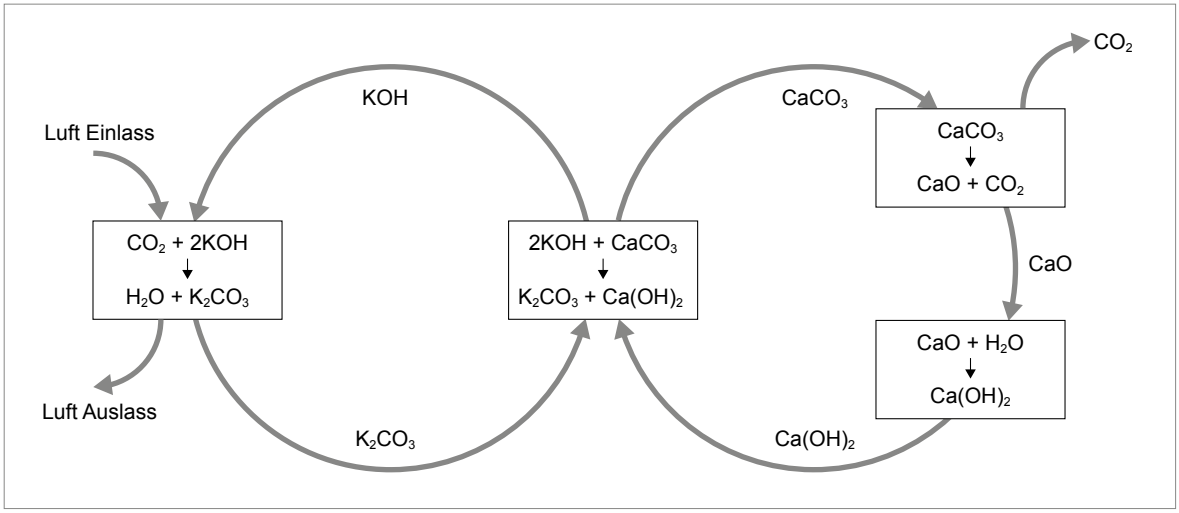


Abb. 3.64: Chemische Prozessführung der beiden Kreisläufe des Absorptionsverfahrens für Direct-Air Capture (Quelle: Eigene Darstellung nach Keith et al. 2018)

gespart werden, da entsprechende Belüftungssysteme ohnehin existieren und betrieben werden. Nachteilig gegenüber einer großindustriellen DAC-Anlage ist jedoch die niedrig skalierte Sorptions- und Regenerationseinheit.

Neben DAC zählt auch Carbon Capture and Storage (CCS) zu den Technologien für negative Emissionen. Bei CCS wird das CO_2 nicht der Umgebungsluft, sondern Punktquellen wie den Abgasen von Kraftwerken entnommen und anschließend gespeichert. Da in diesen Abgasen die CO_2-Konzentration deutlich höher ist als in der Atmosphäre, ist der Energieaufwand gegenüber DAC niedriger. Jedoch wird durch CCS lediglich der Treibhausgasausstoß von Kraftwerken gesenkt, während der CO_2-Gehalt der Atmosphäre nicht beeinflusst wird. Der Einfluss von DAC auf die Klimaerwärmung ist daher unmittelbarer. Eine genauere Betrachtung der Zukunftstechnologie CCS erfolgt in Kapitel 3.3.6. Ein Beispiel für die Umsetzung von negativen Emissionen durch die Speicherung von CO_2 in Gestein wird in Abb. 3.65 gezeigt.



Abb. 3.65: Dauerhafte Speicherung von CO_2 durch Mineralisierung in geeigneter geologischer Lagerstätte (Quelle: Carbfix, Foto von Sandra O. Snaebjornsdottir)

3.3.4.2 Rohstoffinhalt

Der Materialbedarf für eine DAC Anlage nach dem Absorptionsverfahren mit der Kapazität von 1 Mt CO_2 pro Jahr entstammt dem Basisszenario von Jonge et al. (2019). Kompression, Transport und Speicherung des CO_2 sind dabei nicht mit inbegriffen, sondern nur die DAC-Anlage selbst zur Filterung des CO_2 aus der Umgebungsluft. Der Rohstoffbedarf wird in Tab. 3.57 gezeigt. Der Rohstoffgehalt von DAC-Anlagen, welche nach dem Adsorptionsverfahren funktionieren, kann derzeit nicht ermittelt werden, da sich die Entwicklung dieser Technologie in einem frühen Stadium befindet. Durch die schwierigere Skalierbarkeit sowie den diskontinuierlichen Prozess, welcher eine hohe Anzahl an Adsorptionskörpern bedingt, wird der Rohstoffbedarf für das Adsorptionsver-

Tab. 3.57: Materialbedarf von DAC-Anlagen nach dem Absorptionsverfahren mit einer Kapazität von 1 Mt CO_2/a (Quelle: IEA 2020b)

Material	Einheit	Materialbedarf Absorption
Edelstahl	t	32
Stahl (niedriglegiert)	t	5.000
Beton	m^3	117.000
PVC	t	14.000
Polypropylen	t	15
Glasfaserverstärktes Polyurethan	t	70

fahren eher höher als der in Tab. 3.57 dargestellte Rohstoffbedarf des Absorptionsverfahren eingeschätzt.

3.3.4.3 Foresight industrielle Nutzung

Derzeit sind weltweit 15 DAC-Anlagen im Einsatz, welche gemeinsam jährlich 9.000 t CO_2 aus der Atmosphäre filtern (IEA 2020a). In Deutschland sind bisher weder Unternehmen noch Forschungseinrichtungen direkt an der Entwicklung von DAC beteiligt, obwohl entsprechendes Know-how vorhanden ist (Viebahn et al. 2019). Im Folgenden werden in Kürze relevante internationale DAC-Unternehmen vorgestellt. Neben dem Verkauf von CO_2 ist ein häufiges Geschäftsmodell der genannten Unternehmen, negative Emissionen an andere Unternehmen oder Privatpersonen zu verkaufen, sodass diese ihre Kohlenstoffbilanz verbessern können.

– Carbon Engineering (CE) ist ein kanadisches Unternehmen, welches auf das Hochtemperatur Absorptionsverfahren setzt. Seit 2015 betreibt CE eine DAC-Testanlage, welche 1 t CO_2 pro Jahr absorbiert (Keith et al. 2018). Derzeit ist eine kommerzielle DAC-Anlage mit einer Kapazität von einer Million t CO_2 pro Jahr in Planung, welche ab 2021 gebaut werden soll. Das gewonnene CO_2 soll in Zusammenarbeit mit Occidental Petroleum für die Enhanced Oil Recovery verwendet werden (Carbon Engineering 2019).

– Climeworks ist ein schweizerisches Unternehmen, das 2019 mit dem niederländischen DAC-Unternehmen Antecy fusionierte. Im Gegensatz zu Carbon Engineering nutzt Climeworks das Adsorptionsverfahren in DAC-Anlagen, von denen derzeit zwei betrieben werden. Die in der Schweiz betriebene Anlage mit einer Kapazität von 900 t CO_2 pro Jahr ist für den Verkauf des CO_2 für die Getränkeproduktion oder Gewächshäuser ausgelegt. Die zweite Anlage steht wegen der niedrigen Energiekosten in Island und ist auf eine Kapazität von 50 t CO_2 pro Jahr ausgelegt. Es wird die Abwärme einer Geothermieanlage zur Energieversorgung genutzt, um die Gesamteffizienz zu steigern. Das CO_2 wird durch Mineralisierung dauerhaft im Boden gespeichert, sodass dort negative Emissionen erzeugt werden (Geoengineering Monitor 2018).

– Global Thermostat ist ein US-amerikanisches Unternehmen und setzt wie Climeworks auf das Adsorptionsverfahren. In einer Testanlage in Kalifornien werden 730 t CO_2 pro Jahr aus der Atmosphäre gefiltert (Viebahn et al. 2019). In Zusammenarbeit mit Siemens Energy und der Porsche AG soll in Chile eine Anlage zur synthetischen Kraftstoffproduktion entstehen, welche CO_2 aus der Umgebungsluft und elektrolytisch produziertes H2 verwendet und mit Windenergie betrieben wird (Fialka 2021).

– Weitere, jedoch kleinere DAC-Unternehmen sind Skytree und Infinitree.

Ein derzeitiges Hemmnis für ein größeres Wachstum von DAC sind die hohen Kosten, welche aus dem hohen Energieverbrauch und dem frühen Entwicklungsstadium der Technologie resultieren. Die derzeit geschätzten Kosten variieren je nach Quelle stark und werden von den National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) mit 199–357 USD/t CO_2 für das Absorptionsverfahren und mit 88–228 USD/t CO_2 für das Adsorptionsverfahren angegeben. Nach Schätzungen von Fasihi et al. (2019) könnten die Kosten bis 2040 durch den erwarteten Markthochlauf und technologische Weiterentwicklungen auf ca. 56 USD/t CO_2 (50 €/t CO_2) sinken.

Ein weiteres Hemmnis für den Ausbau von DAC sind die Umweltauswirkungen durch die verwen-

deten Materialien, das Errichten und Installieren der Anlage sowie den benötigten Betriebsmitteln. Insbesondere der Stromverbrauch kann durch die Stromerzeugung mit hohen Emissionen verbunden sein. Deutz & Bardow (2020) kommen zu dem Schluss, dass dennoch bereits heute DAC-Anlagen bei Beachtung der gesamten Wertschöpfungskette negative Emissionen erzeugen können. Betrachtet werden dabei zwei Anlagen, welche in der Schweiz bzw. in Island betrieben werden. Es wird festgestellt, dass die tatsächlichen Nettoemissionen stark von der Energieerzeugung und Energieeffizienz abhängig sind, sodass DAC an vielen Standorten, abhängig vom regionalen Strommix, derzeit keinen Beitrag zur Klimaneutralität leisten kann, sondern im Gegenteil sogar für Treibhausgasemissionen verantwortlich ist.

Nach dem Sustainable Development Szenario der IEA werden bis 2030 9,67 Mt CO_2 pro Jahr durch DAC der Atmosphäre entzogen. Bei kontinuierlichem Anstieg des Wachstums der Kapazität von DAC werden im Jahr 2040 ca. 34 Mt CO_2 pro Jahr durch DAC gefiltert. In diesem Fall beträgt der Kapazitätszuwachs von DAC im Jahr 2040 etwa 3,04 Mt CO_2.

3.3.4.4 Foresight Rohstoffbedarf

Da sich DAC derzeit noch in einer frühen Entwicklungsphase befindet und es nur einige Testanlagen gibt, ist der derzeitige Rohstoffbedarf für DAC gegenüber der globalen Rohstoffförderung nicht relevant. Durch eine ansteigende Nutzung von DAC kann sich dies in Zukunft jedoch ändern. Das in Kapitel 3.3.4.2 beschriebene Szenario zur Kapazität von DAC und der beschriebene Rohstoffinhalt von DAC-Anlagen wird zur Berechnung des kumulierten Materialaufwands bis 2040 genutzt. Da der spezifische Rohstoffbedarf für das Adsorptionsverfahren bisher in der Literatur nicht veröffentlicht ist, wird in dem Szenario davon ausgegangen, dass der gesamte Kapazitätszuwachs von DAC durch das Absorptionsverfahren gedeckt wird. Tatsächlich ist jedoch mit einem parallelen Ausbau beider Technologievarianten zu rechnen. Die Lebensdauer von DAC-Anlagen wird je nach Quelle mit 20 – 50 Jahren angegeben (Fasihi et al. 2019), sodass bis 2040 mit keinem rohstoffrelevanten Austausch bestehender DAC-Anlagen zu rechnen ist. Der geschätzte Rohstoffbedarf für DAC bis 2040 wird in Tab. 3.58 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass lediglich ein geringer Anteil der derzeitigen Rohstahlproduktion voraussichtlich für die Produktion von DAC-Anlagen bis 2040 benötigt wird. Daher ist mit keinem signifikanten Einfluss der Zukunftstechnologie DAC auf den Rohstoffmarkt zu rechnen.

3.3.4.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die in DAC verwendeten Stähle sind nach Ende der Lebenszeit der Anlage vollständig recycelbar, sodass die Rohstoffe dem Metallkreislauf nicht entzogen werden. Mit einer Substitution des Stahls, welcher für die tragende Struktur der DAC-Anlage eingesetzt wird, ist nicht zu rechnen, da es sich bei Eisen um ein günstiges und das am meisten genutzte Metall handelt. Daher bedingen weder die Materialkosten noch die Rohstoffverfügbarkeit eine Substitution. Die Ressourceneffizienz lässt sich gegebenenfalls durch größer skalierte Anlagen und besseres technisches Know-how in Zukunft noch steigern.

Tab. 3.58: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für DAC-Anlagen nach dem Absorptionsverfahren in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040
Edelstahl		–	97
Stahl (niedriglegiert)	1.820.366.000	–	15.220
Beton		–	356.159
PVC		–	42.617
Polypropylen		–	46
GFK		–	213

3.3.5 SOFC-Stationäre Brennstoffzelle

3.3.5.1 Technologiebeschreibung

Brennstoffzellen gehören zur Kategorie der Energiewandler und erzeugen durch kalte Verbrennung Strom. Bei der Feststoffoxid-Brennstoffzelle (SOFC) handelt es sich um einen Brennstoffzellentyp, der bei erhöhter Temperatur betrieben wird und im Gegensatz zu anderen Brennstoffzelltypen, z. B. der PEM-Brennstoffzelle, einen festen Elektrolyt besitzt. Die Einsatzfelder der SOFC decken stationäre als auch portable Anwendungen ab. Weiterentwicklungen ermöglichen dabei zunehmend auch den mobilen Gebrauch. In diesem Kapitel wird sich jedoch auf den stationären Betrieb fokussiert, der in der Vergangenheit auch das Haupteinsatzfeld der SOFC war. Zum Einsatz kommen stationäre SOFC hauptsächlich bei der dezentralen Stromerzeugung und der Kraft-Wärme-Kopplung. Die meisten Einheiten sind dabei in den USA und Südkorea im Einsatz (Weidner et al. 2019).

In den letzten Jahren kam es zwar weltweit zu stärkeren Konsolidierungen (Weidner et al. 2019), aber das Interesse von OEMs hat zuletzt wieder zugenommen, wie die Aktivitäten von Weichai, Cummins und Bosch zeigen. Die meisten SOFC

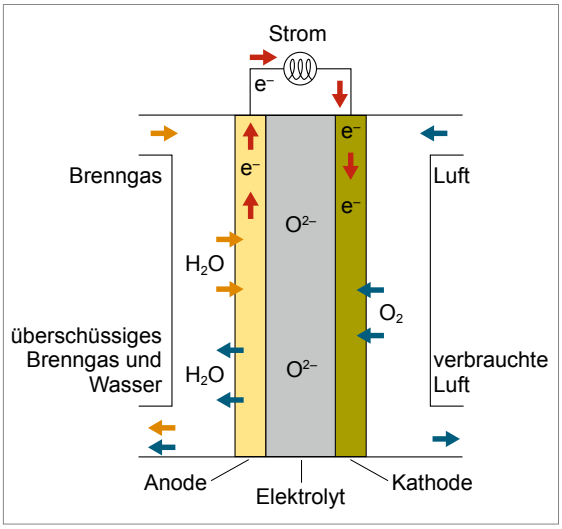


Abb. 3.66: Aufbau und Funktion einer Festoxid-Brennstoffzelle (Quelle: Sakurambo, Sunspeanzler, Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

werden dabei mit rund 80 MW aktuell in den USA von Bloom Energy gebaut. Hierbei handelt es sich in erster Linie um große stationäre Einheiten. Ansonsten sind als Hauptproduzenten SOLIDpower in Europa und Aisin in Japan zu nennen (E4tech (UK) Ltd 2019b). Im Gegensatz zu konventionellen Wärmemaschinen, die durch den Carnot'schen Wirkungsgrad beschränkt sind, können SOFC sehr effizient elektrochemisch Strom direkt erzeugen und zusätzlich Wärme in Form von Abwärme bereitstellen. Dadurch lassen sich kombinierte Wirkungsgrade von bis zu 90 % erreichen, wobei der elektrische Wirkungsgrad typischerweise 50 – 60 % beträgt. Vorteilhaft ist auch, dass Brennstoffe unterschiedlichster Art verwendet werden können, wie Wasserstoff, Kohlenwasserstoffe oder Kohlenmonoxid. Ein modulares Design erlaubt eine gute Skalierung von kleinen bis größeren Anlagen, ohne große Effizienzverluste hinnehmen zu müssen. Weitere Vorteile gegenüber traditionellen Energieumwandlungssystemen sind die Verlässlichkeit, niedrige Emissionen und Geräuscharmut.

Eine SOFC besteht aus elektrochemischen Zellen, die durch elektrische Interkonnektoren miteinander zu einem Stack verbunden sind. In der Zelle selbst befindet sich ein dichtes ionenleitendes Elektrolyt, welches zwei poröse Elektroden, die Kathode und die Anode, voneinander trennt. Zur besseren Veranschaulichung ist das Funktionsprinzip in Abb. 3.66 skizziert. Der an der Kathode zugeführte Sauerstoff reagiert mit den von dem externen Stromkreis kommenden Elektronen zu Oxidionen (O^{2-}), die zur Anode (Treibstoffelektrode) durch das ionenleitende Elektrolyt wandern. In der Anode rekombinieren die Oxidionen mit Wasserstoff (und/oder Kohlenstoffmonoxid) im Treibstoff zu Wasser (und/oder Kohlenstoffdioxid). Dabei werden Elektronen frei, die von der Anode über den externen Stromkreis zur Kathode fließen.

Die Bauform des SOFC-Stacks unterscheidet man typischerweise in eine planare und tubulare Bauweise. Bei der planaren Bauweise handelt es sich um ein flächiges Zelldesign, welches auch bei den anderen Brennstoffzelltypen wiederzufinden ist. Bei der tubularen Bauweise wird die Zelle röhrenförmig aufgebaut, vergleiche Abb. 3.67. Vorteilhaft ist hierbei insbesondere die einfachere Abdichtungsmöglichkeit im Vergleich zur planaren Bauweise. Tendenziell längere Stromwege

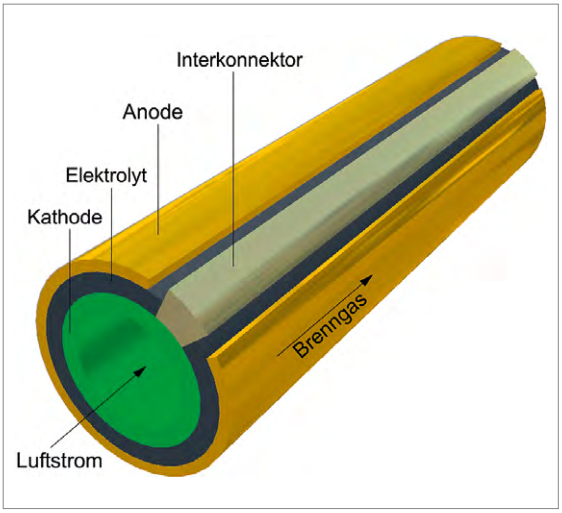


Abb. 3.67: Aufbau und Funktion einer tubularen Festoxid-Brennstoffzelle (Quelle: Jmsanta, Degree, Wikimedia, CC BY-SA 3.0)

und niedrigere Stromdichten gelten als Nachteile der tubularen Bauform. Zu jeder Variante gibt es verschiedene Ausprägungen, wobei sich die Hersteller meist auf einzelne Varianten fokussieren. Eine Unterscheidung der Varianten ist zudem auch durch die anoden- bzw. elektrolytgestützte Bauweise möglich. In der Vergangenheit dominierte die elektrolytgestützte Variante den Markt, da diese eine einfachere Versorgung mit Brenngas erlaubte, trotz höherer ohmscher Verluste durch den dickeren Elektrolyten. Durch die aufgenommenen Forschungsaktivitäten bei der Festkörperoxid-Elektrolyse (SOEL) wird jedoch auch wieder verstärkt an anodengestützen Varianten gearbeitet.

Die erforderliche Betriebstemperatur hängt von den verwendeten Materialien ab und liegt zwischen 500 – 1.000 °C. Bestrebungen, Kosten zu senken und die SOFC flexibler einsetzen zu können, haben in den letzten Jahren dafür gesorgt, dass immer niedrigere Betriebstemperaturen möglich wurden. So wurden die Arbeitstemperaturen im Vergleich verschiedener Varianten von 900 – 1.100 °C auf 500 – 750 °C gesenkt. Damit die elektrochemischen Reaktionen auch bei niedrigeren Temperaturen effizient ablaufen, mussten für die Sicherstellung der ionischen Leitfähigkeit meist Materialdicken reduziert oder Materialen substituiert werden. Für Neuentwicklungen mit dem Ziel, bestimmte Betriebstemperaturen oder Bauformen bzw. Einsatzzwecke der SOFC zu erreichen, ist es daher häufig sinnvoll, bereits vorab Materialen anhand ihrer elektrischen und ionischen Leitfähigkeit auszuwählen. Verschiedene Vor- und Nachteile einzelner Materialien bzw. Materialienkombinationen haben dazu beigetragen, dass viele verschiedene Materialien beim Bau der SOFC zum Einsatz kommen können und jeder Hersteller bestimmte Materialien präferiert.

3.3.5.2 Foresight Industrielle Nutzung

Die historische Entwicklung des SOFC-Marktes wurde in E4TECH (UK) Ltd (2016) und E4TECH (UK) Ltd (2019b) zusammengetragen und ist in Abb. 3.68 dargestellt. In den anfänglichen Jahren bis 2017 stiegen die SOFC Produktionen kontinuierlich an, wobei die Wachstumsraten bereits abnahmen. In den letzten drei Jahren kam es dann zu einer Stagnation, bei der sich die SOFC-Produktion auf einem Niveau von rund 85 MW pro Jahr bewegte.

Generell wird jedoch von einem weiter wachsenden Markt mit mittelfristigen Wachstumsraten zwischen 10 – 25 % ausgegangen. Für die Analysen in dieser Studie wird sich an der prozentualen Marktentwicklung für stationäre Anwendungen der drei Szenarien von E4TECH (UK) Ltd (2019a) kombiniert mit den SSP-Wasserstoffannahmen orientiert, s. Kapitel 1.2. Dabei wird zudem angenommen, dass langfristig nur Wasserstoff als Brennstoff eingesetzt wird. Für den aktuellen Bestand werden die jährlichen SOFC-Produktionen ab 2010 berücksichtigt.

Diese Annahmen wurden zu einer Entwicklung für den Bestand und die jährliche Produktion zusammengeführt, vergleiche Abb. 3.69. Dabei ist zu erwarten, dass der Bestand beim SSP5 in 2040 nur noch sehr langsam anwächst und ungefähr bei 10 GW liegen wird. Für SSP2-26 und SSP1-19 wird eine weiter zunehmende jährliche Produktion angenommen, wobei die des SSP2-26 halb so groß ist wie die des SSP1-19. Die Bestände werden mit 33 GW für das SSP2-26 und 52 GW für das SSP1-19 in 2040 angesetzt.

Der Brennstoffzellenmarkt hängt sehr von den politischen Rahmenbedingungen, der Forschungsförderung und den wirtschaftlichen Einsatzmög-

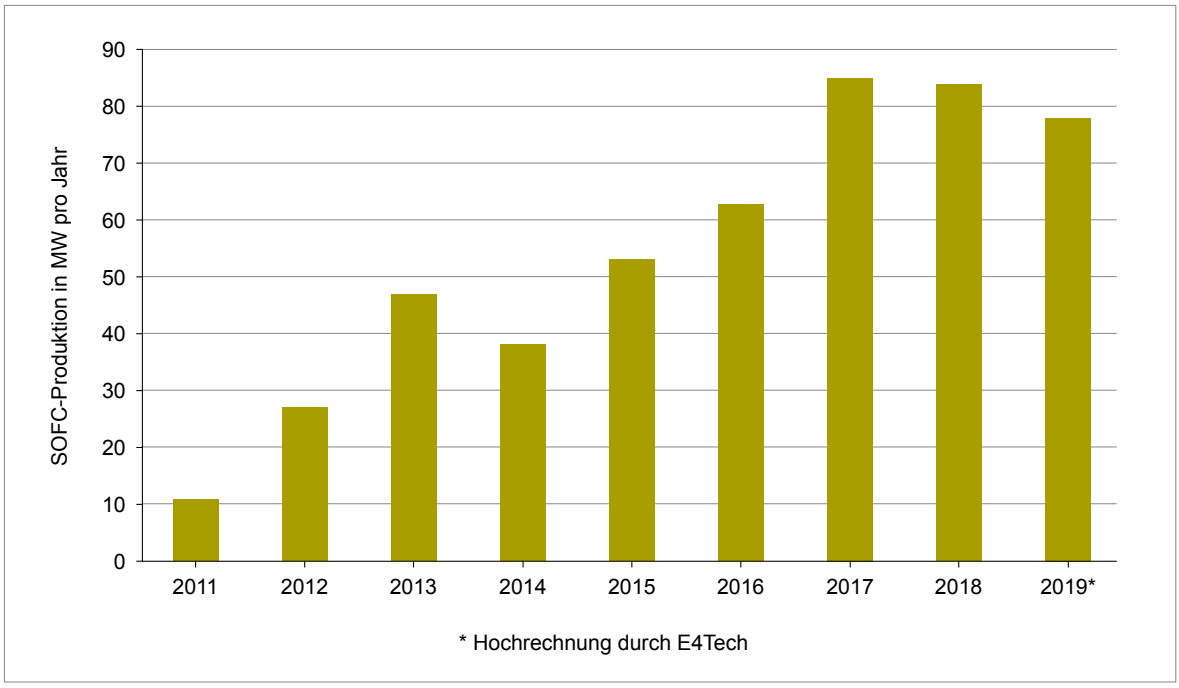


Abb. 3.68: Produktion von SOFC-Anlagen (Quellen: E4TECH (UK) Ltd 2016, E4TECH (UK) Ltd 2019b)

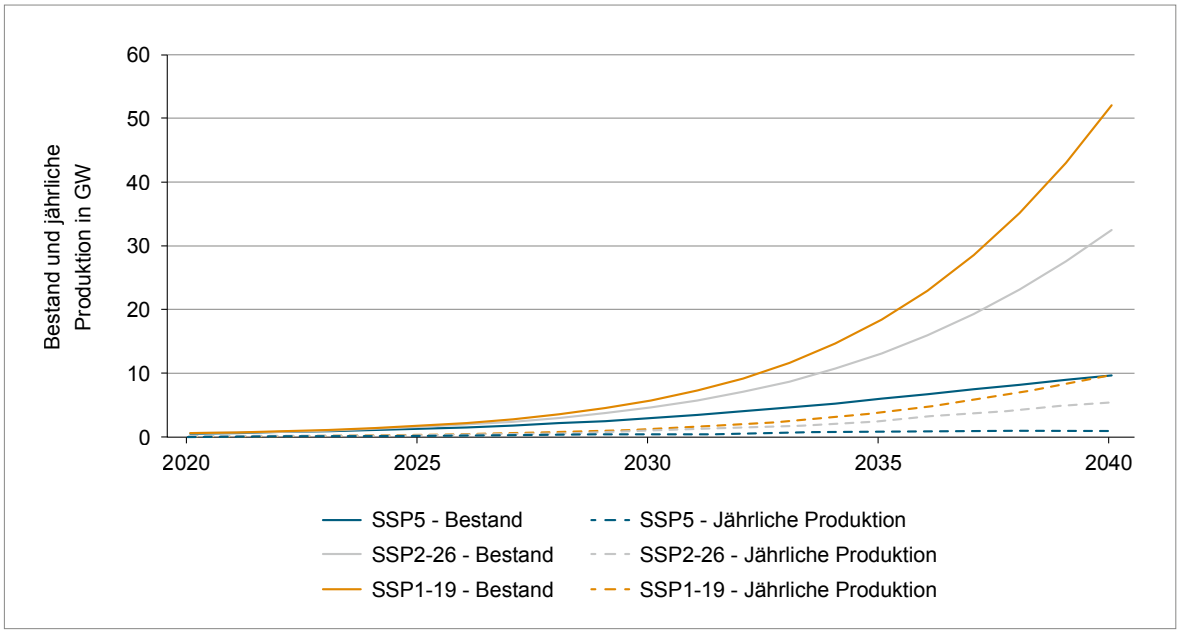


Abb. 3.69: Produktion und Aufbau des Bestandes an installierter SOFC-Leistung für die Szenarien SSP5, SSP2-26 und SSP1-19 (Quelle: Eigene Darstellung)

lichkeiten ab. Unsicherheiten ergeben sich aber auch dadurch, wie sich andere Brennstoffzelltypen und Alternativtechnologien entwickeln. Dies führt unweigerlich dazu, dass es durch das Marktumfeld zu Anpassungen in der Bauweise und der Materialauswahl bei der SOFC kommen kann. Zusätzlich kann die Gewinnung von Marktanteilen eines Herstellers dazu führen, dass bestimmte alternative Materialen stärker nachgefragt werden als angenommen.

3.3.5.3 Rohstoffinhalt

Die Auswahl des Elektrolytmaterials legt häufig die konkrete Bauform und die weiteren verwendeten Materialien fest. Grundsätzlich kann dabei auf eine Vielzahl an Materialien zurückgegriffen werden. Vier häufig verwendete Materialien sind yttriumdotiertes Zirkoniumiumdioxid (YSZ), scandiumdotiertes Zirkoniumdioxid (ScSZ), gadoliniumdotiertes Ceroxid (GDC) und Cer-Gadolinium-Oxid (CGO). YSZ kommt dabei seit langem zum Einsatz und ist auch aktuell noch das am häufigsten verwendete Elektrolytmaterial. Bei niedrigeren Temperaturen unter 700 °C besitzt es jedoch eine niedrige ionische Leitfähigkeit. ScSZ besitzt eine bessere Leitfähigkeit und auch eine höhere Stabilität, ist dafür aber weniger verfügbar und teurer. GDC und CGO besitzen auch bei niedrigen Temperaturen unter 600 °C eine ausreichend hohe Leitfähigkeit, sind dafür aber wiederum nicht so chemisch und mechanisch stabil (Da Silva & Souza 2017; Hussain & Yangping 2020; Zhang et al. 2020).

In Birnbaum et al. (2019) wird eine Übersicht gegeben, welche Materialien hauptsächlich bei verschiedenen Zelltypen zum Einsatz kommen. Für das Elektrolyt wird als Hauptmaterial YSZ mit Dotierungsanteilen von 3 – 10 mol% eingesetzt. Als Alternative wird Scandium-Cer-stabilisiertes Zirkoniumdioxid (ScCeSZ) benannt. Für die poröse Anode sind Nickel-YSZ-Materialien sehr verbreitet, wobei auch Nickel-Ceroxid und Ni-ScCeSZ verwendet wird. Eine etwas größere Auswahl gibt es bei der Kathode mit Lanthan-Strontium-Kobalt-Ferrit (LSCF) und Lanthan-Strontium-Manganit (LSM) mit YSZ bzw. als Alternative Lanthan-Strontium-Kobaltit (LSC) und Lanthan-Strontium-Ferrit (LSF). Für die Interkonnektoren wird auf rostfreie Stähle und Eisen-Chrom-Yttrium-Legierung (CFY) bzw. FeCrAlY zurückgegriffen. Höhere Betriebstemperaturen machen dabei meist die aufwändigeren Legierungen erforderlich, um Korrosion zu verhindern und eine ausreichende thermische Stabilität zu gewährleisten.

Die Bauweise und der Zelltyp haben einen direkten Einfluss auf den Materialbedarf. So ist die anodengestütze Schicht meist zwischen 200 – 300 µm und die elektrolytgestütze Schicht um die 150 µm dick. Die nichttragende Elektrolytschicht kann ansonsten mit 5 – 15 µm deutlich dünner ausfallen und von geringeren ohmschen Verlusten profitieren. Kathode und Anode bewegen sich zwischen 20 – 50 µm.

Tab. 3.59: Spezifische Rohstoffbedarfe für die SOFC in g/kW (Quellen: Strazza et al. 2015, Gandiglo et al. 2019, Smith et al. 2019, Bicer & Khalid 2020)

Rohstoff	g/kW
Nickel	1.070
Yttrium	87
Zirkonium	289
Lanthan	28
Mangan	37
Chrom	2.728
Aluminium	629
Kobalt	6
Scandium	5

Je nach Auslegung der Zellen können auch bei niedrigen Temperaturen Stromdichten von 2 W/cm² erreicht werden, typischerweise liegen diese jedoch bei rund 0,5 W/cm² (Kendall & Kendall 2016). Für die in Tab. 3.59 angenommenen spezifischen Materialbedarfe wurden die Mittelwerte aus den Untersuchungen in Strazza et al. (2015), Gandiglio et al. (2019), Smith et al. (2019), Bicer & Khalid (2020) gebildet. Um der technologischen Entwicklung gerecht zu werden, wurden zudem bei den Materialen für die elektrochemische Zelle hohe Extremwerte nicht berücksichtigt. Es wird dabei von den typischerweise eingesetzten und zuvor genannten Materialeinsätzen ausgegangen.

Berücksichtigt man Aussagen zur Nutzung des abgebauten Scandiums, so wird dieses zur Zeit zum größten Teil für SOFC und insbesondere beim größten Hersteller Bloom Energy eingesetzt (Grandfield 2018), bei dem ein ungefährer Bedarf von 92 g/kW besteht. Um diesen Bedarf nicht unberücksichtigt zu lassen, wird unter technologischer Weiterentwicklung und damit Materialeinsparung auch ein spezifischer Bedarf für Scandium ausgewiesen, welches in der Gesamtbetrachtung in erster Linie den Bedarf von Yttrium im Elektrolyten substituieren würde.

3.3.5.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für das stationäre SOFC-System ergeben sich auf Basis der spezifischen Rohstoffbedarfe pro g/kW und den Szenarien zu den Produktionszahlen die Rohstoffbedarfe wie sie in Tab. 3.60 dargestellt sind. Mit Ausnahme von Scandium ist keiner der Rohstoffe kritisch. Die bestehenden Produktionen reichen nominell auch für die Bedarfe in 2040 aus. Für Scandium ist jedoch eine deutliche Ausweitung der Produktion bzw. Materialeinsparungen nötig, wenn die Verwendung sich nicht groß ändert. Dies spiegelt auch wider, dass bereits jetzt der größte Anteil des abgebauten Scandiums bei der SOFC-Herstellung zum Einsatz kommt.

Der Unterschied im Bedarf zwischen den drei verschiedenen SSPs ist mit einem Faktor von rund 9 zwischen dem SSP5 und dem SSP1-19 relativ groß. Dies spielt insbesondere bei Scandium oder alternativ eingesetzten knappen Rohstoffen eine große Rolle, welche die Marktentwicklung von SSP2-26 (2040: dreifacher Bedarf gegenüber der Produktion 2018) und SSP1-19 (2040: fünffacher Bedarf) erheblich beeinflussen könnte. Es wäre dann anzunehmen, dass auf alternative Materialen zurückgegriffen werden muss, sofern die Anwendung es technisch und ökonomisch erlaubt. Materialien die mit niedrigen Betriebstemperaturen in Verbindung gebracht werden und kritischer sein können, sind z. B. Gadolinium und Cer.

3.3.5.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die aktuellen Materialverluste werden insbesondere für die strategischen Metalle aufgrund der vorherrschenden Entsorgungspraxis als hoch angenommen, auch wenn diese sich prinzipiell aufbereiten ließen (Ökopol GmbH 2016). Das Herstellungsverfahren, die Zellgeometrie und die Größe beeinflussen die Materialverluste zusätzlich. In der Vergangenheit gab es Annahmen zum Materialverlust von bis zu 50 % (Lilley et al. 1989), der nach neueren Arbeiten aber auch nur 10 – 30 % betragen kann (Lee 2015; Mehmeti et al. 2016).

Eine hohe Recyclingsquote mit bis 99 % ist bei der Nickelanode möglich. Für Lanthan-Strontium-Manganit bei der Kathode und Lanthan-Chromit beim Interkonnektor, der die Aufgabe hat, die Zellen elektrisch zu verbinden und den Gastransport zu den Elektroden sicherzustellen, sind keine

Tab. 3.60: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für stationäre SOFC-Systeme in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Nickel	2.327.500 (B) 2.189.313 (R)	84	10.350	5.800	1.100
Yttrium	7.600 (R)	2	842	470	90
Zirkonium	1.256.362[1] (B)	23	2.798	1.570	300
Lanthan	35.800 (R)	2	270	150	29
Mangan	20.300.000 (B)	3	360	200	38
Chrom	27.000.000 (B)	213	26.400	14.800	2.800
Aluminium	63.756.000 (R)	49	6.100	3.420	650
Kobalt	151.060 (B) 126.019 (R)	1	63	35	7
Scandium	9,1 (B)	5	48	27	5

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

[1] *Produktion Zirkoniumminerale*

Recyclingprozesse verfügbar. Entsprechend können tendenziell höhere Recyclingquoten bei einer planaren im Vergleich zu einer tubularen SOFC erreicht werden. Die schwierige Aufbereitung keramischer Materialien, der hohe Energiebedarf und der geringe Wert führt dazu, dass sie nur einer Zweitverwertung als Auffüllmaterial in der Bauindustrie oder Zement- und Klinkerherstellung zugeführt werden (Environment Park SPA et al. 2018). Unter der Annahme eines größeren Marktes an Altanlagen und einem steigendem Wert ist aber anzunehmen, dass entsprechende Verfahren auch verstärkt zum Recycling eingesetzt werden.

3.3.6 CCS – Carbon Capture and Storage

3.3.6.1 Technologiebeschreibung

CO_2 aus industriellen Verbrennungsprozessen kann abgeschieden und dauerhaft geologisch gespeichert werden. Somit kann die steigende Belastung der Atmosphäre mit Treibhausgasen reduziert werden. Von der Internationalen Energieagentur wird der Einsatz von CO_2-Abscheidetechniken zur Erreichung der Klimaziele für unbedingt notwendig erachtet (IEA 2016). Die gesamte Technologie wird allgemein als Carbon Capture and Storage (CCS) bezeichnet (Fischedick et al. 2015). Der Prozess kann in drei Einzelschritte unterteilt werden (Abb. 3.70): CO_2-Abscheidung, CO_2-Transport (Tankschiffe, Tanklaster, Pipelines) zur Lagerstätte und CO_2-Speicherung.

Abtrennungstechnologien werden schon seit Jahrzehnten in der chemischen Industrie und in Raffinerien eingesetzt, allerdings ist die technische Anwendung im Energiesektor nach wie vor herausfordernd. Verschiedene CO_2-Abtrennverfahren für den Kraftwerksmaßstab, deren Systemkomponenten bereits ausgereift sind, werden dabei diskutiert. Als wichtigstes Unterscheidungsmerkmal gilt der Zeitpunkt, zu dem die CO_2-Emissionen abgetrennt werden (Fischedick et al. 2015): Post-Combustion-Capture, Oxyfuel und Pre-Combustion. Zwei weitere Verfahren, deren technische Reife speziell im Energiesektor noch weniger fortgeschritten sind, sind das Membranverfahren und das Chemical Looping-Verfahren.

Ausschließlich das Post-Combustion- und das Oxyfuel-Verfahren lassen sich bei bereits bestehenden Anlagen nachrüsten. Beim Pre-Combustion-Verfahren ist eine Auslegung der kompletten Anlage notwendig, sodass es sich nur für Neuanlagen eignet. In Abb. 3.71 sind die drei Carbon-Capture-Verfahren schematisch dargestellt.

Post-Combustion

Erfolgt die CO_2-Abscheidung nach der Verbrennung, spricht man vom sogenannten Post-Combustion-Verfahren. Dabei wird der Brennstoff zunächst normal verbrannt. Durch die Verbrennung entstehen Stickoxide, Schwefeloxide und andere Schadstoffe. Bestehende Kraftwerke verfügen deshalb über entsprechende Rauchgasreinigungsanlagen, die die Schadstoffe filtern und abtrennen. Beim Post-Combustion-Verfahren wird, nach der Rauchgasreinigungsanlage, eine zusätzliche Reinigungsstufe hinzugefügt. Für die Abtrennung des CO_2 aus dem Rauchgas kommen derzeit folgende Verfahren zum Einsatz: Absorptionsverfahren (chem. und phys. Absorption), Adsorptionsverfahren, Membran-Verfahren und Kryogen-Verfahren. Das gebräuchlichste Verfahren ist die chemische Absorption mittels Aminwäsche, im Allgemeinen auch als Rauchgaswäsche bekannt. Dabei wird das Rauchgas, meist im Gegenstromprinzip, durch ein flüssiges (z. B. Amin-basiertes wie Monoethanolamin) Lösungsmittel geleitet, welches das CO_2 aus den Rauchgasen absorbiert bzw. bindet. Unter Zufuhr von Wärme wird das zuvor gebundene CO_2 in einem anderen Reaktor wieder zum Ausgasen gebracht. Eine solche Regeneration durch Desorption kann auch über einen Druckwechsel erfolgen. Das regenerierte Lösungsmittel wird wieder in den Prozesskreislauf eingebracht und das CO_2 kann weitertransportiert werden. Bei der Membrantechnologie erfolgt die Trennung des CO_2 über speziell selektive Membranen (Fischedick et al. 2015).

Für die Abtrennung des CO_2 aus dem Kraftwerksprozess besitzt die chemische Absorption im Vergleich zu den anderen vorgestellten Verfahren den höchsten technologischen Entwicklungsstand. Als sogenannte „End-of-Pipe“-Technologie hat das Post-Combustion-Verfahren den Vorteil der Nachrüstbarkeit für bereits bestehende Kraftwerke. In Bezug auf den Kraftwerksbau bedeutet die Nutzung eines chemischen Waschverfahrens

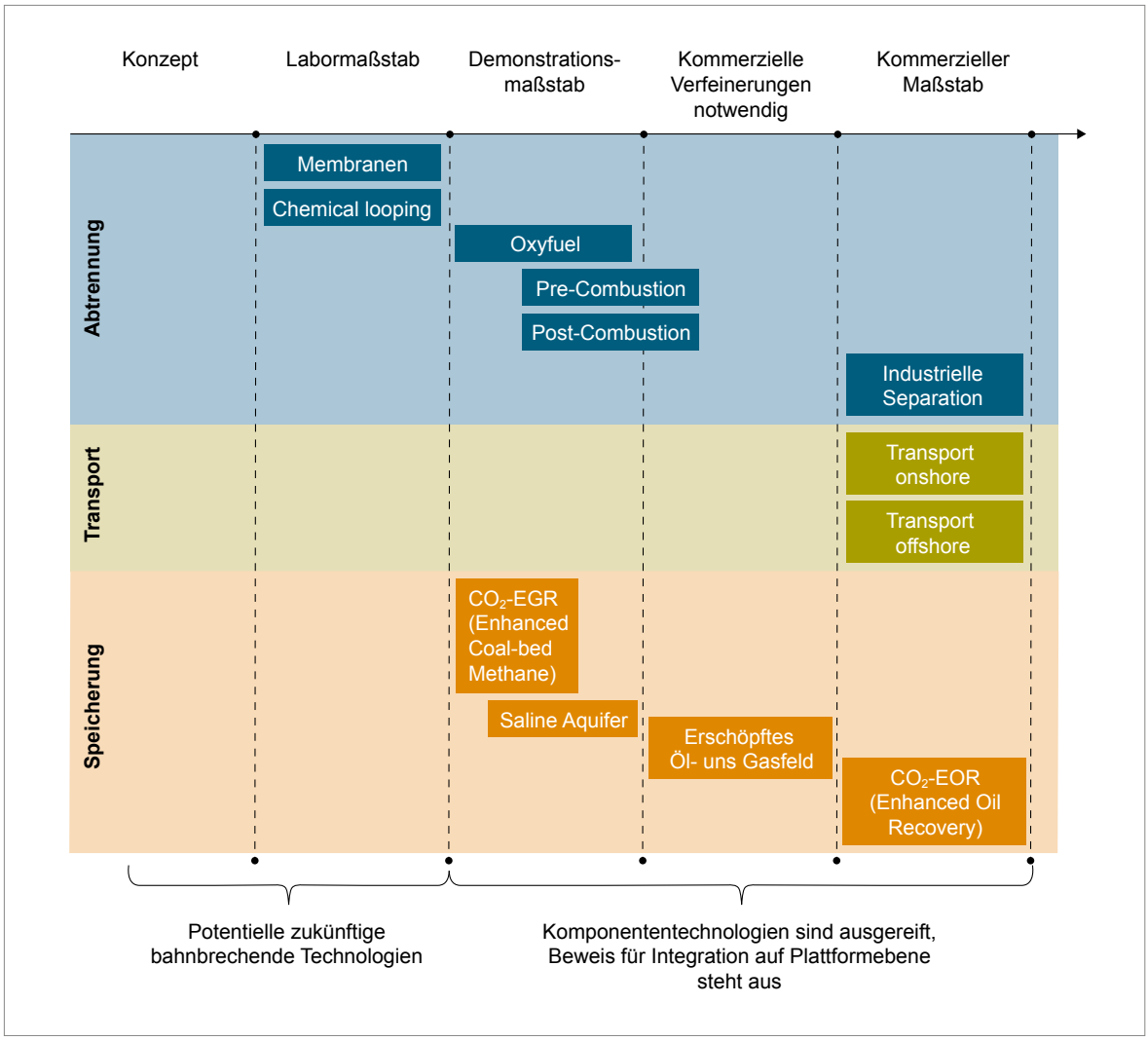


Abb. 3.70: Entwicklungsstadien der CCS-Systemkomponenten (Quelle: Eigene Darstellung nach IPCC 2005 und McKinsey & Company 2008)

keine Änderung der eingesetzten Technologien wie Brenner, Kessel, Turbinen usw. Allerdings muss die Abstimmung der gesamten Anlage verändert werden, da die zusätzliche Wärmeenergie für die Regeneration des Lösungsmittels bereitgestellt werden muss. Außerdem müssen die Waschanlage und die notwendige Verrohrung in die Geometrie und Topologie mit eingeplant werden. Zudem zeigt das Post-Combustion-Verfahren eine hohe Flexibilität hinsichtlich der geführten Lastnutzungen des Kraftwerks. Nachteile sind der hohe Energiebedarf, welcher vor allem die Regeneration des Lösungsmittels betrifft, und der erhöhte Platzbedarf der gesamten Anlage (Fischedick et al. 2015; Wietschel et al. 2015)

Pre-Combustion

Beim Pre-Combustion Capture findet die CO_2-Abscheidung vor dem eigentlichen Verbrennungsvorgang statt. Als Beispiel wird an dieser Stelle die IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) -Technologie genannt. Bei diesem Verfahren wird der Brennstoff unter Zugabe von Sauerstoff bei Temperaturen von ca. 900 °C in einem Vergasungsreaktor zu Synthesegas umgewandelt. Die unerwünschten Gasbestandteile (H_2S, COS, HCN, NH_3) werden anschließend entfernt. Das Synthesegas, das sich hauptsächlich aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff zusammensetzt, wird mittels Wasserstoffkonvertierung in einem Shift-Reaktor unter Hinzugabe von Wasserdampf in CO_2 und weiterem Wasserstoff umgewandelt.

Es entsteht ein Synthesegas aus den Hauptbestandteilen Wasserstoff und CO_2. Der hohe CO_2-Partialdruck ermöglicht eine Abtrennung des CO_2 aus dem H_2/CO_2-Gemisch mittels physikalischer Wäsche oder Membranen. Bei einer physikalischen Wäsche wird das CO_2 in einer Waschlösung, z. B. Methanol, gelöst. In Zukunft kommt auch die Membrantechnik (Wasserstoffmembranen) zur CO_2-Abtrennung verstärkt in Frage, deren Vorteil in einer Reduzierung des Energieverbrauchs zu sehen ist. Der verbleibende Wasserstoff kann in weiterer Folge in der Stromerzeugung für Gas- oder Dampfturbinenkraftwerke eingesetzt werden (Fischedick et al. 2015). Ein Vorteil ist, dass für die IGCC-Kraftwerke eine hohe Einsatz- und Brennstoffflexibilität besteht. Dadurch können bei der Vergasung neben Kohle auch andere, alternative Energieträger, z. B. Biomasse oder Sonderbrennstoffe, eingesetzt werden. Ein wesentlicher Nachteil dieser Technologie ist jedoch, dass die Nachrüstung für bereits bestehende Kraftwerke nicht möglich ist (Fischedick et al. 2007; Fischedick et al. 2015).

Oxyfuel

Die Grundlage des Oxyfuel-Verfahrens ist die Verbrennung des Brennstoffs mit reinem Sauerstoff und nicht konventionell mit der Umgebungsluft. Dadurch wird ein Rauchgas erzeugt, welches im Wesentlichen aus CO_2 (ca. 80 %) und Wasserdampf besteht. Durch die Verbrennung mit reinem Sauerstoff entstehen keine Stickoxide, wodurch aufwändige Entstickungsanlagen entfallen. In einem anschließenden Kondensationsschritt erfolgt die Trennung des im Abgas enthaltenen CO_2 vom Wasserdampf. Aufgrund der Verbrennung mit reinem Sauerstoff entstehen dabei extrem hohe Verbrennungstemperaturen. Um diese zu reduzieren und zu regeln, wird ein Teil der Rauchgase wieder in den Prozess zurückgeführt. Das restliche Abgas kann in weiterer Folge von restlichen Schadstoffen, z. B. Schwefeloxid, gereinigt werden. Die Haupttrennarbeit und somit der höchste Energieverbrauch werden bei der Herstellung von reinem Sauerstoff in einer Luftzerlegungsanlage aufgewandt. Stand der Technik ist hierbei die kryogene Luftzerlegung, bei der die Luft zunächst verflüssigt wird und dann Sauerstoff und Stickstoff durch Destillation aufgetrennt werden. Bei der Sauerstoffherstellung könnte der Einsatz von Hochtemperaturmembranen den Energieverbrauch deutlich senken. Diese spezielle Polymermembranen sind jedoch noch nicht Stand der Technik (Cremer 2007). Neben dem Membranverfahren ist noch das Chemical-Looping Verfahren als vielversprechend zu betrachten (Kuckshinrichs 2013; Fischedick et al. 2015).

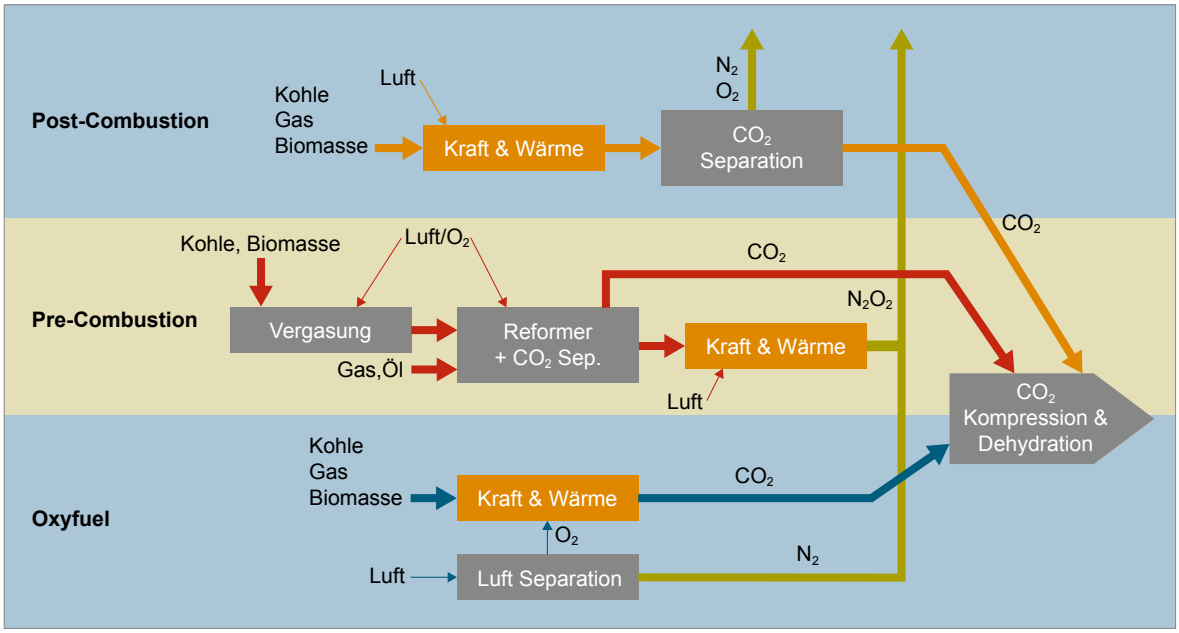


Abb. 3.71: Schematische Darstellung der drei Carbon-Capture-Verfahren (Quelle: Verändert nach IPCC 2005)

Chemical-Looping-Combustion (Unmixed-Combustion)

Beim Chemical Looping Verfahren (CLC) handelt es sich um eine neue Technologie. Im Vergleich zu anderen CO_2-Abtrennverfahren ist der Energieaufwand für die Abtrennung des CO_2 aus dem Abgasstrom deutlich geringer. Es handelt sich um einen indirekten Verbrennungsprozess, bei dem der Brennstoff ohne direkten Kontakt mit der Luft verbrannt wird. Der benötigte Sauerstoff wird nicht mittels energieintensiver kryogener Luftzerlegung hergestellt, sondern durch einen Sauerstoffträger bereitgestellt (Orth 2014). Das CLC-Verfahren besteht dabei im Wesentlichen aus zwei miteinander verbundenen Wirbelschichtreaktoren, einem Luftreaktor und einem Brennstoffreaktor. Das Bettmaterial, welches zwischen den beiden Reaktoren zirkuliert, dient dabei als Sauerstoffträger und besteht in der Regel aus Metalloxid (MeO). Im Luftreaktor wird der Sauerstoffträger mit Luft oxidiert. Das Abgas aus dem Luftreaktor setzt sich dabei aus Stickstoff und Sauerstoff zusammen. Im nachgelagerten Brennstoffreaktor reagiert der Sauerstoffträger mit dem Brennstoff, wobei dem Metalloxid der Sauerstoff wieder entzogen wird. Der so erzeugte Abgasstrom besteht dabei hauptsächlich aus Kohlendioxid und Wasserdampf. Nach der Kondensation des Wasserdampfes bleibt ein reiner CO_2-Gasstrom übrig. Sobald die Reaktion im Brennstoffreaktor abgeschlossen ist, wird das reduzierte Metalloxid wieder zum Luftreaktor transportiert und mit Sauerstoff regeneriert (Orth 2014). Die vereinfachte Funktionsweise des CLC-Verfahrens ist in Abb. 3.72 dargestellt.

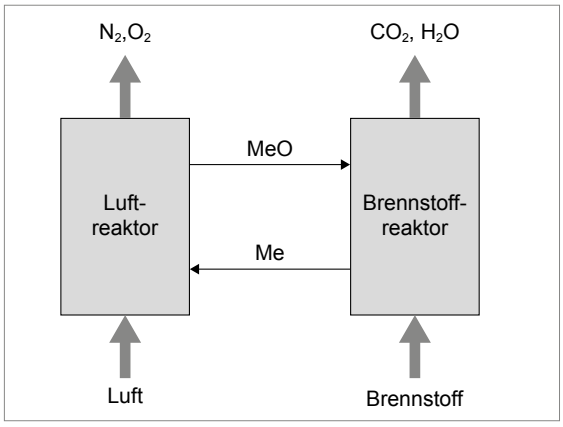


Abb. 3.72: Ablauf des Chemical-Looping-Verfahrens (Quelle: Orth 2014)

CO_2-Transport

Bei allen Verfahren wird nach der Abtrennung das CO_2 entweder für den bevorzugten Transport in Pipelines auf 110 bar verdichtet (überkritischer Zustand) oder bei geringen Mengen für den Abtransport in Schiffen oder Lkw verflüssigt. Danach wird es in tiefen geologischen Formationen on- oder offshore gespeichert. Bei der Ölgewinnung wurden dazu bereits wertvolle Erfahrungen gesammelt, indem CO_2 zum EOR (Enhanced Oil Recovery) eingesetzt oder in erschöpften Öl- bzw. Gasfeldern gespeichert werden kann.

CCS-Technologieentwicklung

Aufgrund von Wirkungsgradverlusten von 6 – 13 % eines Kraftwerks (Wuppertal Institut, ISI, IZES 2017) durch CCS-Technologien benötigen Kraftwerke je nach Anlagentyp bis zu 40 % mehr Primärenergie (IPCC 2005), was auch mit erhöhten CO_2-Emissionen verbunden ist. Diese CO_2-Emissionen werden wiederum zu 85 – 95 % abgeschieden und können gespeichert werden, sodass die Emissionen in die Atmosphäre durch CCS insgesamt um 80 – 90 % reduziert werden können.

Daher stellt eine Steigerung des Wirkungsgrades im Kraftwerksbasisprozess eine wesentliche Entwicklungsaufgabe dar. Alle Verfahren besitzen Potenzial, die Wirkungsgradeinbußen mithilfe effizienter Integration in den Kraftwerksprozess und der Entwicklung neuer Verfahren und Materialien zu senken. Vielversprechend ist, dass eine CO_2-Reinheit von über 99 % bei allen Abtrennverfahren bereits erreicht wurde. Dabei ist das Post-Combustion-Verfahren zurzeit mit Abstand die am weitesten entwickelte Technologie, um die CO_2-Emissionen aus dem Kraftwerksprozess abzutrennen (Kuckshinrichs 2013; Wietschel et al. 2015; Wuppertal Institut et al. 2017).

International sind bereits einige CCS-Anlagen in Betrieb, einige davon in großtechnischem Maßstab. In Europa befinden sich in Norwegen aktuell zwei großtechnisch betriebene Anlagen mit einem CCS-Volumen von zusammen 1,7 Mio. Tonnen CO_2 pro Jahr. Zusätzlich befinden sich auf europäischer Ebene zehn weitere Anlagen in verschiedenen Entwicklungsstation: sechs in UK, zwei in den Niederlanden, eine in Norwegen und eine in Irland. Diese zehn Anlagen wären insgesamt in

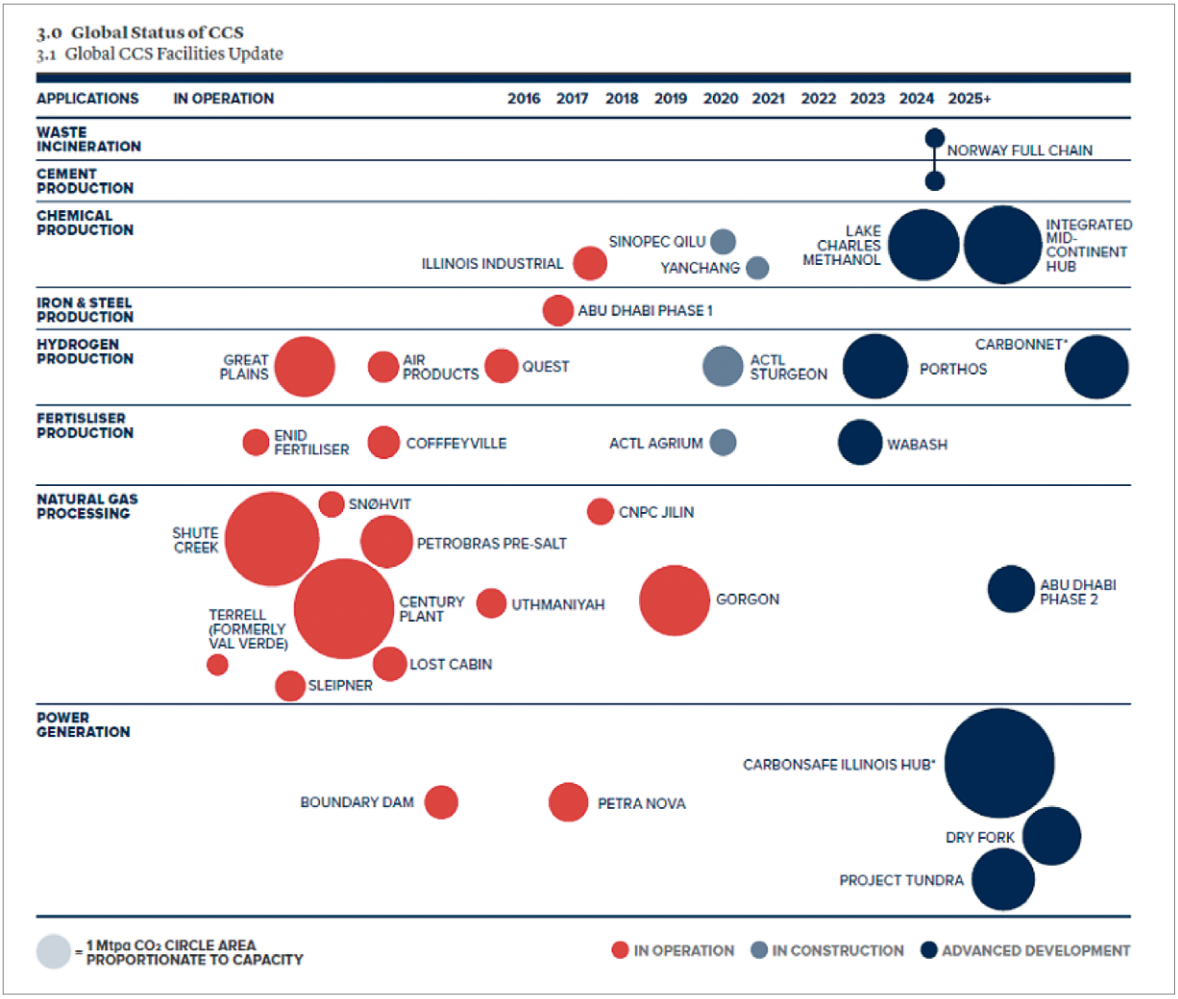


Abb. 3.73: Globale CCS-Projekte (Quelle: Global CCS Institute 2020)

der Lage, 20,8 Mio. Tonnen CO_2 jährlich abzuscheiden. Die Speicherkapazität in Europa wird auf etwa 300 Gigatonnen CO_2 geschätzt (Global CCS Institute 2019). In Abb. 3.73 sind ehemalige, laufende und zukünftige CCS-Projekte dargestellt (Global CCS Institute 2020).

3.3.6.2 Rohstoffinhalt

Nach Cormos et al. (2013), die die drei verschiedenen Kraftwerkstypen Erdgas und Kohlekraftwerke mit Kombi-Prozess mit integrierter Vergasung (NGCC und IGCC sowie PF) mit und ohne CCS untersucht haben, werden für den Bau von Kraftwerken mit CCS bei den kohlebasierten Kraftwerken (IGCC und PF) die doppelte Menge Beton und Stahl benötigt. Bei Gaskraftwerken steigt bei der CCS-Variante ausschließlich der Bedarf an niedriglegierten Stählen um 64 %. Die dargestellten Zahlen beruhen auf konzeptionellen Referenzkraftwerken zwischen 400 – 500 MW mit einer minimalen CO_2-Abscheidungsrate von 90 % und sind nach Cormos et al. (2013) im Abgleich mit der Literatur valide. Sie wurden durch Simulationen an den notwendigen Stellen ergänzt. Anschließend wurden die effizientesten Kraftwerke untereinander verglichen. Dabei wurden Konstruktionsparameter aus der Literatur entnommen.

In einer JRC-Studie (Moss et al. 2011) wurde, neben anderen Energietechnologien, auch CCS in Hinblick auf die Materialmengen analysiert, die für die Erfüllung des SET-Plans nötig sind. In Tab. 3.61 sind die identifizierten Legierungselemente für die CCS-Technologien aufgelistet. Diese Zahlen berücksichtigen, neben dem Bedarf für die eigentliche CCS-Anlage, auch die Stahlmengen für Rohre zum Transport des CO_2 zum Lagerungsort (Moss et al. 2011).

Tab. 3.61: Menge an Legierungselementen für CCS-Technologien in kg/MW_{el} (Quelle: Moss et al. 2011)

Legierungselement	kg/MW
V	100
Nb	100
Ni	1.145
Mn	3.761
Cu	692
Co	7,5
Cr	362
Mo	1

Neben den Konstruktionsmaterialien mit den angesprochenen Legierungselementen benötigen die CCS-Technologien laufend Materialen für den Prozess der CO_2-Abscheidung. Diese Materialien sind schematisch in Tab. 3.62 bezüglich der CO_2-Abscheidungsmethoden aufgelistet. Bei Post-Combustion werden derzeit wässrige Alkanolaminlösungen wie Mono-Ethanol-Amin (MEA) und kohlehaltige Adsorbenten für die CO_2-Wäsche eingesetzt. Nach Abschätzung in Fischedick et al. (2007) werden pro abgetrennter Tonne CO_2 bei der MEA-Wäsche die folgenden Chemikalienmengen benötigt: 2,25 kg MEA-Lösemittel und 0,0826 kg Aktivkohle sowie 0,152 kg NaOH.

Langfristig stellt die Verwirklichung und der sichere Betrieb einer Kraftwerksanlage mit 700 °C-Technologie eine unentbehrliche Voraussetzung dar, um CO_2 aus den Rauchgasen unter wirtschaftlichen Aspekten auszuwaschen und in geeignete Lagerstätten zu verbringen. Heutige bestehende fossil befeuerte Kraftwerke, mit einem mittleren Wirkungsgrad von rund 38 %, sind unter dem Gesichtspunkt eines verantwortlichen Umgangs mit fossilen Primärenergieträgern nicht für einen Betrieb mit einer CO_2-Rauchgaswäsche geeignet. Neben einem höheren Verbrauch an fossilen Brennstoffen wäre beim Einsatz von Rauchgaswäschen auch erheblich mehr CO_2 abzutrennen und einzulagern (VGB 2011).

3.3.6.3 Foresight Industrielle Nutzung

Als Zeitpunkt der kommerziellen Verfügbarkeit von CCS im Kraftwerksmaßstab wird in Roadmaps das Zieljahr 2030 genannt (European Commission 2015). In welchem Zeitraum CCS einen Beitrag zum Klimaschutz leisten kann, ist jedoch nicht nur von der technischen Verfügbarkeit der Abscheidetechnologien, sondern auch von der verfügbaren

Tab. 3.62: Materialien für CO_2-Abscheidungsmethoden (Quelle: D'Alessandro et al. 2010)

		Post-Combustion	Pre-Combustion	Oxyfuel Combustion
Absorption	– Chemikalien (Alkanolamine) – Physikalisch (Ionische Flüssigkeiten)	■	■	
Adsorption	– Mikroporös Materialien (Zeolithe, Metalloxide, Metall – organische Materialien, kohlenstoffhaltige Adsorbentien) – Druck/Temperatur-Swing-Ansatz	■	■	■
Tieftemperatur-Destillation		■	■	■
Membranen	– Anorganisch (Keramik, Wasserstofftransport, Ionentransport) – Polymer – Hybridmembranen	■	■	■
Gashydrate		■	■	
Chemical looping	– Metalloxide		■	■

Speicherkapazität und der benötigten Transportinfrastruktur abhängig (Grünwald 2007). Dagegen werden noch immer neue Pilotanlagen (vgl. (MIT 2015) sowie kommerzielle CCS-Projekte mit einer Größe von über 60 MW geplant und gebaut, (vgl. Global CCS Institute 2020).

Die Entwicklung der CCS-Technologie in der Zukunft ist schwer abzuschätzen, da die kommerzielle und routinemäßige Nutzung voraussichtlich erst ab dem Jahr 2030 einsetzen wird. In der Roadmap der (IEA 2013a) wird ein starker Zuwachs an CCS-Kapazität zwischen 2030 und 2040 unter den Rahmenbedingungen eines 2 °C-Szenarios für die globale Erderwärmung prognostiziert. In einer neueren Studie erwartet die IEA in ihrem Sustainable Development Szenario bis 2040 eine weltweite Kraftwerkskapazität von 315 GW Stromerzeugung, die mit CCS ausgerüstet ist und damit ca. 5 % der weltweiten Kraftwerkskapazität ausmachen (IEA 2020a). Dies entspricht einem Zuwachs an nachgerüsteter und neu gebauter CCS-Kapazität von durchschnittlich 15 GW pro Jahr in den nächsten zwei Jahrzehnten (IEA 2020a).

Aus den Daten zur Stromerzeugung der SSP-Modelle (Riahi et al. 2017), vergleiche auch Tab. 3.63, können über die Umrechnung in TWh, über die jährliche Betriebsdauer und einer (sehr hoch angenommenen) Kraftwerksbereitschaft von

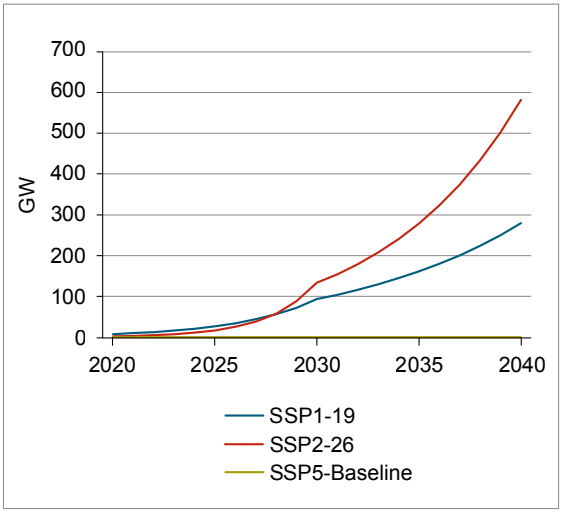


Abb. 3.74: Leistung der Kraftwerke mit CCS in GW (Quelle: Eigene Darstellung)

95 % die Kraftwerksleistung für die verschiedenen Jahre abgeschätzt werden, siehe Abb. 3.74. Interessant beim Blick auf die Szenarien ist die Tatsache, dass im Basis-Szenario SSP5 „Fossiler Pfad“ bis 2040 keine CCS-Technologien bei der Stromversorgung eingesetzt werden.

Für 2040 lassen sich daraus die in diesem Jahr neu installierten Kraftwerkskapazitäten mit CCS ablesen, vergleiche Tab. 3.64.

Tab. 3.63: Stromerzeugung mit CCS für das Jahr 2040 in den ausgewählten SSPs (Quelle: Riahi et al. 2017)

Stromerzeugung mit CCS nach Energieträgern [EJ/y]	SSP1-19 Nachhaltigkeit	SSP2-26 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Kohle	1,30	1,80	0
Gas	7,97	17,39	0
Biomasse	6,66	0,13	0
Summe	**15,93**	**19,32**	**0**

Tab. 3.64: Im Jahr 2040 neu zu installierende CCS-Kapazitäten für Kraftwerke [GW]

	SSP1-19 Nachhaltigkeit	SSP2-26 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Leistung der Stromerzeugung mit CCS [GW]	32,2	88,3	0

3.3.6.4 Foresight Rohstoffbedarf

Verlässliche Annahmen zur Berechnung des Rohstoffbedarfs sind bei derzeitigem Stand der Technik (Demonstrationsanlagen) schwer zu treffen. Erstens werden Stahllegierungen für hocheffiziente Kohlekraftwerke noch getestet, zweitens sind Reduzierungen im Materialbedarf durch Weiterentwicklung der Prozesse zu erwarten, und schließlich könnten neue Membrantechnologien derzeitige Anlagen für die Luftzerlegung beim Oxyfuel-Verfahren oder physikalische Verfahren zur CO_2-Abtrennung vor der Verbrennung ersetzen. Unter Umständen entsteht hier ein Bedarf für Seltene Erden. Da aber einige Materialkombinationen möglich sind, könnte in Zukunft wegen möglicher Knappheiten oder Kostenfragen auf andere Stoffe zurückgegriffen werden. Darüber hinaus ist der zukünftige Ausbau der CCS-Technologie noch schwer abzuschätzen.

In dieser Technologiesynopse wird der Rohstoffbedarf an Legierungselementen für CCS für das Jahr 2040 abgeschätzt. Durch Verknüpfung der Annahmen zum spezifischen Rohstoffbedarf mit den Werten aus Tab. 3.61 und den Kraftwerkskapazitäten mit CCS in Tab. 3.64 ergeben sich die Bedarfsmengen für CCS-Technologien im Jahr 2040, vergleiche Tab. 3.65.

Nach den Berechnungen in dieser Technologiesynopse haben demnach alle Legierungselemente nur einen sehr geringen Anteil an der Weltproduktion im Promillebereich. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch die Studie (Vatopoulos & Tzimas 2012) für die Zementindustrie. Auch in dem Sektor haben die untersuchten CCS-Technologien keinen Effekt auf den Rohstoffbedarf zur Herstellung von Klinker im Einzelnen und damit auch weltweit.

3.3.6.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Da CCS sich noch im frühen Stadium der Entwicklung befindet und Weiterentwicklungen der Prozesse ausstehen, ist es schwierig, Aussagen über das Recycling und Substituierbarkeit von Rohstoffen bezüglich CCS zu machen. Sicherlich gilt für die Konstruktionsmaterialien von CCS-Technologien ähnliches wie für konventionelle Kraftwerkskomponenten: Das enthaltene Kupfer, Aluminium und Chrom wird daher in Zukunft auch recycelt (European Commission 2015). Ebenso wird es möglich sein, Katalysatoren zu recyceln oder Katalysatoren mit Vanadium und Wolfram durch Calciumcarbonat (für die SO_2-Rückhaltung) zu ersetzen (IEA 2012).

Tab. 3.65: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für CCS in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Vanadium	90.661 (B)	n. v.	3.200	8.800	0
Niob	68.200 (B)	n. v.	3.200	8.800	0
Nickel	2.327.499 (B) 2.189.313 (R)	n. v.	36.900	101.200	0
Mangan	20.300.000 (B)	n. v.	121.300	332.300	0
Kupfer	20.590.600 (B) 24.137.000 (R)	n. v.	22.300	61.100	0
Kobalt	151.059 (B) 126.019 (R)	n. v.	200	700	0
Chrom	27.000.000 (B)	n. v.	11.700	32.000	0
Molybdän	265.582 (B)	n. v.	30	100	0

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

3.3.7 Redox-Flow-Speicher

3.3.7.1 Technologiebeschreibung

Redox-Flow-Batterien (RFB) wurden in den 1970er Jahren entwickelt. Sie speichern elektrische Energie in Salzen und sind damit mit den Akkumulatoren verwandt. Im Unterschied zu den klassischen Akkumulatoren zirkulieren die zwei energiespeichernden Elektrolyte in zwei getrennten Kreisläufen, zwischen denen in der Zelle mittels einer Membran ein Ionenaustausch ermöglicht wird (Oertel 2008). Die energiespeichernden Elektrolyte werden außerhalb der Zelle in getrennten Tanks gelagert, wodurch die gespeicherte Energiemenge nicht von der Größe der zentralen Reaktionseinheit für den Lade- oder Entladeprozess abhängt. Die Tanks können einfach und manuell befüllt und die Batterie damit geladen werden. Die Tankgröße bestimmt den Energieinhalt der Batterie (kWh), die Lade-/Entladeeinheit die Leistung (kW) der Batterie. Die zwei Parameter Leistung und Speicherkapazität können unabhängig voneinander skaliert werden. Dies ist bei konventionellen Batterien nicht möglich. Die Elektrolyte werden durch Pumpen in die Reaktionseinheit transportiert, in der die Redox-Reaktion stattfindet. Der Ionentransport erfolgt durch die Membran, während die Elektronen über einen externen Stromkreislauf geführt werden. Diesem Stromkreislauf wird während des Ladens elektrische Leistung zugeführt und während des Entladens elektrische Leistung abgenommen. Durch die Redoxreaktion ändern die beiden Elektrolyte ihre Oxidationsstufe. Um eine Vermischung der „geladenen“ und „entladenen“ Elektrolyte zu vermeiden, wird innerhalb der Tanks ein beweglicher Separator zur räumlichen Trennung der Fluide eingesetzt (Wietschel et al. 2015). Da in einer einzelnen Zelle nur eine geringe Spannung erzeugt wird, werden viele Einzelzellen in Reihe geschalten, sodass sich die Spannungen addieren. Eine Reaktionseinheit besteht daher aus vielen Einzelzellen. Da die Löslichkeit der Salze in den Elektrolyten typischerweise nicht sehr hoch

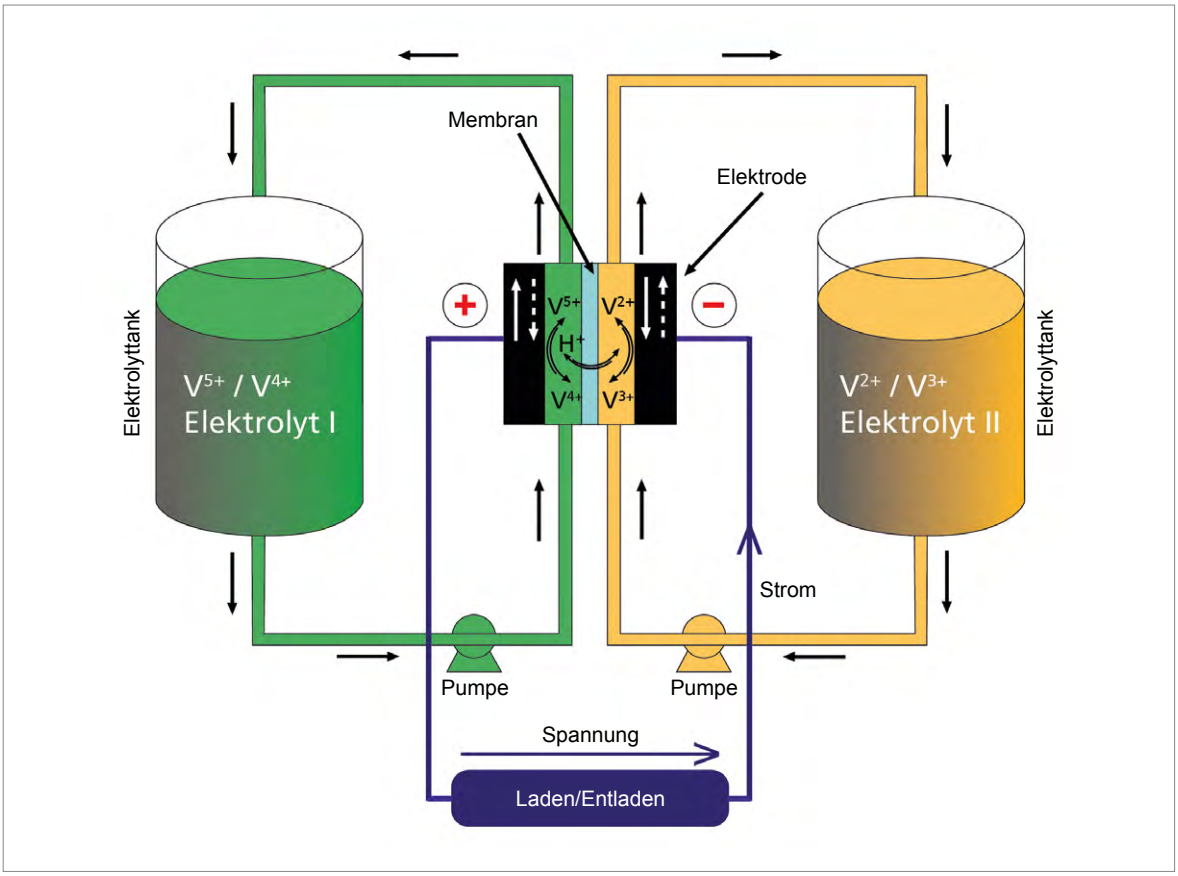


Abb. 3.75: Aufbau und Funktion einer Redox-Flow-Batterie (Quelle: Fraunhofer UMSICHT)

Tab. 3.66: Typische technische Parameter einer Vanadium-RFB (Quelle: Wietschel et al. 2015)

Technische Parameter	Heute	2025	2050
Gravimetrische Energiedichte (Wh/kg)	6–10	20	40
Volumetrische Energiedichte (kWh/m³)	4,2–6,25	12	24
Gravimetrische Leistungsdichte (W/kg)	1–3	10–30	–
Volumetrische Leistungsdichte (kW/m³)	0,42–2,4	4,2 – 24	–
Vollzyklenzahl (in Tausend)	13 – 20	–	–
Lebensdauer (a)	20	–	–
Selbstentladung (%)	< 1 %/a	–	–
Betriebstemperatur (°C)	+20 bis +35	–	–
Wirkungsgrad (%)	70–80	–	–

ist, werden Energiedichten im Bereich der Bleibatterie erreicht (Wietschel et al. 2010). Durch die niedrige volumetrische und gravimetrische Energiedichte sind Redox-Flow-Batterien ungeeignet für mobile Anwendungen wie Elektrofahrzeuge. Mit Redox-Flow-Batterien lassen sich im Vergleich zu anderen elektrochemischen Energiespeichern jedoch große Energiemengen speichern, sodass diese insbesondere als stationäre Großbatterien Einsatz finden, um beispielsweise fluktuierende Energieerzeugung oder -bedarfe auszugleichen.

Wegen der guten Eigenschaften bezüglich Energiedichte und Lebensdauer haben sich derzeit Vanadium-Redox-Flow-Batterien (V-RFB) auf dem Markt durchgesetzt. Zudem kommt es bei dieser Technologievariante nicht zu einer Verunreinigung der Elektrolyte, wenn Ionen ungewollt durch die Membran diffundieren. In diesen wird Vanadium in unterschiedlichen Oxidationsstufen für beide Elektrolyte genutzt. Während des Ladens der Batterie findet an der negativen Elektrode eine Reduktion und an der positiven Elektrode eine Oxidation statt. Die Protonen diffundieren durch die Membran und die Elektronen werden über den externen Stromkreislauf transportiert. Beim Entladen der Batterie kehrt sich die Reaktion um, sodass elektrische Leistung entnommen werden kann (Chen et al. 2017a).

$V^{2+} \leftrightarrow V^{3+} + e^-$ (Negative Elektrode)

$VO_2^+ + 2H^+ + e^- \leftrightarrow VO^{2+} + H_2O$ (Positive Elektrode)

Die technischen Parameter für V-RFB sind in Wietschel et al. (2015) zu finden und werden in Tab. 3.66 dargestellt. Um einen Einblick in die Entwicklungsziele zu geben, werden auch die prognostizierten Parameter für 2025 und 2050 angegeben, sofern diese verfügbar sind.

Eine weitere vielversprechende Technologievariante sind die All-Iron-Redox-Flow-Batterien (I-RFB), welche sich derzeit in der Entwicklung befinden und noch nicht auf dem Markt erhältlich sind. Ähnlich zur V-RFB wird in der I-RFB in beiden Elektrolyten ein Metall mit unterschiedlichen Oxidationsstufen eingesetzt. In I-RFB wird jedoch Eisen statt Vanadium in beiden Elektrolyten genutzt, sodass es ebenso nicht zu einer Kontamination der Elektrolyte bei ungewollter Diffusion durch die Membran kommt. In I-RFB läuft folgende Reaktion zum Laden (links nach rechts) und Entladen (rechts nach links) ab (ESS 2017):

$Fe^{2+} + 2e^- \leftrightarrow Fe^0$ (Negative Elektrode)

$2Fe^{2+} \leftrightarrow 2Fe^{3+} + 2e^-$ (Positive Elektrode)

3.3.7.2 Rohstoffinhalt

Der Elektrolyt hat den größten Anteil am Gesamtgewicht einer RFB. In V-RFB wird neben Vanadium für den Elektrolyt Wasser und Schwefelsäure benötigt, da die Ionen in Lösung gebracht werden müssen. Für die Elektroden wird Kupfer verwendet und Stahl wird unter anderem in den Pumpen, welche für das Zirkulieren des Elektrolyts sorgen, eingesetzt. Polymere werden unter anderem für die Tanks und in Dichtungen genutzt. Die durchschnittlichen Rohstoffbedarfe von V-RFB können

Tab. 3.67: Durchschnittlicher Rohstoffbedarf einer V-RFB (Quelle: Díaz-Ramírez et al. 2020)

Rohstoff	Spezifischer Materialbedarf (g/kWh)	Gewichtsanteil (%)
Vanadiumpentoxid	1,62	10,07
Edelstahl	1,72	10,7
Kupfer	0,13	0,78
Kohlenstoff	0,04	0,26
Polysulphon	0,07	0,44
Polypropylen, Gummi	0,64	3,94
Schwefelsäure	4,18	25,95
Wasser	7,71	47,85

Tab. 3.67 entnommen werden. Der spezifische Materialbedarf bezieht sich dabei auf die über die gesamte Lebensdauer speicherbare Energie. Die auf einen Zyklus berechnete spezifische Energie beträgt durchschnittlich 19,9 Wh/kg. Der auf einen Zyklus gerechnete Vanadiumbedarf wird als 3,02 kg/kWh angenommen. Der Eisenbedarf für den Elektrolyten einer I-RFB beträgt nach Peither (2020) circa 4,4 kg/kWh.

3.3.7.3 Foresight Industrielle Nutzung

Derzeit sind weltweit Redox-Flow-Batterien mit einer Leistung von 70 MW installiert, in welchen eine Energie von 250 MWh gespeichert werden kann. Es handelt sich dabei nahezu ausschließlich um mittlere bis große Energiespeicher (Colthorpe 2020). Die IEA erwartet nach dem Stated Policies-Szenario einen Anstieg der installieren Batterieleistung bis 2040 auf 330 GW und nach dem Sustainable Development Szenario auf 550 GW (IEA 2019). Eine weitere Spezifizierung nach Batterieart und Speicherkapazität erfolgt in diesen Szenarien jedoch nicht.

Die Vanadium-RFB sind inzwischen marktreif. Die Vorteile gegenüber anderen Batteriespeichern liegen in der sehr hohen Lebensdauer und Zyklenzahl, sowie der niedrigen Selbstentladung. Daher sind RFB insbesondere für stationäre Großenergiespeicher geeignet. Im Vergleich zu anderen RFB wird an V-RFB bereits lange entwickelt, sodass diese eine höhere Entwicklungsreife als alternative Zellchemien aufweisen. Ein Hauptideengeber ist dabei der ursprüngliche Entwickler dieses Systems, die University of New South Wales (UNSW) in Sydney. Im Jahr 2005 wurde die Firma VFuel Pty Ltd. als Ausgründung der Universität gegründet, die zurzeit aber keine eigenen Anlagen mehr herstellt. Im Jahr 2015 wurde von der Fa. Gildenmeister ein CellCube FB 30-130 mit 30 kW und einer Speicherkapazität von 130 kWh zu Forschungszwecken an der UNSW installiert. Der nach eigenen Angaben größte Hersteller von V-RFB ist Infinity Energy, welche Großenergiespeicher bis zu einer Leistung von 10 MW und Kapazität von 40 MWh anbietet. Weitere wichtige Anbieter sind die chinesische Prudent Energy Inc., die Cellenium Company Ltd. (Thailand), die Sumitomo Electric Industries (Japan) und die VRB Energy. Eine auf dem Markt erhältliche V-RFB der deutschen Firma VoltStorage dient als Heimspeicher mit einer Kapazität von 6,2 kWh und einer maximalen Leistung von 2 kW. Diese ist insbesondere zur Kopplung mit privaten PV-Anlagen gedacht und kann zur Leistungs- und Kapazitätssteigerung zudem mit weiteren Anlagen in Reihe geschaltet werden (VoltStorage GmbH). Volterion ist eine Ausgründung des Fraunhofer UMSICHT und bietet V-RFB mit einer maximalen Leistung von 15 kW bei einer Kapazität von 13 kWh an (volterion 2020).

In Zukunft wird mit einem starken Anstieg von I-RFB gerechnet, da diese deutlich niedrigere Materialkosten aufweisen. Zudem wird bei diesen das Vanadium durch das sehr versorgungsunkritische Metall Eisen ersetzt, während die Energiedichte und weitere Eigenschaften der Batterie auf ähnlichem Niveau bleiben wie bei den konkurrierenden V-RFB. Ein Hersteller von I-RFB ist die US-amerikanische ESS, welche unter anderem

mit BASF kooperiert. Nach Angaben von ESS erreicht die I-RFB eine ähnlich hohe zyklische und kalendarische Lebensdauer wie V-RFB (ESS 2017). Des Weiteren befasst sich (Yang et al. 2020) mit einer anderen, aber ebenfalls auf Eisen basierten Zellchemie für RFB. Auch bei dem V-RFB-Hersteller VoltStorage wird in Zukunft ein Umstieg auf I-RFB erwartet (Peither 2020).

Aktuell laufen auch in Deutschland verschiedene Projekte zur Nutzung von Vanadium-RFB:

- Braderup: In diesem Projekt der Robert Bosch GmbH und des Bürgerwindparks Braderup-Tinningstedt wird ein Windpark mit sechs Windkraftanlagen mit einem hybriden Speicher verbunden. Dieser wurde 2014 installiert und besteht aus Lithium-Ionenbatterien von Sony (mit einer Kapazität von 2 MWh und einer Leistung von 2 MW) und aus einer Redox-Flow-Batterie (1,3 MWh und 0,3 MW) der Vanadis Power GmbH (Bosch 2014).

- RedoxWind: Das Fraunhofer ICT entwickelte und betreibt einen Redox-Flow-Großbatteriespeicher mit einer Leistung von 2 MW und einer Kapazität von 20 MWh. Die RFB ist direkt an den Gleichspannungszwischenkreis einer Windkraftanlage gekoppelt, sodass eine Einheit aus Erzeugungsanlage und Batteriespeicher als Pilotanlage entstanden ist (Fraunhofer ICT 2015).

- EnergyKeeper: In dem von 2017 bis 2019 laufenden Forschungsprogramm, gefördert von der EU durch das Horizont 2020 Programm, werden organische RFB untersucht. Als Ziel des Projektes wird eine organische RFB aufgebaut, welche eine Leistung von 100 kW und eine Kapazität von 350 kWh erreicht (Radziukynas 2020).

- Sonar Redox: Das Anfang 2020 angelaufene Forschungsprojekt SONAR Redox untersucht unter der Koordination des Fraunhofer ICT potenzielle Aktivmaterialien für RFB. Dabei soll modellbasiert eine Screening-Methode erstellt werden, mittels der unterschiedliche organische Aktivmaterialien hinsichtlich der Eignung zum Einsatz in RFB bewertet werden. Durch eine Vielzahl an Bewertungskriterien soll somit eine Auswahl potentieller Alternativen zu Vanadium eruiert werden (Krapp 2020).

- Weltspeicher: Dieser Innovationswettbewerb für einen umweltfreundlichen Energiespeicher, welcher weltweit kostengünstig eingesetzt werden kann, wird vom BMBF gefördert und ist 2020 angelaufen. Die Hochschule Landshut entwickelt dabei gemeinsam mit VoltStorage eine I-RFB (Hochschule Landshut 2020).

3.3.7.4 Foresight Rohstoffbedarf

Nach Schätzungen von Irena (2017) wird der jährliche Zuwachs der Speicherkapazität von RFB 20 GWh betragen. Mit den angegebenen spezifischen Rohstoffbedarfen kann somit die Gesamtnachfrage nach den Aktivmaterialien für RFB berechnet werden, welche in Tab. 3.68 angegeben werden. Der Rohstoffbedarf wird sowohl für V-RFB als auch für I-RFB angegeben, wobei jeweils davon ausgegangen wird, dass sich die jeweilige Zellchemie gegenüber der anderen durchsetzen wird. Bei dem kumulierten Rohstoffbedarf wird davon ausgegangen, dass derzeit ausschließlich VRFB installiert sind, da sich die I-RFB und organische RFB noch in der Entwicklung befinden. Es wird geschätzt, dass 8 % des kumulierten Bedarfs dem Anlagenbau im Jahr 2018 zugerechnet werden kann.

Mit dem angegebenen Szenario beträgt der Vanadiumbedarf für RFB im Jahr 2040 etwa zwei Drittel der Bergwerksförderung im Jahr 2018. Bei der Nutzung von Redox-Flow-Stromspeichern sind beträchtliche Impulse auf die Vanadiumnachfrage zu erwarten. Bei einem Durchsetzen von I-RFB bis 2040 ist mit keinerlei Einfluss auf den Eisenmarkt zu rechnen, da der Anteil des für I-RFB eingesetzten Eisens mehrere Größenordnungen unter der Gesamtproduktionsmenge liegt. Da es nicht sicher ist, dass sich bis 2040 I-RFB gegenüber VRB durchsetzt und es aus den SSPs keine direkten Angaben zu Speichertechnologien gibt, werden keine einzelnen Bedarfe für die drei SSPs ausgewiesen sondern der gesamte Vanadiumbedarf von 60.500 Tonnen in allen drei Szenarien angenommen, vergleiche Kapitel 4.14.4.

Tab. 3.68: Rohstoffbedarfe für Redox-Flow-Batterien

System	All Vanadium	All Iron
Benötigte Stoffmenge [kg/kWh]	3,02	4,4
Kumulierter Rohstoffbedarf 2018 [t]	756	0

Tab. 3.69: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für Redox-Flow-Batterien in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040	
			All Vanadium	All Iron
Vanadium	90.661 (B)	60	60.500	–
Eisen	1.520.000.000 (B)	–	3.200	88.000

B: Bergwerksförderung (t Inh.)

3.3.7.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die Metalle in den Elektrolyten der Redox-Flow-Batterien verändern sich über die Lebensdauer nicht und können vollständig recycelt werden. Dabei kann der Elektrolyt entweder so aufbereitet werden, dass dieses erneut als Elektrolyt verwendbar ist, oder es werden die Salze aus dem Elektrolyt gewonnen, um diese in einer anderen Anwendung einzusetzen. Die Hersteller von RFB sind zur Rücknahme der Batterien nach Ende der Nutzungsdauer verpflichtet, sodass zu erwarten ist, dass sich in Zukunft Recyclingwege für RFB etablieren werden. Neben dem Elektrolyten kann nach Außerbetriebnahme die RFB demontiert werden, sodass auch die anderen Komponenten der Batterie recycelt werden können (Gouveia et al. 2020).

Es gibt zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte zu vanadiumfreien RFB, durch welche potenzielle Versorgungsengpässe mit Vanadium durch eine stark ansteigende Nachfrage vermieden werden könnten. Derzeit stehen dabei insbesondere neben den bereits beschriebenen I-RFB auch organische RFB im Fokus. In metallfreien organischen RFB kommen aromatische Verbindungen als Elektrolyt zum Einsatz, in welchen die Energie gespeichert wird. Durch Variation der Molekülzusammensetzung kann Einfluss auf die Batterieeigenschaften wie Potenzial, Temperaturbeständigkeit, Zyklusstabilität und Wasserlöslichkeit genommen werden. Durch die sehr hohe Anzahl möglicher Moleküle kann auf veränderliche Randbedingungen reagiert werden (CMBlue Energy AG 2020). Jedoch ist die Entwicklung organischer RFB nicht auf dem Stand von V-RFB, sodass derzeit keine Marktreife besteht. Es wird erwartet, dass sowohl die Lebensdauer als auch die Energiedichte organischer RFB deutlich unterhalb der Eigenschaften von V-RFB oder I-RFB liegen werden. Unternehmen die sich derzeit mit der Entwicklung von organischen RFB befassen sind beispielsweise CMBlue Energy und Jena Batteries.

3.3.8 Windkraftanlagen

3.3.8.1 Technologiebeschreibung

Die Gewinnung von elektrischer Energie aus Wind ist eine etablierte und bewährte Technologie. Dennoch werden global weiterhin hohe Zuwachsraten erwartet, um den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen. Bis 2040 werden daher hohe Wachstumsraten erwartet. Neue Generatortechnologien könnten den Materialbedarf dabei verändern. Aufbau und Dimension einer Windkraftanlage (WKA) sind in Abb. 3.76 dargestellt.

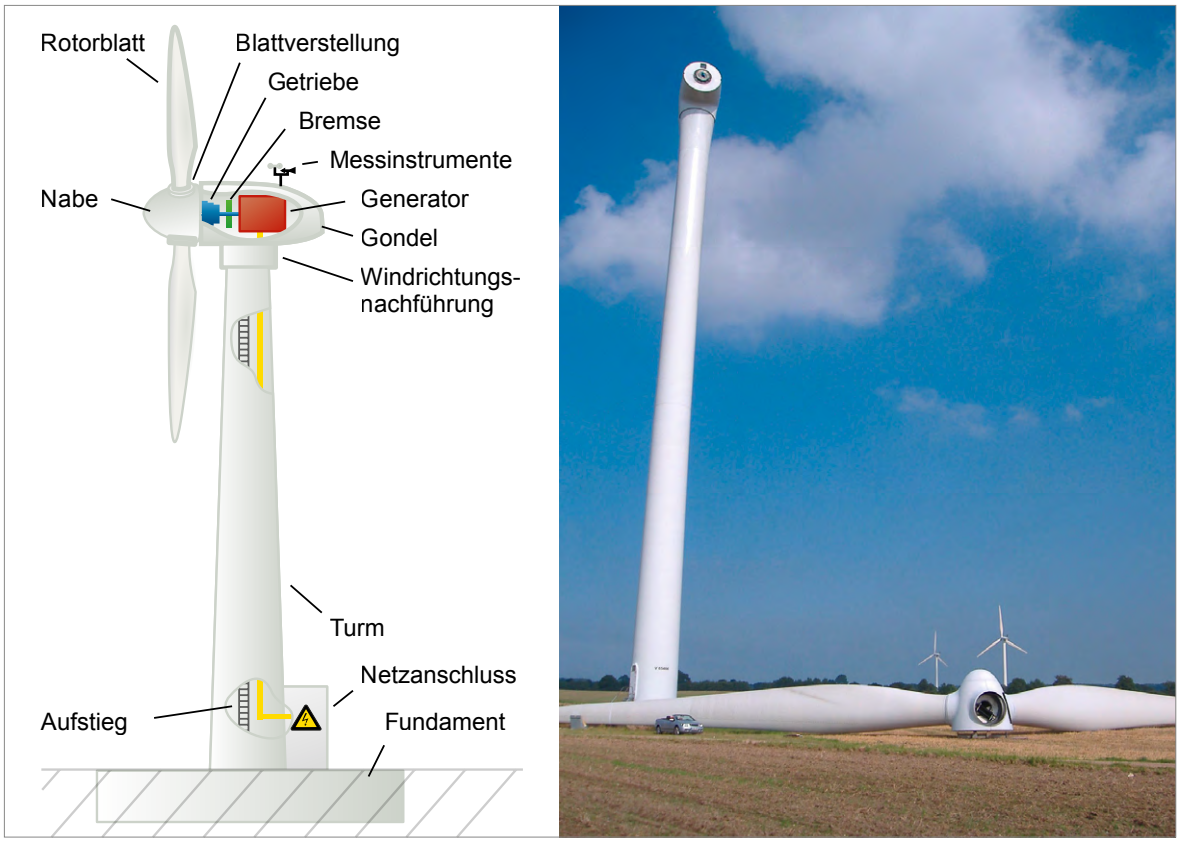


Abb. 3.76: Komponenten einer Windkraftanlage (links) sowie die Dimension einer Windkraftanlage mit einem Pkw als Größenvergleich (rechts) (Quellen: Bildquelle links: Arne Nordmann CC BY-SA 3.0; Bildquelle rechts: Karle Horn CC BY-SA 3.0)

Generatortechnologien

Senkrecht auftreffender Wind versetzt die speziell geformten Rotorblätter einer Windkraftanlage durch dynamischen Auftrieb in Rotation. Die mechanische Energie der Rotationsbewegung wird in einem Generator in elektrische Energie umgewandelt. Dazu liegt am Rotor des Generators ein Magnetfeld an. Die Rotation des Magnetfeldes induziert in den Leiterwicklungen des umgebenden Stators einen Stromfluss, sodass elektrische Energie gewonnen wird. Laufen Rotor und Magnetfeld synchron, spricht man von einem Synchrongenerator. Eilt der Rotor dem Magnetfeld voraus, bezeichnet man den Generator als Asynchrongenerator. Bei permanentmagnetisch erregten Generatoren wird das Magnetfeld am Rotor durch Anbringung von Dauermagneten (NdFeB-Magneten, s. auch Kapitel 3.3.9) gewährleistet. In elektrisch erregten Generatoren wird das Magnetfeld über stromdurchflossene Kupferspulen induziert (Lorentzkraft). Dazu wird elektrische Energie benötigt, die allerdings deutlich kleiner ist als die am Ende gewonnene elektrische Energie.

Bei direkt angetriebenen und somit getriebelosen Windkraftanlagen („Direct Drive“) ist der Generator direkt an die Rotorwelle angeschlossen und hat somit die gleiche Drehzahl wie die Rotorblätter der Windkraftanlage. Höhere Umdrehungszahlen sogenannter High-Speed-Windkraftanlagen werden durch ein Getriebe zwischen Rotor und Generator bewerkstelligt. Dies ermöglicht eine platz-, gewichts, material- und kostensparende Auslegung des Generators. Ein Getriebe kann allerdings 25 % der Kosten einer Windkraftanlage ausmachen, erhöht Störanfälligkeit und Wartungsbedarf der Anlage und senkt den Wirkungsgrad der Energiegewinnung (Viebahn et al. 2014). Als „Hybrid“ zwischen Direct-Drive- und High-Speed-WKA gelten Middle-Speed-Windkraftanlagen mit einem niedrig übersetzenden Getriebe ohne störanfällige Kupplung.

Tab. 3.70: Verschiedene Antriebstechnologien, die derzeit in WKA im Einsatz sind (schwarz) oder für WKA entwickelt werden (blau)

	Gearbox (GB)	Direct Drive (DD)
Elektrisch **e**rregt	Doppelgespeiste Asynchronmaschine (GB-DFIG)	Synchrongenerator (DD-EESG)
		High **T**emperature **S**uperconductor
Permanent**m**agnetisch erregt	Synchrongenerator (GB-PMSG)	Synchrongenerator (DD-PESG)
Reluktanzgetrieben		**R**eluktanz-Generator

Derzeit werden WKA-Generatoren entwickelt, in denen die elektrischen Wicklungen zur Erzeugung des Magnetfeldes aus Hochtemperatursupraleitern (HTS) bestehen. Da diese Hochtemperatursupraleiter einen viel geringeren elektrischen Widerstand als Kupfer haben, erhöht ihr Einsatz bei gleichem Gewicht die magnetische Feldstärke und somit die Generatorleistung. So könnten in einer 10-MW-Anlage 50 % des Generatorgewichts gegenüber einer permanentmagnetischen Direct-Drive-Windkraftanlage eingespart werden (Buchert 29.08.11; BINE Informationsdienst 2011; BINE Informationsdienst 2011; Viebahn et al. 2014).

Ebenfalls in der Entwicklung befinden sich Reluktanz-Generatoren, deren Wirkung nicht auf der Lorentzkraft, sondern auf magnetischem Widerstand (Reluktanz) beruht (Viebahn et al. 2014). Tab. 3.70 fasst derzeit für Windkraftanlagen eingesetzte oder entwickelte Generatortechnologien zusammen. Generatorarten, die nicht für Windkraftanlagen relevant sind oder nicht mehr in neuen WKA eingesetzt werden, werden nicht berücksichtigt.

Kenngrößen

Die übliche Kenngröße einer Windkraftanlage ist ihre maximale Leistung („Nennleistung"). Die tatsächlich durch eine Windkraftanlage erzeugte Leistung ist abhängig vom Wind und somit vom Standort sowie von saisonalen und täglichen Schwankungen. Ein Kapazitätsfaktor gibt daher das Verhältnis von durchschnittlich erzeugter Leistung zur Maximalleistung an (IEA 2013c). Auch die Nabenhöhe und der Rotordurchmesser sind entscheidende Kenngrößen.

Onshore und Offshore

Windkraftanlagen an Land („Onshore") befinden sich bereits in der breiten Anwendung. Mit Windkraftanlagen auf See („Offshore") eröffnet sich seit einigen Jahren ein neuer Technologiezweig. Da in beiden Segmenten anhaltend hohe Wachstumsraten erwartet werden, werden in diesem Kapitel beide Technologiezweige betrachtet. Aufgrund unterschiedlicher äußerer Bedingungen werden die Marktanteile der in Tab. 3.70 zusammengefassten Generatortechnologien in beiden Segmenten verschieden sein, wie im Abschnitt 3.3.8.3 näher diskutiert wird.

Die Vorteile der Offshore-Windenergiegewinnung ergeben sich aus höheren und kontinuierlicheren Windgeschwindigkeiten auf See. Nachteilig sind dagegen höhere Kosten für Installation (Transport, Fundamentierung), Wartung und Netzanschluss (Bradshaw et al. 2013b; IEA 2013c) sowie eine stärkere Belastung der Bauteile durch salzige Luft (Moss et al. 2011) Konventionelle Offshore-WKA werden mittels eines Monopilen (Stahlpfahl) im Meeresgrund verankert, sodass diese in eher flachen Gewässern bis zu einer Wassertiefe von 50 – 60 m eingesetzt werden können. Um eine höhere Standortflexibilität zu erreichen, werden derzeit schwimmende Fundamente für WKA entwickelt. Ein erster Windpark mit schwimmenden Fundamenten wurde 2017 in Schottland mit insgesamt 30 MW Leistung installiert (IEA 2019).

Offshore-WKA erreichen Kapazitätsfaktoren von 40 – 50 %. Mit Abstand von der Küste steigt der Kapazitätsfaktor, jedoch auch die Kosten für Installation, Wartung und Netzanschluss (IEA 2019). Für Onshore-WKA sind Kapazitätsfaktoren von 20 – 35 % im Jahresdurchschnitt typisch. Sehr geeignete Installationsplätze können 45 % und mehr erreichen (IEA 2013b). Besonders interes-

sant sind Offshore-Windkraftanlagen für Länder wie Deutschland, in denen wirtschaftlich lohnende Standorte für Windkraftanlagen an Land bereits als nahezu ausgeschöpft gelten und somit ein weiterer Ausbau hauptsächlich Offshore oder durch Repowering stattfinden kann. Repowering bezeichnet den Austausch bereits installierter Windkraftanlagen durch neuere Modelle mit gegebenenfalls höherer Nennleistung.

3.3.8.2 Rohstoffinhalt

Materialbedarf Massenrohstoffe

Welche Werkstoffe grob in welchen Teilen der Windkraftanlagen zum Einsatz kommen, zeigt Abb. 3.77. Verbundwerkstoffe werden in dieser auf Metalle fokussierten Studie nicht näher betrachtet, da es sich dabei um erdölbasierte Rohstoffe handelt. In Tab. 3.71 sind Schätzungen zum Materialbedarf pro installierter Nennleistung in Megawatt (MW) zusammengefasst. Unterschiede ergeben sich bei den verschiedenen Technologievarianten durch die Erregungsart des Generators und der Verwendung eines Getriebes zur Übersetzung. Onshore-WKA besitzen meist ein Betonfundament, während Offshore WKA häufig mit Stahlpfählen an den Meeresgrund verankert werden, was ebenfalls zu unterschiedlichen Rohstoffbedarfen führt.

Zusätzlich zum Kupferbedarf für die Windkraftanlage fallen laut Harmsen et al. (2013) für Hochspannnungsgleichstromkabel 5,7 t/MW Kupfer sowie für den Ausbau des Übertragungsnetzes 2,2 Megatonnen (Mt) Kupfer pro transportiertem Exajoule (EJ) Energie an. Somit werden 95 % des Kupferbedarfs für Windenergie nicht für den Anlagenbau, sondern für den Netzausbau benötigt. Ursache dafür ist, dass günstige Standorte für die Gewinnung von Windenergie weit entfernt von den Abnehmern der erzeugten Energie sein können. Da die erzeugte Energie mit den Windstärken zeitlich stark schwankt, ergeben sich eventuell weitere Materialbedarfe für Spannungstransformatoren und lokale Speicher zum Glätten von Spitzenlasten (IEA 2013).

Mit steigender Größe der Windkraftanlagen nehmen der Materialbedarf und somit die Kosten pro installierter Leistung ab. Dies liegt daran, dass der Rotordurchmesser einer Windkraftanlage quadratisch und die mit der Nabenhöhe steigende Windgeschwindigkeit sogar kubisch in die gewonnene elektrische Leistung eingeht. Dem seit Jahren anhaltenden Trend zu immer größeren Windkraftanlagen (Rohrig 2014) sind allerdings mit maximal realisierbaren Rotorblattspitzengeschwin-

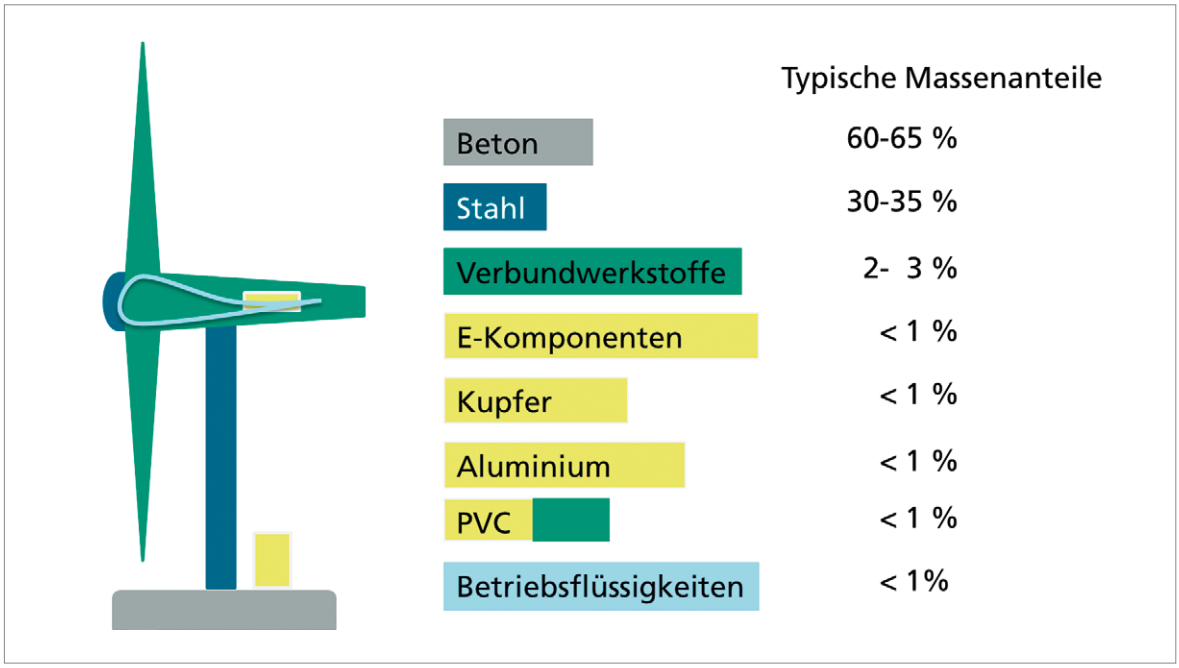


Abb. 3.77: Materialbedarf einer Windkraftanlage (Quelle: Seiler & Woidasky 2013)

Tab. 3.71: Materialbedarf für Windkraftanlagen in t/MW (Quelle: Carrara et al. 2020)

Spezifischer Rohstoffbedarf	DD-EESG (Onshore)	DD-PMSG (Offshore)	GB-PMSG (Onshore)	GB-DFIG (On-/Offshore)
Stahl	132	119,5	107	113
Gusseisen	20,1	20,1	20,8	18
Aluminium	0,7	0,5	1,6	1,4
Kupfer	5	3	0,95	1,4
Nickel	0,34	0,24	0,44	0,43
Zink	5,5	5,5	5,5	5,5
Chrom	0,525	0,525	0,58	0,47
Mangan	0,79	0,79	0,8	0,78
Molybdän	0,109	0,109	0,119	0,099
Beton	369	243	413	355
Polymere	4,6	4,6	4,6	4,6
GFK, CFK	8,1	8,1	8,4	7,7
Bor	0	0,006	0,001	0

digkeiten und Gondelgewichten physikalische Grenzen gesetzt (Viebahn et al. 2014). Daneben können bautechnische Neuerungen den spezifischen Materialbedarf senken, beispielsweise die Sandwich-Bauweise des Turms, bei der statt einem dicken Stahlrohr zwei schmalere, ineinandergreifende Stahlrohre mit einem Verbundmaterial wie Epoxidharz zum Einsatz kommen (VDI ZRE 2014). Andererseits erhöht sich der Marktanteil von Offshore-Anlagen, die aufgrund der anspruchsvolleren äußeren Bedingungen materialintensiver sind. Derzeit gibt es zudem Überlegungen, die Rotorblätter der Offshore-WKA aus Stahl statt aus Verbundstoffen zu fertigen (VDI ZRE 2014). Aufgrund der verschiedenen Tendenzen wird hier vereinfacht angenommen, dass die spezifischen Materialbedarfe aus Tab. 3.71 bis 2040 insgesamt konstant bleiben.

Materialbedarf Seltenerdelemente

In permanentmagnetisch erregten Generatoren von Windkraftanlagen (s. Tab. 3.70) werden NdFeB-Magneten eingesetzt, welche neben Neodym auch die Seltenerdelemente Dysprosium, Terbium und Praseodym enthalten können (s. Kapitel 3.3.9). Die getriebelosen Direct-Drive-Windkraftanlagen benötigen aufgrund des großen Generators deutlich höhere Magnetmassen als die High-Speed und Middle-Speed-WKA mit Getriebe. In Tab. 3.72 werden die spezifischen Rohstoffbedarfe der Seltenen Erden für die unterschiedlichen Technologievarianten in t/GW dargestellt.

Es wird angenommen, dass sich diese Werte bis 2040 nicht ändern, obwohl eine Reduzierung z. B.

Tab. 3.72: Bedarf an Seltenen Erden für Windkraftanlagen in t/GW (Quelle: Carrara et al. 2020)

Spezifischer Rohstoffbedarf	DD-EESG (Onshore)	DD-PMSG (Offshore)	GB-PMSG (Onshore)	GB-DFIG (On-/Offshore)
Neodym	28	180	51	12
Dysprosium	6	17	6	2
Praseodym	9	35	4	0
Terbium	1	7	1	0

durch Optimierung der Generatorauslegung denkbar wäre.

Einige Quellen berichten, dass für NdFeB-Magneten in Windkraftanlagen kein Dysprosium benötigt wird, da ausreichend Platz zur Kühlung vorhanden ist (Roskill Information Services 2011). In den meisten Quellen wird jedoch von einem Dysprosiumanteil von ca. 2 % an den Magneten ausgegangen. In der Berechnung des Rohstoffbedarfs wird die benötigte Menge an Dysprosium nach dem spezifischen Bedarf in Tab. 3.72 berechnet.

Die in der Entwicklung befindlichen Hochtemperatursupraleiter-Windkraftanlagen (HTS) benötigen Yttrium, Lanthan und Cer. Allerdings sind die Bedarfe von ca. 0,002 t/MW im Vergleich zur Permanentmagnettechnologie sehr gering (Buchert 2011).

3.3.8.3 Foresight Industrielle Nutzung

2018 wurde die weltweite Kapazität von Windenergieanlagen um 50 GW gesteigert, wobei 4,3 GW auf Offshore-WKA fällt und die übrige Kapazität auf neu installierte Onshore-WKA (IEA 2019). Onshore-WKA hatten 2018 somit einen Anteil von über 91 % am Zuwachs der installierten Leistung von der Windenergie. In demselben Jahr wurde in Offshore-WKA eine Gesamtenergie von 67 TWh und in Onshore-WKA 1.198 TWh erzeugt, sodass lediglich 5 % der durch Windkraft erzeugten Energie Offshore erzeugt wurden (IEA 2019).

Für den weiteren Ausbau der Windenergiegewinnung gelten politische Rahmenbedingungen als größte Wachstumstreiber. Als größtes Hemmnis gilt die Anpassung der technischen Rahmenbedingungen (Stromverteilungsnetz, Elektrizitätsspeicher) an die wetter- und standortabhängige Energieerzeugung durch Windkraftanlagen (IEA 2013).

Der Ausbau der Windenergie wird nach den drei Szenarien SSP1-19, SSP2-26 und SSP5 abgeschätzt, welche in Kapitel 1.1 beschrieben werden. Tab. 3.73 gibt für diese Szenarien die jährliche Energieerzeugung sowie die installierte Kapazität an.

Um den Rohstoffbedarf für Windkraftanlagen innerhalb eines Jahres abzuschätzen, wird der Zuwachs an WKA-Kapazität benötigt. Auch das Repowering, was das Ersetzen alter WKA durch neue beschreibt, muss dabei berücksichtigt werden. Nach Carrara et al. (2020) steigt die Lebenszeit von WKA an und liegt derzeit für Onshore-Anlagen bei 25 Jahren und bei Offshore-Anlagen bei 30 Jahren. Das Repowering im Jahr 2040 wird daher für Onshore-Anlagen mit dem Zuwachs der Kapazität von 2015 und für Offshore-Anlagen mit dem Zuwachs von 2010 angenommen, da Anlagen mit diesem Bau- und Installationsjahr durchschnittlich 2040 das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Der Kapazitätszuwachs für 2010 und 2015 wird Irena (2020b) entnommen und ist in Tab. 3.74 dargestellt. Der reale Kapazitätszuwachs ohne Repowering wird durch eine lineare Interpolation der Kapazität von 2030 und 2040 berechnet. Der Kapazitätszuwachs wird in Tab. 3.74 dargestellt. Im SSP5 wird erwartet, dass im Jahr 2040 mehr Anlagen deinstalliert als neue errichtet werden.

Tab. 3.73: Szenarien für die Energieerzeugung und installierte Leistung von Windenergieanlagen (Quellen: Fricko et al. 2017, Kriegler et al. 2017, Van Vuuren et al. 2017, IEA 2019, Irena 2020b, Irena 2020c)

Szenario	Jahr	Primärenergie [EJ/a]	Kapazität Onshore [GW]	Kapazität Offshore [GW]
	2018	1,3	540	23,6
SSP1-19	2040	16,5	1022	51,1
SSP2-26	2040	28,3	2433	14,7
SSP5	2040	5,0	538	0

Tab. 3.74: Im Jahr 2040 zugebaute Leistung von WKA aufgrund von Kapazitätszuwachs und Repowering in [GW/a]

Szenario	Lage	Repowering	Realer Kapazitätszuwachs	Totaler Kapazitätszuwachs
SSP1-19	Onshore	63,98	54,62	118,60
	Offshore	0,72	41,61	42,33
SSP2-26	Onshore	63,98	89,12	153,06
	Offshore	0,72	6,81	7,53
SSP5	Onshore	63,98	-2,16	61,82
	Offshore	0,72	0	0,72

Marktanteil verschiedener Technologien

Der Bedarf an Rohstoffen für Windkraftanlagen hängt vom Marktanteil der Antriebstechnologien ab. Insbesondere der Bedarf an Seltenen Erden ist von der Art der Erregung des Generators abhängig, da in elektrisch erregten Maschinen keine Permanentmagneten benötigt werden (vgl. Tab. 3.70). Auch bezüglich der Konstruktionswerkstoffe entstehen bei den verschiedenen Technologien unterschiedliche Rohstoffbedarfe, beispielsweise durch Stahl- statt Betonfundamenten oder der Größe des Generators und möglichem Einsatz eines Getriebes. Für die unterschiedlichen Varianten werden die spezifischen Rohstoffbedarfe nach Tab. 3.71 und Tab. 3.72 berücksichtigt.

Elektrisch erregte High-Speed-Asynchrongeneratoren mit Getriebe haben On- wie Offshore fortbestehend bedeutende Marktanteile, müssen diese aber teilweise an die neueren Technologien abgeben. Dies zeigt sich beispielsweise an den drei weltweit größten Herstellern von Windkraftanlagen (GWEC 2019; IRENA 2019). Das dänische Unternehmen Vestas (20,3 % Marktanteil) baute ehemals ausschließlich Asynchrongenerator-WKA, bietet aber seit einigen Jahren zusätzlich permanentmagnetisch erregte High-Speed-WKA mit Getriebe an (VIEBAHN et al. 2014). Siemens Gamesa (12,3 % Marktanteil) hat in der Vergangenheit ebenfalls Asynchrongenerator-WKA gebaut, setzt mittlerweile aber genau wie der chinesische Anbieter Goldwind (13,8 % Marktanteil) auf permanentmagnetisch erregte Direct-Drive-Anlagen. Der deutsche Hersteller Enercon (5,5 % Marktanteil) baut dagegen seit 1992 elektrisch erregte Direct-Drive-Anlagen und plant nicht, das Konzept zu ändern.

An den 2018 weltweit gebauten Windkraftanlagen hatte die Direct-Drive-Technologie einen Marktanteil von 26,6 %. Ein Teil der Direct-Drive-WKA ist jedoch auch elektrisch erregt, wohingegen hybride Antriebe trotz vorgeschaltetem Getriebe Permanentmagnete verwenden. Der Marktanteil von WKA-Technologien, welche Permanentmagneten verwenden, betrug 2018 24,5 % (GWEC 2019; IRENA 2019).

Welche Technologie in Zukunft welchen Marktanteil erobern kann, hängt jedoch von vielen Faktoren ab. Die Verfügbarkeit und die Preise der Seltenen Erden werden dabei eine große Rolle spielen. Zu beachten ist hierbei, dass China im Jahr 2035 mit einem globalen Anteil von 30 % bei der Herstellung von WKA Marktführer im Bereich Windenergie sein dürfte (IEA 2013). Da in China derzeit fast 75 % der globalen Förderung von Seltenen Erden statt findet, ist anzunehmen, dass die Verfügbarkeit dieser Materialien in China als weniger kritisch betrachtet wird. Wahrscheinlich werden also Technologien mit NdFeB-Magneten in China eine generell größere Verbreitung finden als beispielsweise in Europa.

Weiterhin wird sich die Standortwahl (On- oder Offshore) wesentlich auf die Technologiewahl auswirken. 2040 wird vorraussichtlich ca. 20 % der von Windkraftanlagen erzeugten Primärenergie von Offshore-WKA stammen, während es 2018 lediglich 5,4 % waren (IRENA 2020c). Es wird erwartet, dass die Kosten der Stromerzeugung für Offshore-WKA zwischen 2018 und 2040 um 60 % sinken (IEA 2019). Aufgrund dieses steigenden Marktanteils am Gesamtbestand ist davon auszugehen, dass der Anteil der Offshore-Anlagen an den 2040 neu gebauten Anlagen noch etwas höher als 20 %

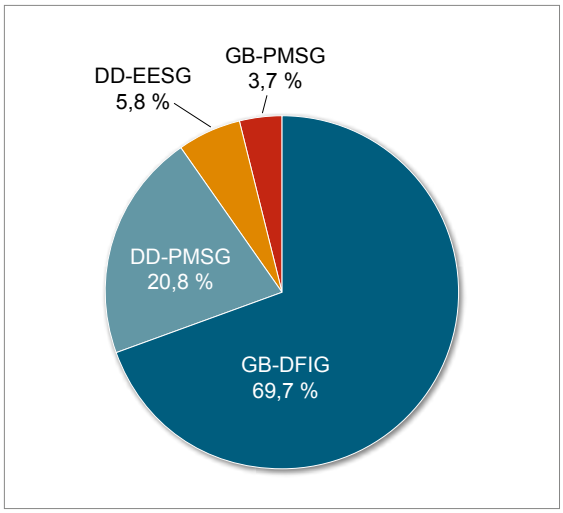


Abb. 3.78: Marktanteile der Technologievarianten in 2018 (Quelle: GWEC 2019 in IRENA 2019)

liegen dürfte. Permanentmagnetisch erregten Direct-Drive-Windkraftanlagen werden vor allem in diesem Segment eine große Zukunft zugeschrieben, da ihre geringe Wartungsanfälligkeit im Offshore-Bereich aufgrund des hohen Aufwands einer Wartung auf See ein entscheidender Vorteil ist, was die höheren Kosten der Technologie ausgleichen kann. Aber auch permanentmagnethaltige Middle-Speed-Windkraftanlagen sollten im Offshore-Segment an Bedeutung gewinnen (VIEBAHN et al. 2014). Dagegen werden elektrisch erregte Direct-Drive-Anlagen und Anlagen mit zwischengeschaltetem Getriebe hauptsächlich im Onshore-Segment bedeutsam sein. Sollten die in der Entwicklung befindlichen Hochtemperatursupraleiter-Windkraftanlagen (HTS) bis 2040 marktreif sein, werden sie vor allem den permanentmagnetisch erregten Direct-Drive-Windkraftanlagen Marktanteile streitig machen (VIEBAHN et al. 2014). In Abb. 3.78 sind die Marktanteile der Technologievarianten für das Jahr 2018 dargestellt.

In Abb. 3.79 werden die Anteile der Technologievarianten der WKA, welche 2040 neu gebaut werden, dargestellt. Betrachtet werden dabei sämtliche neuen WKA, sodass auch Repowering mit einbezogen wird. Die dargestellten Technologieanteile werden unter der Annahme berechnet, dass sich der Markt für Onshore-WKA wie derzeit zusammensetzt (siehe Abb. 3.78), während sich bei Offshore WKA die permanentmagneterregte Direct-Drive-Technologie durchsetzt. Diese weist Vorteile hinsichtlich der Lebensdauer und Wartungsintervalle auf. Dies sind Eigenschaften welche besonders im Offshore-Bereich aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit von hoher Bedeutung sind. Dies dürfte den Bedarf an Seltenen Erden anwachsen lassen. Die Marktdurchdringung neuer Technologien wie dem Reluktanzgenerator oder Generatoren mit Hochtemperatursupraleitern ist derzeit noch nicht abzusehen und wird folglich in den Szenarien nicht betrachtet.

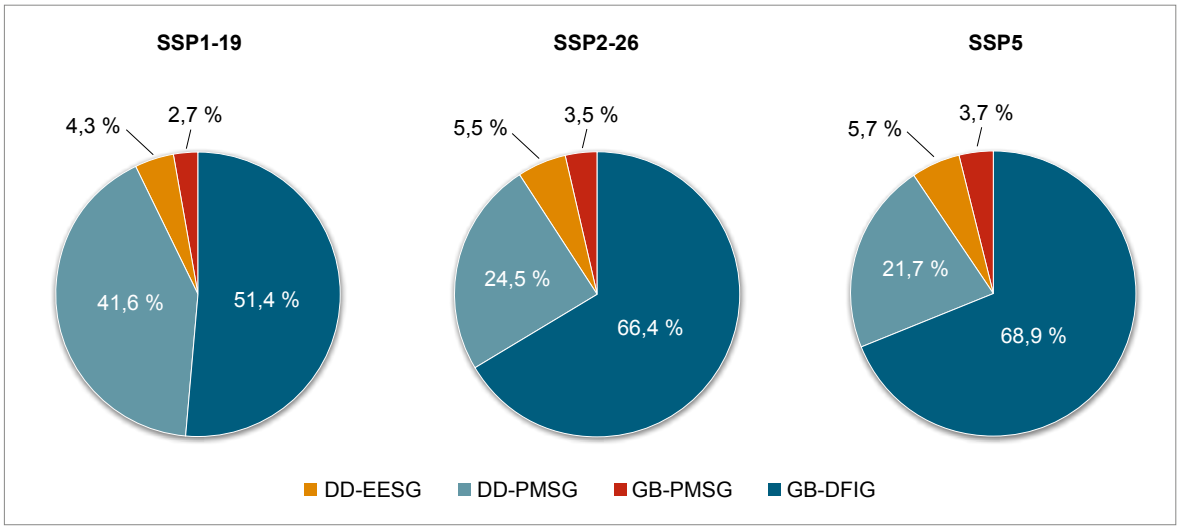


Abb. 3.79: Annahmen der Technologieanteile im Jahr 2040 für weltweit neu gebaute WKA in den unterschiedlichen Szenarien (Onshore und Offshore inkl. Repowering) (Quelle: Eigene Darstellung)

3.3.8.4 Foresight Rohstoffbedarf

Über den spezifischen Rohstoffbedarf aus Tab. 3.71 und Tab. 3.72, den Szenarien für den Ausbau an WKA-Kapazität in Tab. 3.73 und Tab. 3.74 sowie der Aufteilung der Kapazität auf die verschiedenen Technologievarianten in Abb. 3.79 wird der Rohstoffbedarf berechnet und in Tab. 3.75 und Tab. 3.76 dargestellt. Eine in Zukunft erhöhte Materialeffizienz aufgrund von Optimierungsprozessen könnte die spezifischen Materialbedarfe weiter senken. Dies bleibt in den Szenarien jedoch unberücksichtigt, da sich der Fortschritt in diesem Bereich schwierig abschätzen lässt.

In Tab. 3.75 zeigt sich, dass sich der Bedarf an Massenrohstoffen in den Szenarien SSP1-19 und SSP2-26 nur wenig unterscheidet. Der Bedarf an Massenrohstoffen in Szenario SSP5 liegt jedoch je nach Rohstoff etwa 55 – 66 % niedriger als bei den übrigen beiden Szenarien und auf ähnlichem Niveau wie der Rohstoffbedarf im Jahr 2018. Bei den Massenrohstoffen ist durch den Ausbau der Windenergie nicht mit großen Einflüssen auf die Rohstoffmärkte zu rechnen.

Bei den Seltenen Erden ergibt sich ein anderes Bild, wie in Tab. 3.76 zu sehen ist. Durch den erwarteten intensiven Ausbau von Offshore-WKA

Tab. 3.75: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe für WKA in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1-19 Nachhaltigkeit	SSP2-26 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Stahl	1.820.366.000	5.695.000	18.725.000	18.540.000	7.209.000
Gusseisen	1.520.000.000 (Eisen)	922.000	3.064.000	3.008.000	1.168.000
Aluminium	63.756.000 (R)	58.300	161.000	184.000	73.300
Kupfer	20.591.000 (B) 24137.000 (R)	95.100	355.000	317.000	121.000
Nickel	2.327.500 (B) 2.189.313 (R)	19.100	55.900	60.800	24.000
Zink	12.800.000 (B) 13.110.000 (R)	272.000	858.000	883.000	344.000
Chrom	27.000.000 (B)	24.200	80.000	78.800	30.600
Mangan	20.300.000 (B)	38.700	126.000	126.000	49.000
Molybdän	265.582 (B)	5.100	16.800	14.500	6.400

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Tab. 3.76: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Bedarfe an Seltenen Erden für WKA in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1-19 Nachhaltigkeit	SSP2-26 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Neodym	23.900 (R)	2.430	13.470	8.900	3.180
Dysprosium	1.000 (R)	270	1.370	970	350
Praseodym	7.500 (R)	390	2.420	1.480	520
Terbium	280 (R)	76,7	480	290	100

R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

ist in Szenario SSP1-19 mit einem deutlichen Bedarfsanstieg an Seltenen Erden zu rechnen. So steigt in diesem Szenario der Bedarf an Seltenen Erden für WKA gegenüber 2018 um das fünf- bis sechsfache an. Bei den im Vergleich zu den Massenrohstoffen niedrigen globalen Produktionsmengen dieser Rohstoffe kann der Ausbau von Windenergie einen maßgeblichen Einfluss auf den Markt der Seltenen Erden haben. Auch in Szenario SSP2-26 steigt der Bedarf an Seltenen Erden signifikant, jedoch deutlich weniger stark als in Szenario SSP1-19. In Szenario SSP5 wird nicht mit einem weiteren Ausbau an Offshore-WKA gerechnet, sodass der Bedarf an Seltenen Erden zu 2018 nahezu konstant bleibt zu 2018. Die aggregierte Fördermenge der Seltenen Erden betrug 2018 nach BGR (2021) 151.200 t in Metallgehalt.

3.3.8.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Falls zukünftig Verfügbarkeitsengpässe der Seltenerdelemente Neodym, Dysprosium, Praseodym und Terbium auftreten sollten, wird dies global nicht zwangsläufig den Ausbau der Windenergiegewinnung beeinträchtigen, sondern eher ein Ausweichen auf Technologien, welche wenig oder gar keine Seltenerdelemente benötigen, begünstigen. Durch den Trend zu höheren und leistungsstärkeren WKA wird erwartet, dass die Ressourceneffizienz von Windenergie in Zukunft leicht zunimmt.

Durch die hohen Lebenszeiten von Windkraftanlagen (ca. 25 – 30 Jahre) fallen derzeit noch wenige Windkraftanlagen zur Entsorgung bzw. zum Recycling an. Im Zuge des Repowerings in Deutschland abgebaute Anlagen wurden in der Vergangenheit meist vor Ort demontiert und anschließend in Schwellen- und Entwicklungsländer exportiert (VDI ZRE 2014). Die Recyclingquote liegt derzeit bei 80 – 90 % bezogen auf die Gesamtanlage (Seiler & Woidasky 2013). Eine verbesserte Verwertung der Verbundwerkstoffe, die für die Rotorblätter zum Einsatz kommen, wird derzeit erforscht (Seiler & Woidasky 2013). Günstig für das Recycling der Seltenerdelemente ist die im Vergleich zu anderen Anwendungen große Magnetmasse von 0,3 bis 3 t pro Anlage, bei welcher eine Demontage des Generators und eine getrennte Sammlung von Stahl- und Kupferschrott ökonomisch sinnvoll sowie technologisch und logistisch realisierbar ist.

3.3.9 Hochleistungs-Permanentmagnete

3.3.9.1 Technologiebeschreibung

Permanentmagnete und Hochleistungs-Permanentmagnete

Permanent- oder Dauermagnete besitzen magnetische Anziehungs- und Abstoßungskräfte. Im Gegensatz zu Elektromagneten haben und behalten Permanentmagnete diese magnetischen Kräfte, ohne dass ein Stromfluss vorliegt. Permanentmagnete bestehen aus hartmagnetischen Materialien wie FeCoCr-Legierungen, Hartferriten, Kobalt-Samarium, Neodym-Eisen-Bor u. a. und werden durch das Anlegen eines äußeren Magnetfelds hergestellt. Dabei richten sich bereits vorhandene magnetische Domänen (Weiss-Bezirke) innerhalb des Materials entlang des äußeren Magnetfelds aus. Mit der Orientierung dieser Domänen bleibt auch die Magnetisierung des Materials nach Erlöschen des äußeren Magnetfeldes erhalten. Auch weichmagnetische Materialien, z. B. Weichferrite (NiZn), zeigen starke magnetische Eigenschaften in einem externen Magnetfeld, verlieren jedoch den Magnetismus, nachdem das externe Feld entfernt ist.

Eigenschaften eines hartmagnetischen Materials, die über seine Eignung als Dauermagnet entscheiden, werden in Abb. 3.80 veranschaulicht und im Folgenden erläutert:

– Hohe Remanenz BR: Die Remanenz BR ist die nach Verschwinden des äußeren Magnetfelds im Magneten verbleibende Magnetisierung (magnetische Flussdichte B).

– Hohe Koerzitivfeldstärke: Die Koerzitivfeldstärke HC entspricht der Feldstärke H, die aufgewendet werden muss, um den Magneten vollständig zu entmagnetisieren. Je höher also die Koerzitivfeldstärke, desto größer ist die Beständigkeit des Magneten gegen äußere Magnetfelder.

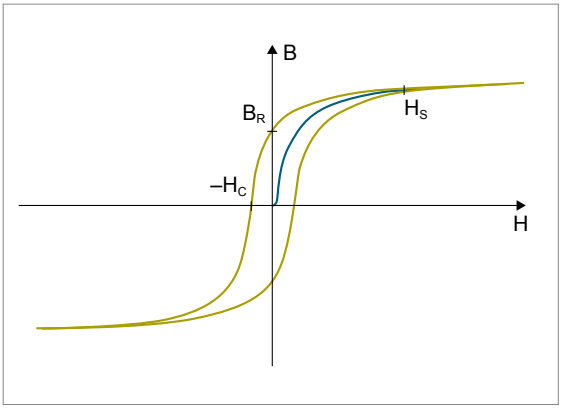


Abb. 3.80: Hysteresekurve eines Permanentmagneten: B: Magnetische Flussdichte, H: Magnetische Feldstärke, BR: Remanenz, HC: Koerzitivfeldstärke (Quelle: Walter Dvorak, Wikimedia, gemeinfrei)

– Hohe Energiedichte: Das Produkt aus B und H entspricht der magnetischen Feldenergie. Bezogen auf das Volumen ergibt sich die Energiedichte. Die maximale Energiedichte eines Magnetmaterials gilt als entscheidendes Leistungskriterium.

– Hohe maximale Betriebstemperatur: Bei vielen Anwendungen (z. B. Motoren) sind die Magnete erhöhten Temperaturen ausgesetzt. Jeder Dauermagnet ist jedoch durch eine maximale Betriebstemperatur gekennzeichnet, oberhalb welcher die Orientierung der Weiss-Bezirke und damit der Dauermagnetismus merklich und irreversibel verloren gehen. Diese maximale Betriebstemperatur ist wesentlich geringer als die Curie-Temperatur, oberhalb welcher die ferromagnetischen Eigenschaften (d. h. von einem Magneten angezogen werden zu können) eines Materials wie Eisen oder eines Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB-Magneten) verloren geht.

NdFeB-Magneten gelten als Hochleistungs-Permanentmagneten, weil ihre maximale Energiedichte $(BH)_{max}$ ein Vielfaches der maximalen Energiedichte von Standardmagneten aus Ferriten oder Aluminium-Nickel-Kobalt-Legierungen und rund das Doppelte der Energiedichte von Samarium-Kobalt-Magneten (SmCo-Magneten) beträgt (Schmal 2010).

Arten und Herstellung von NdFeB-Magneten

Je nach Art der Anwendung können gesinterte oder kunststoffgebundene NdFeB-Magnete zum Einsatz kommen. Kunststoffgebundene NdFeB-Magnete sind preisgünstiger, allerdings auch weniger temperaturbeständig und weniger leistungsfähig. Sie kommen bspw. in Elektrogeräten zum Einsatz, während sich für anspruchsvolle Anwendungen wie Antriebsmotoren von Fahrzeugen oder Generatoren von Windkraftanlagen ausschließlich gesinterte Magneten eignen.

Zur Herstellung der gesinterten NdFeB-Magnete wird im Induktionsschmelzofen eine NdFeB-Legierung hergestellt. Durch Brechen und Mahlen wird daraus ein Pulver, welches nach Ausrichtung der Körner im Magnetfeld gepresst und gesintert wird. Die so entstandenen Magneten werden durch Schneiden und Schleifen in die gewünschte Form gebracht und anschließend in der entstandenen Vorzugsrichtung magnetisiert (Schmal 2010). Laut Liu & Chinnasamy (2012) gehen beim Schleifen und Schneiden 20 – 30 % des Materials verloren. Schleifschlämme sowie Ausschussmagnete werden jedoch recycelt, so dass beim Abschätzen des Rohstoffbedarfs angenommen wird, dass die Masse der in einem Produkt enthaltenen NdFeB-Magnete nährungsweise dem Bedarf entspricht.

Kunststoffgebundene Magneten können über HDDR-Verfahren (Hydrogenation, Disproportionation, Desorption, Recombination) hergestellt werden.

Anwendungen von NdFeB-Magneten

Grundsätzlich können Hochleistungs-Permanentmagnete in allen Magnetanwendungen genutzt werden. Insbesondere ihr Einsatz in bürstenlosen permanentmagnetisch erregten Drehstrom-Synchronmotoren eröffnet viele Anwendungsfelder. Tatsächlich benötigt werden NdFeB-Magnete allerdings nur in Bereichen, in denen eine hohe Leistung bei gleichzeitig geringer Masse bzw. geringem Volumen essenziell ist. Bei niedrigeren Anforderungen an die magnetische Energiedichte sind preisgünstige Ferrite eine gängige Alternative. Außerdem sind NdFeB-Magnete für Temperaturen oberhalb von 200 °C nicht geeignet. In Hochtemperaturanwendungen finden

daher SmCo-Magnete Verwendung. Ob NdFeB-Magnete in Zukunft in allen Bereichen oder ausschließlich in Anwendungen mit höheren Anforderungen zum Einsatz kommen, wird stark von Preis und Verfügbarkeit der Bestandteile abhängen.

NdFeB-Magnete werden weltweit in folgenden Branchen verwendet (Roskill Information Services 2011; Imarc 2020):

- Konventionelle Automobilindustrie,
- Elektromobilität,
- Luftfahrt,
- Medizintechnik,
- Elektrogeräte (Wärmeüberträger, Großgeräte, Kleingeräte, Kleine Geräte der Informations- und Telekommunikationstechnik wie Datenspeicher,
- Elektrische Messinstrumente,
- Energieerzeugung,
- Militär,
- Industrie.

Der Anwendungsbereich Elektrogeräte setzt sich aus vielen verschiedenen Anwendungen mit häufig sehr geringen Anteilen an NdFeB-Magneten pro verkauftem Produkt zusammen. Durch hohe Verkaufszahlen der Massenanwendungen ergeben sich aber insgesamt große Mengen Magnetmaterial. Der Bereich Elektrogeräte wird nach dem Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) in die sechs Kategorien unterteilt: „Wärmeüberträger“, „Bildschirme und Monitore“, „Lampen“, „Großgeräte“, „Kleingeräte“ sowie „Kleine Geräte der Informations-und Telekommunikationstechnik“ (Stiftung ear o. J.) .

Zu den Kategorien „Großgeräte“ und „Kleingeräte“ zählen viele Anwendungen, in denen NdFeB-Magnete einfach durch schwächere Magnete substituiert werden können, wie beispielsweise Kinderspielzeug, Verschlüsse und Befestigungen. Ebenfalls als nicht essenziell ist ihr Einsatz in Motoren für z. B. Waschmaschinen einzuschätzen. In Motoren von z. B. Akkuschraubern oder elektrischen Rasierapparaten sind hingegen die herausragenden Eigenschaften der NdFeB-Magnete gefordert. In der Kategorie "Wäremüberträger" werden in Klimaanlagen, die früher hauptsächlich Ferrite enthielten, aufgrund strengerer Energiesparvorschriften vermehrt NdFeB-Magnete eingesetzt, um die Energieeffizienz zu erhöhen.

In der Kategorie „Kleine Geräte der Informations-und Telekommunikationstechnik“ gelten HDD-, CD- und DVD-Laufwerke als eine Hauptanwendung. Hier kommen NdFeB-Magnete im Schwingpulsbetätiger (HDD) und im Rotationsmotor (HDD, DVD, CD) vor. CD- und DVD-Laufwerke werden zwar durch Online-Datentransfer an Bedeutung verlieren und HDD-Festplatten in Endgeräten zunehmend durch SSD-Festplatten ersetzt, die ohne bewegliche Teile und damit ohne Magneten auskommen. In Rechenzentren werden HDD-Festplatten aber auch zukünftig eine wichtige Rolle spielen (s. Kapitel 3.5.4 zu Rechenzentren). Daneben spielen Lautsprecher, z. B. in Laptops, eine Rolle. Auch in Schrittmotoren kommen NdFeB-Magnete zum Einsatz. Insgesamt können NdFeB-Magnete somit in Laptops, Desktop-Computern, Servern, zentralen Datenspeichern, Druckern, Faxgeräten, Fotokopierern usw. vorkommen. Ebenso stecken NdFeB-Magnete in Lautsprechern und Laufwerken von Unterhaltungselektronik wie Fernsehern, Audiogeräten, Laptops, Tablets, Computern, mobilen Audio-/DVD-Abspielgeräten, Spielkonsolen, Uhren, Digitalkameras und Smartphones (Bookhagen et al. 2020).

Ein weiteres großes Anwendungsfeld ist die konventionelle Automobilindustrie. Hier verteilen sich die NdFeB-Magnete wiederum auf eine Vielzahl von Einzelanwendungen in Motoren, Aktuatoren und Sensoren, z. B. für Innenausstattungselemente wie Geschwindigkeitsanzeige, Klimaanlage, elektrische Fensterheber, Scheibenwischer oder Sitzversteller aber auch für Motorkomponenten, Servolenkung, ABS und Wirbelstrombremsen. Abb. 3.81 zeigt ein Beispiel.

Zusätzlich zu diesen Anwendungen enthalten Elektro- und Hybridautos (s. Kapitel 3.1.2) sowie elektrisch angetriebene Zweiräder vergleichsweise große NdFeB-Magnete im Antriebsmotor. Elektro- und Hybridautos gelten als die Anwendung mit dem größten Wachstumspotenzial.

Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld von NdFeB-Magneten sind Industrieapplikationen, wie z. B. Motoren für Injektionsformpressmaschinen und Roboter (vgl. Kapitel 3.2.6), aber auch Zugantriebsmotoren. Daneben können NdFeB-Magnete in industriellen Klimaanlagen eingesetzt werden. Für magnetische Trennvorrichtungen zur Aufbereitung von Metallen (Recycling) und

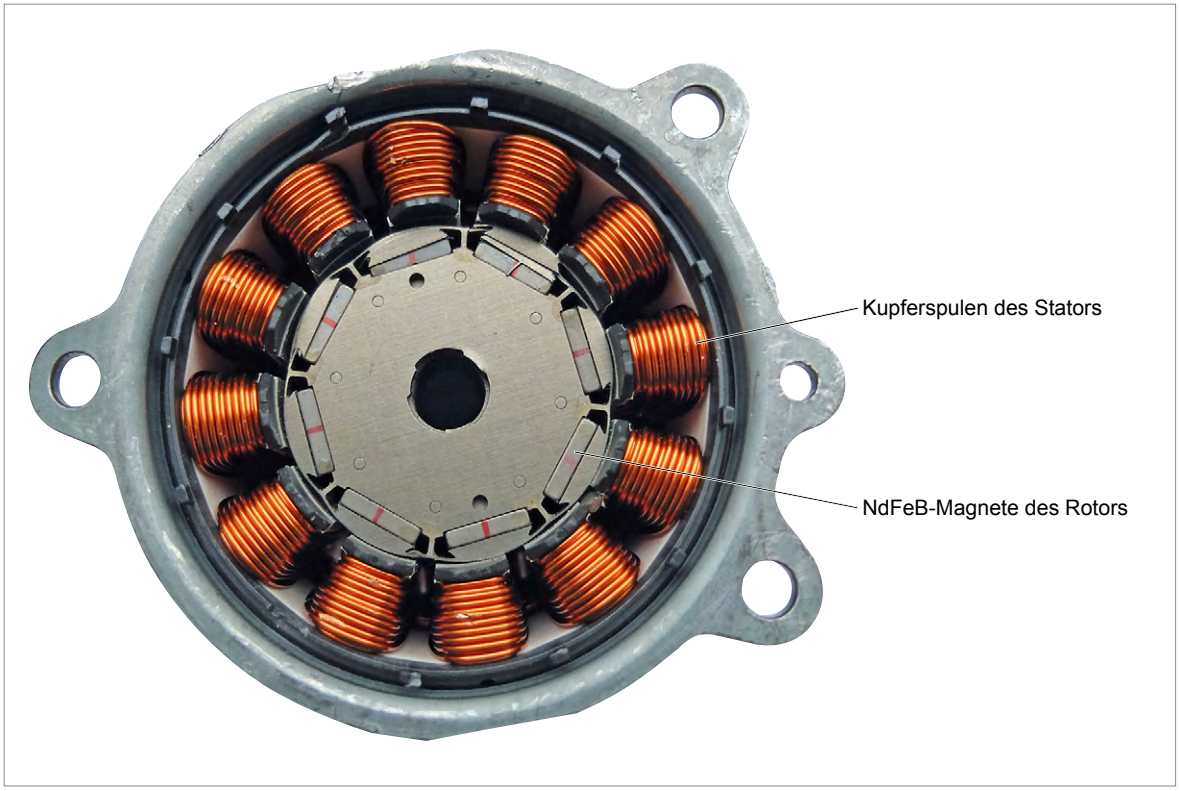


Abb. 3.81: Lenkungsmotor eines Pkw (Quelle: Fraunhofer ISI)

Mineralen (Bergbau) werden ebenfalls NdFeB-Magnete verwendet.

Auch in der Luftfahrt, Messtechnik und Medizin sind NdFeB-Magnete auf viele kleine Einzelanwendungen verteilt. In der Medizintechnik sind MRT-Geräte als eine mögliche Anwendung mit relativ großen NdFeB-Magneten bekannt. Bisher enthalten MRT-Geräte allerdings hauptsächlich Ferrite. Massenanwendungen mit kleinen NdFeB-Magneten sind u. a. Herzschrittmacher, Insulinpumpen und Schlafapnoegeräte (Mordor Intelligence 2020b).

Im Bereich Militär kommen NdFeB-Magnete z. B. für Radarsysteme, Beschleunigungsmesser, Nachtsichtbrillen und die Fernlenkung von Raketen zum Einsatz. Länder wie die USA betrachten die entsprechenden Rohstoffe daher als strategisch wichtig und legen Speicher an.

Als weiterer Wachstumsmarkt für NdFeB-Magnete gilt ihr Einsatz in Generatoren für Windkraftanlagen (s. Kapitel 3.3.8), in untergeordneter Bedeutung auch für Laufwasser- und Gezeitenkraftwerke.

Eine weitere Zukunftstechnologie, bei der NdFeB-Magnete eingesetzt werden können, sind magnetische Kühlsysteme, die sowohl für die Tieftemperaturkühlung in der Forschung als auch für Kühlschränke für Heim- und Industrieanwendungen entwickelt werden. Gegenüber konventionellen Kühlgeräten sind magnetische Kühlsysteme 50 – 60 % energiesparender (Schüler et al. 2011). Bislang befinden sich diese Kühlsysteme aber noch in der Erforschung (Podbregar 2019).

3.3.9.2 Rohstoffinhalt

Neben den drei Hauptbestandteilen Neodym, Eisen und Bor können NdFeB-Magnete zahlreiche andere Elemente enthalten. Der Zusatz von Kobalt verbessert die Korrosionsbeständigkeit der NdFeB-Magnete. Durch eine Schutzummantelung aus Nickel oder Epoxidharz kann die Korrosionsbeständigkeit weiter verbessert werden.

Praseodym (Pr) kann aus Kostengründen als Substitut für Neodym (Nd) verwendet werden, allerdings nur bis zu einem Verhältnis von Nd:Pr = 3:1, da höhere Pr-Gehalte die Magneteigen-

schaften beeinträchtigen würden (Buchert et al. 2012). Die Bedarfe an Nd und Pr für NdFeB-Magnete 2010 laut Roskill (2011) entsprachen dem Verhältnis 3:1. Als durchschnittliches oder übliches Verhältnis wird oft 5:1 genannt (Buchert et al. 2012; Glöser-Chahoud & Tercero Espinoza 2015).

Durch Substitution eines Teils des Neodyms durch Dysprosium (Dy) oder Terbium (Tb) kann die maximale Betriebstemperatur der NdFeB-Magnete von lediglich 80 °C auf 200 °C erhöht werden. In Antriebsmotoren von Elektroautos und in Generatoren von Windkraftanlagen werden daher Dy-haltige NdFeB-Magnete eingesetzt (Hoenderdaal, S. Tercero Espinoza, L. Marscheider-Weidemann, F. Graus, W. 2013). Dysprosium verbessert auch den Korrosionswiderstand der Magnete und erhöht ihre Koerzitivfeldstärke.

Terbium hat die gleichen positiven Auswirkungen auf die Magnete, reduziert im Unterschied zu Dysprosium aber nicht ihre Remanenz (Schüler et al. 2011). Bisher verursachte die Leuchttechnik hohe Tb-Nachfragen und damit hohe Tb-Preise, so dass Terbium in NdFeB-Magneten kaum eingesetzt wurde. Mit dem Durchsetzen der LED-Technologie, in der Terbium keinen Einsatz findet, könnte sich die Verfügbarkeit von Terbium und damit sein Einsatz als Substitut für Dysprosium in NdFeB-Magneten erhöhen.

Laut Roskill (2011) wird den NdFeB-Magneten von einigen chinesischen Herstellern Gadolinium (Gd) beigemischt, um Kosten zu senken, was aber gleichzeitig die Magneteigenschaften beeinträchtigt.

Die reine Magnetphase $Nd_2Fe_{14}B$ hat eine Massenzusammensetzung von Neodym 27 %, Eisen 72 %, Bor 1 %. In den Magneten sind gesinterte Körner dieser Phase von einer seltenerdreichen Phase umgeben, so dass der Gesamtanteil der Seltenerdelemente bei ca. 32 Massen-% liegt.

3.3.9.3 Foresight Industrielle Nutzung

Als Zukunftstechnologien, die den Bedarf an NdFeB-Magneten außergewöhnlich erhöhen werden, gelten Elektroautos und Windkraftanlagen (Research and Markets 2019; Green Car Congress/Adamas Intelligence 2020; Mordor Intelligence 2020b; Roskill 2020a), die in den Kapiteln 3.1.2 und 3.3.8 analysiert werden. Daneben benennen zahlreiche Marktstudien die Kosumentenelektronik als wesentlichen Treiber für zukünftige Nachfragesteigerungen (Research and Markets 2019; Imarc 2020; Mordor Intelligence 2020b; Technavio 2020). Die wichtigste Region für eine steigende Nachfrage nach Magneten für Konsumentenelektronik ist der Asien-Pazifik-Raum. Laut Technavio (2020) wird der Asien-Pazifik-Raum einen Anteil von 86 % Anteil am globalen Wachstum des Seltenen-Erd-Markts zwischen 2020 und 2024 haben. Viele global bedeutende Elektronikproduzenten sind in Indien, Südkorea und Japan beheimatet (Mordor Intelligence 2020b). In Indien ist zudem mit einem starken Zuwachs der Produktion von Elektronikgeräten durch zusätzliche Investitionen und staatliche Anreizprogramme zu rechnen (Mordor Intelligence 2020b). China als weltweit größter Hersteller von Elektronikgeräten produziert sowohl für den heimischen Markt als auch für den Export. Mit starken Nachfragesteigerungen für Konsumentenelektronik ist sowohl innerhalb Chinas als auch in den Ländern, die aus China importieren, zu rechnen (Mordor Intelligence 2020b). Daher dominiert China nach wie vor die Nachfrage nach Seltenen Erden, ebenso wie die Produktion (Roskill 2020a).

Neben der Konsumentenelektronik wird auch die Medizintechnik (u. a. MRT, Herzschrittmacher, Insulinpumpen, Schlafapnoegeräte) als Wachstumsmarkt für NdFeB-Anwendungen genannt (Research and Markets 2019; Imarc 2020; Mordor Intelligence 2020b; Technavio 2020). Starke Investitionen in den Gesundheitssektor werden ebenfalls im Asien-Pazifik-Raum, aber auch in Afrika und im mittleren Osten erwartet (Mordor Intelligence 2020b).

Als mögliche Wachstumshemmer werden Unsicherheiten über eine stabile Versorgung bzw. Nachfrageengpässe, aber auch Sorgen um soziale, ökologische und rechtliche Missstände beim Abbau von Seltenen Erden genannt (Research and Markets 2019; Mordor Intelligence 2020b; Technavio 2020). Beides kann zu einer vermehrten Suche nach Substituten von NdFeB-Magneten führen.

Insgesamt stieg die jährliche Nachfrage nach Seltenen Erden für Magnete in den Jahren zwischen 2015 und 2019 um durchschnittlich 6,4 %, wobei es bedingt durch die Covid-19-Krise zu einem Nachfrageeinbruch um 9,3 % im Jahr 2020 kam (Green Car Congress/Adamas Intelligence 2020). Alle aktuellen Marktstudien gehen von einer schnellen Erholung des Marktes aus. Roskill (2020a) nimmt für die Gesamtnachfrage nach Seltenen-Erd-Oxiden (SEO) zwischen 2020 und 2030 eine jährliche durchschnittliche Wachstumrate (CAGR) von ca. 10 % an, wobei der Anteil der Magnetanwendungen im selben Zeitraum von 29 % auf 40 % wachsen soll. Daraus ergibt sich ein Wachstum der Nachfrage für Magnetanwendungen mit einer CAGR von 13,5 % zwischen 2020 und 2030. Green Car Congress/Adamas Intelligence (2020) gehen von einer Nachfragesteigerung für Magnetanwendungen einer CAGR von 9,7 % bis 2030 aus. In Garside (2020) wird eine CAGR für Magnetanwendungen zwischen 2019 und 2025 von 11 % angenommen. Alle hier aufgeführten CAGR-Werte beinhalten das Wachstum für elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge und Windkraftanlagen, welches schon separat in den Kapiteln 3.1.2 und 3.3.8 betrachtet wird. Daher werden im Folgenden Szenarien für die zukünftige Entwicklung der Nachfrage für Magnetanwendungen im Bereich Konsumentenelektronik analysiert. Diese bauen auf den Rahmenszenarien zur Digitalisierung (vgl. Kapitel 1.4) auf. Im Szenario SSP2 wird angenommen, dass sich historische Entwicklungen fortsetzen. Die global fortschreitende Verbreitung von Internetanschlüssen und steigenden Datenmengen führt zu höheren Nachfragen nach bekannten Geräten der Konsumentenelektronik, aber auch weiterentwickelten oder neuen Geräten. Dies geht mit einem Nachfragewachstum von 7 % CAGR zwischen 2021 und 2040 einher. Im SSP5 kommt es demgegenüber noch zu einer Beschleunigung und Intensivierung (CAGR 8 %). In SSP1 ist die Entwicklung gegenüber SSP2 ebenfalls beschleunigt, es kommen aber nachhaltige Verhaltensmuster zum Tragen (z. B. längere Verwendung, ReUse und Reparatur von Kosumentenelektronik), so dass eine CAGR von 6,8 % resultiert.

3.3.9.4 Foresight Rohstoffbedarf

Laut Garside (2020) betrug der Bedarf an SEO für Magnete im Jahr 2019 43.733 t SEO. Gemäß Roskill (2020a) wurden davon ca. 15 % für Konsumentenelektronik (inkl. akustische Umwandler) benötigt. Es wird im Folgenden angenommen, dass es sich bei den Magneten ausschließlich um NdFeB-Magnete handelt, weil diese den Hauptanteil stellen, auch wenn sie teilweise durch SmCo-Magnete ersetzt werden könnten. Außerdem wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die NdFeB-Magnete für Konsumentenelektronik keine schweren Seltenen Erden (Dy/Tb) enthalten, da diese für diese Anwendungen in der Regel nicht notwendig sind und ein Einsatz aufgrund der Knappheit und hohen Preise unwahrscheinlich ist.

Tab. 3.77 zeigt die aus den Szenarien resultierenden Bedarfe an Neodym in 2040. Die aggregierte Fördermenge der Seltenen Erden betrug laut BGR (2021) 151.200 t Metallgehalt für 2018.

3.3.9.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Laut Experteneinschätzung wird auf absehbare Zeit trotz intensiver Forschungsbemühungen kein Magnetmaterial mit vergleichbaren Eigenschaften unter vollständigem Verzicht auf Seltenerdele-

Tab. 3.77: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Neodymbedarf für Magnetanwendungen in der Kosumentenelektronik in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Neodym	23.900 (R)	5.620	19.630	20.340	24.270

Anmerkung: Die Bedarfe an Seltenen Erden für Magnetanwendungen für Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge und Generatoren für Windkraftanlagen sind in den Kapiteln 3.1.2 und 3.3.8 zu finden.

R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

mente entwickelt werden können. Wahrscheinlicher erscheinen graduelle Verbesserungen der NdFeB-Magnete, insbesondere die Optimierung der Herstellungsmethoden und die Reduktion des Anteils schwerer Seltenerdelemente (v. a. Dysprosium). Die nicht vorhersehbare Entdeckung neuer geeigneter Magnetmaterialien könnte aber aufgrund weltweit intensiver Entwicklungsbemühungen innerhalb weniger Jahre zu neuen Produkten führen.

NdFeB-Magnete werden derzeit in Deutschland nicht getrennt gesammelt (Bast et al. 2015). Produktionsabfälle werden zum Recycling nach China gesendet, da entsprechende Anlagen in Europa nicht existieren. Neben einer Weiterentwicklung des technischen Know-hows, insbesondere zur Reduktion von Seltenen Erden (Oxiden) zu Seltenerdelementen (Metallen), ist auch die Schaffung funktionierender und rentabler Sammelinfrastrukturen Voraussetzung für ein zukünftiges Recycling. Zusätzliche Bedingung sind massentaugliche Demontageverfahren, was bereits beim Entwurf der Anwendungsgeräte berücksichtigt werden sollten (Design for Recycling). Dies ist umso entscheidender, je kleiner der Magnetgehalt pro Einzelanwendung ist. In der Konsumentenelektronik sind in der Regel sehr kleine, schwer rückgewinnbare Mengen pro Einzelanwendung zu finden, die sich aufgrund der vielen Geräte aber zu relevanten Mengen aufsummieren (Bookhagen et al. 2020).

Laut USGS (2021b) findet das Recycling von Permanentmagneten nur in begrenztem Rahmen statt. Die Substitution der Seltenen-Erd-Magnete ist in vielen Anwendungen möglich, aber mit Leistungseinbußen verbunden. Roskill (2020a) hält es jedoch für wahrscheinlich, dass die zukünftige Nachfragesteigerung für xEV zu Substitutionen und Einsparungen in anderen, preissensitiveren Sektoren führen wird.

3.3.10 Synthetische Kraftstoffe

3.3.10.1 Technologiebeschreibung

Ein Bereich, der sich nicht ohne Weiteres dekarbonisieren lässt, ist die Mobilität. Zwar gibt es die E-Mobiltät, als Batteriefahrzeuge für Pkw und in Demonstrationsprojekten für Lkw als Oberleitungs-Lkw, doch bei Schiffen und vor allem Flugzeugen gibt es noch keine überzeugenden Konzepte. Eine Möglichkeit für diese und auch Pkw sind synthetische Kraftstoffe, die mittelfristig ohne CO_2-Emissionen erzeugt werden und deren Kohlenstoffgehalt aus Quellen wie Biomasse oder aus der Luft stammt, so dass bei der Verbrennung im Motor nur im Kreislauf geführtes CO_2 in die Atmosphäre gelangt und die Konzentration nicht erhöht.

Als ein Vorteil synthetischer Kraftstoffe gegenüber der Nutzung von Wasserstoff oder großen elektrischen Antrieben, die einen Ausbau der Stromnetze nötig machen, wird häufig die Nutzung der bestehen Infrastruktur (Tankstellen, Verbrennungsmotoren u. a.) angeführt, weshalb sie auch Drop-in-Fuels genannt werden (Steinfort 2020). Häufig wird als Nachteil die großen Umwandlungsverluste bis zur Herstellung der auch mit e-fuels bezeichneten Kraftstoffe genannt: die Produktionskette vom regenerativen Strom über grünen Wasserstoff bis zur Synthese der Flüssigkraftstoffe kann im Fahrzeug zu einer dreimal so hohen THG-Emission gegenüber Batteriefahrzeugen führen (Agora Verkehrswende 2019b).

Zur Herstellung von synthetischen Kraftstoffen werden Verfahren der sogenannten XtL-Technologien genutzt: mit Erdgas als Rohstoffbasis die GtL-Technologie (Gas-to-Liquid), mit Kohle CtL (Coal-to-Liquid) und BtL-Technologie (Biomass-to-Liquid), wenn Biomasse wie Holz, Stroh oder organische Abfälle aus der Land- und Forstwirtschaft eingesetzt werden. In Analogie wurde der Begriff PtX gebildet. Bei diesen Verfahren wird Strom eingesetzt, um über Elektrolyse Wasserstoff zu erzeugen und mit CO dann über Fischer-Tropsch-Reaktionen Flüssigkeiten zu erzeugen.

Die XtL-Technologien besitzen unterschiedliche technische Reifegrade. Die längste Historie besitzt die Kohleverflüssigung (CtL), welche als Fischer-Tropsch (FT)-Synthese 1925 von Hans Tropsch und Franz Fischer am Kaiser-Willhelm-Institut für Kohleforschung in Mülheim an der Ruhr entwickelt wurde. Mit dem Aufschwung der Petrochemie verlor es an Bedeutung. Nur in Südafrika, das während der Apartheid mit Embargos zu kämpfen hatte, wird die Technologie seit 1950 kommerziell zur Herstellung von Kraftstoffen aus Kohle (CtL) und Erdgas (GtL) eingesetzt. Das in der langjährigen Entwicklung und Nutzung

gewonnene Know-how hat die südafrikanische Firma Sasol zu einem der globalen Technologieführer bei CtL- und GtL-Verfahren aufsteigen lassen, ihre Anlage Secunda CtL aus den Jahren 1980/84 hat eine Produktionskapazität von 160.000 barrels per day (bpd). Daneben gilt auch Shell international als einer der Know-how-Träger. Das Unternehmen betreibt seit 1993 im malaysischen Bintulu eine GtL-Anlage mit 14.800 bpd und seit 2012 die Anlage Pearl GTL in Quatar mit 260.000 bpd. Am KIT in Karlsruhe wird mit dem Bioliq-Verfahren ein BtL-Prozess im Pilotmaßstab betrieben (Eberhard et al. 2018).

Alle XtL-Verfahren arbeiten nach dem gleichen Verfahrensprinzip: In der ersten Stufe wird aus den eingesetzten Rohstoffen (Kohle, Erdgas, Biomasse oder Wasserstoff und CO_2) Synthesegas erzeugt, ein Gemisch von Wasserstoff (H_2) und Kohlenmonoxid (CO). Nach der Gasreinigung wird das hochreine Synthesegas in der Fischer-Tropsch-Synthese direkt oder über Zwischenprodukte wie Dimethylether, Wachse o. ä. zu Kraftstoff konfektioniert. Dabei kann die Synthese so gefahren werden, dass maßgeschneiderte Kraftstoffe hergestellt werden können (optimierte Kettenlängen, ohne aromatische Verbindungen, schwefelfrei).

3.3.10.2 Rohstoffinhalt

Die Anlagen für die Produktion von XtL-Kraftstoffen werden in normalem Stahl ausgeführt. In dieser Analyse gilt das Augenmerk daher dem Katalysator des Fischer-Tropsch-Reaktors. Eingesetzt werden können die Metalle aus der VIII. Nebengruppe wie Eisen, Kobalt, Nickel und Ruthenium. Im praktischen Einsatz erzeugt Nickel zu viel Methan und Ruthenium ist zu teuer (Dry 2002).

Eisen- und Kobaltkatalysatoren werden eingesetzt. Ein Vorteil des Eisens ist seine Aktivität bei der Wassergas-Shift-Reaktion (1), der Nachteil seine kinetische Hemmung durch entstehendes Wasser (2) und seine geringe katalytische Selektivität.

(1) $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$

(2) $n\ CO + (2\ n + 1)\ H_2 \rightarrow CnH_{2n+2} + n\ H_2O$

Im Vergleich zu Eisen- sind Kobaltkatalysatoren bereits bei niedrigeren Temperaturen aktiv und erlauben längere Standzeiten (Dry 2002). Aufgrund ihrer geringen Aktivität bei der Reaktion (1) eignen sich Kobaltkatalysatoren besonders bei Gaszusammensetzungen von H_2:CO größer 2 zur Erzeugung von den gewünschten Alkanen

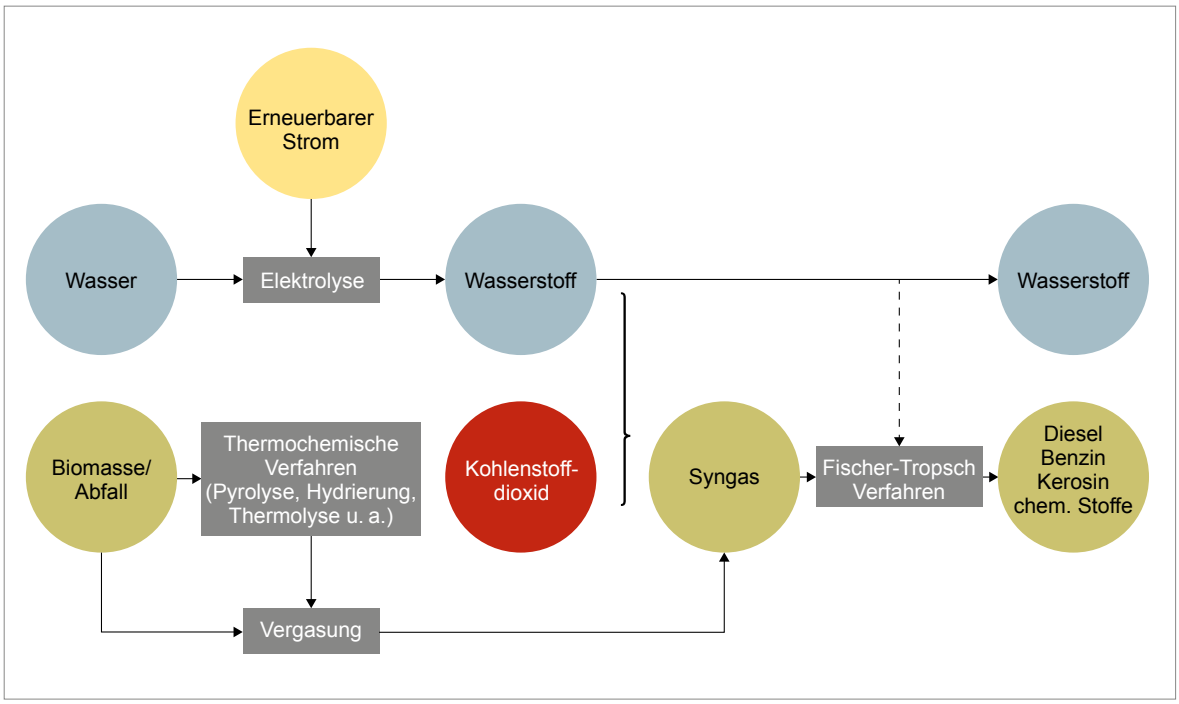


Abb. 3.82: Möglichkeiten zur Erzeugung von PtL (Quelle: Wydra & Schwarz 2021)

Tab. 3.78: Zusammensetzung eines Fischer-Tropsch-Katalysators von Johnson Matthey (Quelle: COMBES ET AL. 2016)

Angaben in %	Co	Al	Mg	Ru
Beispiel 1a	17,18	36,86	0,26	0,06
Beispiel 1b	19,58	33,28	2,06	0,06
Vergleichsprobe A	18,26	31,07	4,13	0,5

(KLERK 2008). In den Kobaltkatalysatoren sind geringe Mengen Rhenium oder ein Platinmetall, bspw. Platin, Ruthenium, Palladium oder Rhodium, als Promotoren eingelagert, welche den Reduktionsprozess verbessern und die Oberfläche des Kobalts aktiv halten sollen (DRY 2002). Die Promotorenanteile betragen weniger als 1 Gew.-%. Wegen des hohen Preises wird versucht, die Menge an Kobalt im Katalysator gering zu halten bzw. die verfügbare Oberfläche des Kobalts zu maximieren. Dies geschieht durch den Auftrag von Kobaltdispersionen auf Gerüstmaterialien mit großen Oberflächen wie Aluminiumoxid, Siliziumdioxid oder Titandioxid oder durch bestimmte Katalysatorgeometrien (CALDERONE et al. 2013). Der Kobaltanteil am gesamten Katalysatorgewicht wird mit 20 Gew.-% angegeben (DRY 2002). In Tab. 3.78 sind verschiedene Zusammensetzungen angegeben.

Die Angaben zur benötigten spezifischen Katalysatormenge des FT-Aggregats schwanken. Als Daumenregel werden 100–200 Tonnen Kobalt für eine 10.000 bpd-Anlage genannt (CDI 2006).

3.3.10.3 Foresight Industrielle Nutzung

Stand der Technik sind zurzeit große GtL-Anlagen mit bis zu 120.000 bpd. Für die Nutzung von Biomasse oder Elektrolyse-Wasserstoff und CO_2 aus Punktquellen sind diese Anlagen zu groß, weshalb an kleineren Anlagenkonzepten gearbeitet wird (KIRSCH et al. 2020).

In den drei SSP-Szenarien werden sehr unterschiedliche Rohstoffe für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe und Öle verwendet, vergleiche Tab. 3.79. Im SSP1-19 (Nachhaltigkeit) werden fossile Ölprodukte insgesamt eingespart und ab 2020 durch flüssige Produkte aus Biomasse (BtL oder PtX, wobei die Biomasse als CO_2-Quelle dient) substituiert, so dass bis 2060 mehr Biomasse-basierte Flüssigkeiten hergestellt werden als fossile Produkte. Im SSP2-26 („Mittelweg“) erfolgt ab 2040 ebenfalls ein Rückgang des Verbrauches an flüssigen Energieträgern. Es wird auch Biomasse eingesetzt, daneben aber Gas und, bis 2060, auch geringere Mengen an

Tab. 3.79: Entwicklung der Produktion der synthetischen Kraftstoffe in den verschiedenen Szenarien

XtLs (Rohstoff) [EJ/a]	2020	2030	2040
SSP1-19 (Biomasse)	2,18	11,73	19,45
SSP1-19	**2,18**	**11,73**	**19,45**
SSP2-26 (Biomasse)	3,58	3,01	7,22
SSP2-26 (Kohle)	1,10	2,18	1,62
SSP2-26 (Gas)	0,83	1,77	2,00
SSP2-26	**5,51**	**6,96**	**10,84**
SSP5-Baseline (Biomasse)	4,23	3,58	2,35
SSP5-Baseline (Kohle)	0,05	1,05	8,78
SSP5-Baseline	**4,28**	**4,63**	**11,12**

Kohle. Im „Fossilen Pfad“ SSP5 erfolgt ab ca. 2020 zunehmend ein Einsatz von Kohle als Rohstoff, um 2090 werden dann mehr Kohle-basierte Energieträger als Erdöl-basierte produziert. Wie genau die Kraftstoffe CtL, GtL und BtL hergestellt werden und welcher Anteil des in den Szenarien hergestellten Wasserstoffs in die PtL-Produktion eingeht, geht aus den Veröffentlichungen nicht hervor (Bauer et al. 2017b).

3.3.10.4 Foresight Rohstoffbedarf

Wenn für die Gesamtproduktion der verschiedenen synthetischen Kraftstoffe eine lineare Entwicklung des Zubaus an Anlagen unterstellt wird, erhält man für den Ausbau im Jahre 2040 Werte zwischen 0,47 und 0,96 EJ Energieinhalt der Kraftstoffe und Öle. Das entspricht zwischen 11,2 und 22,9 Mtoe und zwischen 82 und 168 Millionen Barrel Öl, das sind zwischen 225.400 und 460.500 bpd, siehe Tab. 3.80.

Nach der oben schon erwähnten Daumenregel werden ca. 100 – 200 Tonnen Kobalt für eine 10.000 bpd-Anlage benötigt (CDI 2006), andere Quellen gehen von 50 Tonnen Kobalt aus (Brumby et al. 2005). Geht man von 100 Tonnen aus, ergeben sich, mit den bpd-Angaben aus Tab. 3.80 die in Tab. 3.81 dargestellten Bedarfsmengen für 2040. Diese Mengen sind bei Ruthenium kritisch gegenüber der Weltproduktion 2018.

Da im Jahr 2018 keine größere XtL-Anlage in Betrieb genommen wurde, war der Kobaltbedarf gering.

Tab. 3.80: Kumulierte und jährliche Produktionsmengen für XtL im Jahr 2040

XtLs 2040	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Gesamtproduktion 2040 [EJ/a]	19,45	10,84	11,12
Zubau im Jahr 2040 [EJ]	0,96	0,47	0,93
Zubau 2040 [Mtoe]	22,93	11,21	22,29
Zubau 2040 [Mio. barrel]	168,07	82,28	162,82
Zubau in barrel per day [bpd]	460.500	225.400	446.100
1 EJ = 23884589 toe; 1 toe = 7,33 barrels of oil equivalent (BOE)			

Tab. 3.81: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für synthetische Kraftstoffe in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Kobalt	151.060 (B) 126.019 (R)	gering	4.600	2.250	4.460
Aluminium	63.756.000 (R)	–	7.600	3.700	7.360
Magnesium	948.963 (R)	–	460	225	450
Ruthenium	33[1] (R)	–	13,8	6,8	13,4

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

[1] *Quelle: JM 2020*

3.3.10.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die Katalysatoren sind etwa fünf Jahre im Einsatz und müssen dann ausgetauscht werden (Güttel et al. 2007; Klerk 2008). Edelmetallhaltige Katalysatoren werden in weit entwickelten Recyclingverfahren behandelt, bei denen Wiedergewinnungsraten von 97 % und mehr erreicht werden (Hassan & Richter 2002; Brumby et al. 2005) und wieder eingesetzt. Insgesamt wird die Lebensdauer von GtL- und CtL-Anlagen mit 30 Jahren angegeben (IEA ETSAP 2010).

3.4 Cluster: Kreislauf- und Wasserwirtschaft

3.4.1 Meerwasserentsalzung

3.4.1.1 Technologiebeschreibung

Im Meerwasser sind durchschnittlich 3,5 % (35 g/kg bzw 35.000 ppm) Salz enthalten. Für den Menschen kann ein Salzgehalt im Trinkwasser von maximal 0,5 % (5.000 ppm) toleriert werden, so dass Meerwasser ohne vorherige Aufbereitung nicht zum Trinken nutzbar ist. Für Industrieanlagen muss Prozesswasser teilweise noch weiter entsalzt werden. Nach Angaben der International Desalination Association (IDA 2020) gab es 2019 weltweit ca. 17.000 Entsalzungsanlagen, die eine Kapazität von ca. 107 Mio. Kubikmeter pro Tag haben und dabei ca. 66,5 Mio. Kubikmeter Wasser pro Jahr produzierten.

Die Entsalzung erfolgt im großtechnischen Maßstab mit industriell ausgereiften Verfahren, die zu 61 % Seewasser und zu 21 % Brackwasser einsetzen. Daneben wird auch Flusswasser (8 %), Abwasser (6 %) und auch Rohwasser (4 %, für industrielle Zwecke, die eine hohe Wasserqualität erfordern) behandelt (Jones et al. 2019).

Es gibt thermische Verfahren und Membranverfahren. Die gängigsten sind (vgl. Abb. 3.83):

– MSF-Verfahren (Multi-Stage-Flash, Blitzverdampfung): Dabei wird Meerwasser erhitzt und in mehreren hinter einander geschalteten Kammern unter sukzessive abnehmendem Druck und Temperatur verdampft. Parallel wird frisches Meerwasser durch die Kammern zum Erhitzer geleitet. Der Dampf des aufgeheizten Meerwassers schlägt sich auf den Rohrbündeln nieder, in denen das frische Meerwasser durch die Anlage zum Erhitzer fließt (Römpp 2020).

– UO (Umkehrosmose, Reverse Osmosis): Bei der umgekehrten Osmose wird Wasser mit Hilfe einer Pumpe durch eine semipermeable Membran gepresst, die Ionen der gelösten Stoffe werden zurückgehalten. Der Druck muss über dem natürlichen osmotischen Druck des Wassers liegen. Hochdruckpum-

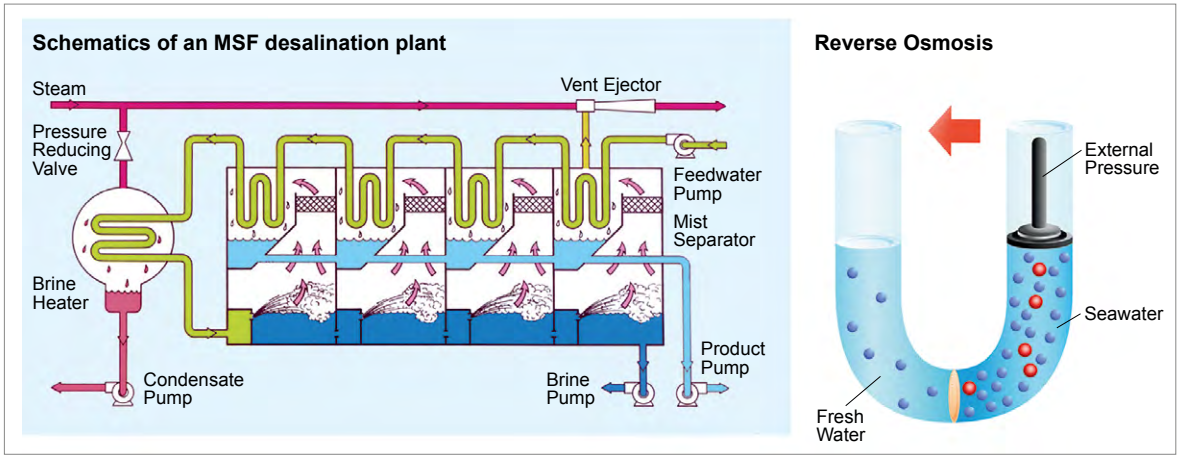


Abb. 3.83: Verfahrensschema der bedeutendsten Meerwasserentsalzungsverfahren (Quellen: linke Seite: Sasakura Engineering Co., Ltd., rechte Seite: shutterstock.com/Designua)

pen können Druck zwischen 5,4 und 8,2 MPa (54 – 82 bar) erzeugen. Die Ausbeute von entsalztem Wasser liegt zwischen 30 und 45 % (Römpp 2020).

Während bis zum Jahr 1995 Destillationsverfahren die führende Technologie waren, änderte sich das zugunsten von Membranverfahren aufgrund der geringeren Investitionskosten, geringerem Energiebedarf und Umweltauswirkungen. Heute arbeiten ca. 70 % aller Anlagen mit Umkehrosmose und nur 25 % mit thermischen Verfahren (Jones et al. 2019), vergleiche Abb. 3.84. Weitere Technologien sind die Elektrodialyse (ED) und die Multi-Effect-Distillation (MED).

Die Meerwasserentsalzung kann grundsätzlich auch mit regenerativen Energieträgern gekoppelt werden. Im April 2020 lobte das amerikanische Energieministerium hierzu einen Preis für die Entwicklung eines technisch umsetzbaren Verfahrens aus (DOE 2020).

Ein mögliches zukünftiges Verfahren zur Trinkwassergewinnung ist die kapazitive Deionisierung (CDI), bei der die zu trennenden Ionen entsprechend ihrer Ladung zur Anode oder Kathode wandern und dort konzentriert werden können. So lassen sich kommerziell interessante Salze und Metalle gewinnen und gleichzeitig Trinkwasser erzeugen.

3.4.1.2 Rohstoffinhalt

Hinsichtlich des Rohstoffbedarfs für die Meerwasserentsalzung sind korrosionsfeste Werkstoffe, Membranen und Wasserchemikalien (für Anti-Fouling, Anti-Scaling, Korrosionskontrolle) von Belang.

Entsalzung stellt aufgrund der korrosiven Prozessumgebung mit hohem Chloridgehalt und hohen Temperaturen hohe Anforderungen an Werkstoffe. In der Werkstoffentwicklung versuchten die Anbieter von Entsalzungsanlagen, die Anforde-

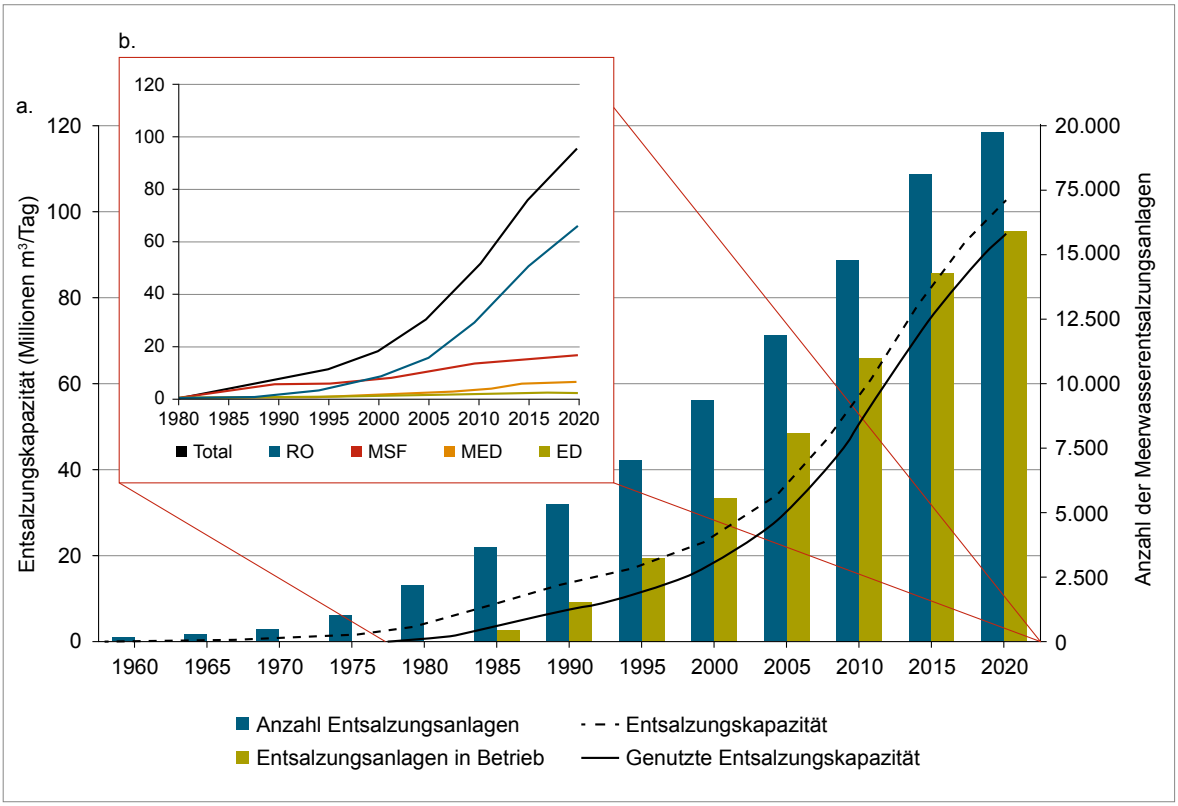


Abb. 3.84: Trends in der globalen Meerwasserentsalzung nach (a) Anzahl und Kapazität der gesamten und in Betrieb befindlichen Entsalzungsanlagen und (b) Betriebskapazität nach Entsalzungstechnologie (Quelle: Jones et al. 2019)

rungen an die Korrosionsbeständigkeit mit niedrigen Investitionskosten im Einklang zu halten. Daher wurden in den Anfängen der Entsalzung die Verdampfer von Multi-Stage-Flash- (MSF) und Multi-Effect- (MED) Entsalzungsanlagen aus Baustahl gefertigt und später MSF-Verdampfer typischerweise mit 316 Laustenit-Edelstahl verkleidet. MED-Kammern wurden zunächst mit Epoxid beschichtet und anschließend mit rostfreiem Stahl verkleidet (IMOA 2014). Diese haben einen Chromgehalt von mindestens 12 %. Das Chrom bildet eine dünne Passivschicht, die sich selbst nach Verletzung wieder schließt.

Seit 2003 werden vor allem Duplex-Edelstähle eingesetzt. Diese haben ein zweiphasiges Gefüge, das aus einer Ferrit-Matrix mit Inseln aus Austenitphasen besteht. Dies führt zu höheren Festigkeiten – doppelt so hoch wie bei herkömmlichen austenitischen Sorten – kombiniert mit hoher Korrosionsbeständigkeit. Infolgedessen können Verdampfer aus Duplex-Edelstahl mit dünneren Platten gebaut werden, was weniger Material und weniger Schweißarbeiten erfordert. Der Durchbruch für das Konzept der Duplex-Edelstähle kam 2003, als Duplex-Edelstahl der Güte 2205 für Vollduplex-Verdampfer ausgewählt wurde, die in der Melittah MSF-Anlage und der Zuara MED-Anlage in Libyen installiert werden sollten.

Seit 2004 werden zwei verschiedene Arten von rostfreiem Duplex-Stahl in den Strukturen der Verdampfer verwendet: hochkorrosionsbeständiges 2205 für Teile, die den widrigsten Bedingungen ausgesetzt sind, und 2304 für Teile, die weniger widrigen Bedingungen ausgesetzt sind. Drei MSF-Anlagen wurden nach diesem Dual-Duplex-Konzept mit einer Kombination aus 2205 und UNS S32101 gebaut: Taweelah B (Abu Dhabi), Jebel Ali L2 (Dubai) und Ras Abu Fontas B2 (Katar) (IMOA 2014).

Mit einer Erhöhung des Chromanteils und der Zugabe von Nickel und Molybdän wird die Korrosionsfestigkeit weiter erhöht. Der Anlagenbauer Outokumpu setzt beispielsweise auf die Qualität

Tab. 3.82: Werkstoffe für Meerwasserentsalzungsanlagen (Quelle: MatWeb 2020)

Legierung [%]	Cr	Mo	Mn	Cu	Ni	Ti	Al	C	Fe
316	16–18	2–3	≤ 2,0		10–14			≤ 0,08	61,8–72
AK Steel 2205 Duplex Stainless steel	22	3,1			6,0			0,02	68,7
UNS S32101	21,5	0,3	5		1,5			0,03	71,4
Sandvik SAF 2304	21,5–24,5	0,05–0,6	2,5	0,05–0,6	3–5,5			0,03	65,2–71,8
Outokumpu 254 SMO® High Performance Austenitic Stainless Steel	20	6,1			18				55,7
Sandvik SAF 2507 Bar Steel	25	4	≤ 1,2	≤ 0,5	7			≤ 0,03	61,1
Outokumpu 4501 Duplex Stainless Steel (W 0,5 %)	25	3,8		0,5	7			0,02	62,9
Copper nickel 10 %, UNS C70600				88,7	9–11				1–1,8
ATI Allegheny Ludlum Grade 5 Titanium 6Al-4V (UNS R56400) (V 4 %)						90	≤ 6,5	≤ 0,08	≤ 0,03
ATI Allegheny Ludlum Grade 7 Titanium (Pd 0,2 %)						≥ 99.1		≤ 0,1	≤ 0,3

4501 und SAF 2507® mit 25 % Chrom, vergleiche Tab. 3.82 (Outokumpu 2020).

Eine grundsätzliche Alternative zu Stahl sind Titanlegierungen. Hierauf setzt z. B. die Firma Allegheny Ludlum. Unter 250 °C und bei pH-Werten über 1 unterliegen palladiumlegierte Titanwerkstoffe nicht der Spaltenkorrosion. Die meisten Anwendungen findet Titan in der Kategorie der thermischen Destillation, wo es für Rohre, Ventile und Plattenwärmetauscher verwendet wird.

So wurden Titanrohre z. B. in Wärmetauschern der Meerwasserentsalzungsanlage Jebel Ali L eingesetzt, in der täglich 317.000 Kubikmeter Trinkwasser aus Meerwasser gewonnen wurden (Thyssen-Krupp 2004). Die 160 Tonnen Titanrohre wurden aus Spaltband rollprofiliert und in einer Argon-Schutzgasatmosphäre geschweißt. Die Wandstärke beträgt 0,5 Millimeter bei einem Durchmesser von 30 Millimeter. Die Herausforderung ist die Länge der Wärmetauscherrohre von jeweils 23,4 Meter. Damit die Rohre über die gesamte Länge gleichmäßig gerade bleiben, müssen sie präzise beim Rollformen und Schweißen behandelt und während des gesamten Fertigungsprozesses abgestützt werden, damit sie nicht verbiegen. Die 160 Tonnen Titanrohre für Jebel Ali L entsprechen dabei einer Strecke von 764 Kilometern (Thyssen-Krupp 2004).

Im Gegensatz dazu wird Titan in Umkehrosmose-Anlagen nur begrenzt eingesetzt, hauptsächlich in Pumpenköpfen. Die Preise für die wesentlichen Werkstoffe für die Meerwasserentsalzung sind stark gestiegen. Die Entwicklung alternativer Werkstoffe ist deshalb ein wichtiges Forschungsfeld.

Bei aggressiven Betriebsbedingungen, werden auch häufig Kupfer-Nickel 90/10 oder modifiziertes 70/30 eingesetzt (Meroufel 2017). Auf Grundlage so vieler potenzieller Werkstoffe ist es nur möglich, eine sehr grobe Abschätzung des Rohstoffbedarfs für Meerwasserentsalzungsanlagen zu machen.

Die Rohstoffbedarfe für die Umkehrosmose stammen aus (Raluy et al. 2005), vergleiche Tab. 3.83. Als rostfreier Stahl wird 316 L unterstellt, vergleiche Tab. 3.82.

Tab. 3.83: Rohstoffbedarf für UO-Meerwasserentsalzungsanlagen (Quelle: Raluy et al. 2005)

Rohstoffbedarf (in t/1.000 hm³/a)	Umkehrosmose
Zement	1.240.000
Beton	130.000
Bewehrter Beton	48.750
Eisen	650
Stahl	87.750
Rostfreier Stahl	370
Titan	–
Sand	65.000
Aromatische Polyamide	370
Epoxidharz	23
Polyethylen	16.000

Aufbauend auf diesen Werten wurden die Ergebnisse einer Auswertung des Spezialstahl- und Titanlegierungsbedarfs für sechs thermische Meerwasserentsalzungsanlagen durchgeführt, um den Rohstoffbedarf für die thermische Anlage anzupassen.

Für sechs thermische Meerwasserentsalzungsanlagen (Yebel Ali L, Ras Al-Khair, All Hidd, MARAFIQ-Anlage, Yanbu3 und Az-Zour North) wurden in der Literatur Angaben zum Materialverbrauch gefunden. Die Mittelwerte der sechs Anlagen sind in Tab. 3.84 dargestellt. Der Bedarf von Kupfer-Nickel 90/10 wurde nicht veröffentlicht, so dass hier derselbe Bedarf wie bei Duplexstählen unterstellt wird.

Tab. 3.84: Rohstoffbedarf für thermische Meerwasserentsalzungsanlagen

Rohstoffbedarf (in t/1.000 hm³/a)	Mittelwert thermische Anlagen
Duplex	29.200
Titan	12.040
Kupfer	(wie Duplex)

3.4.1.3 Foresight Industrielle Nutzung

Voraussagen zur längerfristigen Entwicklung des Marktes der Meerwasserentsalzung über das Jahr 2027 hinaus sind nicht publiziert. In Marktstudien wird von einer jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von ca. 9 % (Grand View Research 2020) bzw. 9,5 % (Fisia Italimpianti S.p.A. 2020) für die globale Entwicklung bis 2027 ausgegangen. Mit geschätzten Ausgaben von 8,6 Mrd. USD im Jahr 2019 ist der Nahe Osten die Region mit den höchsten Investitionen in die Wasserentsalzung, der asiatisch-pazifische Raum weist jedoch mit 10 % pro Jahr die höchste Wachstumsrate im Markt auf (Fisia Italimpianti S.p.A. 2020). In sehr wasserarmen Gebieten in Algerien, Libyen, Marokko und Ägypten werden in speziellen Kläranlagen Abwässer zu Trinkwasser aufbereitet.

Da der Markt der Meerwasserentsalzung auch stark von der industriellen Wassernachfrage abhängt, wird zur Abschätzung des Marktes nach 2027 das Wachstum des globalen BIPs genutzt. Damit ergeben sich für die drei SSP-Szenarien kumulierte Kapazitäten im Jahr 2040 von 305 (SSP2) bis 385 Mio. m³/d (SSP5), vergleiche Abb. 3.85.

3.4.1.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für die Berechnung des Rohstoffbedarfes wurden beim Duplex-Stahl eine Mischung von 35 % UNS S32101, 35 % 2205 und 30 % 4501 unterstellt. Beim Titan wurden zur Hälfte Grade 5 und Grade 7 angenommen. Des Weiteren wurde berücksichtigt, dass der Anteil der thermischen Anlagen weiter abnimmt. Im Jahr 2040 wurde mit 20 % thermischen und 80 % UO-Anlagen gerechnet.

Tab. 3.85: Neu errichtete Meerwasserentsalzungsanlagen 2040

	SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Kapazität [Mio. m³/d]	11,3	7,6	15,5

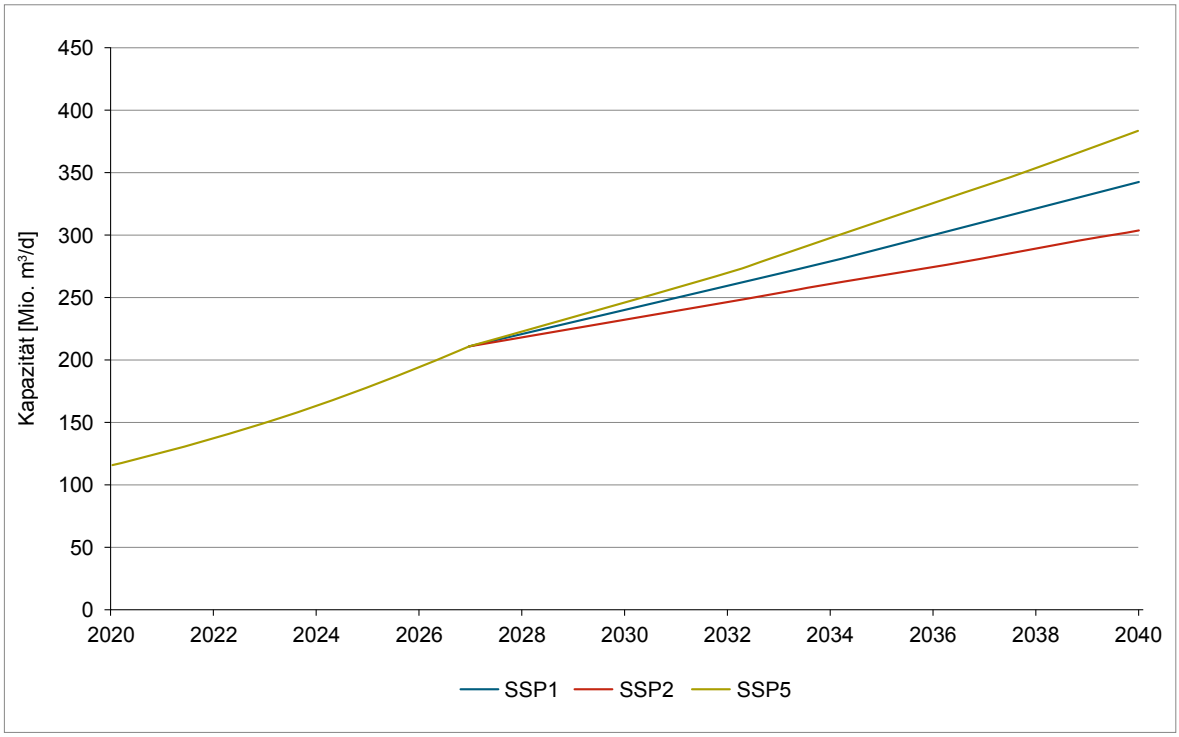


Abb. 3.85: Abschätzung der kumulierten globalen Meerwasserentsalzungskapazität in Mio. m³ pro Tag (Quelle: Eigene Darstellung)

Tab. 3.86: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für die Meerwasserentsalzung in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Eisen	1.520.000.000 (B)	24.700	20.000	13.300	27.300
Titan	260.548 (R)	12.500	9.400	6.300	12.900
Chrom	27.000.000 (B)	7.400	5.700	3.800	7.800
Nickel	2.327.500 (B)	4.100	3.200	2.100	4.400
Molybdän	265.582 (B)	1.100	800	600	1.100
Kupfer	20.591.000 (B) 24.137.000 (R)	28.400	21.400	14.300	29.300
Mangan	20.300.000 (B)	1100	800	500	1.100
Aluminium	63.756.000 (R)	400	300	200	410
Vanadium	90.661 (B)	260	200	130	270
Palladium	210 (B)	13	10	7	14

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Mit diesen Annahmen und den Daten aus den Tab. 3.82 bis Tab. 3.85 ergeben sich die in der Tab. 3.86 abgeschätzten Bedarfe für 2040. Der unterstellte Rückgang der thermischen Verfahren führt 2040 bei den SSP1 und SSP2 zu einem Rückgang der entsprechenden Stähle mit ihren Metallen und bei Titanlegierungen. In SSP5 wird dieser Verfahrens-Shift zur UO durch einen verstärkten Kapazitätsausbau kompensiert. Die Bedarfe der Metalle 2040 liegen deutlich unter den Produktionsmengen von 2018.

3.4.1.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die korrosionsfesten Werkstoffe in der Meerwasserentsalzung lassen sich grundsätzlich gut recyceln (Outokumpu o. J.). Aufgrund der hohen Wachstumsraten bei der Installation und über 25 Jahren Anlagenlebensdauer entlastet das Recycling die Primärrohstoffmärkte aber nur mit einem hohen Zeitverzug.

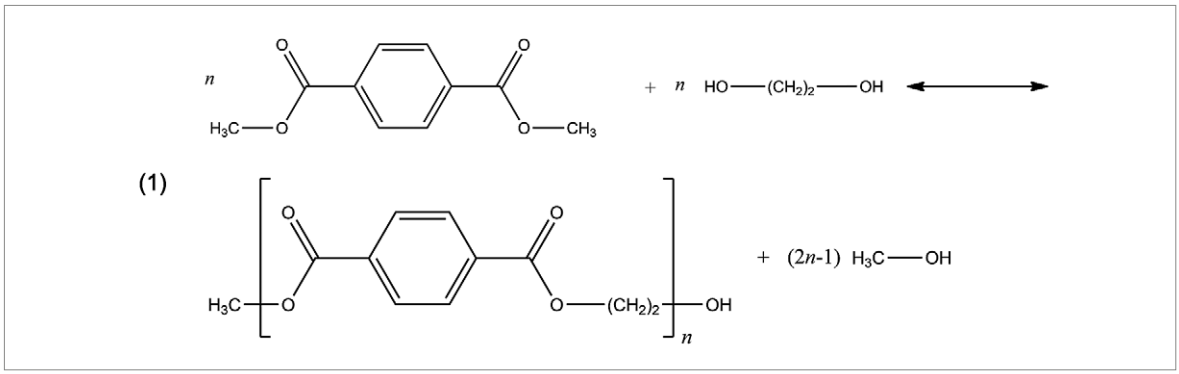
Da bei Titan-Metall und Palladium insgesamt merkliche Nachfrageimpulse auf die Rohstoffmärkte wahrscheinlich sind, stellt sich auch die Frage nach einer Substitution. Korrosionsschutz für Meerwasserentsalzungsanlagen ist nicht zwingend auf Palladium oder Titan angewiesen.

3.4.2 Rohstoffliches Recycling (von Kunststoffen)

3.4.2.1 Technologiebeschreibung

Unter rohstofflichem Kunststoffrecycling werden Verfahren verstanden, bei denen Abfall-Polymere wieder in kleinere chemische Bausteine zerlegt werden. Diese können im besten Fall die reinen Monomere sein, die wieder zur Polymerisation eingesetzt werden können. Im Gegensatz dazu werden Kunststoffe beim werkstofflichen Recycling mit geringerem Energieeinsatz sortiert, gereinigt und wieder in der Kunststoffverarbeitung eingesetzt. Doch fallen Alt-Kunststoffe in der Regel nicht so sortenrein an, dass eine werkstoffliche Verwertung für den selben Einsatz möglich ist.

Bei den rohstofflichen Verfahren wird zwischen thermischen und Solvolyse-Verfahren unterschieden. Bei Letzteren werden Polykondensate durch geeignete Reaktionsbedingungen wieder in die Ausgangsstoffe zerlegt, wie es für Polyethylenterephthalat (PET) bekannt ist. Bei der Methanolyse mit Methanol werden Temperaturen bis 300 °C und Drücke von bis zu 40 bar angewandt, um die Grundstoffe für PET zurück zu gewinnen, was der Umkehrung der Herstellungsreaktion entspricht:



Im Weiteren werden nur thermische Verfahren betrachtet, da bei diesen die Nachfrage nach Edelstählen größer ist.

Die thermischen rohstofflichen Kunststoff-Recyclingverfahren wurden ursprünglich unter dem Einfluss der Ölpreiskrise 1973, der begrenzten Erdölreserven, dem steigenden Verbrauch an Kunststoffen und den gesetzlichen Rahmenbedingungen bei der Verwertung von Abfallstoffen entwickelt (LECHLEITNER et al. 2020).

Vor dem Hintergrund einer umfassenden CO_2-Minderung und einer Kreislaufführung von Kohlenstoff in der Chemischen Industrie gewinnen rohstoffliche Verfahren wieder an Bedeutung. Die werkstoffliche Nutzung sollte soweit möglich ausgebaut werden, da hier ein kurzer Kreislauf möglich ist, bei dem die CO_2-Einsparung prinzipiell am größten ist. Wo eine werkstoffliche Nutzung nicht möglich ist, sollte eine rohstoffliche Verwertung genutzt werden, um chemische Rohstoffe wieder zu gewinnen, siehe Abb. 3.86. Ein zweiter Grund für eine nötige Kreislaufschließung bei den Kunststoffen ist die Tatsache, dass von den im Jahr 2018 weltweit produzierten 359 Mio. Tonnen (PLASTICSEUROPE 2019) ein großer Anteil in die Umwelt gelangt und dort massive Einflüsse

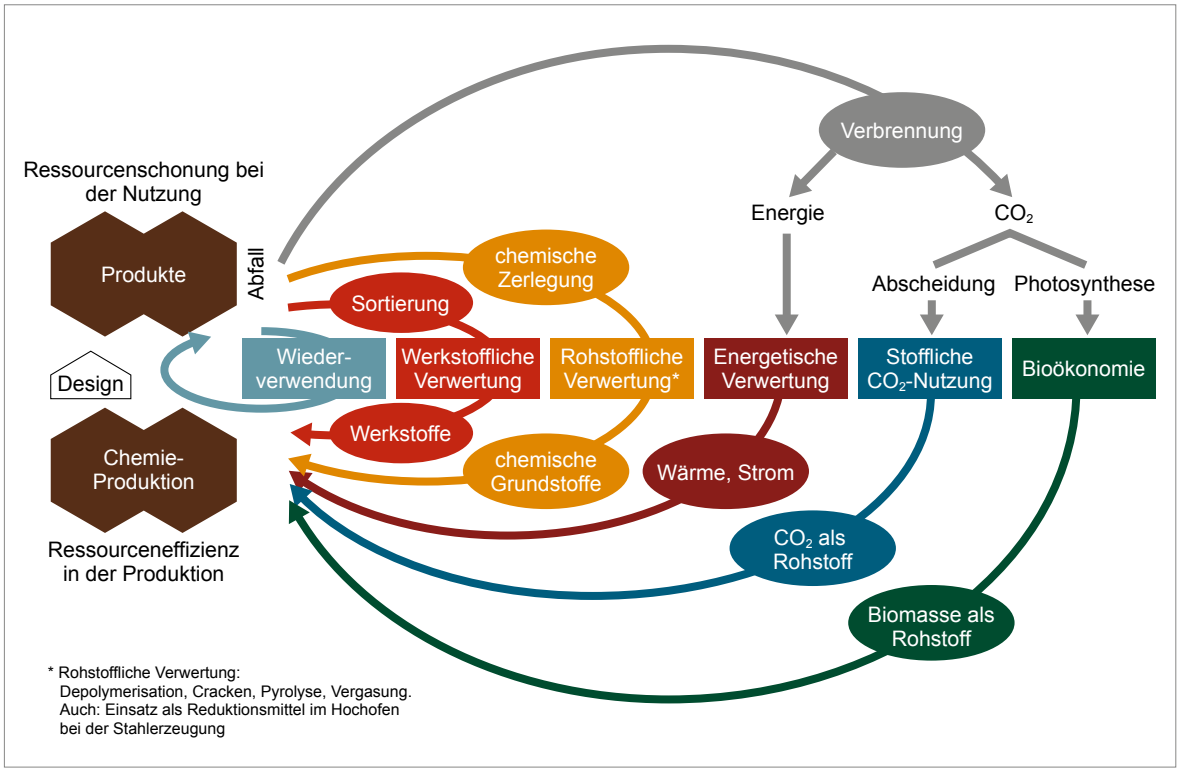


Abb. 3.86: Mögliche Kreisläufe für Kohlenstoff in der Chemischen Industrie (Quelle: VCI 2018)

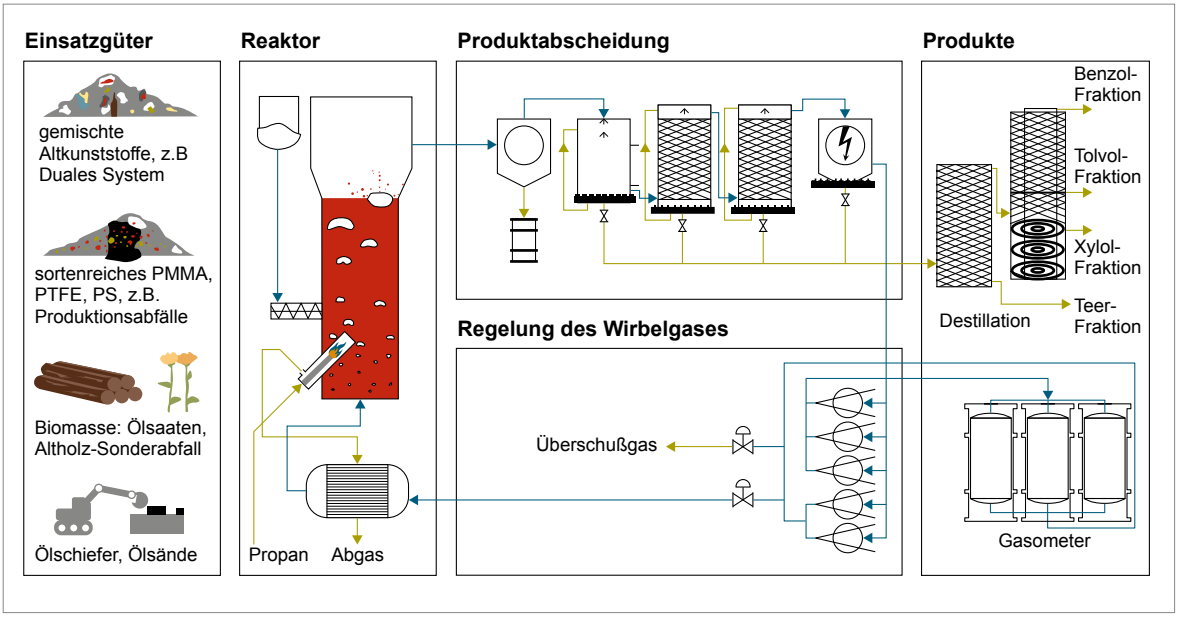


Abb. 3.87: Anlagenschema des Hamburger Pyrolyseverfahrens (Quelle: Universität Hamburg 2012)

auf Flora und Fauna nimmt (EC 2018; Deutsche Umweltstiftung 2020). 2016 veröffentlichte die Ellen MacArthur-Stiftung eine Studie, nach der im Jahr 2050 mehr Plastik als Fische im Meer schwimmen (Ellen MacArthur Foundation 2016).

Ein gut dokumentiertes Pyrolyse-Konzept ist das Hamburger Pyrolyseverfahren, dessen Verfahrens-Schema in Abb. 3.87 dargestellt ist. Es soll hier als Beispiel eines thermisch rohstofflichen Prozesses dienen. Das Verfahren wurde in den 1970er Jahren an der Universität Hamburg entwickelt und in den Jahren 1984 – 1988 in einem BMBF-geförderten Vorhaben in einer Demonstrationsanlage getestet (Kaminsky et al. 1979; Scheirs & Kaminsky 2016).

Bei diesem Verfahren wurden verschiedene Einsatzgüter eingesetzt, die über eine Eintragsschnecke in den Reaktor eingebracht wurden, siehe Abb. 3.87. Der Prozess fand unter Sauerstoffausschluss statt. Der Reaktor war als indirekt beheizte Quarzsand-Wirbelschicht ausgeführt, die bei Temperaturen bis ca. 800 °C betrieben wurde. Als Wirbelgas diente im Kreislauf geführtes Pyrolysegas. Die Pyrolyseprodukte wurden zusammen mit dem Wirbelgas in einem Zyklon von Feststoffen befreit und anschließend gekühlt. Die anfallenden Pyrolyseöle wurden in einer Destillation in eine Benzol-, Toluol-, Xylol- und Teerfraktion getrennt. Das Pyrolysegas wurde mit Pyrolyseöl gequencht und in einem Gasometer gespeichert, bevor es wieder als Wirbelgas oder als Heizgas für die Strahlbrenner genutzt wurde. Hauptprodukte des Hamburger Pyrolyseverfahrens waren die Pyrolyseöle, die je nach Einsatzmaterial und Pyrolysetemperatur 40 – 60 % der Produkte ausmachte, und das Pyrolysegas, welches neben Kohlenwasserstoffen auch einen hohen Anteil Wasserstoff enthielt.

Bei den thermisch rohstofflichen Recyclingverfahren gibt es viele unterschiedliche Verfahrensvarianten: Durch kürzere Verweilzeiten in der Wirbelschicht und moderate Temperaturen entstehen eher Flüssigkeiten; durch lange Verweilzeiten und hohe Temperaturen wird mehr Gas erzeugt. Entsprechend werden auch häufig Drehrohröfen oder klassische Rührkessel als Reaktoren eingesetzt. Neben den Einsatzgütern sind auch die Zielprodukte unterschiedlich, die von Synthesegas über Olefine bis hin zu synthetischen Ölen oder Wachsen variieren, vergleiche Tab. 3.87. Entsprechend finden sich in der Literatur auch Begriffe wie Hydrierung, Vergasung, thermische Depolymerisation o. ä. Durch den Einsatz von Katalysatoren lässt sich das Produktspektrum verbessern.

Tab. 3.87: Beispiele rohstofflicher Recyclingverfahren (Quellen: BASF 2018, Ecoloop 2018, OMV 2018, Petrogas Gas-Systems B.V 2020, Quantafuel 2020, Monreal 2020)

Prozess	Betreiber	Einsatzmaterial	Kapazität [t/a]	Bemerkung
ReOil	OMV, Schwechat	Kunststoffabfall	800	Einsatz in Raffinerie
BlueAlp™	Petrogas, Eindhoven	Polyolefine	15–20.000	Geplant, plastic to oil
Quantafuel	Skive, DK	Kunststoffabfall	20.000	Einsatz von Katalysatoren, Öle an BASF
ChemCycling™	BASF	Öle von der Fa. Recenso		Einsatz von Pyrolyseöl im Steamcracker
Plastic Energy	Sevilla, Almeria		5.000	Sog. TACOIL für Raffinerien
Ecoloop	Traunstein	Kunststoffhaltige Sortierreste	50.000	Gegenstromvergaser mit Kalk

3.4.2.2 Rohstoffinhalt

Bei den verschiedenen Anlagentypen des thermischen rohstofflichen Recyclings ist es schwierig, einen konkreten spezifischen Rohstoffinhalt anzunehmen. Daher soll eine Abschätzung auf Basis einer aktuellen, konkreten am Markt angebotenen Anlage erfolgen. Es handelt sich hierbei um die MIDI-Depolymerisationsanlage der Firma Modis GmbH. Diese kann ca. 6.000 t/a an Altkunststoff in einem elektrisch beheizten Drehrohr zu neuen Rohstoffen verarbeiten. Für die MIDI-Anlage wird Stahl benötigt, vergleiche Tab. 3.88.

Die Zusammensetzung der Werkstoffe ist in Tab. 3.89 dargestellt. Für den Alloy-Werkstoff in den Drehrohren sind Daten für Alloy 601 aufgeführt, einem Standardwerkstoff für Hochtemperaturanwendungen (Special Metals 2021).

Aus den Daten der Tab. 3.88 und Tab. 3.89 lassen sich die spezifischen Bedarfe an Stahlveredlern pro 6.000 t/a Kapazität einer thermischen Rohstofflichen Kunststoffrecycling-Anlage abschätzen. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.90 dargestellt.

Zwar sind die spezifischen Materialbedarfe bei größeren Anlagen geringer, doch gerade bei Kunststoff-Recyclinganlagen sind mehrere kleinere Anlagen sinnvoll, da der leichte Altkunststoff ohne Vorbehandlung nicht energieeffizient über große Entfernungen transportiert werden kann.

Tab. 3.88: Rohstoffbedarf für die Modis MIDI-Anlage (Quelle: Modis GmbH 2021)

Werkstoffe (Anlage mit 6 kt/a Kapazität)	Bedarf in t
Alloy-Werkstoffe	2
1.4404 Stahl	15
1.0037 Stahl	50
Kupferkabel	3

Tab. 3.89: Werkstoffe für Pyrolyseanlagen (Quelle: MatWeb 2020)

Legierung [%]	Al	Cr	Cu	Mo	Mn	Ni	C	Fe
INCONEL® Alloy 601	1–1,7	21–25	≤ 1		≤ 1	58–63	≤ 0,1	13
4404 Cr-Ni-Mo Austenitic Stainless Steel		17,2		2,1		10,1	0,02	70,58
EN 1.0037 High Manganese Carbon Steel					≤ 1,4		≤ 0,17	≥ 98,3

Tab. 3.90: Spezifische Werkstoffe für eine Pyrolyseanlagen mit 6.000 t/a Kapazität

Metalle	Al	Cr	Cu	Mo	Mn	Ni	C	Fe
Bedarf in t	0,027	3,04	3,02	0,32	0,72	2,73	0,09	60,00

3.4.2.3 Foresight Industrielle Nutzung

Zurzeit erlebt das rohstoffliche Recycling aus den oben genannten Gründen eine Renaissance (Auel et al. 2020). Wie die weitere Entwicklung sein wird, hängt von mehren Faktoren ab: Inwieweit eine Kreislaufwirtschaft ohne Kunststoffemission in die Umwelt gelingt, ob Kunststoffe klimaneutral hergestellt werden können und ob die Akzeptanz der Konsumenten weiter erhalten bleibt.

In einer Studie wurde untersucht, mit welchen Maßnahmen der Eintrag von Kunststoffabfällen in die Weltmeere reduziert werden könnte (The Pew Charitable Trusts 2020). In dieser Studie wird ein Anstieg der Kunststoffproduktion im Business as usual-Szenario auf 430 Mio. Tonnen im Jahr 2040 angenommen. In einem System Change-Szenario wird dagegen davon ausgegangen, dass davon 130 Mio. Tonnen eingespart und 71 Mio. Tonnen durch Papier u. a. substiuiert werden könnten. Von den verbleibenden 229 Mio. Tonnen könnten je 13 Mio. Tonnen in einem rohstofflichen Recycling zu Kunststoffen (P2P Chemical recycling-plastic to plastic) und zu Kraftstoffen (P2F-plastic to fuel) umgesetzt werden (Lau et al. 2020), vergleiche Abb. 3.88.

3.4.2.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für die verschiedenen Szenarien des vorliegenden Berichtes wird beim SSP2 eine Kapazität von 26 Mio. Tonnen für P2P- und P2F-Verfahren im Jahr 2040 unterstellt. Das entspricht dem System Change-Szenario der Abb. 3.88.

Beim SSP1-Szenario wird angenommen, dass die Kunststoffabfallmenge bis 2040 auf nur 200 Mio. Tonnen zurückgeht, u. a. durch einen Verzicht auf klassische Kunststoffe und der Nutzung von biogenen Kunststoffen. Davon wird ein ähnlicher Prozentsatz (11 %) wie beim SSP2 rohstofflich recycelt.

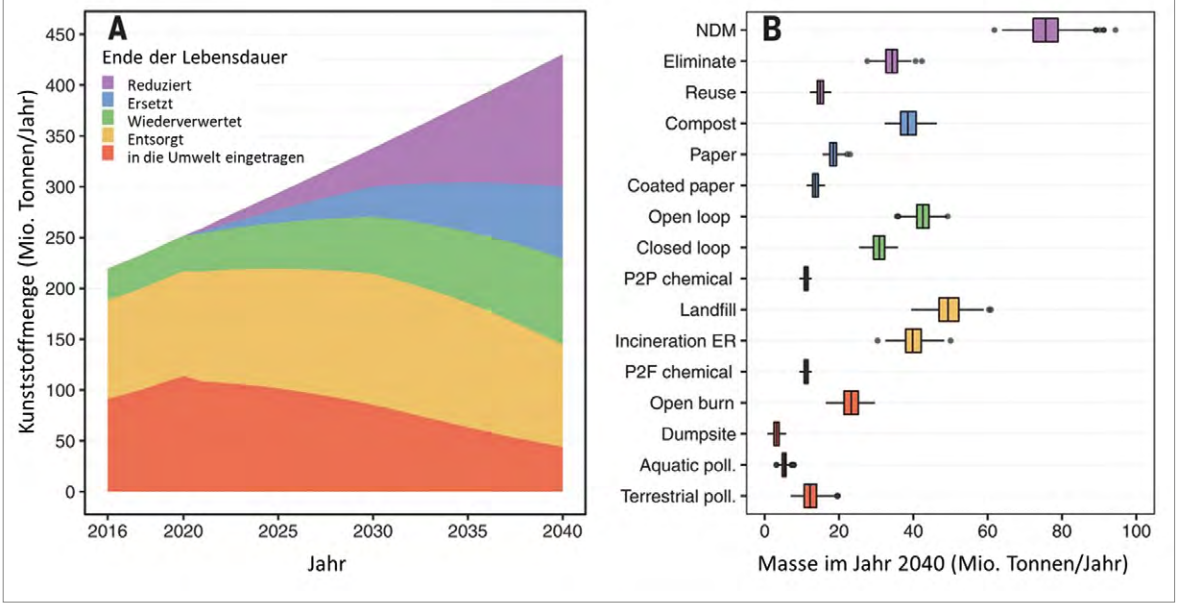


Abb. 3.88: Kunststoffverbleib im System Change-Szenario (Quelle: Lau et al. 2020)

Tab. 3.91: Für die Szenarien angenommenen Kunststoffabfallmengen in Mio. t

Angaben in Mio. t	Annahme 2018	Annahmen 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Kunstoffabfall gesamt	230	200	229	229
davon ins Rohstoffliche Recycling (kumuliert)	0,25	21	26	13
Rohstoffliches Recycling (im Jahr 2040 errichtet)		3,8	4,9	2,1

Tab. 3.92: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Rohstoffbedarf für das rohstoffliche Recycling von Kunststoffen in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1	SSP2	SSP5
Aluminium	63.756.000 (R)	1	17	22	10
Chrom	27.000.000 (B)	127	1.940	2.500	1.080
Kupfer	20.591.000 (B) 24.137.000 (R)	126	1.930	2.490	1.080
Molybdän	265.582 (B)	13	200	260	110
Mangan	20.300.000 (B)	30	460	590	260
Nickel	2.327.499 (B) 2.189.313 (R)	114	1.740	2.250	970
Eisen	1.520.000.000 (B)	2.500	38.300	49.480	21.370

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Im SSP5-Szenario wird nur die Hälfte der Altkunststoffe recycelt, dafür mehr verbrannt. Zur Abschätzung der rohstofflichen Recycling-Kapazitäten im Jahr 2040 wird ein linearer Aufbau der Kapazitäten angenommen, vergleiche Tab. 3.91.

Wie aus Tab. 3.92 hervorgeht, benötigen die Anlagen zum rohstofflichen Recycling keine kritischen Mengen an Rohstoffen.

3.4.2.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Industrielle Anlagen mit bekannten Werkstoffen lassen sich gut recyceln. Rohstoffliches Recycling sollte soweit möglich durch werkstoffliche Verfahren substituiert werden. Wie oben erwähnt, ist ein hochwertiges werkstoffliches Recycling einem rohstofflichem Recycling überlegen, da keine Kohlen-Wasserstoffbindungen zerstört werden müssen.

3.5 Cluster: Strom- und Datennetzwerke

3.5.1 Ausbau Stromnetz

3.5.1.1 Technologiebeschreibung

Stromnetze dienen zum Transport und der Verteilung von elektrischer Energie vom Ort der Herstellung zum Ort des Bedarfs. Dies geschieht über national und regional organisierte und aufgebaute zumeist aber untereinander verknüpfte Netze auf

unterschiedlichen Spannungsebenen. Grundsätzlich unterschieden wird dabei zwischen Übertragungs- und Verteilnetzen. In Übertragungsnetzen kann elektrischer Strom mit Hilfe von Höchstspannung (In Europa meist 220 oder 380 kV, in Nordamerika und Russland aber auch um die 750 kV und maximal bis zu 1.200 kV) über weite Strecken transportiert werden. Übertragungsnetze sind international über Kuppelleitungen verbunden, die Stromim- und exporte ermöglichen. Die Verteilnetze übernehmen die regionale Verteilung mit immer kleinteiliger werdenden Strukturen vom Übertragungsnetz hin zu größeren und kleineren industriellen Verbrauchern und schließlich bis zu den einzelnen Haushalten. Die Spannung wird dabei stufenweise reduziert, weswegen das Verteilnetz aus Hoch-, Mittel- und Niederspannungsbereichen besteht. Die Verbindung der verschiedenen Spannungsebenen bilden Umspannwerke mit Transformatoren (Abb. 3.89). Das globale Netz wird derzeit auf eine Leitungslänge von über 70 Millionen Kilometer geschätzt, wovon mehr als 90 % auf das Verteilnetz entfallen (IEA 2021).

Ursprünglich gab es dabei eine klare Richtung von wenigen großen Produzenten in Form von beispielsweise Wasser-, Kohle- oder Atomkraftwerken, die Strom bei Höchstspannung in das Übertragungsnetz einspeisen, hin zu einer Vielzahl von größeren und kleineren Verbrauchern, die je nach Bedarf Strom aus dem Verteilnetz im Hoch- bis Niederspannungsbereich beziehen. Die zunehmende Einbindung von regenerativen Energiequellen führt zu einer starken Diversifizierung

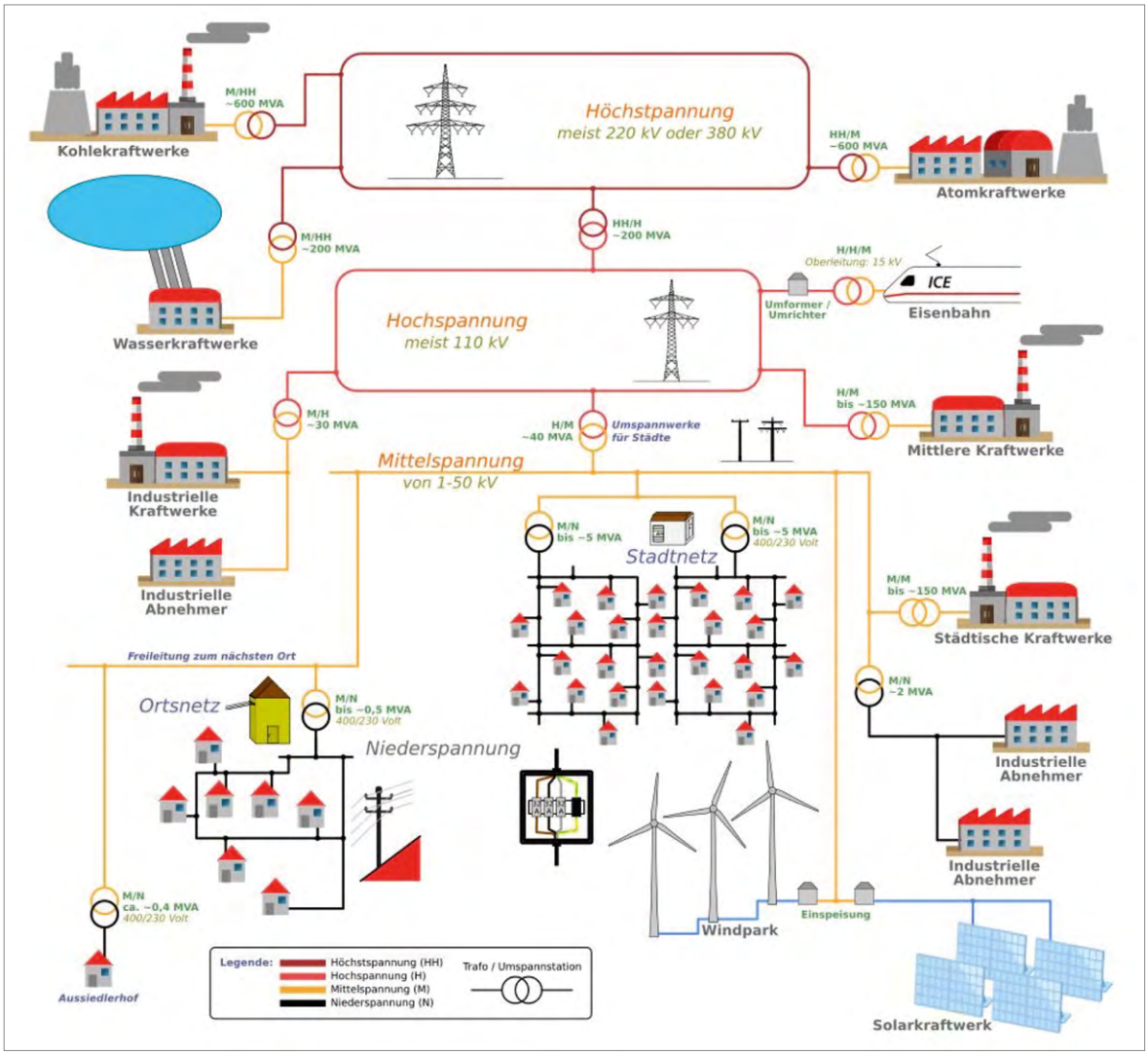


Abb. 3.89: Schematische Darstellung des Stromnetzes in Deutschland (Quelle: Stefan Riepl, CC0, Wikimedia)

des Strommarktes und neuen Anforderungen an das Stromnetz. Eine große Anzahl unterschiedlicher Stromproduzenten mit teilweise fluktuierender Kapazität muss auf den verschiedenen Spannungsebenen eingebunden werden. Die Bandbreite an Herausforderungen geht dabei von großen Offshore-Windparks, die über lange Seekabel angeschlossen werden müssen, über die Elektrifizierung der Wärme- und Verkehrssektoren bis zu einer großen Anzahl einzelner Haushalte, die Strom aus kleinen Photovoltaikanlagen auf Dächern gewinnen und in das Niederspannungsnetz einspeisen (IZES gGmbH et al. 2011; Karimi et al. 2016; Protopapadaki & Saelens 2017; Thormann & Kienberger 2020).

Sowohl Übertragungs- als auch Verteilnetze werden im Normalfall mit Drei-Phasen-Wechselstrom betrieben. Nur vereinzelt findet man beispielsweise in Bahnnetzen Ein-Phasen-Wechselstrom. Grund hierfür ist das bessere Verhältnis von Kapazität zu Materialbedarf bei dreiphasigem Betrieb (Bei 120° Verschiebung der Phasen und symmetrischer Last, heben sich die Ströme im Neutralleiter auf, wodurch er im Leiterquerschnitt reduziert oder sogar entfallen kann). In den letzten Jahren und Jahrzehnten nimmt die Bedeutung von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs(HGÜ)-Leitungen jedoch zu. In Kraftwerken wird durch Generatoren zumeist schon Dreiphasenwechselstrom erzeugt. Der technische Aufwand und die Verluste von Stromrichtern machen eine Umwandlung und Transport als Gleichstrom unwirtschaftlich. Mit zunehmender Transportstrecke können diese Nachteile der Gleichstromübertragung jedoch durch Wegfall der Blindleistung und geringerem Materialbedarf (Reduktion von drei auf zwei oder sogar einen Leitungsstrang und höherem Leistungstransport bei gleichem Strangdurchmesser) aufgehoben werden. Im Falle von Kabeln ist dies bereits bei einigen 10 km der Fall, bei Freileitungen erst ab einigen 100 km. Verwendung finden HGÜ-Leitungen daher häufig, wenn längere Seekabel nötig sind. Darunter fallen Verbindungen von Ländernetzen wie das BalticCable zwischen Schweden und Deutschland oder das BritNed zwischen Großbritannien und den Niederlanden aber auch die Anbindungen von Offshore-Windparks. An Land gibt es Leitungen mit jeweils über 1.000 km Länge beispielsweise zwischen den USA und Kanada oder im Kongo. Neben dem Transport über sehr weite Strecken ermöglichen HGÜ-Leitungen jedoch auch die Verbindung von Wechsselstromnetzen mit asynchronen Phasen. Diese kurzen Leitungen werden wegen hohen Übertragungsverlusten in der Regel stillgelegt, sobald eine Synchronisation der Wechselstromnetze erfolgen kann. Des Weiteren kann der Stromtransport mit HGÜ-Leitungen im Gegensatz zu Wechselstromnetzen regelbar in beide Richtungen erfolgen, was zur Sicherung der Netzstabilität genutzt werden kann (Rudervall et al. 2000; Wietschel et al. 2015; Gellings 2015; Alassi et al. 2019). Obwohl HGÜ-Leitungen bereits seit den 1950er Jahren in Verwendung sind, hat die Bedeutung stark zugenommen und sich die verbaute Leitungslänge in den letzten zehn Jahren verdreifacht (IEA 2021).

Die technische Umsetzung von Stromnetzen kann entweder durch Freileitungen und Aufhängung an Masten oder durch die Verlegung von unterirdischen Kabeln erfolgen. Beide Varianten sind grundsätzlich in allen Spannungsbereichen sowohl für Wechsel- als auch Gleichstrom realisierbar. Eine unterirdische Verkabelung hat einen geringeren Platzbedarf, ist weniger anfällig für äußere Einflüsse (z. B. Wetterschäden, Fremdeinwirkung, Manipulation) und stößt generell auf höhere Akzeptanz in der Bevölkerung. Die Übertragungsverluste durch Blindleistung sind jedoch höher und auch der Installationsaufwand liegt über dem einer Freileitung. In Deutschland ist ein kontinuierlicher Trend zur Verkabelung zu beobachten. Schon 2007 lag der unterirdische Verkabelungsgrad in Deutschland bei sehr hohen 77,8 % und stieg bis 2017 weiter bis auf 82,4 % an. Ähnliches gilt für Österreich und die Schweiz (FSM o. J.; IZES gGmbH et al. 2011; BDEW 2018; Energieallianz Austria GmbH 2019).

3.5.1.2 Rohstoffinhalt

Wie oben beschrieben, kann in der technischen Umsetzung von Stromnetzen generell zwischen Freileitungen und Erdleitungen unterschieden werden. Der Rohstoffbedarf unterscheidet sich entsprechend.

Freileitungen

Im Falle von Freileitungen werden die Leiterseile über Isolatoren an Masten aufgehängt. Dazu kommen je nach Bedarf Erdseile oder Neutral-



Abb. 3.90: Stahlverstärktes Aluminiumseil (Quelle: Clark Mills, Sample cross-section of high tension power (pylon) line.jpg, CC BY-SA 3.0)

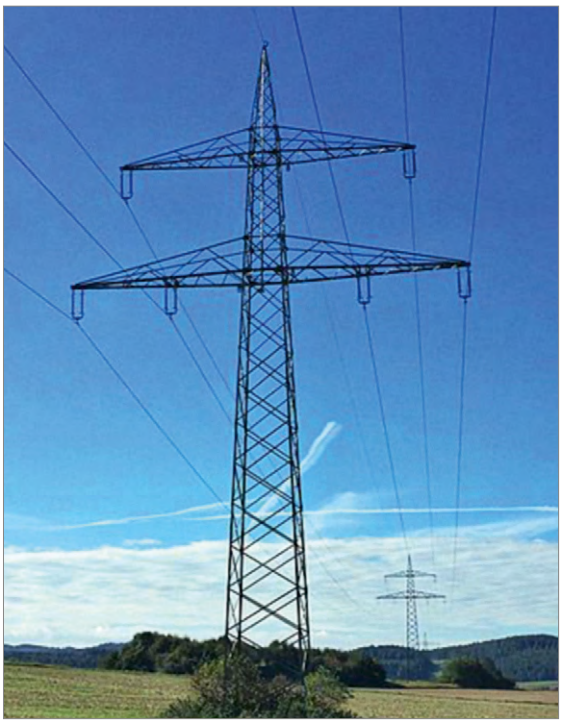


Abb. 3.91: Donaumast mit zwei 110 kV Stromkreisen (links und rechts jeweils mit drei an Isolatoren hängenden Leiterseilen) und einem Erdseil auf der Mastspitze (Quelle: Adl252, 110 kV Leitung Borken Lauterbach.jpg, CC BY-SA 4.0)

leiter. Ein Mast kann bei Bedarf mehrere Stromkreise tragen, die im Normalfall von 3-Phasen-Wechselstrom aus einem Leiterseil für jede Phase bestehen. Ab 220 kV sind pro Phase mehrere Leiterseile, sogenannte Bündel, nötig. Als Leiterseile werden derzeit hauptsächlich stahlverstärkte Aluminiumleiterseile (ACSR) eingesetzt. Die Aluminiumstränge werden dabei zur Verbesserung der mechanischen Festigkeit um einen Stahlkern gewickelt (Abb. 3.90). Daneben gibt es jedoch auch Leiterseile aus reinem Aluminium oder Aluminiumlegierungen mit Magnesium, Silizium und Eisen (sogenannte Aldrey-Seile). Trotz der höheren Leitfähigkeit findet Kupfer in normalen Freileitungen keine Verwendung, da der geringere Materialbedarf den höheren Preis nicht aufwiegt. Anders ist dies im Sonderfall der Bahnoberleitungen. Hier besteht der Fahrdraht aus Kupfer oder niedrig legiertem Kupfer (Mg, Ag, Sn) und das zugehörige Tragseil aus Bronze. Die Isolatoren bestehen aus Kunststoff, Glas, Keramik oder Porzellan. Masten werden als Stahlgitterkonstruktionen oder aber aus Beton, Holz oder Verbundmaterialien gefertigt. Die jeweilige Ausführung hängt von der Spannungsebene und technischen Anforderungen aber auch regionalen Gewohnheiten und örtlichen Begebenheiten ab. In Deutschland sind im Hoch- und Höchstspannungsbereich Stahlgitterkonstruktionen weit verbreitet. Meist handelt es sich um sogenannte Donaumasten mit zwei Traversen, die zwei Stromkreise tragen, sowie dem Erdseil für die Erdung und den Schutz vor Blitzeinschägen auf der Mastspitze (Abb. 3.91). Diese stehen in einem Abstand von 300 – 500 m. Im Mittel- und Niederspannungsbereich in den Ortsnetzen sind in Deutschland Freileitungen eher unüblich. Aus Gründen der Sicherheit, Ästhetik und Akzeptanz ist der unterirdische Verkabelungsgrad hier sehr hoch. In anderen Ländern ist dies anders (Amprion GmbH o. J.b; Crastan 2015; Hofmann 2015).

Erdleitungen

Verkabelte Erdleitungen finden sich vor allem im Nieder- und Mittelspannungsbereich des Stromnetzes. Innerhalb von Ortschaften spielt die Akzeptanz der Bevölkerung eine größere Rolle, die trotz der aufwendigen Verlegung für unterirdi-

sche Kabel höher ist als für die sichtbaren Freileitungen. Hinzu kommt der Schutz vor Schäden durch Fremdeinwirkung oder Wettergeschehen, was die Versorgungssicherheit erhöht. Zusammen mit dem Sicherheitsaspekt einer für die Bevölkerung unzugänglichen Stromleitung rechtfertigt das meist die hohen Kosten einer Verkabelung durch aufwändige Verlegung und schwierige Wartung. Im Hoch- und Höchstspannungsnetz werden Erdleitungen meist nur eingesetzt, wenn Freileitungen keine Option sind (z. B. Seekabel).

Als Leiter werden sowohl Kupfer als auch Aluminium in Erdkabeln eingesetzt. Der für Aluminium nötige größere Leiterquerschnitt bedeutet gleichzeitig einen höheren Bedarf an Isolationsmaterial für das Kabel, was den Vorteil des niedrigeren Aluminiumpreises aufhebt. Als Erdkabel für den Nieder- und Mittelspannungsbereich werden daher sowohl Aluminium- als auch Kupferleitungen eingesetzt. Ein Kabel besteht dabei aus drei Leitern (3-Phasen-Wechselstrom) sowie bei Bedarf einem Neutralleiter. Jeder Leiter kann aus einem einzelnen massiven Draht bestehen oder mehrdrähtig ausgeführt sein und ist von einer isolierenden Kunststoffschicht (PE, VPE, PVC oder EPR) umgeben. Eine Polsterschicht aus Gummi umhüllt die inneren Leiterstränge und ist dann ihrerseits wieder von einer konzentrischen Leiterschicht im Falle eines weiteren Leiterkabels oder einer Cu-Abschirmung umgeben. Ein Kunststoffmantel (PE) bildet die äußerste Schutzschicht.

Im Hoch- und Höchstspannungsbereich finden ausschließlich Kupferleitungen Verwendung. Der Materialaufwand für die Isolation eines Aluminiumkabels wird hier zu hoch. Zudem befindet sich in jedem Kabel nur ein Leiterstrang, um mehr Flexibilität bei der Verlegung zu erreichen. Kabel, die im Wechselspannungsbereich eingesetzt werden, bestehen auch im Hoch- und Höchstspannungsnetz mittlerweile aus einer den Leiter umgebenden Kunststoffisolierung, dem abschirmenden Kupferdrahtmantel sowie ganz außen einer Kunststoffhülle. Zunächst nur im Niederspannungsbereich eingesetzt, hat sich die Kunststoffisolierung Schritt für Schritt durchgesetzt und wird mittlerweile für den Einsatz bis zu 500 kV verwendet. Wegen höheren Anforderungen an die Isolationsschicht haben Kabel, die bei Gleichspannung eingesetzt werden, weiterhin eine Papier-Masse-imprägnierung. Hierfür wird der Leiterstrang aus Kupfer mit in Öl-Harz-Masse getränkten Papierschichten umwickelt, die im Hochspannungsbereich zusätzlich mit Hilfe von Gas oder Öl unter Druck gesetzt werden. Die Isolationsschicht aus Papier wird ihrerseits von einer Blei- oder Aluminium-Kunststoffschicht sowie einer Stahldruckbandage umschlossen. Ein Kunststoffmantel bildet die äußerste Schicht (Amprion GmbH o. J.a; Crastan 2015).

Materialzusammensetzung

Leistungskilometerspezifische Materialbedarfe gibt es von Wetzel (2016) für das Stromnetz in Deutschland. Diese basieren auf europäischen Lebenszyklusanalysen für Komponenten des Stromnetzes (May 2005; Jorge et al. 2012a; Jorge et al. 2012b; Jorge & Hertwich 2013; Jorge & Hertwich 2014).

Tab. 3.93: Leistungskilometerspezifische Materialbedarfe für das Stromnetz in Deutschland (Quelle: Wetzel 2016)

Rohstoffbedarf	Verteilnetz	Übertragungsnetz (Erdkabel)	Übertragungsnetz (Freileitung)
Stahl [t/MWkm]	0,8836	0,0392	0,0406
Aluminium [t/MWkm]	0,0276	–	0,0069
Kunststoff [t/MWkm]	0,0084	0,0038	–
Glas [t/MWkm]	0,0018	–	0,0008
Kupfer [t/MWkm]	0,0259	0,0310	–
Zink [t/MWkm]	0,0006	–	0,0009
Blei [t/MWkm]	–	0,0277	–

Tab. 3.94: Materialbedarf für HGÜ-Freileitungen oder Kabel (Quelle: Wetzel 2016)

Rohstoffbedarf	Freileitung 1000 MW 400 kV	Freileitung 2200 MW 600 kV	Freileitung 5000 MW 800 kV	Kabel 1000 MW 400 kV	Kabel 2200 MW 600 kV	Kabel 5000 MV 800 kV
Beton [t/MWkm]	0,200	0,138	0,040			
Stahl [t/MWkm]	0,0508	0,0350	0,0163	0,0480	0,0326	0,0192
Aluminium [t/MWkm]	0,0087	0,0060	0,0035			
Kunststoff [t/MWkm]				0,0046	0,0031	0,0018
Kupfer [t/MWkm]				0,0380	0,0258	0,0152
Blei [t/MWkm]				0,0340	0,0231	0,0498

3.5.1.3 Foresight Industrielle Nutzung

Der Bedarf für Stromtransport und damit für Stromnetze ist gekoppelt an den Stromverbrauch. Dieser ist in den letzten Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen. Seit 1990 hat sich der weltweite Stromverbrauch mehr als verdoppelt und stieg von 36 EJ oder 10,116 TWh auf 83 EJ oder 23,103 TWh im Jahr 2019. Ein großer Anteil dieses Wachstums kann auf den steigenden Stromverbrauch in Asien zurückgeführt werden (Enerdata 2020). Drei Aspekte müssen in Bezug auf den Anstieg des Stromverbrauchs betrachtet werden: Die wachsende Weltbevölkerung, der steigende Pro-Kopf-Verbrauch und der zunehmende Bevölkerungsanteil mit Zugang zu Elektrizität.

Der weltweite Stromverbrauch pro Kopf steigt seit Jahrzehnten annähernd linear an. 1971 lag er bei 1,2 MWh und stieg bis 2014 auf 3,1 MWh pro Person an (World Bank 2014). Gründe hierfür sind das Wirtschaftswachstum sowie steigender Wohlstand, aber auch die zunehmende Elektrifizierung unserer Welt. Dieser Trend wird voraussichtlich weiter anhalten oder sich sogar verstärken. Der Kampf gegen den Klimawandel verlangt eine Dekarbonisierung der Weltwirtschaft, die in vielen Fällen mit einer Elektrifizierung einhergeht. Prominente Beispiele sind die Verkehrswende mit einem global vorangetriebenen Umstieg auf elektrische Fahrzeuge, aber auch die Umgestaltung des Wärmesektors mit dem großflächigen Einsatz von Wärmepumpen anstelle von Öl- und Gasheizungen (IEA 2020d).

Mit der Sustainable Energy for All (SE4ALL) Initiative haben sich Vereinte Nationen und Weltbank 2011 vorgenommen, bis 2030 allen Menschen einen Zugang zu Elektrizität zu ermöglichen (World Bank 2013). Seither ist der Anteil der Weltbevölkerung mit Elektrizitätszugang von 82 % auf fast 90 % im Jahr 2019 gestiegen (World Bank). Abgeschnitten von der Stromversorgung sind mittlerweile hauptsächlich ländliche Gebiete, insbesondere südlich der Sahara in Afrika (Ciller & Lumbreras 2020). Nicht immer ist eine Fernvernetzung mit Anschluss an ein großes Stromnetz sinnvoll. So genannte off-grid-Lösungen sind für eine Erstversorgung verbreitet. Allerdings benötigen auch diese den Grundstock an Technologie und Material eines Stromnetzes. Mit Fortsetzung der regionalen Entwicklung kann langfristig ein Netzanschluss oder -aufbau angenommen werden.

Zusammen führt dies zur Erwartung eines deutlichen Anstiegs im globalen Stromverbrauch. Die Größenordnung hängt dabei von den Annahmen einzelner Szenarien ab. Der grundsätzliche Trend zieht sich jedoch durch die Szenarien durch. Hier gezeigt werden drei SSP-Szenarien des IPCC (Abb. 3.92). Die Spannweite des erwarteten Stromverbrauchs im Jahr 2040 liegt dabei zwischen knapp 179 EJ im stark fossil-angetriebenen Entwicklungsszenario SSP5 und zunächst unveränderten 83 EJ im Nachhaltigkeitsszenario SSP1 (Riahi et al. 2017).

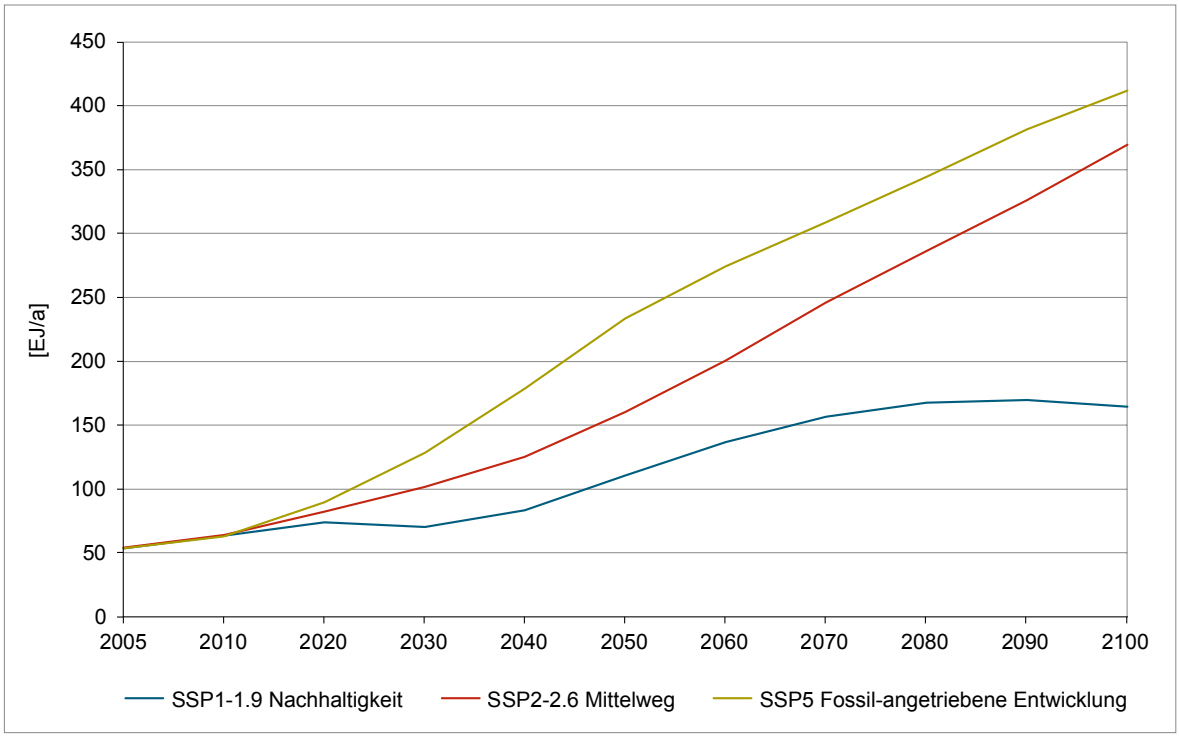


Abb. 3.92: Erwarteter Bedarf an elektrischer Energie nach den SSP-Szenarien des IPCC (Quelle: RIAHI et al. 2017)

3.5.1.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der zukünftige Rohstoffbedarf des globalen Stromnetzes lässt sich nur schwierig ganzheitlich berechnen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Zukunftstechnologien existiert das Stromnetz als global verbreitete Infrastruktur seit mehr als einem Jahrhundert. Die technologische Ausgestaltung ist dabei von unterschiedlichen geschichtlichen Entwicklungen und örtlichen Gegebenheiten abhängig. Für Europa und Deutschland ist die Datenlage etwas besser. Hier gibt es Daten zu verlegten Leitungskilometern und durchschnittlichem Materialgehalt. Hochrechnungen sind von WETZEL (2016) für Deutschland und von MOSS et al. (2011) für Europa verfügbar. Auf globaler Ebene wird die jährlich benötigte Materialmenge für Austausch und Zubau der weltweiten Übertragungs- und Verteilnetze für Kupfer erhoben (IWCC 2020). Diese kann mit dem derzeitigen jährlichen Energiebedarf (ENERDATA 2020) und den Prognosen für das Jahr 2040 der drei SSP-Szenarien (Abb. 3.92) ins Verhältnis gebracht werden, um eine Bedarfsvorschau von Kupfer für die Stromnetze im Jahr 2040 zu geben (Tab. 3.95). Eine Berechnung der IEA (2021) kommt zu ähnlichen Ergebnissen und prognostiziert für 2040 je nach Szenario einen Kupferbedarf von 7,5 bis 10,0 Mt für den Ausbau

Tab. 3.95: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Kupferbedarf für Übertragungs- und Verteilnetze in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Kupfer	20.591.000 (B) 24.137.000 (R)	3.825.000	3.832.000	5.759.000	8.211.000

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

und Erhalt der globalen Stromnetze. Der Aluminiumbedarf wird auf 13 bis 16 Mt im Jahr 2040 für die zwei IEA Szenarien geschätzt. Detailliertere Annahmen werden nicht offen gelegt und können daher hier nicht verwendet oder zum Vergleich herangezogen werden.

3.5.1.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Aufgrund des hohen Materialwertes, der einfachen Sammlung und der bekannten, einfachen Materialzusammensetzung ist das Recycling von Bestandteilen des Stromnetzes sehr gut ausgebaut und effizient. Kupferkabel gelten als eine der hochwertigsten Quellen sekundären Kupfers und sind daher auf dem Markt stark nachgefragt. Die hohe Reinheit des Kupfers in elektrischen Leitern zusammen mit der leichten Trennbarkeit von der isolierenden Kunststoffschicht machen die Metallrückgewinnung sehr kostengünstig bei hoher Materialqualität. Etwas schwieriger ist das Recycling von bleihaltigen Kabeln, da hier zunächst der Bleimantel und eventuell auch Schmiermittel entfernt werden müssen. Die Qualität des zu erhaltenden Sekundärmaterials ist etwas geringer. Auch andere Kupferteile, beispielsweise aus Transformatoren, haben einen hohen Materialwert und können gut rezykliert werden (Langner 2011; Li et al. 2017). Ähnlich ist der Sachverhalt für die weiteren Metalle Aluminium, Stahl und Zink, die im Stromnetz in großen Bauteilen von verhältnismäßig einfacher Materialzusammensetzungen Verwendung finden und daher gut rezykliert werden können. Fundament- und Isolatorenmaterialien wie Beton, Zement, Keramik und Glas werden dagegen deponiert (Jorge et al. 2012a; Jorge et al. 2012b).

Bereits seit einiger Zeit gibt es verschiedene F&E-Anstrengungen zur Optimierung der Übertragungskapazität von Stromnetzen, was einer Erhöhung der Ressourceneffizienz entspricht. Zu nennen sind hier insbesondere der Einsatz von Hochtemperaturleiterseilen, Freileitungsmonitoring sowie der Einsatz von flexibler Drehstromübertragungstechnik (engl. Flexible AC Transmission Systems: FACTS und Flexible AC Distribution Systems: FACDS), die alle auf eine bessere Auslastung bestehender Netzstrukturen zielen. Begrenzt wird die Übertragungskapazität vor allem durch die Betriebstemperatur und den Durchhang der Leiterseile. Durch geänderte Materialzusammensetzung und Aufbau der Seile konnte die zulässige Betriebstemperatur von 80 °C auf etwa 200 °C bei Hochtemperaturleiterseilen gesteigert werden. Das Freileitungsmonitoring ermöglicht dagegen durch Überwachung der Leitungen und Analyse von Wetterdaten eine dynamische Anpassung der Übertragung und somit eine kontinuierlichere Ausnutzung an der Kapazitätsgrenze. Ähnlich nutzt FACTS/FACDS Leistungselektronik in Steuerungs- und Kompensationssystemen statt der herkömmlichen Stelltransformatoren und statischen Kompensationsmittel, um ebenfalls eine Dynamisierung und bessere Auslastung des Netzbetriebs zu erzielen (Wietschel et al. 2015).

3.5.2 Glasfaserkabel

3.5.2.1 Technologiebeschreibung

Wie in Abb. 3.93 veranschaulicht, sind Glasfaserkabel Lichtwellenleiter, welche Licht über längere Strecken übertragen können. Licht ist elektromagnetische Strahlung und besteht also aus elektrischen und magnetischen Feldern. Nach räumlichem Verlauf der elektrischen und magnetischen Feldstärke lassen sich Schwingungsmoden unterscheiden. Welche dieser Schwingungsmoden einen Wellenleiter transportiert, hängt von seiner Geometrie und Beschaffenheit ab. Bei Glasfaserkabeln unterscheidet man Mono- und Multimodekabel. Monomodekabel übertragen nur eine einzige Lichtmode und können ohne Signalverstärkung Strecken bis zu mehreren 100 km überbrücken. Dagegen übertragen Multimodekabel mehrere Lichtmoden, was bei längeren Strecken zur Signalverfälschung aufgrund von Überlagerungen führt. Sie sind allerdings kostengünstiger als Monomodekabel und werden daher bevorzugt für kürzere Übertragungsstrecken eingesetzt. Die Signalverfälschung der Multimodenfasern lässt sich zudem durch den Einsatz von Gradientenfasern mildern. Anders als die in Abb. 3.93 dargestellten Stufenfasern mit abruptem, stufenförmigem Übergang der Brechungsindices ändert sich der Brechungsindex bei Gradientenfasern allmählich.

Lichtstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 350 – 2.500 nm (IR – UV) kann übertragen wer-

den. Als Lichtquellen dienen LEDs oder Laser. Glasfaserkabel sind die derzeit technisch bedeutsamsten Lichtwellenleiter. Daneben gibt es Lichtwellenleiter, die zum Teil oder vollkommen auf polymeren Kunststoffen basieren. Diese werden v. a. für die Kurzstreckenübertragung eingesetzt und spielen insgesamt eher eine untergeordnete Rolle. Äußerlich umgibt die Lichtwellenleiter eine Schutzbeschichtung, z. B. aus Polyamid-, Silikon- oder Acryllack und eine Hülle (Abb. 3.93). Ein Glasfaserkabel kann dabei mehrere (bis zu 1.000) Glasfasern enthalten. Daher ist bei Mengenangaben zwischen Kabel- und Faserkilometern zu unterscheiden.

Herstellung

Bei der Herstellung von Glasfasern fertigt man zunächst eine Vorform (engl. Preform), aus der anschließend Fasern gezogen werden. Die Vorform aus hochreinem Silicaglas (SiO_2) wird durch chemische Gasphasenabscheidung (engl. Chemical Vapour Deposition CVD) von Tetrachlorsilan ($SiCl_4$) und Sauerstoff geschaffen. Dotierungen werden über einen analogen Abscheidungsprozess eingebracht. Dabei erhält die Preform bereits das gewünschte Brechungsindexprofil, welches beim anschließenden Ziehen der Fasern in einem Faserziehturm unverändert bleibt. Unmittelbar nach dem Ziehen werden die äußeren Schutzschichten aufgetragen und ausgehärtet (Petermann 2015).

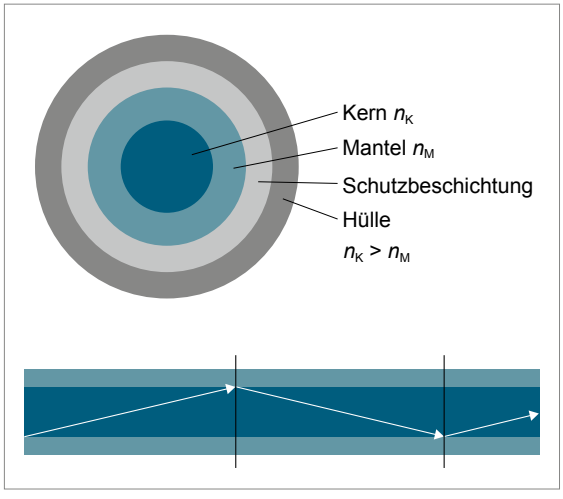


Abb. 3.93: Aufbau und Funktion eines Glasfaserkabels (Quelle: Fraunhofer ISI)

Anmerkung: Der Brechungsindex des Kerns ist größer als der Brechungsindex des Mantels ($n_K > n_M$), so dass es an der Grenzfläche zur Totalreflexion kommt, sobald Lichtstrahlen flach genug einfallen. Daher kann das Licht durch den Kern über weite Strecken geführt werden.

Anwendung

Glasfaserkabel werden vorrangig als Übertragungsmedium in der Nachrichtentechnik eingesetzt. Vorteile gegenüber herkömmlichen Kupferkabeln bestehen in der höheren Reichweite (bis zu mehreren 100 km ohne Zwischenverstärker) und der größeren Übertragungsrate (Giga- bis Terabit/s) der Glasfaserkabel.

Moderne Kommunikationsnetze bestehen daher in Kernbereichen (so genannten Backbones), in denen hohe Übertragungsraten benötigt werden, fast ausschließlich aus Glasfaserkabeln. Zu diesen Backbones zählen Kernbereichsnetzwerke von Telekommunikationsunternehmen, Kabelfernsehnetzbetreibern und Energieversorgern. Letztere verlegen Glasfaserkabel gemeinsam mit anderen Leitungen und betreiben diese zur Überwachung ihrer Leitungen und zur Vermietung an Telekommunikationsunternehmen und Kabelfernsehnetzbetreiber.

Auch zum Anschluss einzelner Endabnehmer werden zunehmend Glasfaserkabel eingesetzt. Je nach Zielpunkt unterscheidet man dabei verschiedene sogenannte FTTx-Anschlüsse, z. B. FTTN (Fibre To The Neighborhood/Node), FTTH (Fibre To The Home), FTTB (Fibre To The Building), FTTP (Fibre To The Premise), FITH (Fibre In The Home), FTTD (Fibre To The Desk). Größtes Hindernis für solche Anschlüsse ist die Biegeempfindlichkeit der Glasfaserkabel, welche einen größeren Aufwand bei der Verlegung erfordert und bei unsachgemäßem Gebrauch (Biegen, Drücken) zu höheren Ausfallquoten führen kann. Außerdem sind Glasfaserkabel empfindlicher gegen Wasser und Staub. Durch Biegung verringert sich auch die Übertragungsrate der Glasfasern. Für FTTx-Anwendungen wurden daher spezielle Glasfasern mit geringerem Biegeverlust entwickelt, welcher z. B. durch eine fluordotierte Schicht am Übergang Kern-Mantel oder durch Nanostrukturen erreicht wird (Li et al. 2008). Neben der Nachrichtentechnik werden Glasfasern z. B. in der Mess- und Medizintechnik sowie für Hochleistungslaser eingesetzt.

3.5.2.2 Rohstoffinhalt

Glasfaserkabel bestehen in der Regel aus amorphem Siliziumdioxid (SiO_2), genannt Silicaglas oder Quarzglas. Die Einstellung des Brechungindexprofils erfolgt durch Dotierung. Es ist möglich den Kern der Faser mit Germaniumdioxid (GeO_2) oder Phosphorpentoxid (P_2O_5) zu dotieren, um den Brechungsindex dort zu erhöhen. Ebenso kann der Mantel mit Bor oder Fluor dotiert werden, um seinen Brechungsindex zu verringern (Petermann 2015). In der Regel wird entweder der Kern oder der Mantel dotiert, der jeweils andere Teil der Faser besteht aus reinem SiO_2. Unter Dotierungen versteht man im Allgemeinen sehr geringe Konzentrationen von 100 ppm (parts per million), d. h. weniger als einem Dotierungsatom unter 10.000 Grundstoffatomen.

Der Einsatz unterschiedlicher Materialien und Dotierungen sowie die variierende Anzahl an Fasern pro Kabel (100 – 1.000) erschwert die Angabe von durchschnittlichen Stoffgehalten pro km verlegtem Kabel. Für die Abschätzung des Germaniumbedarfs ist daher die Anzahl der jährlich verlegten km an Glasfasern, kurz Faser-km, interessanter.

3.5.2.3 Foresight Industrielle Nutzung

Für das Wachstum des Glasfasermarktes gibt es mehrere aktuelle Marktstudien. Da „Glasfasermarkt“ nicht streng definiert ist, beziehen die verschiedenen Marktstudien unterschiedliche Aspekte z. B. Hardware inkl. Kabel, Regler, Verbindungselemente; Software; Services (Fortune Business Insights 2019) mit ein, woraus sich verschiedene Marktvolumen und Wachstumsraten ergeben, aus denen nicht direkt auf den Zubau an Faser-km und den Germaniumbedarf geschlossen werden kann:

- (Allied Market Research 2017): globaler Glasfasermarkt wächst von 3.477 Mio. USD in 2017 auf 8.153 Mio. USD in 2025, jährliche durchschnittliche Wachstumrate (CAGR): 11,6 % von 2018 bis 2025.
- (Fortune Business Insights 2019): globaler Glasfasermarkt wächst von 4,48 Mrd. USD in 2019 auf 9,73 Mrd. USD in 2027, CAGR: 10,3 % von 2019 bis 2027.
- (Mordor Intelligence 2020a): globaler Glasfasermarkt wächst von 9.236,5 Mio. USD in 2020 auf 20.832,6 Mio. USD in 2026, CAGR: 14,85 % von 2018 bis 2026.
- (Maximize Market Research 2020): globaler Glasfasermarkt wächst von 9,38 Mrd. USD in 2019 auf 20,9 Mrd. USD in 2027, CAGR: 11,51 % von 2020 bis 2027.

Jedoch enthalten diese Marktstudien wichtige Hinweise zu aktuellen Trends sowie Treibern und Hemmern der zukünftigen Nachfrage für Glasfaserkabel, die im Folgenden zusammengefasst werden. Zunächst erfordert die Erschließung bisher nicht erschlossener Regionen einen weiteren Ausbau des Glasfasernetzes (Allied Market Research 2017). Darüber hinaus wird der Ausbau durch neue technologische Trends und damit steigende Anforderungen an die Bandbreite getrieben, bzw. eine Erhöhung der Bandbreite durch weiteren Netzausbau ermöglicht neue technologische Trends, die diese Bandbreite ausnutzen, siehe Kapitel 1.4 zu den Digitalisierungsszenarien. Laut Mordor Intelligence (2020a) hat das wachsende Glasfasernetz über die letzten zehn Jahre hinweg den steigenden Bedarf an Bandbreite für Internet, E-Commerce, Netzwerke, Multimedia abgedeckt und wird es zukünftig auch für kommende Technologietrends tun. Weitere Kostensenkungen bei Installation, Betrieb und Wartung sowie Investitionen in die Glasfaserinfrastruktur werden als wichtige Faktoren für einen weiteren Ausbau genannt (Allied Market Research 2017; Fortune Business Insights 2019). Zu den wichtigsten technologischen Treibern der Datenübertragung und damit des Glasfaserausbaus werden 5G, das Internet der Dinge (IoT), Cloud Computing, Big Data und FTTx gezählt (Allied Market Research 2017; Fortune Business Insights 2019). Bei 5G handelt es sich zwar einerseits um eine kabellose Übertragung, von der teilweise erwartet wird, dass sie sich abschwächend auf den Ausbau des Kabelnetzes zum Endnutzers auswirken wird (Allied Market Research 2017). Andererseits ist anzunehmen, dass 5G insgesamt zu steigendem Datenverkehr und damit höheren Anforderungen an die Backbone-Struktur der Datenübertragung führt (Allied Market Research 2017; Fortune Business Insights 2019; Mordor Intelligence 2020a). Der Bedarf an Glasfaserkabel für die 5G-Versorgung kann jedoch laut Finch (2020) noch nicht verlässlich abgeschätzt werden, weil die Verbreitung von 5G noch am Anfang

steht. Dagegen sind FTTx-Anschlüsse vergleichsweise weit verbreitet. In 2019 gab es weltweit 972 Millionen FTTP (Fiber to the premise) oder FTTB (Fiber to the building) -Anschlüsse bei 1.937 Millionen Haushalten (Finch 2020). 481 Millionen dieser FTTP bzw. FTTB-Anschlüsse befinden sich in China, 153 Millionen in anderen Ländern im asiatischen Pazifikraum. In einigen europäischen Ländern (z. B. Norwegen, Dänemark, Schweden, Lettland, Litauen) gibt es schon eine nahezu flächendeckende Versorgung mit FTTH-Anschlüssen, welche beispielsweise 4K-Videostreaming ermöglichen (Allied Market Research 2017). Die Covid-19-Krise wird in mehreren aktuellen Marktstudien als Wachstumshemmer benannt, was mit Verzögerungen und Hindernissen in der Produktion (Fortune Business Insights 2019) oder umfassender mit einer Schwächung von Produktion, Markt und Finanzierung (Mordor Intelligence 2020a) begründet wird. Laut USGS (2021a) wurde der Nachfrageeinbruch durch Covid-19 im Jahr 2020 für Germanium in den USA durch Investitionen in die Glasfaserinfrastruktur abgemildert.

Noch vor der Covid-19-Krise wurde der seit 2004 anhaltende Wachstumstrend erstmals gestoppt, als die jährlich verlegten Faser-km im Jahr 2019 gegenüber 2018 zurückgingen (Finch 2020). Daten zu den jährlich weltweit verlegten Faser-km sind in Abb. 3.94 dargestellt. Wesentlicher Treiber ist der weltweit wachsende Markt an Breitbandzugängen, der seit den frühen 2000er Jahren zu beobachten ist. Von Breitbandzugängen gehen höhere Anforderungen an die Datenübertragung aus als von den vorher üblichen Schmalbandzugängen, so dass letztere ab der Verbreitung der Breitbandzugänge nur noch einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Netzausbau hatten, siehe Kapitel 1.4 zu den Digitalisierungsszenarien. Besonderen Einfluss auf die weltweite Nachfrage hatte seit ca. 2008 der Glasfaserausbau in China. Von 2008 bis 2018 ist die Nachfrage für Glasfaserkabel in China mit einer jährlichen durchschnittlichen Wachstumrate (CAGR) von 21 % gewachsen, woraus sich ein Wachstum von insgesamt 556 % ergab (Finch 2020). Von 2018 auf 2019 ist die Nachfrage in China dann im 2-stelligen Bereich eingebrochen. Langfristig werden für China aber weiterhin starke Investitionen in Glasfaserkabel erwartet, ebenso beispielsweise in Indien und Indonesien (Mordor Intelligence 2020a). Somit kann der Rückgang in 2019 noch nicht als Trendwende gewertet werden und auch ein vorübergehender Rückgang aufgrund von Covid-19-Hemmnissen wird den langfristigen Trend eines global wachsenden Glasfasernetzes voraussichtlich nicht brechen. Bezieht man die Jahre vor dem Rückgang in 2003 mit ein, ergibt sich für die 20 Jahre zwischen 1999 und 2019 eine CAGR von 12,4 %. Hohe Wachstumsraten über einen langen Zeitraum sind für diese zentrale Infrastrukturtechnologie der Digitalisierung somit nicht ungewöhnlich und erscheinen auch für die nächsten 20 Jahre plausibel. Zum Vergleich: Der Datentraffic wuchs in den 20 Jahren zwischen 1997 und 2017 mit einer CAGR von 63 %, siehe Kapitel 1.4. Von 2003 bis 2019 ist die Anzahl der

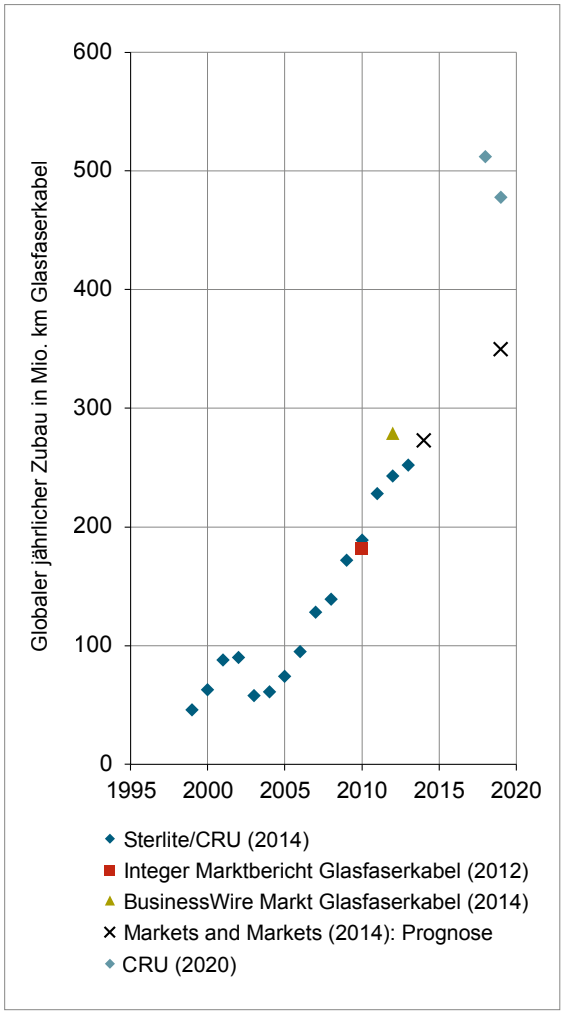


Abb. 3.94: Jährlich global zugebaute Mio. km Glasfaserkabel (Quellen: Eigene Darstellung nach Eveland 2011, Business Wire 2014, Gomatam 2014, Markets and Markets 2014, Finch 2020)

jährlich zugebauten Faser-km mit einer CAGR von 14 % gewachsen (Abb. 3.94). Über diesen Zeitraum sind die Wachstumsraten des jährlichen Zubaus leicht zurückgegangen. Von 2003 bis 2008 war es eine CAGR von 19 %, von 2008 bis 2013 dann 13 % und von 2013 bis 2019 schließlich 11 %. Im Sinne eines Fortsetzens historischer Trends ist daher anzunehmen, dass auch weiterhin von Jahr zu Jahr mehr Glasfaserkabel zugebaut werden und dass die jährlichen Wachstumsraten dieses Zubaus allerdings weiterhin allmählich abnehmen.

Laut StrategyR (2020) wird die Nachfrage an Germanium für Glasfaserkabel zwischen 2020 und 2027 mit einer CAGR von 6,2 % wachsen und 90,3 t im Jahr 2027 erreichen. Damit wächst die Nachfrage für Glasfaserkabel deutlich stärker als die Gesamtnachfrage für Germanium, für welche StrategyR (2020) ein Wachstum von 173,1 t in 2020 auf 225,6 t in 2027 prognostiziert (CAGR 3,9 %). Der Einfluss der Covid-19-Krise ist in diesen Prognosen schon berücksichtigt, so dass langfristig ein stärkeres Wachstum plausibel erscheint.

Im Szenario SSP2 wird – passend zu den Rahmenannahmen – ein Fortschreiben historischer Trends angenommen und so die durchschnittliche Wachstumsrate zwischen 2027 und 2040 auf CAGR 8 % geschätzt. Im Szenario SSP5 wird dagehen von einem schnelleren und stärkeren Ausbau ausgegangen. Die Erschließung bisher nicht erschlossener Gebiete geht aufgrund eines schnellen Aufholens der Länder mit geringem bzw. geringerem Einkommenslevel rasch voran. Haupttreiber des Wachstums ist jedoch die stetig wachsende Datenübertragung bedingt durch neue technologische Möglichkeiten wie 5G, IoT, Cloud Computing, KI, Streaming und Gaming, siehe oben und das Kapitel 1.4. Die CAGR wird auf 9 % geschätzt. Im Szenario SSP1 wird ebenfalls von einer Beschleunigung gegenüber historischen Trends ausgangen, was die technologische Entwicklung und das Aufholen der Länder mit geringem bzw. geringerem Einkommen betrifft. Insbesondere die Nutzung digitaler Technologien für nachhaltige Anwendungen im Bereich Bildung Gesundheit und Umweltschutz geht zügig voran und treibt den weiteren Ausbau. Allerdings wächst in SSP1 das Konsumniveau in Ländern mit hohem Einkommenslevel nicht weiter ungebremst, insbesondere bei Streaming, Gaming und Social Media in immer höheren Auflösungen zeichnet sich eine Sättigung ab, so dass weitere Effizienzsteigerungen der technischen Entwicklung partiell zu tatsächlichen Einsparungen führen (vergleiche Kapitel 1.4 zu den Digitalisierungsszenarien). Für die Jahre zwischen 2027 und 2040 ergibt sich in diesem Fall eine CAGR von 7,7 %.

3.5.2.4 Foresight Rohstoffbedarf

Tab. 3.96 zeigt die aus den oben beschrieben Ausbauszenarien in den verschiedenen SSPs resultierenden Bedarfe an Germanium in 2040.

3.5.2.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Aufgrund der sehr geringen Konzentration von Germaniumdioxid als Dotierung im Silicaglas ist die Rückgewinnung von Germanium aus Glasfaserkabeln schwierig. Auch die sehr langen Lebensdauern bei gleichzeitig steigender Nachfrage sprechen nicht für eine aussichtsreiche Sekundärrohstoffquelle. Ein mögliches Verfahren zur Rückgewinnung von Germanium aus Glasfaserkabeln wurde aber wissenschaftlich erprobt (Chen et al. 2017b). Insgesamt gibt der USGS für Germanium eine seit Jahren konstante Recyclingrate von 30 % an, wobei bei der Herstellung von

Tab. 3.96: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Germaniumbedarf für Glasfaserkabel in t

Rohstoff [t]	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Germanium	143,1 (R)	59,3	237	246	277

R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Elektronik 60 % des verwendeten Germaniums als Produktionsausschuss (engl. new scrap) anfallen und direkt wiederverwendet werden (USGS 2021a).

3.5.3 5G (6G)

3.5.3.1 Technologiebeschreibung

3.5.3.1.1 Leistungsfähigkeit von 5G und 6G im Vergleich

Bei 5G handelt es sich um die 5. Generation des Mobilfunknetzes. 5G bezeichnet dabei keine eigene, klar definierte Technologie, sondern vielmehr einen Standard, der das Zusammenspiel von Software, Infrastruktur und verschiedenen Technologien ermöglicht, um bestimmte Zielwerte zu erreichen. 5G soll „Echtzeit-Internet" ermöglichen. Die Latenzzeit eines Datenpaketes soll sich deshalb auf 1 bis 10 ms verringern, was eine sehr hohe Datenübertragungs- und -verarbeitungsgeschwindigkeit erfordert. Während die Einführung von 5G seit 2019 in Gang ist und vermutlich bis 2025 weitreichend erfolgt sein wird, erwartet man ab 2030 die Einführung der nächsten Generation 6G, die noch kürzere Latenzzeiten bei noch höheren Datenraten ermöglichen soll. Laut NDIP (2021b) wird 6G eher die Funktionen, die mit 5G in den Bereich des Möglichen rücken, ausbauen und erweitern. Tab. 3.97 zeigt Unterschiede zwischen den verschiedenen Generationen der Mobilfunknetze.

5G wird das Spektrum der für Mobilfunk verwendeten Frequenzen in den Hochfrequenzbereich jenseits der bisher für 4G genutzten 2,6 GHz erweitern, und 6G wird in noch höhere Frequenzbereiche vordringen. Tab. 3.98 zeigt die Frequenzbereiche, die in Deutschland für 5G und andere Mobilfunkstandards genutzt werden, die künftig aber zunehmend flexibel ebenfalls für 5G und später 6G verwendet werden sollen.

Die Darstellung der Frequenzbereiche in Tab. 3.98 ist so zu verstehen, dass die 5G- wie auch die 6G-Frequenzen nur für Kommunikation und anderen Datentransfer neu und zusätzlich zu den derzeit benutzten Frequenzen genutzt werden, aber nicht ausschließlich. Freiwerdende Frequenzen aus früheren Mobilfunkstandards, z. B. 3G, werden künftig ebenfalls für 5G und vermutlich auch für 6G verwendet werden. 5G und 6G können also durch Latenzzeiten und Datentransferraten, nicht aber über die genutzten Frequenzbereiche definiert werden.

Tab. 3.97: Vergleich typischer Latenzzeiten und Datenraten verschiedener Mobilfunkgenerationen (Quellen: 5G-ANBIETER 2021, ELEKTRONIKNET.DE 2021, NDIP 2021b)

Generation	2G	3G	4G	5G	6G
Latenzzeit (ms)	400 – 500	80 – 400	15 – 80	1 – 10	0,1
Max. Datentransferrate (Mbit/s)	0,25	42,2	500	1.000 – 20.000	1.000.000
Zeit für Download von 4.5 GB (Film)	1 Tag 16 h	14 min 33 s	1 min 13 s	3,7 s	0,074 s

Tab. 3.98: Für Mobilfunk in Deutschland genutzte Frequenzbereiche (Quellen: INFORMATIONSZENTRUM MOBILFUNK 2020; LTEMOBILE 2021; NDIP 2021a)

Mobilfunkgeneration	2G	3G (UMTS)	4G (LTE)	5G	6G
Frequenzbereiche (GHz)	0,89 – 0,915 0,935 – 0,96 1,71 – 1,785 1,805 – 1,88	1,92 – 1,98 2,11 – 2,17	0,7 0,8 1,8 2,0 2,6	3,4 – 3,7 26 Freiwerdende Frequenzen (z. B. bei Abschaltung von 3G)	110 – 170

3.5.3.1.2 Netzqualitäten bei 5G und 6G und deren Realisierung

Gemäß Freund et al. (2020) und dem Informationszentrum Mobilfunk (2020) unterscheidet man beim 5G-Netz drei unterschiedliche Anwendungsbereiche:

1. Das ultraschnelle mobile Breitband (Enhanced Mobile Broadband),

2. Die Kommunikation zwischen Maschinen und Anwendungen (Massive Machine Type Communications, M2M),

3. Ein Hochzuverlässigkeitsnetz mit kurzen Antwortzeiten (Ultra-Reliable and Low Latency Communications).

Nach Freund et al. (2020) und dem Informationszentrum Mobilfunk (2020) benötigen die drei Anwendungsbereiche keine drei voneinander getrennten Netze, sondern können über dasselbe 5G-taugliche Netz angeboten werden mittels des „Network Slicing". Diese Technik teilt das verfügbare Netz so auf, dass Nutzern mit unterschiedlichen Bedürfnissen Verbindungen mit den jeweils erforderlichen Qualitätsmerkmalen angeboten werden können, z. B. mit einer zugesicherten Datenkapazität oder einer zugesicherten Latenzzeit.

Der aktuelle Ausbau der Funknetze mit weiteren Kapazitäten sowohl für 4G als auch für 5G ermöglicht mit Hilfe des „Dynamic Spectrum Sharing" (DSS) eine schnelle, bedarfsgerechte Aufteilung der Frequenzbereiche einer Mobilfunkantenne zwischen den 4G und 5G-Funkstandards. Verwenden beispielsweise 10 Prozent der Nutzer in der Mobilfunkzelle ein 5G-taugliches Endgerät und 90 % ein 4G-Endgerät, werden entsprechend 10 % des Spektrums für die Versorgung mit 5G und 90 % für 4G/LTE genutzt. Prinzipiell funktioniert DSS auf allen für die Nutzung durch 4G und 5G in Frage kommenden Frequenzen. DSS ermöglicht Netzbetreibern somit, das begrenzte Funkspektrum an den tatsächlichen Bedarf anzupassen. Nimmt der Anteil der Nutzer mit 5G-fähigen Endgeräten zu, kann auch die Versorgung mit diesem neueren Mobilfunkstandard wachsen. Den Netzbetreibern ermöglicht DSS, in einem Schritt sowohl die 5G-Netzabdeckung auszubauen als auch der Nachfrage nach 4G/LTE gerecht zu werden. Dabei sind in der Regel keine zusätzlichen baulichen Aufwände notwendig, da lediglich bereits vorhandene funktechnische Ressourcen für den 5G-Standard geöffnet werden (Informationszentrum Mobilfunk 2020).

3.5.3.1.3 Infrastrukturelle Voraussetzungen

5G und ab voraussichtlich 2030 auch 6G werden gemäß dem (Informationszentrum Mobilfunk 2020) unter anderem den Ausbau der mobilen Infrastruktur und den Ausbau der Glasfasernetze (s. Kapitel 3.5.2) erfordern, um die Basisstationen mit schnellen Verbindungen auszustatten. Zudem wird die Datenverarbeitungskapazität in den Basisstationen verstärkt werden, um lange Übertragungswege zu zentralen Rechenzentren zu vermeiden, bzw. um die Zahl der Daten zu reduzieren, die dorthin übertragen werden müssen.

Die Zahl bzw. Dichte der Basisstationen wird sich dabei nicht mehr nur vorrangig an der Bevölkerungs- bzw. Nutzerdichte orientieren, sondern auch nach den Anforderungen dieser Nutzer hinsichtlich verschiedener Netzqualitäten etc. Weiterhin werden kleinteiligere Netze entstehen, sogenannte Campusnetze z. B. auf Universitätsgeländen, Flughäfen, Bahnhöfen, die räumlich begrenzte Mobilfunkverbindungen zur Verfügung stellen und ebenfalls mit der entsprechenden Sende- und Empfangsinfrastruktur ausgestattet werden müssen, wenn auch in kleinerem Maßstab im Vergleich zu den großräumig verfügbaren Netzen.

Bereits für 4G (LTE) verbessert die Mehrfachantennentechnik „Multiple Input Multiple Output" (MIMO) in Basisstationen und Endgeräten die Qualität und Datenrate drahtloser Verbindungen. Es werden sende- und empfängerseitig jeweils zwei bis acht Antennenelemente verwendet. Für den Ausbau von 5G und 6G sollen Mehrfachantennen mit mehreren hundert Antennenelementen[16] ausgestattet werden, die so zu „massive MIMO" (mMIMO)-Antennen werden. Mit jeder Antenne steigen die Datenrate sowie die Anzahl möglicher Nutzer in einer Mobilfunkzelle.

[16] C. f. T-Systems, https://www.t-systems.com/de/blickwinkel/netze/multiple-input-multiple-output/massive-mimo-800124

Die Elemente der Mehrfachantennen bündeln Signale in der ungefähren Richtung des Empfängers. Dieses „Beamforming“ sorgt dafür, dass die Funksignale mit größerer Genauigkeit dort ankommen, wo sie gebraucht werden, anders als bei der fast kugelförmigen Signalausbreitung anderer Antennen.

3.5.3.1.4 Schlüsseltechnologien für 5G und 6G mit Bezug zu kritischen Rohstoffen

Schlüsseltechnologien bzw. -bauelemente für 5G und 6G mit Bezug zu kritischen Rohstoffen sind:

- Frequenzfilter mit überwiegend auf Galliumarsenid (GaAs) basierenden Verstärkern für mobile Endgeräte und piezoelektrischen Wandlern basierend auf Lithiumniobat ($LiNbO_3$) und Lithiumtantalat ($LiTaO_3$), um auch die über das bisherige 4G hinausgehende langewellige Hochfrequenzspektrum[17] für 5G – und später auch für 6G – nutzbar zu machen.
- Auf Galliumnitrid (GaN) basierende Verstärker für den Einsatz in Basisstationen;
- Photonische Bauelemente, insbesondere auf InP (Indiumphosphid), aber auch auf GaAs basierende optische Transceiver, die für die schnelle Signalübertragung in Basisstationen und zur Verstärkung optischer Signale in Glasfaserkabeln erforderlich sind (Tekin 2021). Für 6G könnten auch ebenfalls auf InP basierende optische Bauelemente zum Einsatz kommen, die mit sichtbarem Licht arbeiten zur „visible light communication“ (Ndip 2021a).

Optische Bauelemente sind im Kapitel 3.2.3 (Optoelektronik/Photonik) näher beschrieben, die anderen oben erwähnten Bauelemente in Kapitel 3.2.5 (Radiofrequenz-Mikrochips).

3.5.3.2 Rohstoffinhalt

Die Rohstoffinhalte der oben beschriebenen Bauelemente sind in den Kapiteln 3.2.4.2 (Rohstoffbedarf der Optoelektronik/Photonik) und 3.2.3.2 (Rohstoffbedarf für Radiofrequenz-Mikrochips) beschrieben.

3.5.3.3 Foresight Industrielle Nutzung

3.5.3.3.1 Frequenzfilter mit Verstärkern in RF-Anwendungen

Gemäß Yole développement (2020b) stellten mobile IKT-Geräte (überwiegend Mobiltelefone) 93 % des Marktes für GaAs-Halbleiter, die in den RF-Markt fließen. Sie werden in Verstärkern der Frequenzfilter für die Mobilfunkstandards 3G, 4G, 4G+ und 5G verwendet, während die siliziumbasierte CMOS-(Complementary metal-oxide-semiconductor)-Technologie den 2G-Bereich dominiert und mittlerweile auch im 3G-Bereich zum Einsatz kommt. Da bisher für 3G-Frequenzen reservierte ebenso wie 4G-Frequenzen mit Hilfe des DSS ebenfalls für 5G genutzt werden sollen, ist es nicht sinnvoll, die Nutzung GaAs-basierter Halbleiter nur für die für 5G bzw. später für 6G neu hinzukommenden Frequenzen zu berechnen. Die Anzahl der Filter steigt durch den Ausbau von 5G und später vermutlich auch für 6G an, da die HF-Filter zu den bisher schon in Mobiltelefonen und anderen mobilen Endgeräten verwendeten Filtern hinzukommen.

Die durch 5G neu hinzukommenden Frequenzen unterteilen sich in den Frequenzbereich unterhalb von 6 GHz, dessen Verstärker in den HF-Filtern GaAs-basiert sind, und den „Millimeterwellenbereich“ mit höheren Frequenzen bis über 28 GHz, für den derzeit noch nicht entschieden ist, ob die zugehörigen Verstärker in den HF-Frequenzfiltern mit GaAs- oder siliziumbasierten Halbleitern gefertigt werden.

3.5.3.3.2 Optische Transceiver

Optische Transceiver werden im Zusammenhang mit 5G und 6G in Basisstationen eingesetzt, um Signale in (opto-)elektrischen Schaltkreisen schneller zu übertragen. Sie tragen wesentlich dazu bei, die in 5G- und 6G-Netzwerken angestrebten kurzen Latenzzeiten zu erreichen. Sie werden ebenfalls eingesetzt als Verstärker in Glasfaserkabeln. Die Anzahl an Basisstationen

[17] Hochfrequente Wellen sind kurzwelliger als niederfrequente gemäß der Gleichung $c = \lambda \nu$ (c: Lichtgeschwindigkeit; λ: Wellenlänge; ν: Frequenz); Die hochfrequenten 5G- und 6G-Freqenzen sind deshalb langwelliger („Millimeterwellen“) als die niederfrequenten.

wie auch die Menge an Glasfaserkabeln sind korreliert mit dem künftig zu erwartenden Datenverkehr, der außerhalb der Aufbauphasen der 5/6G-Netze den Bedarf an optischen Transceivern wesentlich bestimmen wird.

3.5.3.3.3 GaN-basierte Verstärker in Basisstationen

In den Basisstationen wie auch für Campus-Netze werden für 5G und 6G laut NDIP (2021a) GaN-Halbleiter als Verstärker eingesetzt, die sowohl die Sendeleistung als auch die Empfangsleistung der Antennenelemente in mMIMO-Antennen erhöhen sowie deren Steuerung ermöglichen, wobei jeweils zwei Antennenelemente mit einem GaN-Verstärker verbunden sind, deren Reichweite in den hohen Frequenzbereichen für 5G etwa 10 m, bei den noch höheren Frequenzbereichen für 6G nur 5 m beträgt, so dass die Anzahl der Basisstationen für 6G nochmals zunehmen wird, um eine entsprechende räumliche Abdeckung mit den angeforderten Netzqualitäten zu erreichen.

Wie auch bei den optischen Transceivern, korreliert der künftige Bedarf an Basisstationen mit dem künftig zu erwartenden Datenverkehr, der außerhalb der Aufbauphasen der 5/6G-Netze den Bedarf an GaN-Verstärkern wesentlich bestimmen wird.

3.5.3.4 Foresight Rohstoffbedarf

Der im Folgenden dargestellte Rohstoffbedarf fasst den Verbrauch kritischer Ressourcen für 5G und 6G zusammen, der im Wesentlichen durch Frequenzfilter mit GaAs-basierten Verstärkern für Mobiltelefone, GaN-basierten Verstärkern für Basisstationen und InP- und GaAs-basierten optischen Transceivern erzeugt wird. Die entsprechenden Rohstoffmengen sind deshalb in den Kapiteln 3.2.3 (Optoelektronik/Photonik) und 3.2.5 (Radiofrequenz-Mikrochips) bereits erfasst und werden in diesem Kapitel lediglich nochmals speziell für die neuen 5G bzw. 6G-Mobilfunkstandards zusammengefasst.

3.5.3.4.1 Gallium, Lithium, Niob und Tantal in Frequenzfiltern

Gemäß YOLE DÉVELOPPEMENT (2020b) ist der Bedarf an Frequenzfiltern mit GaAs-basierten Verstärkern weitgehend abhängig von der Anzahl der Mobiltelefone, da ca. 93 % dieser Filter in Mobiltelefonen verwendet werden. In den vergangenen Jahren nahm die Anzahl der Mobilfunkanschlüsse stark und stetig zu (STATISTA 2021a), in den letzten zehn Jahren allerdings mit deutlich abnehmenden Wachstumsraten und seit 2019 kaum mehr. Sie übertrifft mit ca. 8,2 Milliarden Anschlüssen die Weltbevölkerung von ca. 7,8 Milliarden Menschen (STATISTA 2019b). Das Wachstum bei den Anschlüssen wurde in den letzten Jahren vor allem von den Ländern in Asien und Afrika getragen. In Europa und Nord- und Lateinamerika hingegen wuchs die Zahl der Mobilfunkanschlüsse nur noch langsam; hier ist mittlerweile eine Sättigung erreicht.

Aufgrund dieser Entwicklung des Mobilfunkmarktes in den letzten Jahren und aufgrund der Tatsache, dass die Anzahl der Mobiltelefone die Weltbevölkerung beträchtlich übersteigt, wird für die Berechnungen des Rohstoffbedarfes für GaAs-basierte Verstärker in Mobiltelefonen davon ausgegangen, dass die Gesamtzahl an Mobiltelefonen von 2026 an mit dem Bevölkerungswachstum ansteigt.

YOLE DÉVELOPPEMENT (2020b) prognostiziert für GaAs-Halbleiter in mobilen Endgeräten ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 6 % von 2019 bis 2025 vor allem bedingt durch 5G. Während des Zeitraums von 2019 bis 2025 wurde aus den Prognosen der verkauften Mobiltelefone verschiedener Generationen (vergleiche S. 111 in YOLE DÉVELOPPEMENT (2020b)) eine durchschnittliche jährliche Steigerungsrate von 81 % für 5G-Mobiltelefone errechnet. Dieses Wachstum bei den 5G-Mobiltelefonen verursacht also die 6 % jährlichen Zuwachses bei den GaAs-Verstärkern.

Um den Bedarf an Gallium im Jahr 2040 in den verschiedenen Szenarien zu ermitteln, wird für den Zeitraum von 2019 bis 2025 die Yole-Prognose zugrunde gelegt. Danach wird davon ausgegangen, dass der unterschiedliche Datenverkehr der Digitalisierungsszenarien SSP1, SSP2 und SSP5 den Zuwachs der 5G-tauglichen Mobiltelefone und somit der GaAs-Halbleiter nach 2025

bestimmt, wenn die 5G-Netze weitgehend ausgebaut sein sollen. Für die einzelnen Szenarien wurden folgende Zuwachsraten zwischen 2025 und 2040 angenommen:

– SSP5: Der Anteil 5G-tauglicher Mobiltelefone an den Mobiltelefonverkäufen nimmt von 2019 bis 2025, beginnend mit 19 Millionen Stück, um jährlich durchschnittlich 81 % jährlich zu. Dies setzt sich nach 2025 fort, bis zur Marktsättigung, d. h., dass 100 % der neu verkauften Mobiltelefone 5G-tauglich sind. Dieses Wachstum entspricht laut Yole développement (2020b) einem durchschnittlichen jährlichen Zuwachs an GaAs-Verstärker von 6 %. Durch Einführung von 6G ab 2030 wiederholen sich diese Wachstumsraten, so dass ab 2039 alle verkauften Mobiltelefone 6G-tauglich sind.

– Weil jedoch die Verstärker für Frequenzen jenseits der 6Hz auch in Siliziumtechnik ausgeführt sein können (Integration in Siliziumtechnologie), wird für den Zeitraum ab 2030 alternativ nur mit einem Wachstum der 5G/6G-Mobiltelefone von 0,7 % gerechnet, was der jährlichen Zunahme der Weltbevölkerung in diesem Zeitraum entspricht. Die jährliche Zunahme der GaAs-Halbleiter beträgt in diesem Zeitraum damit 0,14 %.

– SSP2: Der Anteil 5G-tauglicher Mobiltelefone an den Verkäufen wächst nach 2025 um durchschnittlich 40 % jährlich bis zur Marktsättigung, falls diese in den relevanten Zeiträumen erreicht wird. Ab 2030 soll der Anteil der dann 6G-tauglichen Mobiltelefone, beginnend mit 9,5 Millionen Stück, wiederum um durchschnittlich 40 % jährlich zunehmen bis maximal zur Marktsättigung.

– Alternativ wird davon ausgegangen, dass ab 2030 die weitere Zunahme nur gemäß dem Weltbevölkerungswachstum erfolgt, da die 6G-spezifischen Frequenzen jenseits der 6 GHz in siliziumbasierter Technologie ausgeführt bzw. darin integriert werden.

– SSP1: Der Anteil 5G-tauglicher Mobiltelefone wächst nach 2025 nur um jährlich 0,7 %, was der Zunahme der Weltbevölkerung entspricht (Statista 2019b). Die Einführung von 6G ab 2030 bis 2036 verursacht wie in SSP2 eine jährliche Zunahme von 40 % beginnend mit 9,5 Millionen Stück. Danach wächst der Anteil dieser Telefone wieder analog zur Zunahme der Weltbevölkerung in diesem Zeitraum.

  Auch hier wird das bei SSP2 und SSP5 beschriebene Alternativszenario berücksichtigt, so dass ab 2030 die weitere jährliche Zunahme der GaAs-Verstärker mit 0,14 % angesetzt wird, ausgelöst durch das Wachstum der Weltbevölkerung.

Da die Verstärker integrale Bestandteile der Frequenzfilter sind, so lange die Verstärker nicht integriert werden, wurden für die Entwicklung der Bedarfe von Lithium, Niob und Tantal in den Frequenzfiltern ebenfalls die obigen Szenarien angesetzt, allerdings ohne die Integrationsszenarien, die in diesem Zusammenhang nicht relevant sind.

Bei der Produktion von GaAs-Halbleitern gelangen laut Clemm et al. (2016) nur ca. 45 % des eingesetzten Galliums in das Produkt. Neben dem Gallium in den Verstärkern sind deshalb auch die Gallium-Mengen zu berücksichtigen, die bei der Produktion in verschiedene Abfallströme abgeschieden werden. Gemäß Clemm et al. (2016) werden galliumhaltige Abfälle in Recyclingprozessen behandelt und dabei auch Gallium zurückgewonnen. Diese Aussage bezieht sich jedoch auf eine Untersuchung bei einem Hersteller in Deutschland. Es ist nicht bekannt, welche Recyclingraten in weltweitem Maßstab für Gallium aus Produktionsabfällen erzielt werden. Der Galliumbedarf aus Tab. 3.99 stellt deshalb ein Worst-Case-Szenario dar unter der Annahme, dass Gallium aus Produktionsabfällen nicht oder nur zu sehr geringen Anteilen recycelt wird. Aus Mobiltelefonen oder anderen elektrischen Geräten wird Gallium nicht recycelt. Der Galliumgehalt in den Halbleitern repräsentiert somit den „Best Case“ unter der Annahme, dass Gallium mit sehr hohen Raten aus den Produktionsrückständen recycelt wird und somit über den Galliumbedarf in den GaAs-Halbleitern netto kaum Gallium verbraucht wird. Tab. 3.99 fasst den Galliumbedarf für die verschiedenen Szenarien für das Jahr 2040 zusammen, siehe auch auch Abb. 3.45 in Kapitel 3.2.5.4.

Die Zahlen für den Galliumbedarf gelten unter der Annahme, dass bei den Verstärkern für die bisher bei 3G und 4G genutzten Frequenzen keine

Tab. 3.99: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe GaAs-basierter Verstärker in Frequenzfiltern in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	2040 (keine Integration)			2040 (mit Integration)		
			SSP1	SSP2	SSP5	SSP1	SSP2	SSP5
Gallium (gesamt)	413 (R)	38	60	74	90	49	54	54
davon Ga in Halbleitern		17	27	33	41	22	24	24
davon Ga in Abfällen (min.)		21	33	41	50	27	30	30
Lithium	95.170 (B)	8	15	18	22	–	–	–
Niob	68.200 (B)	5	12	15	18	–	–	–
Tantal	1.832 (B)	194	356	435	531	–	–	–

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Integration auf Siliziumbasis erfolgt, die den Galliumbedarf reduzieren würde. Für 2G ist diese Integration bereits erfolgt – dies ist in den Szenarien oben berücksichtigt – und hat bei 3G bereits begonnen.

3.5.3.4.2 Indium und Gallium in optischen Transceivern

Die 5G- und voraussichtlich auch die 6G-Mobilfunkstandards werden mehr und schnellere Basisstationen benötigen, was Dutzende Millionen von Transceivern erfordern wird. Es wird für den InP-Wafer-Markt die gleiche Marktentwicklung erwartet wie für die RF-Geräte (s. Kapitel 3.2.5 Radiofrequenz-Mikrochips), da 5G der Haupttreiber ist. Yole prognostiziert ein jährliches Wachstum von 9 % zwischen 2019 und 2024 (Yole développement 2019a). Es wird angenommen, dass zwischen 2025 und 2040 der Anstieg des Absatzes von InP-Wafern dem jährlichen Wachstum der mobilen Internetdaten folgen (s. Kapitel 1.4 Digitalisierungsszenarien), proportional dem Verhältnis von 0,3 aus dem Wachstum des Waferverkaufs und dem mobilen Internetverkehr in 2023 und 2024. Weitere Einzelheiten zu den Szenarien und deren Berechnung finden sich in den Kapiteln 3.2.5.4 und 3.2.3.4.

Tab. 3.100 zeigt die resultierenden jährlichen Bedarfe für Gallium und Indium für optische Transceiver im Jahr 2018 sowie die Bedarfsprognose für 2040.

Tab. 3.100: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe für optische Transceiver für 5G/6G in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Gallium	413 (R)	1	2	2	2
Arsen	32.783 (B)	1	2	2	2
Indium	808 (R)	5	35	35	35

B: Bergwerksförderung (t As_2O_3 Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

Es wird nicht erwartet, dass die Mengen an Gallium und Arsen in der Zukunft signifikant ansteigen. Die Mengen bleiben im Vergleich zum RF-Markt klein (s. Kapitel 3.2.5 Radiofrequenz-Mikrochips). Andererseits, wird sich die Nachfrage nach Indium, das für Photodioden und Laserdioden unerlässlich ist, bis 2040 mehr als verdreifachen. Diese Prognose basiert auf einem Worst-Case-Szenario, bei dem die InP-Technologie die Hauptplattform bleiben wird. Die Silizium-Photonik ersetzt derzeit die InP-Plattform, um die Kosten zu senken und die Leistung zu erhöhen (siehe Kapitel 3.2.3.5 unter Substitution). Setzt sich dieser Trend fort, sollte der Bedarf an Indium 2040 geringer sein als prognostiziert.

3.5.3.4.3 Gallium in GaN-basierten Verstärkern für Antennenelemente in Basisstationen

Tab. 3.101 zeigt den Bedarf an Gallium für GaN-Verstärker für die drei SSPs. Die Berechnungen beruhen auf der Annahme, dass der Bedarf an GaN-Verstärkern im Gleichmaß mit dem Datenaufkommen in den Szenarien zunimmt. Es handelt sich bei den Zahlen also insofern um ein Worst-Case-Szenario als keinerlei Effizienzsteigerungen einbezogen wurden und auch keine Zunahme der Ressourceneffizienz beispielsweise durch künftige Integration oder weitergehende Miniaturisierung. Weitere Details zur Berechnung finden sich in Kapitel 3.2.5.

Trotz dieser Worst-Case-Annahmen beläuft sich der für 2040 errechnete Bedarf auf maximal 2,4 t und ist somit gering angesichts einer jährlichen Galliumproduktion 413 t im Jahr 2018.

3.5.3.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Die Reycling- und Substitutionsmöglichkeiten werden hier nur überblicksmäßig dargestellt. Weitere Informationen finden sich im Kapitel 3.2.3 (Optoelektronik/Photonik) und Kapitel 3.2.5 (Radiofrequenz-Mikrochips).

3.5.3.5.1 Recycling und Ressourceneffizienz

Derzeit wird Gallium aus Elektroaltgeräten nicht recycelt, weder in der EU noch außerhalb. Das in den Verstärkern mobiler Endgeräte enthaltene Gallium wird deshalb nicht wiedergewonnen. Das Gleiche ist für Ga in den GaN-Verstärkern der Antennenelemente der Basisstationen anzunehmen sowie für In aus den optischen Transceivern. Die kleinen Mengen enthaltener Rohstoffe bedürften eines unverhältnismäßig hohen technischen und finanziellen Aufwandes beim Recycling, sofern diese Aufgabe technisch überhaupt zu bewältigen ist.

Wie bereits im vorherigen Kapitel erläutert, ist nicht bekannt, wie viel Gallium aus Abfällen der GaAs-Halbleiterproduktion im weltweiten Maßstab recycelt wird. Neben Verbesserung im Herstellungsprozess der Halbleiter, die den im Produkt verbleibenden Galliumanteil erhöhen, eröffnen Produktionsabfälle ein Potenzial, durch Galliumrecycling den Galliumbedarf zu reduzieren. Die Situation für GaN-Halbleiter und deren Herstellung wird als vergleichbar angenommen mit der von GaAs-Halbleitern.

Tab. 3.101: Galliumbedarf 2040 für GaN-Verstärker in Basisstationen

	2040		
	SSP1 Nachhaltigkeit	**SSP2 Mittelweg**	**SSP5 Fossiler Pfad**
SiC-Wafer-Einheiten	3.810.284	5.216.810	5.734.869
Ga-Bedarf in der Fertigung (kg)	659	902	992
Silizium-Wafer-Einheiten	1.129.502	1.546.446	1.700.017
Ga-Bedarf in der Fertigung (kg)	942	1.290	1.418
Gesamtbedarf Ga (t)	**1,6**	**2,2**	**2,4**

Indium wird derzeit aus elektrischen und elektronischen Geräten nicht recycelt. Da die Indiumgehalte in optischen Transceivern gering sind und diese Bauelemente für das Recycling separiert werden müssten, ist aus wirtschaftlichen und technischen Gründen keine Änderung dieser Situation zu erwarten. Weitere Informationen finden sich in den Kapiteln 3.2.3 (Optoelektronik/Photonik) und 3.2.5 (Radiofrequenz-Mikrochips).

3.5.3.5.2 Substitution

Optische Transceiver und Indium

Zurzeit dominieren die InP-basierten Transceiver den Markt. Allerdings wächst der Anteil siliziumbasierter photonischer Bauelemente derzeit schneller vor allem bei höheren Datenraten, da komplexe Schaltungen kompakter und Transceiver für höhere Datenraten von 400 G und 800 G (G = Gigabit/s) in dieser Technologie vermutlich billiger hergestellt werden können. Für Transceiver der Silizium-Photonik benötigt man allerdings trotzdem InP Laser, die in die siliziumbasierte Technologie integriert werden (Tekin 2021). Da jedoch die anderen Teile der sonst rein InP-basierten Transceiver nicht mehr auf InP beruhen, wird für solche siliziumbasierte Transceiver weniger Indium benötigt. Weitere Informationen finden sich im Kapitel 3.2.3.5.

Verstärker für mobile Endgeräte und Gallium

Laut Yole développement (2020a) könnten die Verstärker für den für 5G neu erschlossenen Frequenzbereich jenseits der heutigen 4G-Frequenzen bis 6 GHz in siliziumbasierte Technologien integriert werden, so dass der Bedarf an Gallium mindestens stark abnehmen würde. Diese Integration ist jedoch erst nach 2025 zu erwarten.

Für den Frequenzbereich jenseits der 6 GHz, der für 5G und noch weiter für 6G genutzt werden wird, ist der künftige Standard noch nicht festgelegt, d. h., es ist offen, ob diese Verstärker ebenfalls auf GaAs oder auf Siliziumtechnologie aufgebaut werden, was einen zusätzlichen Galliumbedarf deutlich verringern oder vollständig vermeiden würde.

Verstärker in Basisstationen und Gallium

Nachdem sich der Bedarf von Gallium für GaN-basierte Verstärker als vernachlässigbar herausgestellt hat, wurden Substitutionsmöglichkeiten nicht weiter untersucht.

3.5.4 Rechenzentren

3.5.4.1 Technologiebeschreibung

Rechenzentren als solche sind keine einzelne Technologie. Es handelt sich vielmehr um hoch individualisierte und auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnittene Zusammenstellungen von Hardware und Software. Verschiedenste Querschnitttechnologien und Komponenten sind möglich; eine hohe Diversität der Bauformen und schneller Wandel der Technik prägend.

Im Rahmen dieser Studie wird der Fokus aufgrund der Komplexität des Themas auf die Hauptkomponente Speichersysteme gelegt. Neben den Speichersystemen stellen die Gesamtinfrastruktur (Kühlung, Stromversorgung, Internetversorgung), sowie die Prozessoren wichtige Eckpfeiler von Rechenzentren dar, die betrachtet werden könnten. Es wurde sich hier jedoch dafür entschieden, statt eines groben Überblicks über alle diese Themen eine detaillierte Vertiefung im Bereich der Speichersysteme vorzunehmen.

Speichersysteme sind ein wichtiger Teil der Rechenzentrenarchitektur. Mit immer weiter steigenden Datenmengen, die gespeichert werden sollen, werden Speicher immer wichtiger für eine reibungslose Nutzung von Rechenzentren. Momentan werden vor allem drei Arten von Speichern eingesetzt: Magnetbänder, HDD- (Hard Disk Drive) und SSD-Festplatten (Solid State Drive). Für die Langzeitspeicherung, Archivierung und Sicherungskopien werden bevorzugt Magnetbänder eingesetzt. Im Bereich der Festplatten sind HDD- und SSD-Festplatten der Standard in Rechenzentren.

Magnetbänder

Magnetbänder werden hauptsächlich für Datensicherungszwecke verwendet und hierbei zur

Speicherung von Daten in Bandlaufwerken eingesetzt. Hierfür wird auf eine flexible Trägerfolie eine magnetische Schicht aufgebracht. Digitale Daten werde dann durch Magnetisierungsvorgänge auf den Bändern gespeichert (Lipinski 2015). Die magnetische Schicht besteht aus Eisenoxid oder Chromoxid (Lipinski 2015), in neueren Generationen wird der Wechsel von Barium- auf Strontiumferrit angestrebt (Mellor 2020b; Mantel 2020). Früher gab es verschiedene Standards für Magnetbänder; seit 2016 wird nur noch das Format „Linear Tape Open" – kurz LTO – weiterentwickelt (Labs 2020a). Dieses offene Format wird von einer Unternehmens-Gemeinschaft aus Hewlett Packard Enterprise, IBM Corporation und Quantum Corporation entwickelt und fortgeführt[18]. Seit 2015 ist die Generation LTO-7 erhältlich, welche maximal 15 Terabyte (TB) Daten pro Band komprimiert speichert (Ultrium LTO 2015).

Abb. 3.95 zeigt die Entwicklung der Speicherkapazitäten in den letzten Generationen und zukünftig geplanten. Es ist zu erkennen, dass auch weiterhin wesentliche Sprünge bei den Bandkapazitäten zu verzeichnen sind; etwa alle 2,3 Jahre hat sich in der Vergangenheit die Kapazität verdoppelt (Wesseler 2020). Die LTO-9 Generation wurde im Jahr 2020 angekündigt. Mit dem Wechsel von Generation 5 auf 6 hat sich die Komprimierungsrate von 2- auf 2,5-fach erhöht.

In Rechenzentren befinden sich Magnetbänder in sogenannten Bandbibliotheken, in denen viele Bänder gelagert, automatisch gesucht und in ein Lesegerät eingespeichert werden (Coyne et al. 2017). Magnetbänder arbeiten sehr energieeffizient, da sie nach dem Beschreiben bis zum Abrufen der Daten keine weitere Energie benötigen. Magnetbändern sollten nur bis zu 200-mal neu beschrieben werden, wobei die Daten aber bis zu 30 Jahre erhalten werden können (Labs 2020a). Dies macht sie insbesondere für Archivierungen und Sicherheitskopien interessant.

Die Kosten pro Gigabyte betragen auch nur bis zu einem Sechstel der Kosten einer Speicherung

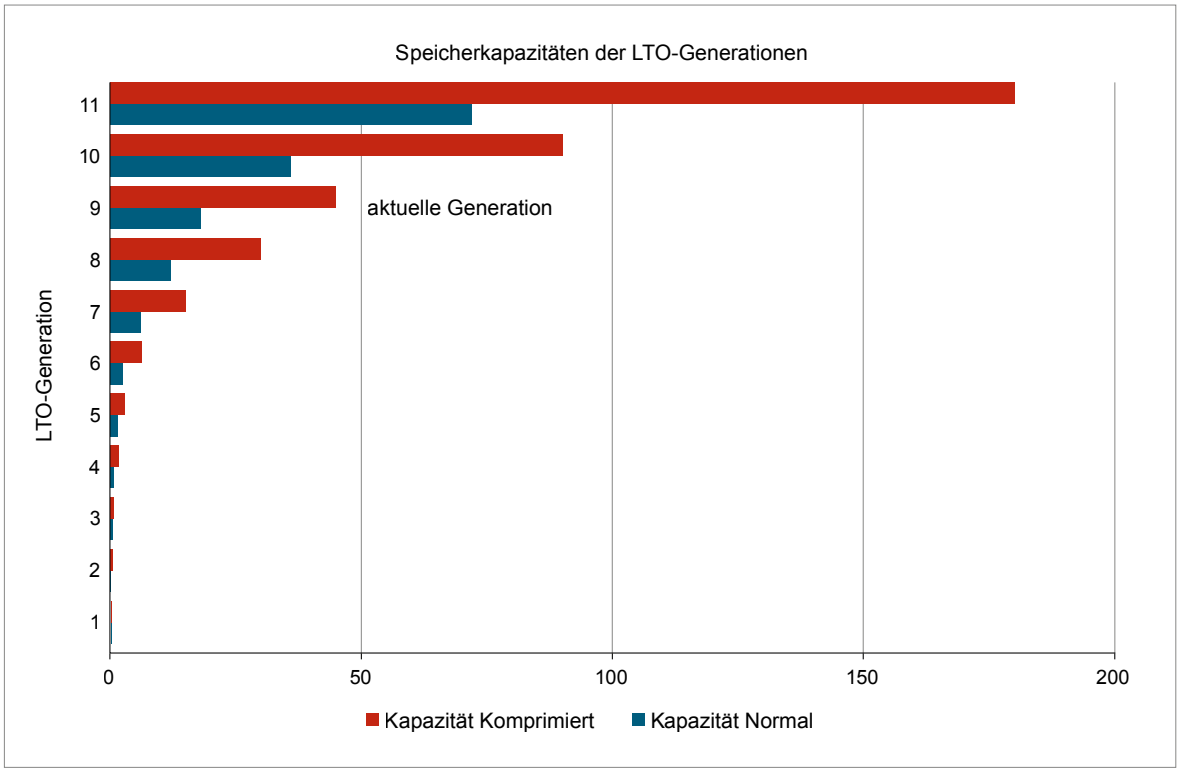


Abb. 3.95: Vergangene und geplante Bandkapazitäten des LTO-Standards (Quelle: Ultrium LTO 2020)

[18] Siehe https://www.lto.org/ (letzter Zugriff am 12.02.2021)

(Ultrium LTO 2015) auf Festplatten. So kostet das Gigabyte Speicherplatz auf Fujitsu-Magnetbändern circa 0,004 USD (Ostler 2019). Die Zugriffsgeschwindigkeiten sind zwar niedriger, dafür aber die Fehlerraten von Bändern um vier bis fünf Größenordnungen niedriger als die von Festplatten, was sie insbesondere als Sicherungsmedien interessant macht. Magnetbänder sind auch vergleichsweise sicher, da die auf Kassetten gespeicherten Daten nur zugänglich sind, wenn sich die Kassette physikalisch in einem Laufwerk befindet. Das macht sie immer noch als finale Sicherungsinstanz eines mehrstufigen Verfahrens attraktiv (Lantz 2020). Moderne Magnetbänder fassen bis zu 30 TB pro Kassette, es wird jedoch immer noch aktiv an Bändern mit größerem Speichervolumen geforscht (Ostler 2019; Mellor 2020b; IBM Knowledge Center 2020). Magnetbänder sind weit verbreitet, auch wenn es wenig konkrete Zahlen zur Verbreitung in Rechenzentren gibt. So gab eine Vereinigung von Magnetbandherstellern namens „LTO Program“ 2015 an, dass 90 % der Fortune 500[19] Firmen Magnetbänder als eine ihrer Datensicherungsoptionen nutzen (Ultrium LTO 2015). IDC schätzen in ihrem Zukunftsreport, dass die Menge an Daten, die bis 2025 auf Magnetbändern transportiert wird (Worldwide byte shipments), weiter steigen wird (von 0,1 Zettabyte (ZB) global 2018 auf knapp 1 ZB 2025) (Reinsel et al. 2018). Es ist davon auszugehen, dass ein Großteil dieser Daten in Firmen und Rechenzentren gespeichert ist, da Magnetbänder weitestgehend aus dem Verbrauchermarkt verdrängt wurden. Gleichzeitig bezieht dies jedoch nicht die langfristigen Sicherungskopien mit ein, deren Datenmenge deutlich höher liegen dürfte.

Festplatten

HDD-Festplatten sind ebenfalls magnetische Speichermedien. Im Gehäuse befindet sich eine rotierende Scheibe mit magnetischer Oberfläche, die beim Schreiben magnetisiert wird. Zum Schreiben und Lesen der Daten wird ein Arm genutzt, der über der Scheibe schwebt (Bauer 2018a). Typische Baugrößen sind 3,5 und 2,5 Zoll. In HDD-Festplatten wird meist ein Neodym-Magnet verbaut (Linne 2020). Der größte Vorteil von HDD-Festplatten sind ihre niedrigen Kosten pro Gigabyte gespeicherte Daten, teilweise um Faktor zehn niedriger als SSD (0,03 USD/GB verglichen mit 0,20 – 0,30 USD/GB 2018). Dies ist der Hauptgrund, weshalb sie in Rechenzentren weiterhin häufig verbaut werden (Bauer 2018b).

SSD-Festplatten basieren auf der sogenannten NAND-Flash-Speichertechnologie, bei der die einzelnen Speicherzellen seriell verschaltet sind. SSD (Solid-State-Disk) sind elektronische, halbleiterbasierte Speichermedien. Sie benötigen keine rotierenden Teile und sind daher erschütterungsresistenter (Bauer 2018a). SSD sind robuster und weniger anfällig für mechanische Störungen, jedoch sind sie, auf das Gigabyte gespeicherte Daten gerechnet, momentan noch deutlich teurer als HDD-Festplatten. Ihr größter Vorteil sind die kürzere Zugriffszeit und bessere Lese- und Schreibgeschwindigkeiten als HDD (Linne 2020). SSD-Festplatten sind außerdem meist energieeffizienter (Bauer 2018b). Je nach Anwendungsfall des Rechenzentrums variiert also die Zusammensetzung der genutzten Speichermedien.

Momentan wird die Speicherung in Rechenzentren und Unternehmen überwiegend durch HDD-Festplatten realisiert (Reinsel et al. 2018). Es gibt verschiedene Prognosen bezüglich der Verteilung von Daten auf HDD- und SSD-Festplatten in den nächsten 20 Jahren. Es ist zu vermuten, dass SSD-Festpatten nach und nach immer größere Anteile des Rechenzentrenmarktes übernehmen werden. Manche Datenanalysten glauben, dass „bald“ nur noch in Hyperskala-Rechenzentren, in denen wirklich große Datenmengen gespeichert werden müssen, HDD-Platten genutzt werden, sind jedoch zurückhaltend mit konkreten zeitlichen Einschätzungen (van Winkle 2019; Mellor 2020a).

Die Beraterfima IDC schätzt, dass zumindest 2025 immer noch 80 % der Daten von Firmen auf HDD-Festplatten gespeichert werden (Reinsel et al. 2018). Als Grund hierfür werden die niedrigen Kosten angeführt. Im Jahr 2018 gaben sie diese Schätzung jedoch noch mit über 90 % an – SSD-Speicher haben den Hauptanteil an der Verteilungsveränderung in dieser Vorhersage (der Rest verteilt sich auf andere NAND-Speichermedien).

Seagate schätzt, dass sie den Preisvorteil von HDD gegenüber SSD-Platten mindestens bis zur

[19] Fortune 500 ist eine Liste, die die 500 umsatzstärksten Unternehmen der USA pro Geschäftsjahr aufführt.

Mitte der 2030er halten können (Mellor 2019). Coughlin Associates prognostizieren, dass der Preis pro GB für HDD-Festplatten bis 2024 auf unter 0,01 USD fallen wird (Coughlin 2019). Obwohl auch der SSD-Preis fällt, prognostizieren verschiedene Experten, dass der Preis pro GB für HDD-Festplatten weit in die nächste Dekade hinein günstiger sein wird. Ramirez, Senior Director of Product Marketing and Data Center Devices bei Western Digital, geht sogar davon aus, dass sich der Preisunterschied auf etwa 6:1 einpendeln und dort bis mindestens 2030 bleiben wird (van Winkle 2019). Damit würden HDDs vor allem für Rechenzentren mit großen Datenmengen weiter attraktiv bleiben.

Das Unternehmen Toshiba verkündete 2019, dass SSD zwar prozentual größere Anteile des Gesamtspeichermarktes übernehmen werden, dass aber gleichzeitig die absolute Menge an SSD- und HDD-Festplatten steigen wird, weil die Gesamtmenge der zu speichernden Daten so schnell ansteigt (Kaese 2020). Bei der Rohstoffbetrachtung von Speichersystemen in Rechenzentren spielen also die Magneten der HDD-Festplatten eine entscheidende Rolle.

Im Folgenden soll kurz auf die vielversprechendsten Weiterentwicklungen im Speichersystembereich eingegangen werden.

Trends im Speichersystembereich

HAMR / MAMR

HAMR (Heat Assisted Magnetic Recording) ist eine Technologienentwicklung, um die Kapazität von Speichermedien zu erhöhen. Dabei wird die Plattenoberfläche mittels eines Hochpräzisionslasers während des Schreibprozesses erhitzt. HAMR erhöht die Speichermenge, die auf HDD-Festplatten gespeichert werden kann, stark. Die aktuellen Kapazitäten liegen bei maximal 20 TB mit Aussicht auf weitere Steigerungen in den nächsten Jahren (Labs 2020b). Der HAMR-Technologie ähnelt der MAMR-Technologie (Microwave Assisted Magnetic Recording), die ein ähnliches Prinzip mittels Mikrowellen statt Laser umsetzt. Western Digital erwartet 40 TB HDD-Festplatten mit MAMR-Technologie für das Jahr 2025 (Bauer 2018b).

Es ist zu erwarten, dass die Speicherkapazitäten von HDDs in den nächsten Jahren stark ansteigen werden (Rao 2019) und sie damit weiterhin attraktiv bleiben als kosteneffiziente Lösung für Rechenzentren.

Netzwerkschnittstellen

In den nächsten Jahren werden sich voraussichtlich neue Netzwerkschnittstellen in den Rechenzentren etablieren, wie zum Beispiel PCIe (Peripheral Component Interconnect Express). Dieses ist deutlich schneller als SAS (Serial Attached Small Computer System Interface), welches momentan oft genutzt wird (Bauer 2018b).

QLC NAND

Im Bereich der NAND-Flashspeicher, also auch der SSDs, ist QLC NAND (Quad-level-cell) ein neuer Trend, der schnellere und dichtere SSD-Festplatten verspricht, wodurch auch der Preis pro GB fallen könnte (Ramseyer 2018). Hierbei können vier Bit pro physischer Speicherzelle gespeichert werden statt einem, wie bei SLC (single level cell) oder zwei wie bei MLCs (multi-level-cell) (Bauer 2018b).

FLAPE

Bei der Kombination aus Flash- und Tape-Technologien spricht man von FLAPE. Hierbei wird der Vorteil des schnellen (Zwischen-)Speicherns auf Flash genutzt, verbunden mit den niedrigen Speicherkosten und der schnellen Schreib- und Streamgeschwindigkeit auf Band (Schadhauser & Graefen 2016). Im Jahr 2016 gab es zu dieser Technologie zahlreiche Artikel und Veröffentlichungen, danach flaute das Medienecho ab. IBM hat im Jahr 2016 eine Produktserie, welche auf diese Methode zurückgreift auf den Markt gebracht (IBM Systems 2016).

DNA-basierte Speichertechnologien

DNA-basierte Speichertechnologie befindet sich aktuell an der Schwelle zwischen Machbarkeit und Skalierbarkeit auf industrielle Maßstäbe. Ob diese Schwelle erfolgreich überschritten wird, ist

noch nicht klar absehbar. Insbesondere die Langzeitstabilität von DNA macht diese als Speichermedium interessant. Die digitalen Daten werden bei diesem technologischen Ansatz in Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Thymin (T) umgewandelt. Die daraus hergestellten DNA-Stränge können sicher gelagert und wieder ausgelesen werden.

Takahashi et al. (2019) haben 2018 erstmals die grundsätzliche Machbarkeit des Schreibens und Lesens von digitalen Daten in künstlichen DNA-Strängen im Labormaßstab demonstriert. Hierfür wurde das Wort „hello“ – also 5 Byte Daten – in Strängen künstlicher DNA gespeichert und anschließend wieder ausgelesen. Die Schreibgeschwindigkeit lag bei etwa 21 h, die Lesegeschwindigkeit bei 6 min. Für eine erfolgreiche kommerzielle Nutzung müssen diese Zeiten deutlich verkürzt werden. Weitere Problemfelder sind die Kosten und Automatisierung der Laborarbeiten (Ryon 2019).

Denkbar wären erste Anwendungen für Langzeitspeicher (Datenarchive). Denn die Speicherdichte ist enorm hoch. In einem Grundlagenversuch wiesen Wissenschaftler eine Speicherdichte von 215.000 Terabyte pro Gramm nach Erlich & Zielinski (2017). Vorteilhaft ist hierbei auch die Stabilität der DNA-Moleküle, was durch intakte DNA in archäologischen Funden nachgewiesen ist. Bereits 2016 konnte das Microsoft Team (The AI Blog 2016) den Rekord mit 200 MByte in DNA gespeicherten Daten erreichen, laut Firmenangaben wurden inzwischen 1 GByte an Daten gespeichert.

3.5.4.2 Foresight Industrielle Nutzung

Für diese Studie wurden drei grundlegende Szenarien auf Basis der Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) entwickelt (Fricko et al. 2017), siehe Kapitel 1.4 zu den Digitalisierungsszenarien. Um diese Szenarien spezifisch für Rechenzentren anzupassen, wurden zunächst Annahmen über die Entwicklung der globalen Datenmenge in Rechenzentren und insgesamt getroffen. Diese basieren unter anderem auf dem IDC Report zur globalen Datensphäre (Reinsel et al. 2018) und dem Cisco Global Cloud Index 2015–2020 (Cisco 2016).

Für die Szenarien wurden die drei relevanten Speichertechnologien – Magnetbänder, SSDs und HDDs identifiziert. Nach eingehender Quellenstudie wurden jeweils Annahmen über die Entwicklung dieser drei Speichertechnologien in Rechenzentren in den drei vorhandenen Szenarien umgesetzt. Auch wurde ein Redundanzfaktor hinzugefügt, der den Mehrverbrauch an Ressourcen durch Ausfallsicherung darstellt.

Das günstigste Szenario (SSP1) basiert auf den Annahmen, dass die Datenmenge vergleichsweise wenig steigt, während die Speichertechnologien vergleichsweise stark an Effizienz gewinnen, was insgesamt zu einem geringeren Ressourcenverbrauch führt.

Das ressourcenintensivste Szenario (SSP5) basiert auf gegenteiligen Annahmen – die globale Datenmenge in Rechenzentren steigt vergleichsweise stark an und die Effizienz der Speichermedien steigt in deutlich geringerem Maße an als im ressourcenschonendsten Szenario. Dieses Szenario ist also deutlich ressourcenintensiver als das günstigste Szenario.

Das Basisszenario (SSP2) bewegt sich in seinen Annahmen zwischen den beiden Extremszenarien.

Entwicklung der Gesamtdatenmenge von Rechenzentren

Für die Berechnung der Gesamtdatenmenge, die in Rechenzentren zu den betrachteten Zeitpunkten gespeichert ist, wurde der Cisco Global Cloud Index 2015–2020 (Cisco 2016) als Grundlage genutzt. In Abb. 3.96 sind verschiedene Wachstumsraten bis 2040 zu sehen, die sich alle innerhalb der für die Szenarien betrachteten Raten befinden. Wie hier sehr deutlich zu sehen ist, sind durch exponenzielles Wachstum Werte in zwei Dekaden schwer vorherzusagen und Abweichungen immens. In der Grafik wurde der Bereich, in dem die errechnete Datenmenge für höhere Wachstumsraten sich beginnt in deutlich anderen Größenordnungen zu bewegen, rot gekennzeichnet. Trotzdem wurde ein Modell entworfen, welches aufgrund der gegebenen Umstände eine hohe Bandbreite an möglichen Ergebnissen in drei Szenarien abbildet.

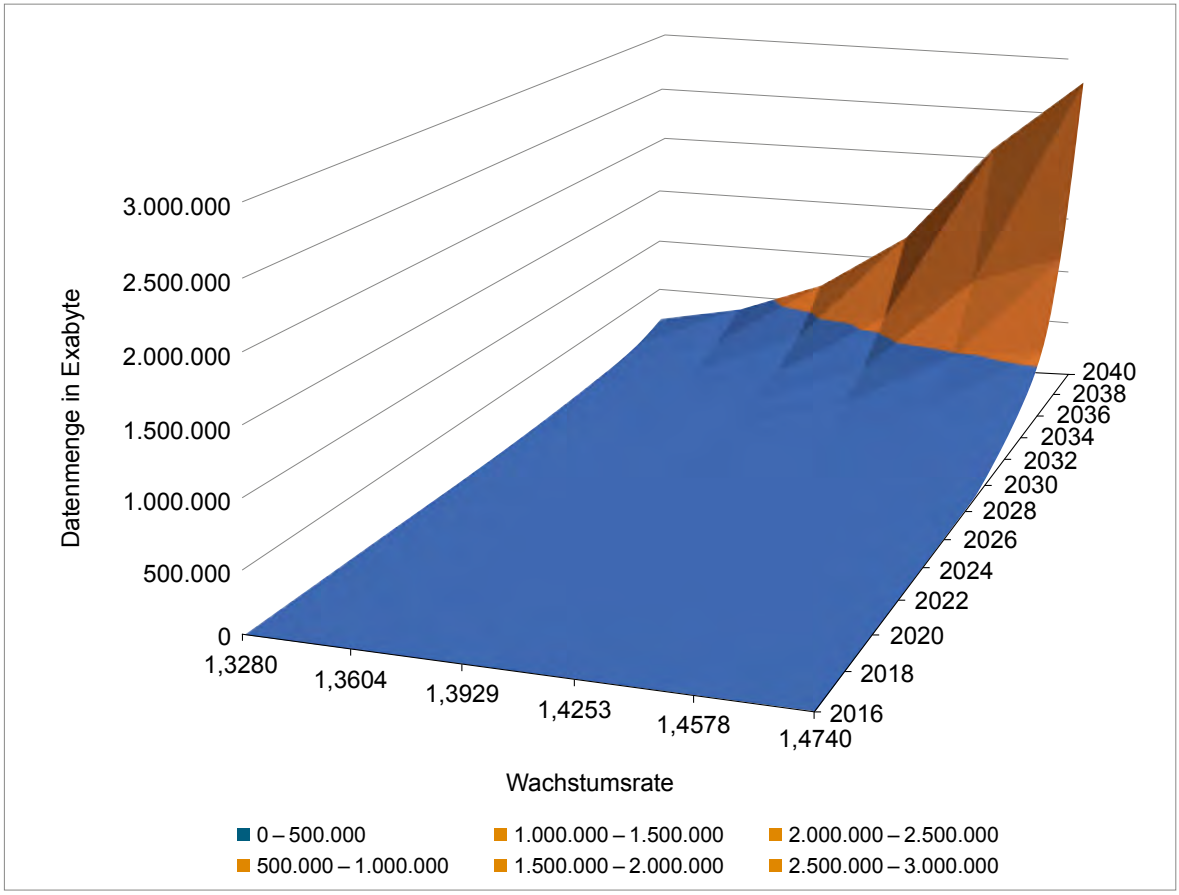


Abb. 3.96: Darstellung der verschiedenen Datenwachstumsszenarien bis 2040 (Quelle: Eigene Darstellung)

Aus dieser Prognose wurden drei grundlegende Szenarien für die Entwicklung der Rechenzentren bis ins Jahr 2040 abgeleitet. Als Ausgangspunkt wurde die von Cisco angegebene Datenmenge von 171 Exabyte Daten im Jahr 2015 genutzt. Zunächst wurde eine Basiswachstumsrate über die Methode der kleinsten Quadrate ermittelt. Außerdem wurden die maximale und minimale Wachstumsrate über die in der Cisco-Studie betrachteten Jahre ermittelt. Damit wurden die folgenden Szenarien festgelegt:

– **Basisszenario (SSP2):**
  - Die durch die Methode der kleinsten Quadrate ermittelte Wachstumsrate von 39 % pro Jahr wird bis 2040 fortgeführt.
– **Ressourcenschonendstes Szenario (SSP1):**
  - Für das Szenario mit dem geringsten Anstieg in Daten wurde die minimale Wachstumsrate der Cisco-Daten ermittelt und bis 2040 angewendet.
  - Minimale Wachstumsrate: 32 %
– **Ressourcenintensivstes Szenario (SSP5):**
  - Hierfür wurde die maximale Wachstumsrate der Cisco-Studie von 47 % pro Jahr genutzt.

Um die Validität dieser Wachstumsraten zu überprüfen, wurde zusätzlich noch der IDC „Data Age 2025“ Report betrachtet (Reinsel et al. 2018). In diesem Report befindet sich eine Prognose für das Wachstum der globalen Datensphäre von 2015 bis 2025. Auch hier wurden durchschnittliches Wachstum und Trendlinie ermittelt. Die durchschnittliche Wachstumsrate ist mit 31 % in derselben Größenordnung wie die genutzten Cisco-Daten. In Abb. 3.97 ist ein Vergleich der geschätzten Datenmengen der drei Szenarien für die Jahre 2018 und 2040 in Zettabyte dargestellt. Hier ist deutlich zu sehen, dass die Unterschiede in den Datenmengen, wie erwartet, durch das exponenzielle Wachstum im Jahr 2018 noch recht klein, im Jahr 2040 dagegen enorm sind. So ist die geschätzte Datenmenge in Rechenzentren im

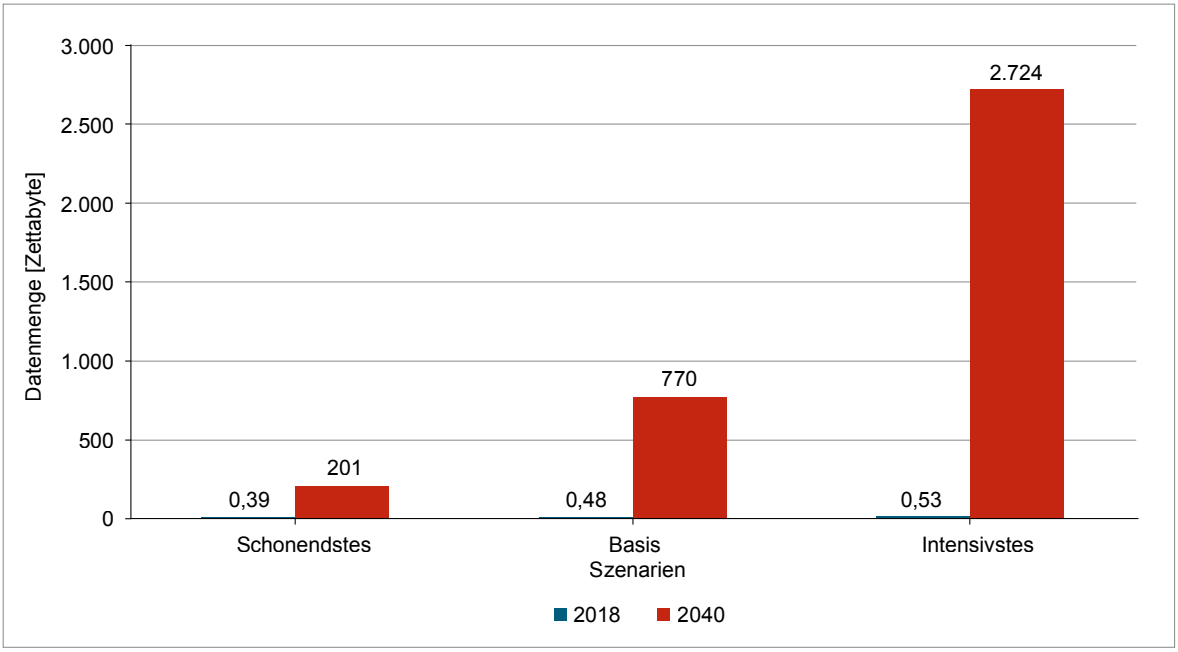


Abb. 3.97: Vergleich der Datenmengen in den verschiedenen Szenarien 2018 und 2040 (Quelle: Eigene Darstellung)

Jahr 2040 für das ressourcenschonendste Szenario im Vergleich zum ressourcenintensivsten Szenario über 90 % Prozent geringer.

Speichermedienmengen

Die Entwicklung von Szenarien für die benötigten Speichermedienmengen bis 2020 wurde in mehrere Schritte aufgeteilt. Zunächst wurden die drei relevanten Technologien identifiziert und für diese Wachstumsprognosen aufgestellt. Danach wurde ein sogenannter „Festplattenfaktor" festgelegt, welcher die Verteilung der insgesamt benötigten Speicherkapazität über die Technologien festlegt. Zuletzt wurde noch ein Redundanzfaktor festgelegt. Da Herstellerquellen lediglich die neuesten Entwicklungen beschreiben, wurden die vorhergesagten Entwicklungen nicht direkt in die Szenarien übernommen, sondern um zwei Jahre nach hinten versetzt, da davon ausgegangen wird, dass Neuentwicklungen zu diesem Zeitpunkt im Rechenzentrum angekommen sind.

Für diese Arbeit sind HDD-Festplatten, SSD-Festplatten und Magnetbänder relevante Technologien. Speichermedien entwickeln sich meist mit Technologiesprüngen, weswegen eine jährliche Betrachtung schwierig ist. Es wird jedoch angenommen, dass sich die Wachstumsraten der Speicherkapazität durch Technologiesprünge im Mittel auf die angegebenen jährlichen Wachstumsraten beschreiben lassen.

HDD-Festplatten

Die drei Szenarien zur Erhöhung der Speicherkapazität von HDD-Festplatten basieren auf verschiedenen Pressemitteilungen von Festplattenherstellern, welche als richtungsweisend für die Entwicklung gewertet werden:

- **Basisszenario:** nach einer Pressemitteilung von Seagate im Jahr 2017 ist durch Einführung von HAMR- und HDMR-Technologien mit einem jährlichen Wachstum von 30 % zu rechnen (Seagate Blog 2017).

- **Ressourcenschonendstes Szenario:** die optimistischste weitere Pressemitteilung beschreibt eine Verdopplung der Speicherkapazität von HDD-Festplatten alle 2,5 Jahre, also ein jährliches Wachstum von grob 35 %. Dies wurde als ressourcenschonendstes Szenario verwendet (Mellor 2018).

- **Ressourcenintensivstes Szenario:** dieses Szenario basiert auf der Annahme, dass die oben genannten angekündigten Wachstums-

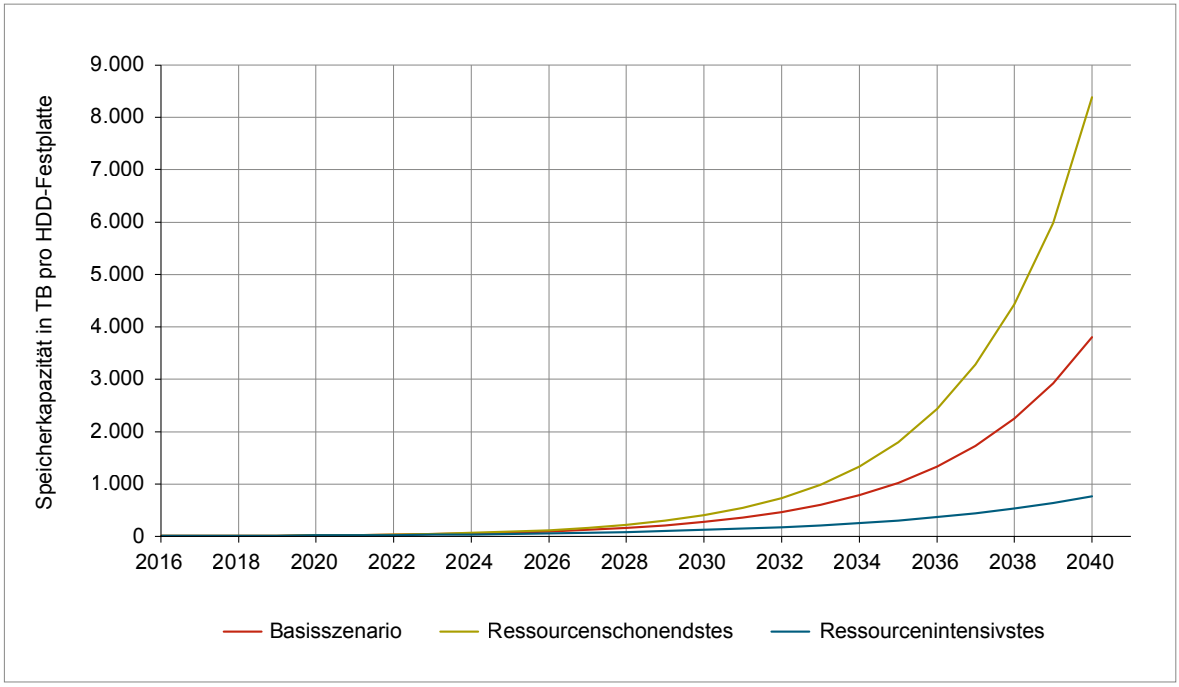


Abb. 3.98: Vergleich der Szenarien für HDD-Festplatten (Quelle: Eigene Darstellung)

raten eindeutig verfehlt werden und geht von einem jährlichen Wachstum der Speicherkapazität von nur 10 % aus.

In Abb. 3.98 sind die Ergebnisse dieser Szenarien zu sehen. Wie deutlich zu sehen ist, begünstigt das exponenzielle Wachstum der Kapazitäten große Ergebnisunterschiede bis 2040.

SSD-Festplatten

Die Annahmen zur Verbesserung der Speicherkapazität von SSD-Festplatten fußen vorrangig auf Berichten der Firma Google bei der Usenix (The Advanced Systems Computing Association) durch Extraktion von Stützstellen und einer Extrapolation der Wachstumsfaktoren (USENIX Association 2016; USENIX Association 2020).

– **Basisszenario:** Die Kapazität der SSD-Festplatten steigt um etwa 40 % pro Jahr.

– **Ressourcenschonendstes Szenario:** Die Kapazität der SSD-Festplatten steigt um 65 % pro Jahr pro Jahr.

– **Ressourcenintensivstes Szenario:** Die Kapazität der SSD-Festplatten steigt um 20 % pro Jahr.

In Abb. 3.99 sind die Ergebnisse dieser Szenarien zu sehen. Wie deutlich zu sehen ist, begünstigt das exponenzielle Wachstum der Kapazitäten auch hier große Ergebnisunterschiede bis 2040.

Magnetbänder

Die Annahmen zu Magnetbändern beruhen auf einer Einschätzung von Fujifilm zur Entwicklung von Magnetbändern in den kommenden Jahren. In der Quelle wird von einem Technologiewechsel alle zwei bis drei Jahre gesprochen (Mellor 2020b).

– **Basisszenario:** hierbei wird angenommen, dass die nächste LTO-Technologie alle drei Jahre auf den Markt kommt und nach der bereits angekündigten Version LTO-14 (nach diesem Szenario 2035) keine weitere Entwicklung mehr stattfindet.

– **Ressourcenschonendstes Szenario:** hierbei wird angenommen, dass die nächste LTO-Technologie tatsächlich alle zwei Jahre und bis 2040 durchgehend entwickelt wird. Dies würde bis 2040 zu LTO-19 führen und somit wird für die Berechnung LTO-18 betrachtet.

– **Ressourcenintensivstes Szenario:** es wird angenommen, dass auch das Basisszenario nicht gehalten werden kann und sich der Markteintritt für LTO-14 bis 2040 hinzieht. Durch die Rückverschiebung wird daher LTO-13 für dieses Szenario betrachtet. Damit würde eine neue LTO-Technologie alle vier Jahre auf den Markt kommen.

In Abb. 3.100 sind die Ergebnisse dieser Szenarien zu sehen. Wie deutlich zu sehen ist, begünstigt das exponenzielle Wachstum der Kapazitäten große Ergebnisunterschiede bis 2040. Im Gegensatz zu den Festplattentechnologien bewegt sich der Kapazitätszugewinn bei Magnetbändern stärker innerhalb von Technologiesprüngen. Dies

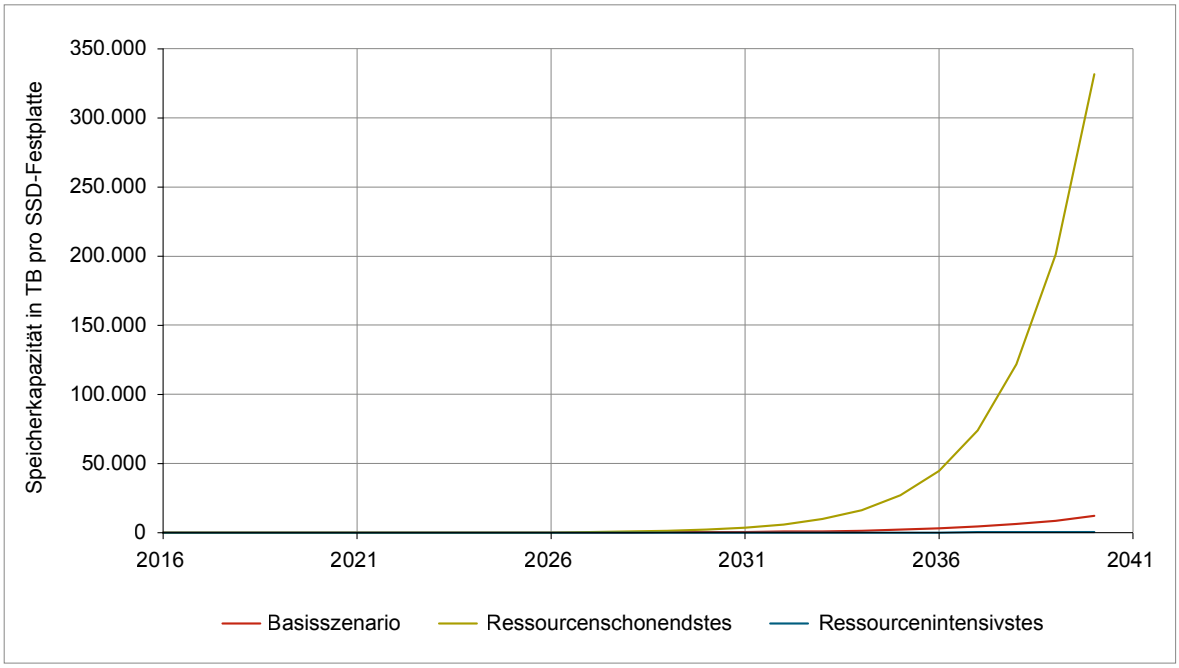


Abb. 3.99: Szenarienvergleich für SSD-Festplatten (Quelle: Eigene Darstellung)

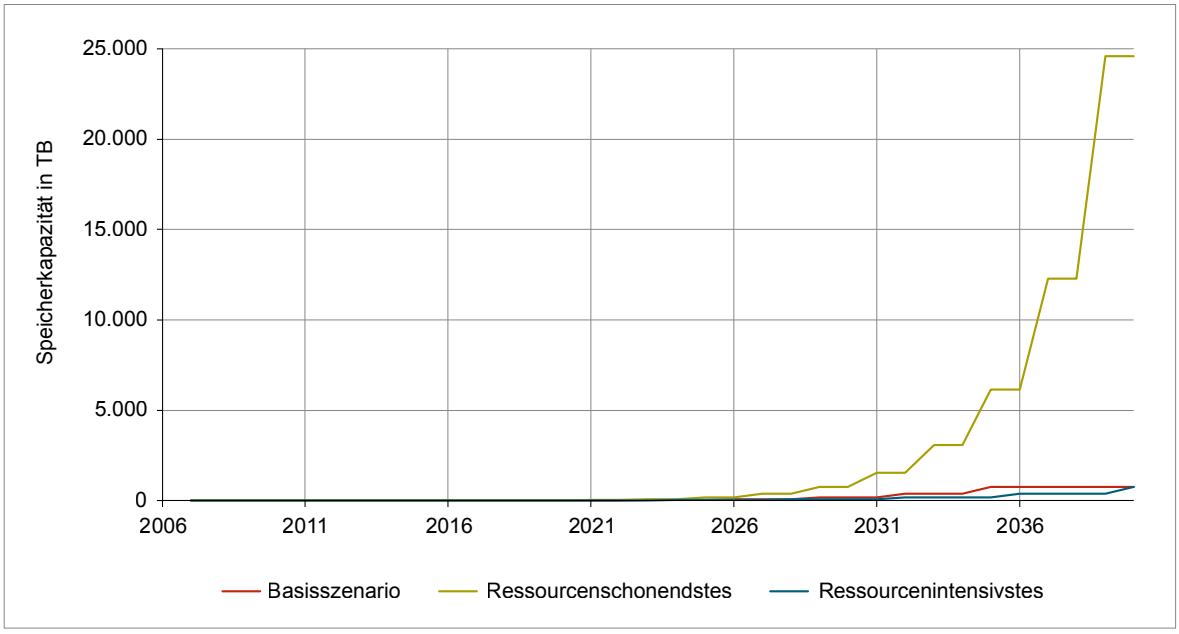


Abb. 3.100: Szenarienvergleich für Magnetbänder (Quelle: Eigene Darstellung)

führt zu der in der Grafik dargestellten Plateauform der Verläufe.

Speichermedienverteilungsfaktor

Wesentlich für die zukünftigen Rohstoffbedarfe ist die Verteilung von Datenmengen auf die Speichertechnologien. Für ein Vorhersagemodell wurde die prozentuale Verteilung der Speicherkapazitäten im Rechenzentrum mit der globalen Verteilung kombiniert. Dabei wurde angenommen, dass die Menge an Magnetbändern, welche für die globale Verteilung laut Reinsel et al. (2018) angegeben wurde, vollständig auf Rechenzentren entfällt. Aufgrund einer prognostizierten und in den letzten Jahren absehbaren Verschiebung der Speicherdynamik in Rechenzentren in Richtung SSD-Festplatten wurde dies ebenfalls abgebildet (Plankers 2015; Viaud 2019; Mellor 2020a). In Abb. 3.101 ist der Speichermedienverteilungsfaktor für die drei Hauptspeichermedien in den Jahren 2018 und 2040 im Vergleich dargestellt.

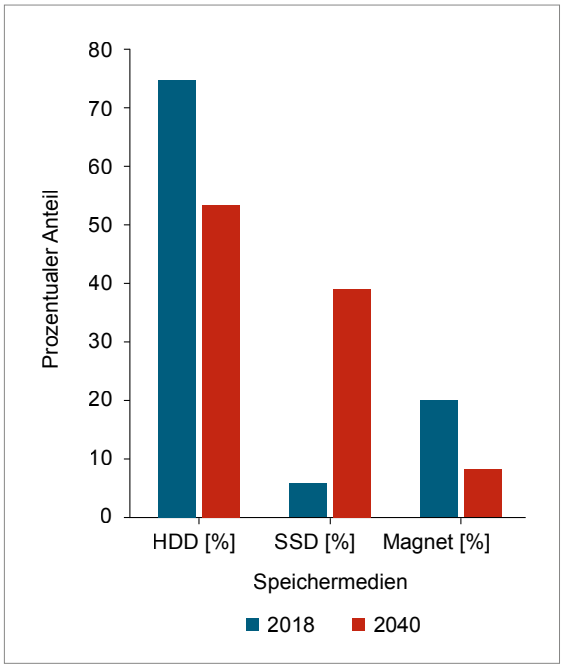


Abb. 3.101: Speichermedienverteilung 2018 und 2040 (Quelle: Eigene Darstellung)

In Abb. 3.102 ist die Gesamtverteilung der Speichermedien für 2018 und 2040 vergleichend dargestellt. Man sieht einen deutlichen Anstieg des Anteils, der auf SSD-Festplatten entfällt.

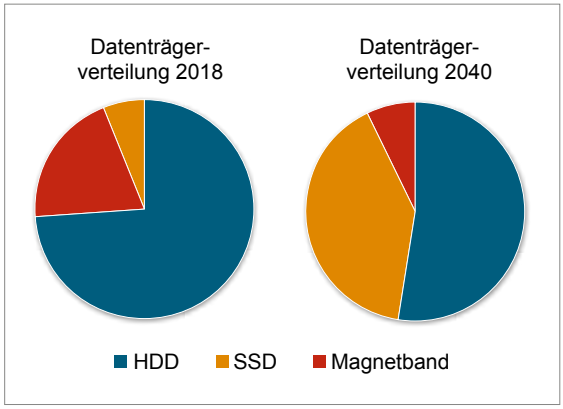


Abb. 3.102: Speichermedienverteilung gesamt 2018 und 2040 (Quelle: Eigene Darstellung)

Redundanzfaktor

Da Verlässlichkeit und Verfügbarkeit wichtige wirtschaftliche Faktoren für Rechenzentren sind, wird hier oft mit einer hohen Redundanz bei den Komponenten gearbeitet, um Ausfälle zu vermeiden. Als Redundanzfaktor wurde für alle drei Szenarien der Faktor 2 angenommen, da tatsächliche Daten zum Redundanzfaktor realer Rechenzentren schwer zugänglich sind. Die benötigten Ressourcen aus dem bisherigen Modell werden also verdoppelt. Im Bereich der möglichen Redundanzfaktoren stellt der Faktor 2 (oder 2N) einen defensiven Wert dar, der einen hohen zusätzlichen Ressourcenaufwand einkalkuliert. Diese Annahme wurde getroffen, da das Speichern der Daten eine der wichtigsten Elemente des Rechenzentrums sind und ein Ausfall eines Datenträgers schnell zu unumkehrbaren Datenverlust führen kann (Allen 2014). Da der Redundanzfaktor jedoch lediglich linear in das Modell eingeht (Verdopplung der Datenträger), bewirkt er keine deutliche Veränderung der Prognosen im Vergleich zu anderen Faktoren wie Datenmengenwachstum und Speicherkapazitätsanstieg, die exponentiell eingehen.

Gesamtszenarien

Aus den oben genannten Teilszenarien wurden am Ende drei Gesamtszenarien entwickelt, die im Folgenden zusammengefügt werden. Die Festplattenfaktoren und Redundanz bleiben für alle drei Szenarien gleich:

– **Ressourcenschonendstes Szenario:**
  - In diesem Szenario werden die wenigsten Ressourcen verbraucht, da durch geringes Datenmengenwachstum und hohe Speicherkapazitätsanstiege weniger Daten gespeichert werden müssen als in den anderen Szenarien.
  - Die globale Datenmenge in Rechenzentren wächst mit einer Rate von 32 % pro Jahr.
  - Speichermedien:
  - Für die HDD-Festplatten wird ein jährliches Wachstum von 35 % angenommen.
  - Für die SSD-Festplatten wird ein jährliches Wachstum um den Faktor 1,65 angenommen.
  - Für Magnetbänder wird die Technologie bis 2040 auf LTO-18 weiterentwickelt, dies entspricht einer Speichermenge pro Band von etwa 13 Petabyte.

– **Basisszenario:**
  - In diesem Szenario werden weniger Ressourcen als in Szenario 3, aber mehr als in Szenario 1 verbraucht.
  - Die globale Datenmenge in Rechenzentren wächst mit einer Rate von 39 % pro Jahr.
  - Speichermedien:
    Für die HDD-Festplatten wird ein jährliches Wachstum von 30 % angenommen.
    Für die SSD-Festplatten wird ein jährliches Wachstum um den Faktor 1,4 angenommen.
    Für Magnetbänder findet eine Weiterentwicklung auf LTO-14 statt, welches ca. 800 Terabyte Datenspeicherung pro Band ermöglicht.

– **Ressourcenintensivstes Szenario:**
  - In diesem Szenario werden die meisten Ressourcen verbraucht, da durch hohes Datenmengenwachstum und geringe Speicherkapazitätsanstiege mehr Daten gespeichert werden müssen als in den anderen Szenarien.
  - Die globale Datenmenge in Rechenzentren wächst mit einer Rate von 47 % pro Jahr.
  - Speichermedien:
    Für die HDD-Festplatten wird ein jährliches Wachstum von 10 % angenommen.
    Für die SSD-Festplatten wird ein jährliches Wachstum um den Faktor 1,2 angenommen.
    Für Magnetbänder endet die Weiterentwicklung bei LTO-13 mit knapp 400 Terabyte.

Diese Szenarien führen zu den Ergebnissen in Tab. 3.102. Wie zu erkennen ist, führen das exponenzielle Datenwachstum und das exponenzielle Wachstum der Speichermedienkapazitäten zu enormen Unterschieden in den Szenarien. So verringert sich die Anzahl Datenträger insgesamt beim ressourcenschonendsten Szenario sogar von 2018 auf 2040, was am angenommenen starken Kapazitätszuwachs der Datenträger liegt, während für das ressourcenintensivste Szenario ein enormer Anstieg an Datenträgern zu verzeichnen ist. Dieser Trend bildet sich auch bei den einzelnen Technologien ab. Den stärksten Anstieg verzeichnen SSD-Festplatten, gefolgt von HDD-Festplatten. Die Anzahl an Magnetbändern nimmt vergleichsweise moderat zu.

Tab. 3.102: Anzahl Speichermedien nach Szenarien aufgeteilt

Rohstoff	Aufkommen 2018			Prognose 2040		
	SSP1	SSP2	SSP5	SSP1	SSP2	SSP5
Datenträger (Anzahl in Mio., gerundet)	109	134	149	71	602	26.339
HDD (Anzahl in Mio., gerundet)	60	73	82	49	372	5.555
SSD (Anzahl in Mio., gerundet)	23	28	31	1,3	187	19.596
Magnetbänder (Anzahl in Mio., gerundet)	27	33	36	21	44	1.188

3.5.4.3 Foresight Rohstoffbedarf

HDD-Festplatten

Die folgenden Angaben wurden Ku (2018) entnommen: Um die kritischen Rohstoffe in HDDs zu untersuchen, ist es notwendig, sich verschiedene Komponenten der HDD-Festplatten zu betrachten. Bei HDD-Festplatten werden Daten auf einer dünnen, magnetischen Kobalt-Chrom-Platin (CoCrPt)-Schicht gespeichert. Des Weiteren besitzen HDD-Festplatten Magneten für den Schreib-/Lesevorgang, die zu Teilen aus Neodym bestehen. Gängig sind hierbei Neodym-Eisen-Bor-Magnete. In manchen Fällen wird Ruthenium für nichtmagnetische Separationsschichten zwischen Datenschichten oder in der Herstellung der Festplatten genutzt. Daraus ergeben sich die folgenden Spannbreiten für kritische Rohstoffe in HDD-Festplatten in Tonnen/Zettabyte:

- Kobalt (Co): 0,34 – 1,0 t/ZB
- Chrom (Cr): 0,03 – 0,09 t/ZB
- Platin (Pt): 0,18 – 0,55 t/ZB
- Ruthenium (Ru): 0,3 – 0,4 t/ZB
- Neodym (Nd): 342 – 480 t/ZB

Bis zum Jahr 2040 ist eine deutliche Effizienzsteigerung bei der Speicherkapazität der Hardware zu erwarten. Diese wurde anhand der historischen Steigerungen und der zukünftig erwarteten Festplattenkapazitäten szenariospezifisch berechnet. Für Neodym wird angenommen, dass daraus ein geringerer Verbrauch resultiert als 342 – 480 t/ZB, da weiterhin ein Lese-/Schreibkopf verbaut wird in Relation zur größer werdenden Festplattenkapazität (JM o. J.). Die Neodymbedarfe der Szenarien werden durch die erwartete Effizenzsteigerung geteilt. Für die anderen Rohstoffe wird angenommen, dass der Verbrauch korrelierend mit der zunehmenden Festplattenkapazität steigt. Daraus ergeben sich die in Tab. 3.103 aufgeführten Rohstoffbedarfe. Der Rohstoffbedarf steigt in fast allen Szenarien von 2018 auf 2040 deutlich an. Es ist erkennbar, dass die Abweichungen in den benötigten Mengen sowohl zwischen den Szenarien als auch zwischen den Minimal- und Maximalwerten, die angegeben wurden, relativ groß sind. Chrom wird selbst für das ressourcenintensivste Szenario nur in relativ kleinen Mengen benötigt, verglichen mit anderen betrachteten Rohstoffen. Es ist deutlich zu sehen, dass vor allem Neodym in großen Mengen durch die HDD-Festplattenproduktion verbraucht wird. Die Unterschiede zwischen Minimal- und Maximalwerten sind auch hier vergleichsweise gering. Der Anstieg des Neodymbedarfs von 2018 bis 2040 ist vor allem im ressourcenintensivsten Szenario erheblich – der prognostizierte jährliche Maximalbedarf liegt bei rund einem Drittel der heutigen Weltproduktion. Die Unterschiede zwischen den Szenarien sind ebenfalls deutlich. Im nachhaltigsten Szenario (SSP1) sinkt der jährliche Neodymbedarf bis 2040 auf rund ein Drittel des heutigen Verbrauchs (2040 Maximalwert).

Tab. 3.103: Rohstoffbedarf von HDDs nach Szenarien und Jahr in t

Rohstoff	SSP1 Nachhaltigkeit		SSP2 Mittelweg		SSP5 Fossiler Pfad	
	2018	2040	2018	2040	2018	2040
Kobalt, Min	0,10	37	0,12	142	0,14	500
Kobalt, Max	0,30	109	0,37	418	0,41	1.480
Chrom, Min	0,01	3,2	0,01	12	0,01	44
Chrom, Max	0,03	9,8	0,03	38	0,04	133
Platin, Min	0,05	20	0,07	75	0,07	266
Platin, Max	0,16	60	0,20	230	0,22	813
Ruthenium, Min	0,09	33	0,11	125	0,12	444
Ruthenium, Max	0,12	44	0,15	167	0,16	592
Neodym, Min	51	44	63	376	70	6.570
Neodym, Max	72	62	88	530	98	9.220

SSD-Festplatten

Die folgenden Angaben wurden Ku (2018) entnommen: Zur Untersuchung der kritischen Rohstoffe in SSDs ist die Grundstruktur der SSDs relevant. SSD-Festplatten sind Flashspeicher. Sie nutzen oft eine mehrschichtige NAND-Floating-Gate-Transistorstruktur. Die gängigste Architektur hierfür beinhaltet Silizium in Form von Siliziumnitrid und Siliziumoxid und wird SONOS genannt (Silizium-Oxid-Nitrid-Oxid-Silizium). Eine ebenfalls genutzte Alternative zu Floating-Gate-Strukturen sind TANOS-Materialsets, welche Tantal enthalten (Tantalnitrid-Aluminiumoxid-Nitrid-Oxid-Silizium) (Tan et al. 2008). Diese Alternative ist besser skalierbar und performanter.

Daraus ergeben sich die folgenden Rohstoffe in HDD-Festplatten in Tonnen/Zettabyte:

– Silizium (Si): 0,02 t/ZB
– Tantal (Ta): 0,6 t/ZB

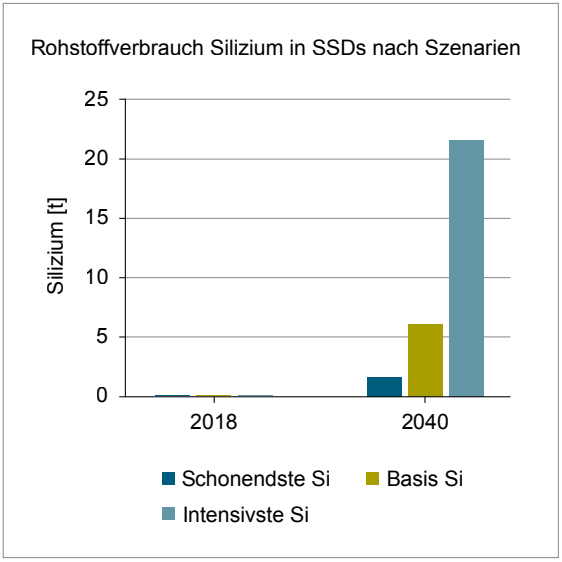


Abb. 3.103: Siliziumbedarf in Tonnen für SSDs nach Szenario und Jahr (Quelle: Eigene Darstellung)

Daraus ergeben sich folgende Rohstoffbedarfe für Silizium und Tantal (Tab. 3.104). Man sieht für beide Rohstoffe einen deutlichen Anstieg über die Szenarien und auch über die Zeitspanne. Es wird 2040 ein Vielfaches der Rohstoffe benötigt im Vergleich zu 2018. Abb. 3.103 zeigt dies exemplarisch für Silizium.

Magnetbänder

Die magnetische Schicht der Bänder kann potenziell kritische Rohstoffe enthalten. Bekannte magnetische Beschichtungen enthalten Eisen, Chrom, Strontium oder Barium. Die Schichtdicke der Oxid-Kristalle liegt bei weniger als 10 nm (Lipinski 2015). Bei einer gängigen Bandlänge von 960 m und Breite von 12,65 mm ergibt sich damit eine Größenordnung von maximal 0,7 g Metalloxid je Kassette. Es ist anhand der recherchierten Literaturdaten nicht möglich, eine Verteilung der genutzten Speicherbänder auf die verschiedenen eingesetzten, magnetischen Beschichtungen anzugeben. Damit ist eine Diversifizierung der Berechnung nicht umsetzbar. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch die mögliche Substitution der magnetischen Beschichtung durch ein anderes Material etwaige Knappheiten am Markt auch zukünftig beherrschbar sind. Bei Magnetbändern sind aus Ressourcenperspektive auch die Schreib- und Lesegeräte interessant. Die Literaturlage gestaltet sich hier schwierig, es konnten keine validen Werte für die Schreib- und Leseköpfe in Bandbibliotheken gefunden werden. Im Rahmen dieser Technologiesynopse wird angenommen, dass der Einsatz von Magnetbändern sich im Vergleich zu SSDs und HDDs tendenziell mildernd auf Rohstoffknappheiten auswirkt.

Zusammenführung

Die Unterscheidung in minimale und maximale Bedarfe in der Vorschau ergibt sich durch die

Tab. 3.104: Rohstoffbedarf von SSDs nach Szenarien und Jahr in t

Rohstoff	SSP1 Nachhaltigkeit		SSP2 Mittelweg		SSP5 Fossiler Pfad	
	2018	2040	2018	2040	2018	2040
Silizium	0,0005	1,6	0,0006	6,1	0,0006	21,6
Tantal	0,0136	47,8	0,0167	184	0,0186	650

Tab. 3.105: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelte Rohstoffbedarfe für Speichermedien in Rechenzentren in t

Rohstoff	Produktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040					
			SSP1 Nachhaltigkeit		SSP2 Mittelweg		SSP5 Fossiler Pfad	
			Min	Max	Min	Max	Min	Max
Kobalt	151.060 (B) 126.019 (R)	0,1	37	109	142	418	503	1.479
Chrom	27.000.000 (B)	0,02	3	10	13	38	44	133
Platin	190 (B)	0,1	20	60	75	230	266	813
Ruthenium	33[1] (R)	0,1	33	44	125	167	444	592
Neodym	23.900 (R)	180	44	62	376	528	6.570	9.220
Tantal	1.832 (B)	0,01	48		185		649	

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

[1] Quelle: JM 2020

angegebene Spannweite des Rohstoffbedarfs für SSDs und HDDs nach Ku (2018). Insbesondere Neodym weist einen starken Anstieg des Bedarfs auf. Jedoch steigen auch der Platin- und Tantalbedarf merklich an, so dass wesentliche Anteile der heutigen Produktion benötigt würden (Tantal) oder auch darüber hinaus (Platin). Der Neodymbedarf erreicht für SSP5 im Jahr 2040 etwa ein Drittel der heutigen Weltproduktion.

Rechenzentren sind hoch diverse Technologiecluster, welche je nach Anwendungsfall anders ausgestaltet sind. Hinzu kommen Geheimhaltungsrichtlinien aufgrund sensibler Daten. Die Einschätzung der tatsächlich auf dem Markt befindlichen Hardware und ihrer Ausnutzung gestaltet sich deshalb schwierig. Je nach Anwendungsfall des Rechenzentrums variiert die Zusammensetzung der genutzten Speichermedien, was wiederum den Rohstoffbedarf beeinflusst. Auch die Datenmengen sind sehr veränderbar durch Aspekte wie neue digitale Trends, neue Datenkomprimierungen, Codierung, Sicherheitsrichtlinien und Standards. All diese Unsicherheiten begründen weit auseinander divergierende Ergebnisse. Konsequente Rückführung von Rohstoffen bei Lebensende und die Aufarbeitung gebrauchter Komponenten können ein wesentlicher Hebel für die Versorgungssicherung sein. Auch durch politische Vorgaben kann sich der tatsächliche Rohstoffbedarf im Bereich der Rechenzentren spürbar ändern.

3.5.4.4 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Rechenzentren sind große Bestandteile der IT-Infrastruktur und haben keinen direkten physikalischen Bezug zum Endkunden. Es ist zu erwarten, dass bei Um- oder Rückbauten der Technikspähre die gesetzlichen Vorgaben für Entsorgungswege vollständig beachtet werden. Die Recyclingquoten können tendenziell höher liegen als die Durchschnittswerte für europäische Abfälle, da die sortenreine Sammlung größerer Mengen umsetzbar ist. Datenträger stellen hochsensible Abfälle dar; für die zuverlässige Löschung der Daten wird entsprechend Aufwand getrieben. Das physikalische Zerstören der Datenträger ist hierbei ein zuverlässiger Weg. Jedoch ist damit eine Weiterverwendung der Speichermedien nicht mehr möglich. Es gibt auch in diesem Bereich spezialisierte Unternehmen, die gebrauchte Komponenten aus Rechenzentren (wie Speichermedien, Racks und Server) aufarbeiten und Wartungsservice über die üblichen Garantieverträge hinaus anbieten (Schlücker 2016).

Die Lebensdauer einzelner Bestandteile im Rechenzentrum ist schwer abschätzbar, da etwaige Umbauten auch immer fortschrittsgetrieben sind, um dem aktuellen Stand der Technik zu entsprechen und die Zuverlässigkeit zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein soll (preventive maintenance). Es ist prinzipiell denkbar, dass Geräte

oder Speichermedien ersetzt werden, bevor sie technisch überholt oder defekt sind. Hier kann sich ein Hebel für die Steigerung der Ressourceneffizienz ergeben. Energieeffizienz und Ressourceneffizienz können sich in diesem Fall gegenüberstehen, wenn beispielsweise neue Prozessoren deutlich niedrigere Energiebedarfe haben.

Im Rahmen dieses Kapitels wurde der Fokus auf die Speichermedien in Rechenzentren gelegt. Dabei haben sich HDDs, SSDs und Magnetbänder als wesentliche und beständig eingesetzte Technik herauskristallisiert. Eine Substitution einzelner kritischer Rohstoffe würden einen Technologiewandel erfordern. Es ist folglich damit zu rechnen, dass die ermittelten Rohstoffbedarfe in der Zukunft nur schwer zu ersetzen sind.

3.5.5 Induktive Übertragung elektrischer Energie

3.5.5.1 Technologiebeschreibung

Die Übertragung elektrischer Energie erfolgt heute meist über Kabel. Diese konduktive Energieübertragung kann über eine fest verdrahtete Verbindung, wie bei einem Backofen, über ein Kabel mit Stecker, wie bei einem Kühlschrank, oder über Kontakte, wie bei Elektrowerkzeugen, hergestellt werden. Aber auch ohne Kabel ist es möglich, elektrische Energie zu übertragen, sei es elektromagnetisch, optisch, kapazitiv oder induktiv. Elektromagnetisch und optisch können nur kleine Leistungen ausgetauscht werden. Elektromagnetische Wellen werden beispielsweise genutzt, um Daten zwischen einem RFID-Transponder und dem Lesegerät auszutauschen. Die kapazitive Übertragung ist energetisch ineffizient, weil sie mit hohen Streuverlusten behaftet ist. Sie wird zur Datenübertragung genutzt. Die induktive Übertragung ist unter den berührungslosen Verfahren die Methode der Wahl für den Transfer mittlerer und hoher elektrischer Leistung. Die Technik, bei der elektrische Leistung von einer Primär- zu einer Sekundärspule übertragen wird, besitzt ein breites Einsatzspektrum und hat sich in einigen Anwendungen, wie dem Laden von elektrischen Zahnbürsten oder von Herzschrittmachern sowie bei selbstfahrende Unterflurfahrzeuge in industriellen Produktionshallen bereits durchgesetzt.

Die berührungslose Übertragung elektrischer Energie beruht auf dem physikalischen Prinzip der elektromagnetischen Induktion, das 1831 Michael Faraday entdeckt hat. Wird eine Schleife aus elektrisch leitendem Material durch ein Magnetfeld mit dem Fluss Φ bewegt, so wird in der Leiterschleife die Spannung U induziert, die an den offenen Enden der Leiterschleife gemessen werden kann. Die induzierte Spannung ist proportional zu der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses:

$$U = \frac{d\Phi}{dt}$$

Dabei ist es unerheblich, ob sich der magnetische Fluss in einer ruhenden Schleife zeitlich ändert, oder ob die Schleife durch ein ortsfestes Magnetfeld bewegt wird.

Hans Christian Ørstedt erkannte 1820, dass um einen stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld entsteht. Wird der Draht, wie in Abb. 3.104 gezeigt, zu einer Spule geformt, entsteht bei Stromfluss ein rotationssymmetrisches magnetisches Feld um die Spulenachse. Auf der Kombination dieses Phänomens mit dem faradayschen Induktionsprinzip basiert die induktive Energieübertragung. Wenn die Primärspule mit einem Wechselstrom durchflossen wird, wird ein magnetisches Wechselfeld erzeugt. Treten Teile eben dieses primären Magnetfelds durch eine zweite Spule aus elektrisch leitendem Material, wird in dieser Sekundärspule eine elektrische Spannung induziert.

Beim Anschluss eines Verbrauchers an die Sekundärspule mit dem ohmschen Widerstand R_2 fließt der Strom $I_2 = U_2/R_2$ und es wird die Leistung $P_2 = I_2 \cdot U_2$ übertragen, welche beispielsweise für das Laden eines Akkus genutzt werden kann. Die energetische Güte der Übertragung wird durch den Wirkungsgrad charakterisiert, der das Verhältnis von zugeführter zu nutzbarer Energie beschreibt. Dieser hängt von einer Reihe an Faktoren ab. Erstes Ziel ist es, einen möglichst großen Teil des primären Magnetfelds mit der Sekundärspule einzufangen und somit die Streuverluste gering zu halten. Dies wird erreicht, indem die Spulen ohne wesentlichen lateralen Versatz Δx übereinander positioniert werden. Der Abstand der Spulen voneinander (Luftspalt z) beeinflusst die Streuverluste erheblich. Durch Abschirmungen, beispielsweise mit Ferritblechen unterhalb

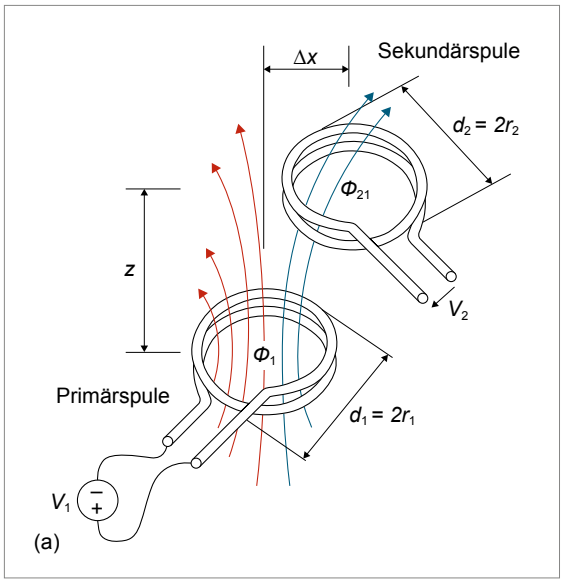


Abb. 3.104: Induktionsprinzip (Quelle: Eigene Darstellung nach Wambsganss & Parspour 2010)

der Spulen, lassen sich die Streuverluste reduzieren. Durch die Erhöhung der Frequenz des primären Wechselfelds lässt sich das Magnetfeld stärker bündeln und der Wirkungsgrad steigern.

In praktischen Anwendungen wird mit Übertragungsfrequenzen von 20 – 400 kHz gearbeitet (IFAK 2011). Um eine internationale und herstellerübergreifende Interoperabilität zu erreichen, wird die Übertragungsfrequenz für Elektrofahrzeuge in der Norm ISO 19363 auf 85 kHz festgelegt. Der Gesamtwirkungsgrad kontaktloser Ladesysteme wird von WiTricity (2018) mit 90 – 93 % angegeben, und derzeit werden Übertragungsleistungen von bis zu 11 kW für Pkw erreicht (WiTricity 2018). Induktive Übertragungssysteme können künftig beinahe ebenso effizient wie konduktive Systeme ausgeführt werden, die typischerweise einen Wirkungsgrad von 97 % erreichen (IFAK 2011). Neueren Forschungsergebnissen zu Folge, können induktive Ladesysteme ebenso wie konduktive Systeme bidirektional genutzt werden. Das bedeutet, es besteht die Möglichkeit der Rückspeisung von Energie von dem Fahrzeug in das Stromnetz, was zur Stabilisierung des Netzes beitragen kann (Tachikawa et al. 2018).

Die induktive Energieübertragung erfolgt aus den genannten Gründen in der Praxis nicht mit der Netzfrequenz von 50 Hz, sondern wird mit einem Umrichter (Inverter) auf die Übertragungsfrequenz gesteigert. Die leistungselektronischen Komponenten der Schaltung innerhalb des Gesamtsystems zeigt Abb. 3.105. Die Primärseite (links im Bild) entspricht im Falle des Ladens von Elektrofahrzeugen der Ladestation, während sich die Sekundärseite (rechts im Bild) im Fahrzeug befindet.

Die Chancen der kabellosen Energieübertragung wurden vor wenigen Jahren noch eher pessimistisch eingeschätzt (Schraven et al. 2010). Die Technik hat in den letzten Jahren große Entwicklungsfortschritte gemacht und wird heute als Zukunftstechnologie gesehen, die in vielen Anwendungen die konventionelle konduktive Energieübertragung ablösen kann. Der heute erreichbare Leistungsbereich liegt zwischen weni-

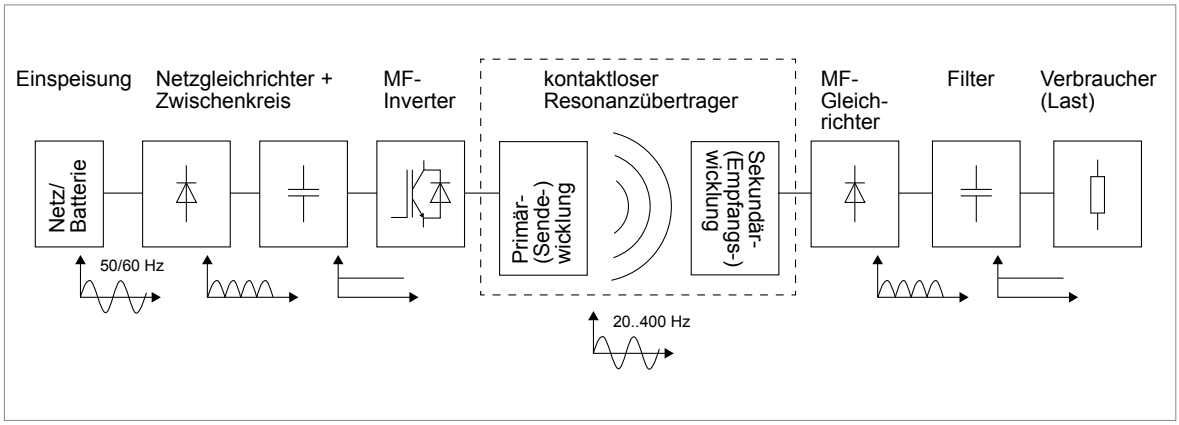


Abb. 3.105: Komponenten eines kabellosen Systems zur Übertragung elektrischer Energie (Quelle: IFAK 2011)

gen Watt bis zu einigen 100 kW. Eine Untersuchung des DLR in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen kommt zu dem Ergebnis, dass es technisch machbar ist, Hochgeschwindigkeitszüge mit in den Oberbau integrierten Induktionsstrecken oberleitungsfrei zu betreiben. Dabei müssen, um die maximale Betriebsgeschwindigkeit von 400 km/h zu erreichen, 25 MW elektrische Leistung induktiv übertragen werden (DLR 2014). Auch Smartphones und weitere elektronische Endgeräte werden zunehmend mit induktiven Ladesystemen ausgestattet.

Dem induktiven Laden von Elektrofahrzeugen wird in der Zukunft eine steigende Bedeutung zukommen. Dies wird durch die Tatsache bekräftigt, dass bereits jeder OEM der Automobilindustrie ein Programm zur Untersuchung oder Entwicklung von kontaktlosem Laden betreibt (Tachikawa et al. 2018). Diese Anwendung soll im Folgenden beispielhaft für das große Spektrum möglicher Einsatzfelder näher betrachtet werden.

Das induktive Laden von Elektrofahrzeugen kann in zwei unterschiedliche Systemen unterschieden werden, das statische und das dynamische Laden. Beim statischen Laden erfolgt die Energieübertragung, während sich das Fahrzeug in ruhendem Zustand befindet, beispielsweise beim Parken im privaten oder auch öffentlichen Raum. Bei dem dynamischen Laden wird das Fahrzeug während des Fahrens geladen, indem in der Fahrbahn Primärspulen installiert werden. Zum statischen induktiven Laden gibt es bereits zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte. So ist beispielsweise von BMW bereits ein induktives Ladesystem für Endnutzer erhältlich. Das für das Plug-In Hybridfahrzeug 530e konzipierte Ladesystem erreicht eine maximale Ladeleistung von 3,7 kW und einen Wirkungsgrad von 85 % (Oleg Satanovsky 2019).

Auch das dynamische induktive Laden wurde bereits erfolgreich getestet. Auf einer 20 m langen Strecke wurde dabei eine Leistung von 8,5 kW mit einem Wirkungsgrad von 91 % übertragen (Werwitzke 2019). Diese Anwendung der Technologie wirkt niedrigen Reichweiten von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen entgegen. Demgegenüber steht jedoch ein geschätzter Kostenaufwand von 460.000 USD bis 760.000 USD pro Kilometer für die Installation der Ladespulen in die Fahrbahn, wodurch in naher Zukunft eine breite Durchsetzung des dynamischen induktiven Ladens von Elektrofahrzeugen nicht zu erwarten ist (Suh & Cho 2017). Daher werden im Folgenden ausschließlich statische induktive Ladesysteme betrachtet.

Die Vorteile des berührungslosen Ladens liegen auf der Hand. Es entfallen die Ladesäulen, sowie das Ladekabel zur Verbindung des Fahrzeugs mit dem Stromnetz. Der manuelle Vorgang mit dem Ladekabel entfällt. Das führt zu einer deutlichen Komfortsteigerung elektrischer Fahrzeuge, auch im Vergleich zu konventionellen verbrennungsmotorbetriebenen Fahrzeugen, welche regelmäßig mit Treibstoff betankt werden müssen. Die Primärspule kann unauffällig in Stellflächen integriert werden. Somit sinkt auch die Gefahr, dass die Ladekabel oder -station ein Gegenstand des Vandalismus wird. Das Sekundärsystem im Fahrzeug wird mit dem Parkassistenten automatisch zentimetergenau über dem Primärsystem positioniert. Es arbeitet praktisch wartungsfrei, ohne Verschleiß von Steckern oder Kabel, deren regemäßige Erneuerung ein wesentlicher Kostenfaktor bei Ladesäulen ist. Die hochfrequenten elektromagnetischen Streufelder müssen allerdings durch Ferrite abgeschirmt werden. Zudem wird gerade bei hohen Ladeleistungen eine Fremdobjekterkennung benötigt. Diese stellt sicher, dass sich keine elektrisch leitenden Objekte zwischen der Primär- und Sekundärspule befinden, da sich diese durch Wirbelstromverluste erhitzen. Die Gefährdung von Lebendobjekten wird ebenfalls durch eine Überwachung des Luftspalts umgesetzt. Eine Schutzschaltung unterbricht notfalls die Energieübertragung. Durch einen Datenaustausch via WLAN zwischen Fahrzeug und Ladestation wird sichergestellt, dass das Primärfeld erst eingeschaltet wird, sobald die Sekundärspule ausreichend positioniert ist. So wird die Entstehung eines offenen magnetischen Kreises vermieden.

3.5.5.2 Rohstoffinhalt

Um die ohmschen Verluste gering zu halten und gute Übertragungswirkungsgrade zu erzielen, werden die stromführenden Teile bei konduktiven und induktiven Ladesystemen aus Kupferlitzen ausgeführt. Die Kupferlitzen bestehen aus vielen Einzeldrähten aus Kupfer, welche zur Effizienzsteigerung zueinander isoliert sind. Der Großteil

des Kupfers wird für die Primär- und Sekundärspule benötigt. Für die Abschirmung des Magnetfelds werden zudem Ferrite eingesetzt. In den signal- und leistungselektronischen Komponenten findet sich ein Großteil der Elemente des Periodensystems, allerdings in unkritischen Mengen.

Bei den konduktiven Übertragungssystemen findet sich Kupfer vor allem im Ladekabel und der Verdrahtung von Ladestation und Fahrzeug. Zudem wird für das Gehäuse der Ladestation Kunststoff und Stahl benötigt. Auch in konduktiven Ladesystemen werden in geringen Mengen viele weitere Rohstoffe für die Leistungselektronik eingesetzt. Als mengenmäßig kritischer Werkstoff soll Kupfer betrachtet werden.

Im Projekt „Begleitforschung zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen“ wurden eine Reihe von geförderten Entwicklungsvorhaben zum induktiven Laden ausgewertet, Testsysteme nachgebaut und in empirischen Erhebungen der Stand der Entwicklung und die Zukunftsperspektiven erhoben (IFAK 2011). Ein stationäres induktives Ladesystem mit 3,6 kW Leistung wurde nachgebaut und das notwendige Kupfergewicht der beiden Spulen mit zusammen 1,3 kg bestimmt. Ein 5-adriges, 4 m langes Normladekabel einer konduktiven Ladestation hat einen Kupfergehalt von 1,2 kg. Hinzu kommt das Gewicht der nicht näher untersuchten Kupferverdrahtung in den Ladestationen selbst. Das Institut für Automation und Kommunikation kommt zu dem Schluss, dass der Kupferanteil beider Ladesysteme in etwa vergleichbar ist (IFAK 2011). Der Kupferbedarf für induktive Ladesysteme steigt etwa proportional mit der maximal übertragbaren Leistung. Es wird jedoch erwartet, dass induktives Laden insbesondere im niedrigen und mittleren Ladeleistungsbereich zum Einsatz kommt. Durch hohe Standzeiten von Pkw kann durch eine flächendeckend ausgebaute induktive Ladeinfrastruktur auch mit niedriger Ladeleistung gewährleistet werden, dass ein Fahrzeug einen ausreichenden Ladestand haben.

3.5.5.3 Foresight industrielle Nutzung

Die künftige Verbreitung stationärer induktiver Ladesysteme wird wesentlich von deren Kosten bestimmt. Sie stehen mit konventionellen konduktiven Ladesystemen im Wettbewerb. Das induktive Ladesystem für das Plug-In Fahrzeug BMW 530e ist in Deutschland als Sonderausstattung bereits erhältlich. Die Kosten der Sekundärseite im Fahrzeug belaufen sich auf 890 €. Zusätzliche Kosten von 2.315 € entstehen durch den Kauf und die Installation der Primärseite, also des infrastrukturseitigen Ladepads (Schaal 2019). Die Gesamtzusatzkosten von 3.205 € lassen vermuten, dass induktives Laden in näherer Zukunft im Pkw Bereich auf das Premiumsegment beschränkt bleiben wird. Jedoch ist mit steigender Marktdurchdringung dieser Technologie auch mit einer deutlichen Senkung der Kosten durch eine breitere Verteilung der Forschungs- und Entwicklungskosten sowie durch effizientere Fertigung in hoher Stückzahl zu rechnen.

Ein Vergleich der Gesamtsystemkosten des konduktiven und induktiven Ladens von Elektrobussen wurde von Bi et al. (2017) in einer Lebenszykluskosten-Analyse durchgeführt. In der genannten Studie wurde angenommen, dass Linienbusse regelmäßig an Haltestellen statisch kontaktlos

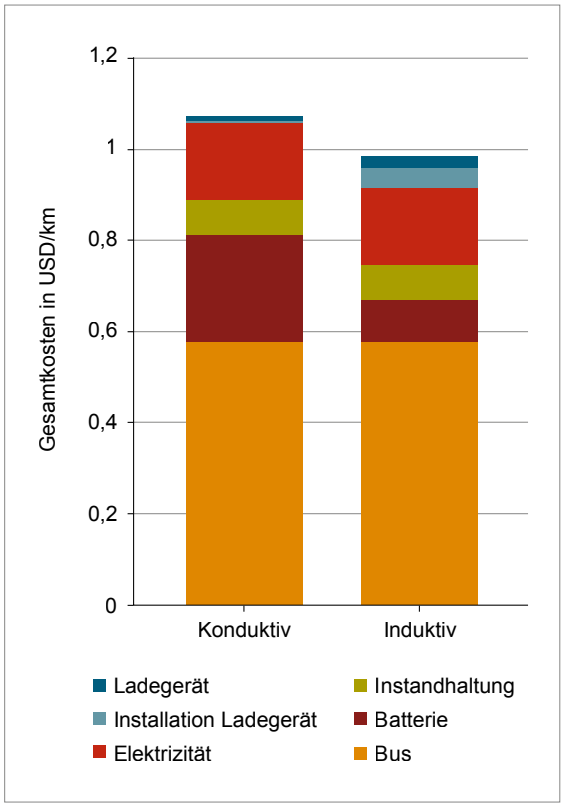


Abb. 3.106: Gesamtkostenvergleich von Bussen mit konduktivem und induktivem Ladegerät pro gefahrenem Kilometer (Quelle: Bi et al. 2017)

laden, während konduktive Busse lediglich auf dem Betriebsgelände geladen werden. Daraus resultiert, dass die Batterie eines induktiv ladenden Busses kleiner ausgelegt werden kann. Demgegenüber steht ein deutlicher Anstieg der Investitionskosten für die Infrastruktur der Ladestationen. Die Energieeinsparung des kontaktlos ladenden Busses durch Gewichtseinsparung wird durch einen niedrigeren Wirkungsgrad beim Laden aufgehoben, sodass sich dieser nahezu gleicht. Die niedrigeren Batteriekosten führen der genannten Studie zufolge dennoch dazu, dass die Gesamtkosten über die Lebensdauer des kontaktlosen Ladens im Falle von Bussen niedriger sind, als bei dem kabelgebundenen Laden. Eine vergleichende Übersicht der Kosten der beiden Technologien ist Abb. 3.106 zu entnehmen.

3.5.5.4 Foresight Rohstoffbedarf

Für die Neuzulassungen von Elektrofahrzeugen werden die Szenarien SSP1, SSP2 und SSP5 des IIASA herangezogen, welche weitergehend im Kapitel 1.3 in den Mobilitätsszenarien beschrieben werden. Dabei werden sowohl vollelektrische als auch Plug-in-Hybridfahrzeuge mit einbezogen, da diese ebenso Ladesysteme benötigen. In den Szenarien für induktives bzw. konduktives Laden wird davon ausgegangen, dass jeweils ausschließlich die genannte Ladetechnologie eingesetzt wird, sodass der Unterschied der Rohstoffbedarfe deutlich wird. Nach Angaben von DENA (2020) ist das Ziel der Bundesregierung, dass pro acht bis neun Elektrofahrzeuge ein Ladepunkt installiert wird. Dieses Verhältnis wird im Folgenden herangezogen, um die Anzahl der neu installierten Ladepunkte von den Zulassungszahlen der Elektrofahrzeuge abzuleiten. So werden 2040 nach den Szenarien SSP1, SSP2 und SSP5 weltweit jeweils 8,9 Mio., 6,3 Mio. oder 2,4 Mio. neue Ladesysteme installiert.

Der gesamte Kupferbedarf für ein induktives Ladesystem teilt sich meist gleichmäßig auf das Fahrzeug und die Ladestation auf. Es wird davon ausgegangen, dass die induktiven Ladesysteme eine Leistung von 3,6 kW übertragen. Daher wird für beide Seiten ein Kupferbedarf von 0,65 kg angenommen. Im Szenario des induktiven Ladens wird davon ausgegangen, dass jedes Elektrofahrzeug mit der Sekundärseite eines induktiven Ladesystems ausgestattet ist. Für das konduktive Laden wird angenommen, dass der gesamte Kupferbedarf auf die Ladestation fällt. Der Kupferbedarf für die beiden unterschiedlichen Systeme und die globale Kupferproduktion 2018 wird in Tab. 3.106 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass im Referenzjahr 2018 noch kein Kupfer für induktive Ladesysteme benötigt wird, da sich diese Technologie zu dem Zeitpunkt noch nicht auf dem Markt etabliert hat.

Der jährliche Kupferbedarf induktiver Ladesysteme übersteigt den Kupferbedarf konduktiver Ladesysteme um etwa den Faktor 5, da in jedem Fahrzeug eine Ladespule mitgeführt wird. Das gleiche gilt für das Kupferinventar, sodass sich das konduktive Ladesystem als deutlich ressourceneffizienter herausstellt. Gegenzurechnen ist jedoch der Verschleiß von Ladekabel und Ladesteckern, die bei konduktiven Ladesystemen regelmäßig erneuert werden müssen. Das induktive Ladesystem ist dagegen praktisch wartungsfrei und gegen Vandalismus unempfindlich. Es benötigt weder Stahl noch Kunststoffe für ein Tanksäulengehäuse.

Tab. 3.106: Globale Produktion (BGR 2021) und ermittelter Kupferbedarf von Ladesystemen für Elektrofahrzeuge in t

Ladesystem	Kupferproduktion 2018	Bedarf 2018	Bedarfsvorschau 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Induktiv	20.591.000 (B) 24.137.000 (R)	0	54.960	38.760	14.990
Konduktiv		195	10.680	7.530	2.910

B: Bergwerksförderung (t Inh.)
R: Raffinadeproduktion (t Inh.)

3.5.5.5 Recycling, Ressourceneffizienz und Substitution

Kupfer hat nach Silber die höchste elektrische Leitfähigkeit. Die Realisierung von Leiterstrecken für die Energieübertragung aus Silber stellt aus Kostengründen keine Alternative dar. Grundsätzlich könnte als Leiterwerkstoff auch Aluminium eingesetzt werden, wenn bestimmte technische Besonderheiten von Aluminium beachtet werden (Dittrich et al. 2018). Dies brächte bei Betrachtung von Ressourceneffizienz, Gewicht und Kosten Vorteile. Aufgrund der niedrigeren Leitfähigkeit von Aluminiumleitern ist jedoch nicht zu erwarten, dass sich diese Substitution in breiter Front durchsetzt.

Kupfer aus den Ladesystemen ist sehr gut zu recyceln. Sekundärkupfer ist nach der Elektrolysestufe qualitativ nicht vom Primärkupfer zu unterscheiden. Für die Komponenten aus Stahl und Kunststoffen gibt es gut funktionierende Entsorgungs- und Recyclingwege. Problematisch ist das Recycling der Leistungs- und Signalelektronik. Trotz großer Fortschritte ist die Rohstoffrückgewinnung beim Elektronikschrottrecycling aus wirtschaftlichen und technischen Gründen unbefriedigend. Der Großteil der Inhaltsstoffe geht dabei dem Wirtschaftskreislauf verloren.

4 Rohstoffsynopsen

4.1 Gallium

Gallium steht in der dritten Hauptgruppe, der Borgruppe, des Periodensystems der Elemente direkt unter Aluminium. Es wurde 1875 entdeckt, doch gewann es erst ab 1970 mit der Entdeckung seiner Nutzbarkeit für die Herstellung von Halbleitern an industrieller Bedeutung (Greber 2012).

4.1.1 Eigenschaften

Gallium ist ein weiches, silbrigblau glänzendes Metall. Mit einem relativ niedrigen Schmelzpunkt von 29,8 °C und einem sehr hohen Siedepunkt von 2.403 °C hat Gallium das größte Flüssigkeitsintervall aller Metalle (Tab. 4.1). Einige Galliumlegierungen, z. B. die Legierungen mit Aluminium, bilden sich bei normalen Temperaturen. Diese Eigenschaften werden industriell genutzt, erschweren jedoch die Lagerung und den Transport von Gallium, die eine Kühlung und spezielle Verpackung erfordern um die Reinheit des Metalls und die Integrität der Transportmittel zu sichern (Quadbeck-Seeger 2007; Greber 2012; Liedtke & Huy 2018).

Tab. 4.1: Eigenschaften von Gallium

Dichte	5,9 g/cm^3
Schmelzpunkt	29,8 °C
Elektrische Leitfähigkeit	7,1 · 10^6 S/m
Wärmeleitfähigkeit	29 W/(m · K)

4.1.2 Vorkommen und Produktion

Gallium gehört nicht zu den seltenen Elementen, doch ist es in der Erdkruste selten in höheren Konzentrationen vorzufinden. Unter den Mineralen, die Gallium enthalten, weist das sehr seltene Kupfer-Gallium-Sulfid Gallit mit bis zu 35,3 % den höchsten Galliumgehalt auf. Der Galliumanteil im westafrikanischen Germanit liegt zwischen 0,1 und 1 %. In einer Vielzahl anderer Minerale, u. a. Bauxit, Sphalerit und Anthrazit, ist Gallium nur als Spurenelement enthalten. So hat z. B. Bauxit einen durchschnittlichen Galliumgehalt von ca. 50 ppm. Auch Flugaschen können Spuren von Gallium enthalten (Römpp o. J; Greber 2012; Rongguo et al. 2016; Liedtke & Huy 2018).

Gallium wird als Nebenprodukt der Aluminiumproduktion (aus Bauxit) und zu einem deutlich kleineren Teil als Nebenprodukt der Zinkproduktion

Tab. 4.2: Versorgungssituation bei Gallium 2010, 2013 und 2018 (Quellen: BGR 2021, USGS 2011a, USGS 2014a, USGS 2019a, USGS 2020c)

	2010	2013	2018
Primärproduktion [t Inh.]	182	369	413
Raffinadeproduktion [t Inh.]	161	200	205
Reserven [t Inh.]	–	–	–
Ressourcen [t Inh]	> 1.000.000	> 1.000.000	> 1.000.000
Größte Produktionsländer	Deutschl. 49 %[1] Kasachst. 26 %[1] Russland 18 %[1]	China 81 % Deutschl. 10 % Ukraine 4 %	China 96 % Russland 2 % Ukraine 1 %
Größte Raffinadeländer	–	–	–
Länderkonzentration Primärproduktion[2]	–	6.747	9.244
Länderkonzentration Raffinade	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Primärproduktion[2]	–	–0,30	–0,31
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade	–	–	–
Preis[3] [USD/kg]	469,15	279,41	191,82

[1] *Daten für das Jahr 2011*
[2] *zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[3] *min. 99,99 % fob China*

(z. B. aus Sphalerit) gewonnen. Insbesondere ist es in dem in der Aluminiumproduktion anfallenden Natriumaluminat und in Rückständen, die in Zinkhütten anfallen, enthalten (Liedtke & Huy 2018; USGS 2020c).

Chinas Anteil an der weltweiten Primärgalliumproduktionskapazität beträgt ca. 80 %. Geschätzt wurden 97 % des 2019 weltweit produzierten Primärgalliums in China hergestellt. Die wichtigsten Produzenten von raffiniertem (hoch-reinem) Gallium sind China, Japan, Slowakei und USA. Weltweit sind umfangreiche Galliumressourcen in Bauxit und Zinkerzen gebunden. So belaufen sich allein die in Bauxit enthaltenen Galliumressourcen auf mehr als eine Million Tonnen. Allerdings sind weniger als 10 % der in Bauxit und Zinkerzen gebundenen Galliumressourcen potenziell nutzbar. Daneben sind große Reserven (im niedrigen Konzentrationsbereich) in Phosphaterzen und verschiedenen Kohlesorten enthalten. Eine Schätzung der derzeitigen Galliumreserven ist derzeit nicht verfügbar (Ronggu et al. 2016; USGS 2020c). Die Versorgungssituation bei Gallium ist in Tab. 4.2 dargestellt.

4.1.3 Verwendungen

Entsprechend den Eigenschaften, die es ab 1970 in der Halbleiterproduktion industriell bedeutend machten, stellen die integrierten Schaltungen den heute wichtigsten Anwendungsbereich von Gallium dar. Das große Flüssigkeitsinterwall von Gallium wird für den Bau von Spezialthermometern genutzt. Die Anwendungsbereiche von Gallium in der EU sind in Tab. 4.3 zusammengefasst.

Tab. 4.3: Verwendung von Gallium in der EU (Quelle: Europäische Kommission 2020a)

Anwendungsbereich	2012 – 2016 [%]
Integrierte Schaltungen	70
LED	25
Solartechnologien	5
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten galliumhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

– Radiofrequenz-Mikrochips
– Dünnschicht-Photovoltaik

4.1.4 Galliumbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.4 und Abb. 4.1 geschätzt worden. Der Bedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2018 bei ca. 11 % der Raffinadeproduktion von Gallium. Die Menge Gallium, die für die untersuchten Zukunftstechnologien im Jahr 2040 benötigt wird, kann je nach Szenario auf bis zu 22 % der Raffinadeproduktion des Jahres 2018 anwachsen.

Tab. 4.4: Galliumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Optoelektronik/Photonik	1	2	2	2
Radiofrequenz-Mikrochips	38	60	74	90
Dünnschicht-Photovoltaik	5	26	3	0
Bedarfssumme	**44**	**88**	**79**	**92**
Bedarf / Primärproduktion 2018	6 %	12 %	11 %	13 %
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	11 %	21 %	19 %	22 %

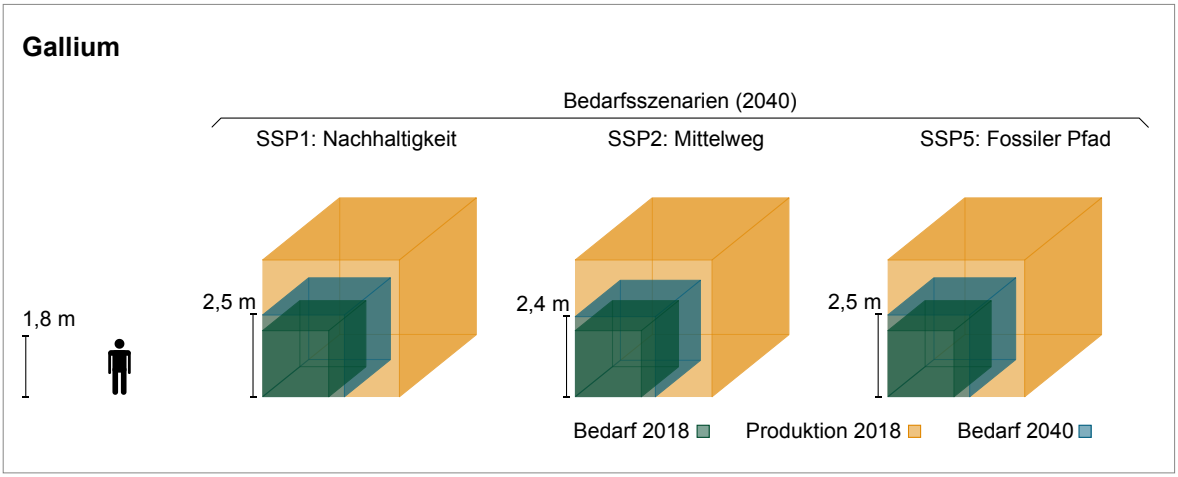


Abb. 4.1: Primärproduktion 2018 und Bedarf von Gallium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.2 Germanium

Germanium steht in der vierten Hauptgruppe, der Kohlenstoffgruppe, des Periodensystems der Elemente unterhalb von Silizium. Es wurde 1886 zum ersten Mal isoliert und gewann ab 1947 an industrieller Bedeutung mit dem Einsatz in der Transistorproduktion (Scoyer et al. 2012).

4.2.1 Eigenschaften

Germanium ist ein grauweißes, metallisch glänzendes Halbmetall. Es weist Halbleitereigenschaften auf und ist für Infrarotlicht durchlässig (Tab. 4.5). Allgemein sind seine physikalischen Eigenschaften stark von der Temperatur abhängig. Germaniumkristalle sind anfällig für thermische Schocks. Für die Endanwendung wird Germanium u. a. in Form von verschiedenen Chemikalien eingesetzt, deren Lagerung und Transport aufgrund ihrer z. T. ätzenden Eigenschaften (wie im Fall von Germaniumtetrachlorid) und hohen Qualitätsanforderungen in den vorgesehenen Anwendungsbereichen mit relativ hohen Verpackungskosten verbunden sein können (Wagner 1958; Scoyer et al. 2012).

Tab. 4.5: Eigenschaften von Germanium

Dichte	5,3 g/cm³
Schmelzpunkt	938,3 °C
Elektrische Leitfähigkeit	2 · 10³ S/m
Wärmeleitfähigkeit	60 W/(m · K)

4.2.2 Vorkommen und Produktion

Germanium ist ein relativ seltenes Element und ist zudem dispers in der Erdkruste verteilt. Zu den Mineralen mit relativ hohen Germaniumanteilen gehören Stottit (ca. 29 %), Schaurteit (ca. 14 %), Briartit (13 – 17 %), Germanit (5 – 10 %) und Renierit (6,3 – 7,7 %). Germaniumanreicherungen finden sich in bestimmten Zink- und Zink-Blei-Kupfer-Sulfidlagerstätten sowie gebunden an die organische Substanz in Kohlen und Ligniten (Römpp o. J; Scoyer et al. 2012; USGS 2020d).

Während Germanit und Renierit früher zu den Germaniumhauptquellen zählten, wird Germanium heute hauptsächlich als Beiprodukt bei der Produktion anderer Metalle, insbesodere Zink, gewonnen. Daneben werden auch Flugaschen aus der Kohleverbrennung zur Gewinnung von Germanium genutzt (Elsner et al. 2010; Scoyer et al. 2012; USGS 2017b).

Genaue Daten zur Primärproduktion von Germanium sind nicht verfügbar, da die wenigen Hersteller (insbesondere USA) ihre Daten vertraulich behandeln. Der größte Raffinadeproduzent ist China mit 75 % der weltweiten Raffinadeproduktion. Die Sekundärproduktion (Recycling) deckt ungefähr 30 % des weltweiten Germaniumbedarfs ab (USGS 2020d). Einen Überblick über die Versorgungssituation bei Germanium bietet Tab. 4.6.

Tab. 4.6: Versorgungssituation bei Germanium 2010, 2013 und 2018 (Quelle: BGR 2021)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]	–	–	–
Raffinadeproduktion [t Inh.]	129	140	143
Reserven [t Inh.]	–	–	–
Ressourcen [t Inh.]	–	–	–
Größte Bergbauländer	–	–	–
Größte Raffinadeländer	China 62 % Kanada 19 % Finnland 9 %	China 70 % Finnland 12 % Kanada 11 %	China 75 % Kanada 5 % Russland 4 %
Länderkonzentration Bergbau	–	–	–
Länderkonzentration Raffinade[1]	4.365	5.182	5.661
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade[1]	0,16	0,03	–0,14
Preis[2] [USD/kg]	640,23	1.317,71	1.102,39

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *Germaniumdioxid, min. 99.99 %, MB free market, in warehouse*

4.2.3 Verwendungen

Germanium hat in seinem ursprünglichen industriellen Anwendungsbereich, der Transistorproduktion, an Bedeutung verloren. Seine heutigen Hauptanwendungsgebiete finden sich im Bereich der Optik. Aufgrund seiner Infrarotlichtdurchlässigkeit wird Germanium in Optiken für Nachtsichtgeräte, Wärmebildkameras u. ä. eingesetzt. Daten zur weltweiten Verwendung von Germanium sind in Tab. 4.7 zusammengefasst.

Tab. 4.7: Weltweite Verwendung von Germanium (Quelle: Europäische Kommission 2020a)

Anwendungsbereich	2016 [%]
Polymerisations-Katalysatoren	31
Glasfasern	24
Infrarotoptik	23
Solaranwendungen	12
Andere Anwendungen	10
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigste germaniumhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

– Glasfaberkabel

4.2.4 Germaniumbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.8 und Abb. 4.2 geschätzt worden. Für Germanium ist die wichtigste Zukunftstechnologie der Einsatz in Glasfaserkabeln, deren Bedarf lag im Jahr 2018 bei 41 % der Raffinadeproduktion. Für das Jahr 2040 wird der Bedarf für Glasfaserkabel je nach Szenario auf bis zu 195 % der Raffinadeproduktion des Jahres 2018 geschätzt.

Tab. 4.8: Germaniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL)	–	0,76	1,3	1,5
Glasfaserkabel	59	237	246	277
Bedarfssumme	**59**	**237,8**	**247,3**	**278,5**
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	41 %	166 %	173 %	195 %

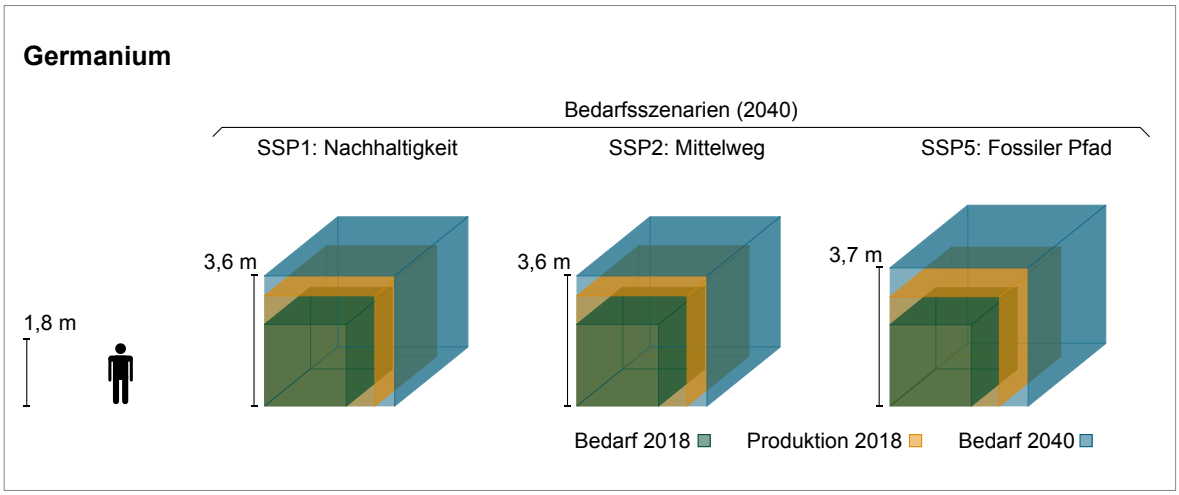


Abb. 4.2: Produktion 2018 und Bedarf von Germanium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.3 Graphit

Graphit ist eine stabile Modifikation des Kohlenstoffs, der in der vierten Hauptgruppe, der Kohlenstoffgruppe, des Periodensystems der Elemente steht (Römpp o. J.). Nachweislich wurde Graphit schon vor 2.800 Jahren zur Herstellung feuerfester Keramik genutzt. Als Bleistiftmaterial wurde er ab Mitte des 16. Jahrhunderts eingesetzt. Der Nachweis, dass Graphit eine Form des Kohlenstoffs ist, erfolgte 1779. Ab Anfang des 20. Jahrhunderts wurden Graphitelektroden zunehmend in elektrolytischen und elektrothermischen Prozessen eingesetzt (Römpp o. J; Frohs et al. 2012).

4.3.1 Eigenschaften

Graphit ist eine grau bis grauschwarze, metallisch glänzende, kristalline Form des Kohlenstoffs. Er ist schwer brennbar, chemisch sehr resistent, besitzt unter Normaldruck keinen Schmelzpunkt und sublimiert bei ca. 3.750 °C. Aufgrund der besonderen Parallelschichtstruktur seines Kristallgitters weist Graphit anisotropische Eigenschaften auf (Tab. 4.9). Dies gilt insbesondere für die elektrische und thermische Leitfähigkeit: Parallel zu den Schichten seines Kristallgitters ist Graphit (bei Raumtemperatur) ein guter elektrischer und thermischer Leiter. Senkrecht zu den Schichten ist Graphit dagegen nahezu ein elektrischer Isolator. Dass Graphit relativ weich ist und in Bleistiften oder als Schmiermittel verwendet werden kann, lässt sich auch durch seine Schichtstruktur erklären – die Schichten können leicht gegeneinander verschoben werden (Römpp o. J; Frohs et al. 2012; Robinson et al. 2017).

Tab. 4.9: Eigenschaften von Graphit

Dichte	2,1 – 2,3 g/cm³
Schmelzpunkt	–
Elektrische Leitfähigkeit	anisotrop.
Wärmeleitfähigkeit	anisotrop.

4.3.2 Vorkommen und Produktion

Der Graphitmarkt setzt sich aus bergmännisch gefördertem Naturgraphit sowie durch komplexe Prozesse im Hochofen aus kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien hergestellten synthetischen Graphit zusammen. Naturgraphit lässt sich wei-

Tab. 4.10: Versorgungssituation bei Graphit 2010, 2013 und 2018 (Quellen: BGR 2021, USGS 2011b, USGS 2014b, USGS 2019b)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]			
– natürlicher Graphit	1.719.400	1.055.800	1.700.000
… davon Flockengraphit	860.700	731.900	1.156.300
Produktion [t Inh]			
– synthetischer Graphit	1.428.000	1.514.000	1.573.000
Reserven [t Inh.]			
– natürlicher Graphit	71.000.000	130.000.000	300.000.000
Ressourcen [t Inh.]			
– natürlicher Graphit	> 800.000.000	> 800.000.000	> 800.000.000
Größte Bergbauländer			
– natürlicher Graphit	China 90 % Brasilien 5 % Kanada 1 %	China 80 % Brasilien 9 % Indien 3 %	China 74 % Mosambik 6 % Brasilien 6 %
– Flockengraphit	China 81 % Brasilien 11 % Kanada 2 %	China 74 % Brasilien 13 % Indien 4 %	China 69 % Mosambik 9 % Brasilien 8 %
Größte Produktionsländer			
– synthetischer Graphit	China 42 % Japan 22 % USA 14 %	China 43 % Japan 21 % USA 13 %	China 49 % Japan 19 % USA 10 %
Länderkonzentration Bergbau[1]			
– natürlicher Graphit	8.054	6.423	5.938
– Flockengraphit	6.658	5.537	4.961
Länderkonzentration Produktion[1,2]			
– synthetischer Graphit	3.287	3.199	3.556
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau			
– natürlicher Graphit	–0,51	–0,46	–0,35
– Flockengraphit	–0,5	–0,49	–0,28
Gewichtetes Länderrisiko Produktion[1,2]			
– synthetischer Graphit	0,19	0,16	0,21
Preis[3] [USD/t]	1.329,84	1.170,83	1.025,94

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *Basiert auf 92 % der Weltproduktion*
[3] *Crystalline fine, 94 – 97 % C, +100 – 80 mesh, CIF European Port FCL,*

terhin unterteilen in makrokristallinen Graphit (Flockengraphit), mikrokristallinen (amorphen) Graphit sowie Ganggraphit. Naturgraphiterze und Konzentrate erfordern eine von der jeweiligen Endanwendung abhängige Anzahl von Aufbereitung- und Weiterverarbeitungsschritten; bei der Herstellung von synthetischem Graphit können die gewünschten Eigenschaften während des Produktionsprozesses gezielt modifiziert werden. Die auf dem Markt verfügbaren Graphitprodukte unterscheiden sich im Hinblick auf Kohlenstoffgehalt, Struktur und Reinheit. Insbesondere sind Naturgraphit und synthetischer Graphit keine identischen Materialien (Damm & Zhou 2020).

Die weltweiten Ressourcen an natürlichem Graphit werden auf 800 Mio. Tonnen geschätzt und umfassen sowohl Flocken- als auch amorphen Graphit. Der Großteil der Reserven ist in China, Türkei und Brasilien vorzufinden. Es ist davon auszugehen, dass in Bezug auf die Verwendung als Anodenmaterial in Lithium-Ionen-Batterien lediglich ein Teil dieser Ressourcen zu batterietauglichen Qualitäten aufbereitet werden kann. Aktuell bedeutendstes Bergwerksförderland für Naturgraphit ist China; beim Abbau von Flockengraphit nimmt das Land ebenfalls eine Vormachtstellung ein (USGS 2019b; Damm & Zhou 2020). Die Produktion von synthetischem Graphit wird aktuell ebenfalls von China dominiert (vgl. Tab. 4.10).

4.3.3 Verwendungen

Mit rund 60 % sind feuerfeste Werkstoffe in verschiedenen industriellen Anwendungen bzw. Prozessen, z. B. in der Stahl-, Eisen-, Glas- und Keramikproduktion das Hauptanwendungsgebiet von natürlichem Graphit (Jara et al. 2019; Roskill 2019; Damm & Zhou 2020). Weitere Einsatzgebiete umfassen Verbundstoffe für Luft- und Raumfahrt, Schmiermittel in Hochtemperaturanwendungen und Friktionsmaterialien in Bremsbelägen; Graphen und Elektrodenmaterialien für Brennstoffzellen stellen Nischenanwendungen dar.

Rund 14 % des weltweiten Bedarfs an natürlichem Graphit werden aktuell für Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt, wo Graphit als Anodenmaterial zum Einsatz kommt (siehe Tab. 4.11). Hier wird überwiegend Flockengraphit verwendet; die für den Einsatz in Batterien erforderlichen Qualitäten werden in einer Reihe von Weiterverarbeitungsschritten erreicht. Hierbei ist die Qualität des Ausgangserzes von ausschlaggebender Bedeutung; des Weiteren ist zu beachten, dass der tatsächliche Bedarf niedriger liegt, da es bei der Weiterverarbeitung von Flockengraphit zu batterietauglichem „Spherical Graphite“ zu Verlusten kommt.

Hauptanwendungsgebiet für synthetischen Graphit ist der Einsatz in metallurgischen Anwendungen (Mordor Intelligence 2020c). Synthetischer Graphit findet ebenfalls als Anodenmaterial in Lithium-Ionen-Batterien Verwendung. Insbesondere in Batterien für höherwertige Anwendungen ist ein Mix beider Graphittypen üblich.

Tab. 4.11: Weltweite Verwendung von natürlichem Graphit (Quelle: Damm & Zhou 2020, Roskill 2019)

Anwendungsbereich	2018 [%]
Feuerfeste Werkstoffe	46
Gießereien	14
Batterien	14
Friktionsmaterialien (für z. B. Bremsbeläge)	6
Schmiermittel	5
Sonstige	15
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigste graphithaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

– Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher

4.3.4 Graphitbedarf 2040

In Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher gingen 2 % der Produktion des Flockengraphits im Jahr 2018. Diese Menge kann sich im Jahr 2040 je nach Szenario auf bis zu 88 % der Produktion 2018 erhöhen, vergleiche Tab. 4.12 und Abb. 4.3.

Tab. 4.12: Graphitbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher	21.900	1.019.000	886.400	196.000
Bedarfssumme	**21.900**	**1.019.000**	**886.400**	**196.000**
Bedarf / Primärproduktion Flockengraphit 2018	2 %	88 %	77 %	17 %

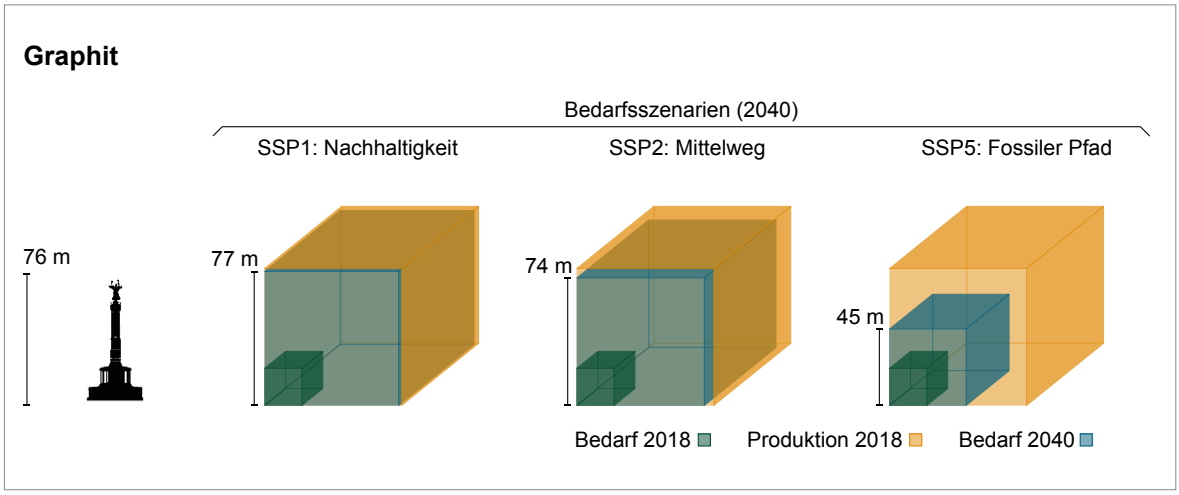


Abb. 4.3: Produktion 2018 und Bedarf von Graphit für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.4 Indium

Indium steht in der dritten Hauptgruppe, der Borgruppe, des Periodensystems der Elemente unter Gallium. Es wurde 1863 entdeckt und fand in den 1940er Jahren seinen ersten größeren Anwendungsbereich als Lagerbeschichtungsmaterial in Hochleistungsflugmotoren (Jorgenson & George 2005; Felix 2012).

4.4.1 Eigenschaften

Indium ist ein silbrig-weißes, stark glänzendes und sehr weiches Metall. Die hohe Duktilität und leichte Kaltformbarkeit behält es auch bei sehr niedrigen Temperaturen bei. Es kann Legierungen mit den meisten Metallen bilden; dabei steigert es bereits in geringen Konzentrationen die Härte und die Korrosionsbeständigkeit. Indium benetzt Glas und bildet bei gleich guten Reflexionseigenschaften eine korrosionsresistentere Spiegeloberfläche als Silber (Römpp o. J; Quadbeck-Seeger 2007; Felix 2012).

Tab. 4.13: Eigenschaften von Indium

Dichte	7,31 g/cm³
Schmelzpunkt	156,6 °C
Elektrische Leitfähigkeit	12,5 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	81,6 W/(m · K)

4.4.2 Vorkommen und Produktion

Indium ist relativ selten und dispers in der Erdkruste verteilt. Seltene Indium-Minerale wie Indit ($FeIn_2S_4$) und Roquesit ($CuInS_2$) haben hohe Indiumgehalte im Bereich zwischen ca. 45 % und 60 %. Daneben ist Indium in vielen polymetallischen

Erzen/Mineralen als Spurenelement enthalten, so in sulfidischen Zinkerzen, insbesondere Sphalerit, Kupfererzen, z. B. Chalkopyrit und Bornit, Zinnerzen, z. B. Stannit und Kassiterit, sowie Bleierzen, insbesondere Galenit (Römpp o. J; Anthony et al. 2001a; Anthony et al. 2001b; Felix 2012).

Zum größten Teil wird Indium als Beiprodukt aus Aufbereitungs- und Verhüttungsresten sowie Stäuben und Gasen, die bei der Zinkgewinnung und -verhüttung entstehen, gewonnen. Dabei dient Sphalerit als Indium-/Zinkquelle mit Indiumgehalten zwischen 1 und 100 ppm. Der übrige Anteil der Indiumproduktion erfolgt aus Resten der Zinn- und Kupferaufbereitung (USGS 2017c; Pradhan et al. 2018; USGS 2020e).

Der führende Poduzent ist China mit einem Anteil von 50 bis 60 % an der weltweiten Indiumraffinadeproduktion. Die Angaben zur Versorgungssituation bei Indium sind in Tab. 4.14 zusammengefasst. Diese sind aufgrund des relativ kleinen Indiummarktes als unsicher einzuschätzen.

4.4.3 Verwendungen

Dünnschichten von Indium-Zinn-Oxiden (ITO) werden in der Produktion von Flüssigkristallanzeigen (LCD) bzw. Flachbildschirmen verwendet. Aufgrund des breiten Einsatzgebietes dieser Bildschirme in der Unterhaltungselektronik (z. B. in Mobiltelefonen, Notebooks und Fernsehern) und der hohen Nachfrage, ist dies mengenmäßig der wichtigste Anwendungsbereich von Indium. Je nach Literaturquelle wird der Anteil des in diesem Bereich verwendeten Indiums am Indiumgesamtbedarf auf bis zu ca. 80 % geschätzt, weil dabei im Produktionsprozess verlorengehendes Indium mitberücksichtigt wird. Weitere Anwendungen finden sich z. B. im Bereich von hochreinen Niedrigtemperaturlegierungen. Einen Überblick über die Anwendungen von Indium in der EU bietet Tab. 4.15.

Tab. 4.15: Verwendung von Indium in der EU (Quelle: Europäische Kommission 2020a)

Anwendungsbereich	2012–2016 [%]
Flachbildschirme	60
Lote	11
Photovoltaik	9
Wärmeleitmaterialien	7
Batterien	6
Legierungen	4
Halbleiter und LED	3
Gesamt	**100**

Tab. 4.14: Versorgungssituation bei Indium 2010, 2013 und 2018 (Quelle: BGR 2021)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]	–	–	–
Raffinadeproduktion [t Inh]	669	825	808
Reserven [t Inh.]	–	–	–
Ressourcen [t Inh.]	–	–	–
Größte Bergbauländer	–	–	–
Größte Raffinadeländer	China 50 % R. Korea 22 % Japan 10 %	China 50 % R. Korea 21 % Japan 9 %	China 60 % R. Korea 12 % Japan 9 %
Länderkonzentration Bergbau	–	–	–
Länderkonzentration Raffinade[1]	3.235	3.153	3.914
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade[1]	0,232	0,233	0,263
Preis[2] [USD/kg]	567,26	595,54	291,16

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *Indium-Ingots, min. 99,97 %, MB free market, in warehouse*

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten indiumhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

– Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik
– Dünnschicht-Photovoltaik

4.4.4 Indiumbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.16 und Abb. 4.4 geschätzt worden. Der größte Indiumbedarf besteht bei der Displaytechnik. Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien benötigte im Jahr 2018 rund 26 % der Raffinadeproduktion. Diese Menge kann sich bis 2040 je nach Szenario, bezogen auf die Raffinadeproduktion 2018, auf 50 % erhöhen.

4.5 Kobalt

Kobalt steht in der 9. Gruppe, der Kobaltgruppe, des Periodensystems der Elemente vor Rhodium und Iridium. Es wurde 1735 zum ersten Mal isoliert und 1780 als ein eigenständiges Element identifiziert. Obwohl es seit Jahrtausenden als Färbemittel Verwendung findet, begann die verstärkte industrielle Nutzung von Kobalt erst mit der Entwicklung seiner Anwendungen im Bereich der Legierungen und Magnete Anfang des 20. Jahrhunderts (Donaldson & Beyersmann 2012).

4.5.1 Eigenschaften

Reines Kobalt ist grau-silbrig glänzend. Bei einem hohen Reinheitsgrad und optimalen thermischen Bedingungen ist es wie andere Übergangsmetalle hart und besonders zäh. Es ist

Tab. 4.16: Indiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Indium-Zinn-Oxid (ITO) in der Displaytechnik	185	297	297	297
Optoelektronik/Photonik	5	35	35	35
Dünnschicht-Photovoltaik	17	92	10	0
Bedarfssumme	**207**	**424**	**342**	**332**
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	26 %	52 %	42 %	41 %

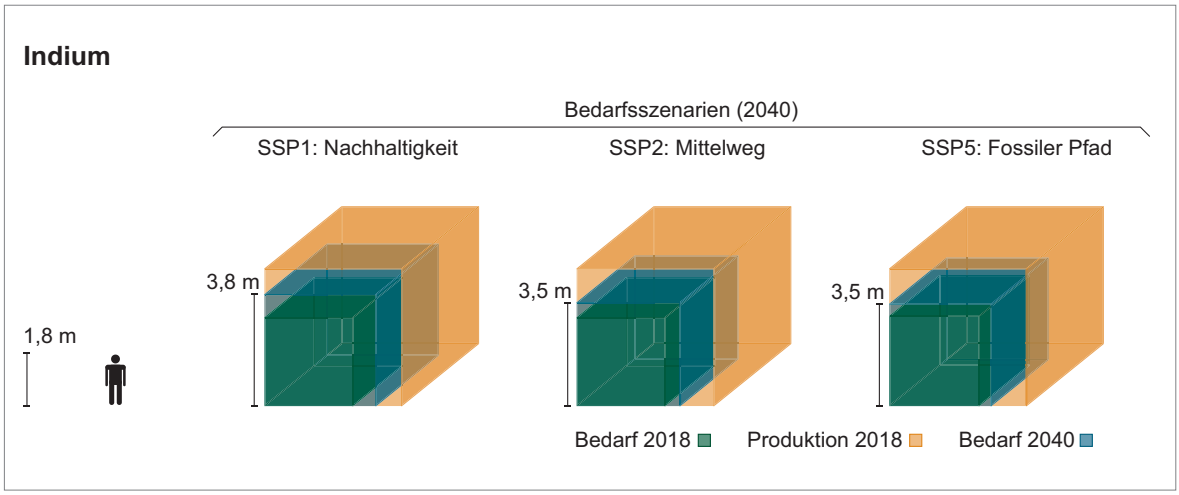


Abb. 4.4: Produktion 2018 und Bedarf von Indium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

fester als Stahl. Neben diesen mechanischen und den ferromagnetischen Eigenschaften – Kobalt behält seinen Magnetismus bis 1.121 °C –, spielen für seine heutigen Anwendungsgebiete auch die Eigenschaften der Kobaltchemikalien eine wichtige Rolle (Tab. 4.17). So kann sich z. B. Lithium in der Schichtstruktur von Lithium-Kobaltdioxid sehr gut einlagern, was zu einer hohen Energiedichte von Lithium-Kobaltdioxid-Kathoden in Lithiumionen-Batterien führt (Römpp o. J; Truebb & Rüetschi 1998; Quadbeck-Seeger 2007; Donaldson & Beyersmann 2012).

Tab. 4.17: Eigenschaften von Kobalt

Dichte	8,89 g/cm³
Schmelzpunkt	1.495 °C
Elektrische Leitfähigkeit	16,7 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	100 W/(m · K)

4.5.2 Vorkommen und Produktion

Kobalt, das in der oberen Erdkruste seltener als Nickel oder Kupfer vorkommt, ist auf der Erde weit verbreitet und dispers verteilt. So ist es in vielen verschiedenen Mineralen und der Umwelt meist als Spurenelement enthalten. Zu den Mineralen, die hohe Konzentrationen von Kobalt aufweisen, gehören u. a. Heterogenit (40–60 %), Linneit (ca. 58 %), Cattierit (ca. 48 %), Cobaltin (ca. 36 %), und Skutterudit (ca. 21 %) – die Angaben in den Klammern beziehen sich auf die Kobaltgehalte der Minerale (Römpp o. J; Donaldson & Beyersmann 2012; Al Barazi 2018; Petavratzi et al. 2019).

Zu den wichtigsten Kobaltlagerstätten zählen schichtgebundene synsedimentäre kobaltführende Kupferlagerstätten, liquidmagmatische sulfidische Nickel-(Kupfer)-Lagerstätten und kobaltführende Nickellateritlagerstätten. So dienen derzeit Nickel- und Kupfererze, aus denen Kobalt als Beiprodukt gewonnen wird, als Hauptquelle für die Kobaltproduktion. Daneben werden auch Kobalt-Arsenid-Erze zur Kobaltgewinnung genutzt (Römpp o. J; Donaldson & Beyersmann 2012; Al Barazi 2018; Petavratzi et al. 2019).

Tab. 4.18: Versorgungssituation bei Kobalt 2010, 2013 und 2018 (Quelle: BGR 2021)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]	105.100	118.502	151.060
Raffinadeproduktion [t Inh.]	79.457	87.232	126.019
Reserven [t Inh.]	7.302.000	7.203.000	6.875.200
Größte Bergbauländer	Kongo 70 % Sambia 5 % Australien 5 %	Kongo 65 % Australien 6 % Sambia 5 %	Kongo 72 % Australien 4 % Russland 4 %
Größte Raffinadeländer	China 45 % Finnland 12 % Sambia 6 %	China 41 % Finnland 12 % Kanada 6 %	China 62 % Finnland 10 % Belgien 5 %
Länderkonzentration Bergbau[1]	4.922	4.276	5.316
Länderkonzentration Raffinade[1]	2.368	2.066	4.061
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau[1]	–1,12	–0,92	–1,15
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade[1]	0,14	0,29	0,23
Preis[2] [USD/kg]	45,33	29,01	82,52

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *high Grade (min. 99,8 %), MB free market, in warehouse*

Das weltweit geförderte Kobalt stammt derzeit zu ungefähr 70 % aus der DR Kongo. China ist der größte Raffinadeproduzent. Die terrestrischen Kobalt-Ressourcen betragen ca. 25 Mio. Tonnen und verteilen sich überwiegend auf schichtgebundene kobaltführende Kupferlagerstätten, schichtgebundene kobaltführende Nickellateritlagerstätten sowie Nickel-Kupfer-Sulfid-Lagerstätten. Marine Manganknollen und -krusten bilden eine geschätzte Kobaltressource von 120 Mio. Tonnen (USGS 2020a). Eine Zusammenfassung der Versorgungssituation findet sich in Tab. 4.18.

4.5.3 Verwendungen

Der ursprüngliche Hauptanwendungsbereich von Kobalt als (Blau-)Färbemittel für u. a. Keramiken und Gläser spielt heute nur noch eine untergeordnete Rolle. Die Anfang des 20. Jahrhunderts begründeten Einsatzgebiete im Bereich der Legierungen und Magnete haben auch heute noch Bedeutung. So wird das harte, besonders zähe Kobalt in besonders belastbaren Eisenlegierungen eingesetzt, beispielsweise Rasierklingen, Bohrern und Werkzeugen, und dank seiner ferromagnetischen Eigenschaften zur Herstellung von Dauermagneten, z. B. SmCo-Magneten, genutzt (Quadbeck-Seeger 2007). Doch auch Legierungen und Magnete stellen heute nicht mehr den wichtigsten Anwendungsbereich von Kobalt dar. Viel mehr wird knapp die Hälfte der weltweiten Kobaltproduktion für die Herstellung von Batterien verwendet. In diesen wird Kobalt u. a. in Form von Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid als Kathodenmaterial eingesetzt und findet Verwendung in Elektrofahrzeugen, stationären Energiespeichersystemen, Computern und Telekommunikationsgeräten. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Verwendungen von Kobalt weltweit findet sich in Tab. 4.19.

Tab. 4.19: Weltweite Verwendung von Kobalt (Quelle: Petavratzi et al. 2019)

Anwendungsbereich	2017 [%]
Batterien	46
Superlegierungen	17
Hartmetalle	8
Katalysatoren	7
Hochleistungsschnellschnittstahl/ andere Legierungen	6
Färbemittel	5
Magnete	5
Sonstige	6
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten kobalthaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher
- Feststoffbatterie
- Superlegierungen

4.5.4 Kobaltbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.20 und Abb. 4.5 geschätzt worden. Der Bedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2018 bei ca. 39 % der Raffinadeproduktion von Kobalt. Diese Menge könnte bis zum Jahr 2040 je nach Szenario auf bis zu 391 % der Raffinadeproduktion von 2018 anwachsen.

Auch wenn heute schon 46 % der Kobaltproduktion in die Batterieherstellung gehen, wird sich diese Menge in Abhängigkeit von der Diffusion der Elektromobilität bis 2035 stark erhöhen.

Tab. 4.20: Kobaltbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Superlegierungen	37.000	68.000	63.000	88.000
Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher	12.750	311.000	270.400	59.830
Feststoffbatterie	–	109.000	28.000	3.000
Additive Fertigung von Metallbauteilen („3D-Drucker“)	4	139	116	93
Wasser-Elektrolyse	0	160	40	8
SOFC-Stationäre Brennstoffzelle	1	63	35	7
CCS – Carbon Capture and Storage	–	200	700	0
Synthetische Kraftstoffe	–	4.600	2.250	4.460
Rechenzentren	0	110	420	1.480
Bedarfssumme	**49.755**	**493.272**	**364.961**	**156.878**
Bedarf / Primärproduktion 2018	33 %	327 %	242 %	104 %
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	39 %	391 %	290 %	124 %

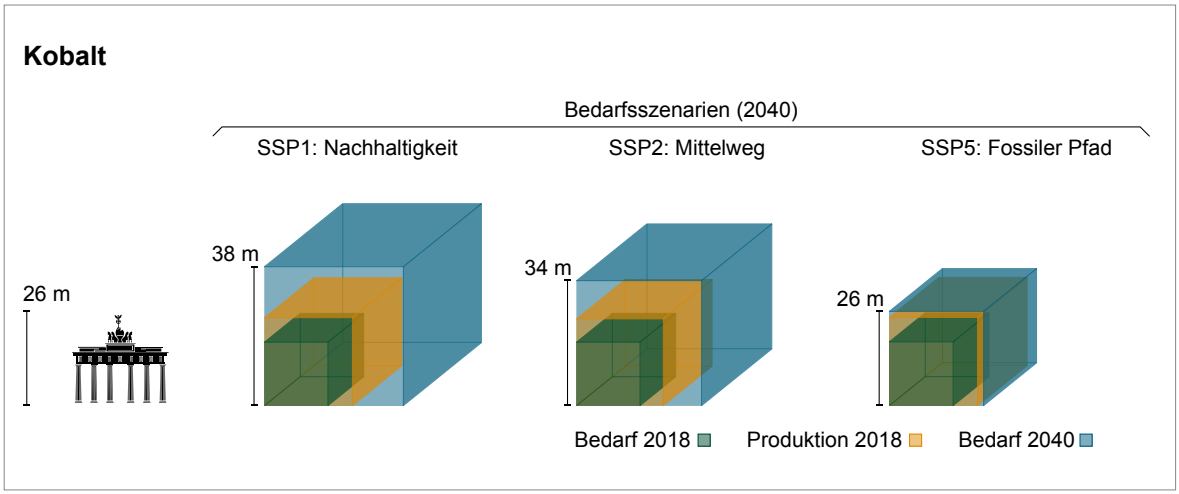


Abb. 4.5: Raffinadeproduktion 2018 und Bedarf von Kobalt für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.6 Kupfer

Kupfer steht zusammen mit Silber und Gold in der 11. Gruppe, der Kupfergruppe, des Periodensystems der Elemente. Es gibt Evidenz dafür, dass Kupfer bereits vor mehr als 9.000 Jahren verwendet wurde. Über verschiedene Epochen (z. B. während der Kupferzeit 2000 – 1800 v. Christus) wurde es weiträumig genutzt, wobei die Nutzung im letzten Jahrhundert stark zugenommen hat. Große technologische Fortschritte in der Kupferindustrie wurden in den letzten 140 erzielt (Römpp o. J; Lossin 2012).

4.6.1 Eigenschaften

Reines Kupfer ist ein hellrotes, schweres und gut schmiedbares Metall. Es zeichnet sich durch hohe Duktilität aus. Wie andere Übergangsmetalle kann es (je nach Reinheitsgrad und thermischer Vorbehandlung) relativ hart und sehr zäh sein. Seine Stärke behält es auch bei Temperaturen unter 0 °C. Als Halbedelmetall wird es von Luft nicht korrodiert, insbesondere aufgrund der Bildung einer schützenden Oxidschicht. Daneben bildet es unter feuchten und sauren Bedingungen eine Patina aus Kupfersalzen (Cu-Sulfaten) aus. Unter allen Metallen hat Kupfer nach Silber die höchste elektrische und Wärmeleitfähigkeit (Tab. 4.21). Kalt(massiv)umformung mindert jedoch die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer bis zu einem gewissen Grad (Römpp o. J; Quadbeck-Seeger 2007; Lossin 2012).

Tab. 4.21: Eigenschaften von Kupfer

Dichte	8,92 g/cm³
Schmelzpunkt	1.085 °C
Elektrische Leitfähigkeit	58,1 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	400 W/(m · K)

4.6.2 Vorkommen und Produktion

Kupfer kommt gediegen vor und wurde in der Menschheitsgeschichte in dieser Form gewonnen und weiterverarbeitet. Daneben ist es in zahlreichen Mineralen mit z. T. hohen Anteilen enthalten und kommt als Spurenelement in der Umwelt vor. In der oberen Erdkruste kommt es ca. doppelt so häufig wie Kobalt vor. Zu den Mineralen mit hohen Kupfergehalten zählen Cuprit (ca. 89 %), Tenorit (ca. 80 %), Chalkosin (ca. 80 %), Digenit (ca. 78 %) und Covellin (ca. 67 %) (Römpp o. J; Lossin 2012).

Kupfer wird auf allen Kontinenten in unterschiedlichen geologischen Formationen abgebaut. Wirtschaftlich von großer Bedeutung sind Chalkopyrit – ein Kupfererz/Mineral mit einem Kupfergehalt von ca. 35 % – sowie porphyrische und schichtgebundene Kupferlagerstätten, die den Großteil des weltweiten Kupferangebots ausmachen. Zu den größten Bergbauländern zählen Chile, Peru und China; der größte Raffinadeproduzent ist China; die größten Kupferreserven finden sich in Chile, Peru und Australien. Mehr als die Hälfte der weltweit identifizierten Ressourcen in porphyrischen und schichtgebundenen Kupferlagerstätten sind in Nord- und Südamerika gelegen. Neben dem

Tab. 4.22: Versorgungssituation bei Kupfer 2010, 2013 und 2018 (Quellen: BGR 2021, USGS 2020b)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]	16.123.946	18.321.082	20.590.587
Raffinadeproduktion [t Inh.]	19.070.226	21.084.422	24.136.955
Reserven [t Inh.]	635.000.000	685.000.000	826.000.100
Ressourcen [Mrd. t Inh.]	2,1 – 3,5	2,1 – 3,5	2,1 – 3,5
Größte Bergbauländer	Chile 34 % Peru 8 % China 7 %	Chile 32 % China 9 % Peru 8 %	Chile 28 % Peru 12 % China 8 %
Länder mit größter Raffinade	China 24 % Chile 17 % Japan 8 %	China 32 % Chile 13 % Japan 7 %	China 38 % Chile 10 % Japan 7 %
Länderkonzentration Bergbau[1]	1.444	1.343	1.182
Länderkonzentration Raffinade[1]	1.063	1.341	1.739
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau[1]	0,44	0,40	0,25
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade[1]	0,34	0,20	0,16
Preis[2] [USD/t]	7.534,18	7.332,19	6.524,80

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *Copper: Grade A, LME, cash, in LME warehouse*

Bergbau stellt auch Kupferrecycling eine wichtige Kupferquelle dar, weswegen die Raffinadeproduktion die Bergwerksförderung deutlich überschreitet (Lossin 2012; Johnson et al. 2014; Sun et al. 2015; Dorner 2020; USGS 2020b). Eine Zusammenfassung der Versorgungssituation bei Kupfer findet sich in Tab. 4.22.

4.6.3 Verwendungen

Obwohl Kupfer mit zahlreichen weiteren Metallen legiert werden kann, um Produkte mit spezifischen Eigenschaften herzustellen, wird es im Gegensatz zu vielen anderen Metallen häufig in seiner nicht-legierten Form verwendet. Insbesondere lässt es sich dank seiner zuvor diskutierten Eigenschaften (hohe Duktilität und elektrische Leitfähigkeit) in vielerlei Formen (insb. Bleche, Folien und Draht) verarbeiten und für elektrische Anwendungen einsetzen, die ca. 79 % der Kupferverwendung ausmachen (Dorner 2020). So wird Kupfer u. a. für die Stromverteilung (in Gebäuden) und in elektrischer Infrastruktur eingesetzt; es findet sich in Transformatoren und Elektromotoren und wird in Kabelbäumen in Automobilen verbaut. Auch im Bereich der Elektronik und dank seiner hohen Wärmeleitfähigkeit im Bereich der Kühlsysteme findet es Verwendung (vgl. Römpp o. J; Copper Alliance 2019). Tab. 4.23 fasst die wichtigsten weltweiten Anwendungen von Kupfer zusammen.

Tab. 4.23: Weltweite Verwendung von Kupfer (Quelle: Copper Alliance 2019)

Anwendungsbereich	2018 [%]
Gebäude	28
Elektrische Infrastruktur und Telekommunikationsnetzwerke	16
Transport Automobile und andere)	13
Industrielle Maschinen und Ausrüstung	12
Kühlsysteme	8
Elektronik	5
Sonstige (Instrumente, Werkzeuge, Münzen etc.)	18
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten kupferhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Ausbau Stromnetz
- Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge
- Windkraftanlagen
- Feststoffbatterie

4.6.4 Kupferbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.24 und Abb. 4.6 geschätzt worden. Das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien benötigt derzeit ca. 19 % der Kupferförderung des Jahres 2018. Diese Menge wird sich vervielfachen und könnte bis zum Jahr 2035 je nach Szenario auf bis zu 45 % der Bergwerksförderung von 2018 anwachsen.

Tab. 4.24: Kupferbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge	33.200	800.000	816.000	772.600
Legierungen für den Airframe-Leichtbau	11.000	12.000	13.000	18.000
Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL)	–	150	390	390
Feststoffbatterie	–	261.000	76.000	8.000
Quantencomputer	3	1.150	1.150	1.150
Dünnschicht-Photovoltaik	14	79	8	0
Wasser-Elektrolyse	29	110.400	31.300	5.800
CCS – Carbon Capture and Storage	–	22.300	61.100	0
Windkraftanlagen	95.100	355.000	317.000	121.000
Meerwasserentsalzung	28.400	21.400	14.300	29.300
Rohstoffliches Recycling (von Kunststoffen)	126	1.930	2.490	1.080
Ausbau Stromnetz	3.825.000	3.832.000	5.759.000	8.211.000
Induktiver Übertrag. elektrischer Energie	195	65.640	46.290	17.900
Bedarfssumme	**3.993.067**	**5.483.049**	**7.138.028**	**9.186.220**
Bedarf / Primärproduktion 2018	19 %	27 %	35 %	45 %
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	17 %	23 %	30 %	38 %

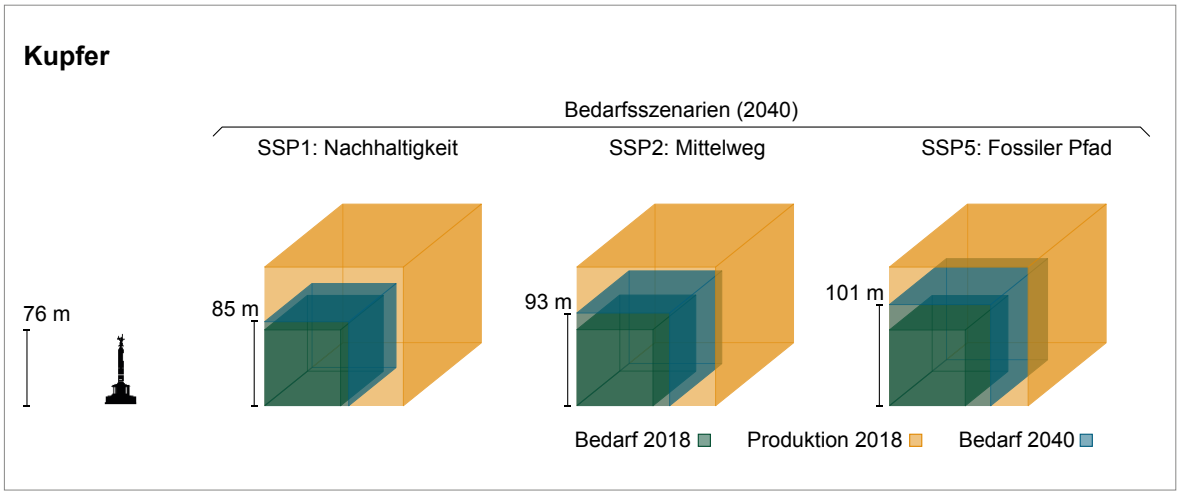


Abb. 4.6: Raffinadeproduktion 2018 und Bedarf von Kupfer für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.7 Lithium

Lithium steht in der ersten Hauptgruppe, der Alkalimetallgruppe, des Periodensystems der Elemente an dritter Stelle. Es wurde 1817 entdeckt und gewann ungefähr ein Jahrhundert später an industrieller Bedeutung aufgrund der Nachfrage nach Lagermetall für die Eisenbahn, für das Lithium als ein Legierungsbestandteil gebraucht wurde (Wietelmann & Steinbild 2013).

4.7.1 Eigenschaften

Lithium ist ein silbrig-weiß glänzendes Metall. Es gehört zu der Gruppe der Leichtmetalle und besitzt die geringste Dichte aller festen Elemente (bei Raumtemperatur) (Tab. 4.25). Zudem ist es sehr weich und lässt sich gut zu Draht oder sehr dünnen Blättchen verarbeiten. Lithium hat eine gute elektrische Leitfähigkeit. Sie ist vergleichbar mit der von Eisen. Wie alle Alkalimetalle weist Lithium eine hohe Reaktionsfähigkeit auf. Unter allen Metallen hat es das geringste Redoxpotenzial (Römpp o. J; Quadbeck-Seeger 2007; Wietelmann & Steinbild 2013; Schmidt 2017).

Tab. 4.25: Eigenschaften von Lithium

Dichte	0,53 g/cm³
Schmelzpunkt	180,5 °C
Elektrische Leitfähigkeit	10,6 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	85 W/(m · K)

4.7.2 Vorkommen und Produktion

In der oberen Kontinentalkruste kommt Lithium nicht so häufig wie Kupfer, jedoch häufiger als Zink oder Blei vor. Aufgrund seiner hohen Reaktionsfähigkeit ist Lithium in der Natur nicht elementar vorzufinden, allerdings ist es Bestandteil zahlreicher Minerale. Einige seltene Minerale enthalten relativ hohe Lithiumanteile, so z. B. Zabuyelit (Li_2CO_3) mit einem Lithiumanteil von ca. 18,79 %. Dagegen sind die Lithiumgehalte der technisch/wirtschaftlich bedeutsamen Lithiumminerale (Amblygonit, Eucryptit, Lepidolith, Petalit und Spodumen) im Bereich zwischen ca. 2 % und 5,5 %. Lithium findet sich nicht nur in Festgestein sondern auch in Salzseen, Grundwässern von Öllagerstätten, kontinentalen Tiefenwässern und Tonen wie Hektorit (Römpp o. J; Quadbeck-Seeger 2007; Bradley et al. 2017; Schmidt 2017).

Tab. 4.26: Versorgungssituation bei Lithium 2010, 2013 und 2018 (Quellen: BGR 2021, USGS 2011c, USGS 2014c, USGS 2020f)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]	26.044	30.718	95.170
Raffinadeproduktion [t Inh.]	–	–	–
Reserven [t Inh.]	12.565.000	13.017.000	13.919.000
Ressourcen [t Inh.]	33.000.000	39.500.000	80.000.000
Größte Förderländer	Chile 37 % Australien 33 % Argentinien 12 %	Australien 38 % Chile 37 % Argentinien 8 %	Australien 61 % Chile 19 % China 7 %
Größte Raffinadeländer	–	–	–
Länderkonzentration Förderung[1]	2.694	2.956	4.184
Länderkonzentration Raffinade	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Förderung[1]	0,91	1,01	1,16
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade	–	–	–
Preis[2] [USD/t]	5.180,87	6.899,44	16.812,50

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *Lithium: Lithium-carbonate, large contracts, USA, del. continental*

Zu den wichtigsten Lithiumquellen zählen lithiumhaltige Solen von Salzseen und die in Pegmatiten enthaltenen Minerale (insbesondere Spodumen). Aus ihnen wird Lithiumkonzentrat, -hydroxid, -karbonat und -chlorid gewonnen und anschließend zu anderen Chemikalien verarbeitet, zu Metall reduziert oder direkt den Endprodukten zugeführt. Der Großteil des weltweit hergestellten Lithiums stammt aus bergbaulicher Gewinnung in Australien und China sowie aus lithiumhaltigen Solen in Argentinien, Chile und China. Die weltweiten Lithiumressourcen werden auf 80 Mio. Tonnen geschätzt. Zwei Drittel davon sind in Amerika, insbesondere Bolivien, Argentinien, Chile und (zu einem kleineren Teil) USA verortet (Bradley et al. 2017; Schmidt 2017; Sun et al. 2017; USGS 2020f). Eine Zusammenfassung der Versorgungssituation bei Lithium findet sich in Tab. 4.26.

4.7.3 Verwendungen

Die auffälligste Entwicklung auf der Lithiumverwendungsseite ist die massive Verschiebung der Nachfragestruktur hinzu Batterien. Der Anteil der Batteriesparte am Lithiumgesamtbedarf hat sich in den letzten zehn Jahren fast verdreifacht und beträgt heute 65 %. Getrieben wurde dieser Strukturwandel u. a. durch die steigende Nachfrage nach elektronischen Mobilgeräten, die Lithium-Ionen-Batterien einsetzen, und wird sich zukünftig v. a. dank steigender Batterienachfrage für E-Mobilität fortsetzen.

Keramiken und Gläser, die vor einigen Jahren noch den wichtigsten Anwendungsbereich von Lithium darstellten, machen heute nur noch 18 % des Gesamtbedarfs aus. Lithiumkonzentrat (hauptsächlich α-Spodumen) fließt direkt in die Produktion von Keramiken ein und reduziert die Empfindlichkeit der entsprechenden Endprodukte (u. a. Ceranfelder) gegen starke und plötzliche Temperaturschwankungen. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Anwendungsbereiche für Lithium findet sich in Tab. 4.27.

Tab. 4.27: Weltweite Verwendung von Lithium 2010, 2013, 2019 (Quellen: USGS 2011c, USGS 2014c, USGS 2020f)

Anwendungsbereich	2010 [%]	2013 [%]	2019 [%]
Glas/Keramiken	31	35	18
Batterien	23	29	65
Schmierfette	9	9	5
Polymere und Pharmazeutika	6	5	3
Luftaufbereitung	6	5	1
Aluminiumschmelzen	6	1	
Strangguss	4	6	3
Weitere Anwendungen	15	10	5
Gesamt	**100**	**100**	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten lithiumhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzial sind:

- Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher
- Feststoffbatterie

4.7.4 Lithiumbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.28 und Abb. 4.7 geschätzt worden. Der Bedarf des untersuchten Segments der Zukunftstechnologien lag 2018 bei etwa 8 % der Lithiumförderung. Diese Menge könnte bis 2040 je nach Szenario auf bis zu 587 % der Lithiumförderung aus dem Jahr 2018 ansteigen, wenn sich der Bedarf an Elektrofahrzeugen mit Lithium-Ionen-Batterien erhöht.

Tab. 4.28: Lithiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Legierungen für den Airframe-Leichtbau	–	4.200	4.400	6.200
Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL)	–	210	660	1.630
Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher	7.460	377.300	328.100	72.600
Feststoffbatterie	–	177.000	47.000	5.000
Radiofrequenz – Mikrochips	8	15	18	22
Bedarfssumme	**7.468**	**558.725**	**380.178**	**85.452**
Bedarf / Primärproduktion 2018	8 %	587 %	399 %	90 %

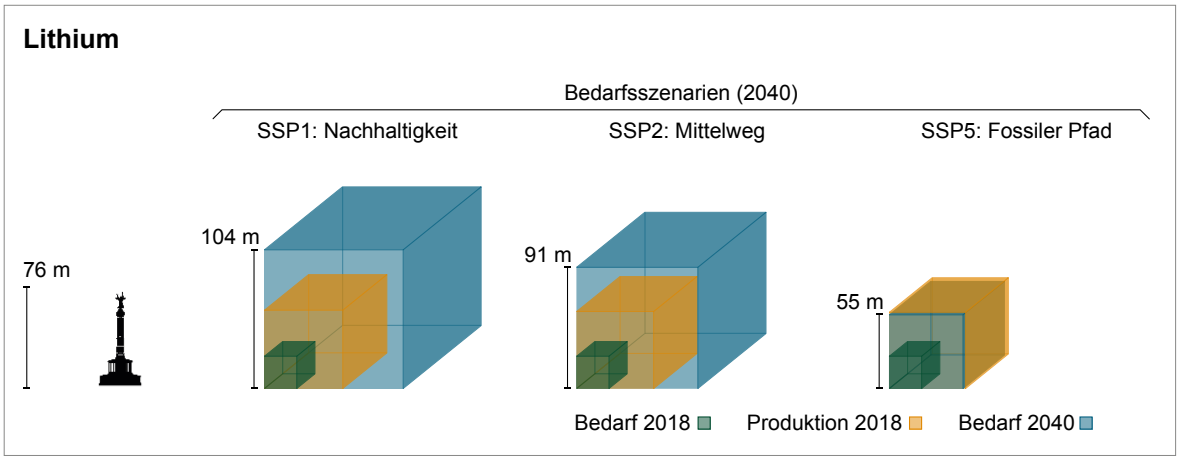


Abb. 4.7: Produktion 2018 und Bedarf von Lithium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.8 PGM (Ruthenium, Iridium, Platin)

Platin-Gruppen-Metalle (PGM) ist eine Sammelbezeichnung für die zu den Edelmetallen zählenden sechs Elementen Ruthenium, Rhodium und Palladium sowie Osmium, Iridium und Platin. Während die ersten drei Elemente zu den leichten Platinmetallen gezählt werden (Ordnungszahlen 44–46, Dichte ca. 12 g/cm³), werden Osmium, Iridium und Platin zu den schweren Platinmetallen gezählt (Ordnungszahlen 76–78, Dichte ca. 22 g/cm³).

Es gibt Hinweise dafür, dass Platin vor mehr als 2.600 Jahren genutzt wurde. In Europa wurde es erst 1750 wissenschaftlich beschrieben. Palladium und Rhodium wurden erst um 1803 von William Hyde Wollaston, Iridium und Osmium um 1804 von Smithson Tennant und Ruthenium noch später, um 1844 von Carl Ernst Claus entdeckt (Römpp o. J; Renner et al. 2018).

4.8.1 Eigenschaften

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der PGM ähneln sich sehr (Tab. 4.29). Alle PGM sind graue bis stark silberglänzende Edelmetalle. Vor allem die herausragenden katalytischen Eigenschaften der PGM finden industrielle Anwendung, z. B. im Bereich der Autoabgaskatalysatoren (Römpp o. J; Renner et al. 2018).

Tab. 4.29: Eigenschaften von Ruthenium, Iridium und Platin

	Ruthenium	Iridium	Platin
Dichte	12,4 g/cm³	12,6 g/cm³	21,5 g/cm³
Schmelzpunkt	2.334 °C	2.466 °C	3.827 °C
Elektrische Leitfähigkeit	14,1 · 10^6 S/m	19,7 · 10^6 S/m	9,43 · 10^6 S/m
Wärmeleitfähigkeit	120 W/(m · K)	150 W/(m · K)	72 W/(m · K)

4.8.2 Vorkommen und Produktion

PGM gehören zu den seltensten Metallen. Sie kommen gediegen und in verschiedenen Mineralen, z. B. Laurit (RuS_2), Osmiridium (Os–Ir) und Sperrylith ($PtAs_2$), vor. Der Großteil der weltweiten PGM-Primärproduktion und der identifizierten PGM-Primärressourcen können zwei Lagerstättentypen bzw. drei Orten zugeordnet werden: Zum einen dienen PGM-dominierte Lagerstätten, insbesondere mafische bis ultramafische magmatische Intrusionen (Bushveld-Komplex in Südafrika und Great Dyke in Simbabwe) als PGM-Quellen. Zum anderen werden PGM als Beiprodukte aus Nickel-Kupfer-dominierten Lagerstätten, insbesondere aus an Riftzonen

Tab. 4.30: Versorgungssituation bei PGM 2010, 2013 und 2018 (Quellen: BGR 2021, JM 2020, JM 2021a, JM 2021b, USGS 2011d, USGS 2014d, USGS 2020g)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]			
– Platin	194	195	190
Raffinadeproduktion [t Inh.]			
– Ruthenium	29,4	25,8	33
– Iridium	10,5	6,2	6,8
Reserven[1] [t Inh.]	66.110	66.110	69.310
Ressourcen[1] [t Inh]	> 100.000	> 100.000	> 100.000
Größte Bergbauländer[2]	Südafrika 76 % Russland 13 % Simbabwe 4 %	Südafrika 70 % Russland 13 % Simbabwe 7 %	Südafrika 72 % Russland 11 % Simbabwe 8 %
Größte Raffinadeländer	–	–	–
Länderkonzentration Bergbau[2,3]	5.999	5.999	5.402
Länderkonzentration Raffinade	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau[2,3]	0,09	0,09	0,06
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade	–	–	–
Preis Ruthenium[4] [USD/troz]	197,52	75,75	240,94
Preis Iridium[5] [USD/troz]	641,49	836,14	1.283,77
Preis Platin[6] [USD/troz]	1.611,73	1.487,31	879,75

[1] *Angaben für die Platingruppenmetalle*
[2] *Angaben für Platin*
[3] *zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[4] *Johnson Matthey base price (unfab) USD per troy oz (09.00 hrs)*
[5] *Johnson Matthey base price (unfab) USD per troy oz*
[6] *99,95%, London, morning, in warehouse*

und kontinentale Flutbasalte gebundenen Nickel-Kupfer-PGM-Vererzungen/Intrusionen (in der russischen Norilsk-Talnakh-Region) gewonnen. Ungefähr 26 % des Platinbedarfs werden durch Recycling gedeckt (Schmidt 2015; Zientek et al. 2017; Renner et al. 2018; JM 2021). Eine Zusammenfassung der Versorgungssituation findet sich in Tab. 4.30.

4.8.3 Verwendungen

Der Großteil des Rutheniumbedarfs entfällt auf chemische Anwendungen, z. B. die Caprolactam- und Adipinsäure-Industrie, und den Elektronikbereich, wo Ruthenium hauptsächlich zur Herstellung von Festplatten und Wiederständen in Chip-Bauform verwendet wird. Iridium wird größtenteils in elektrochemischen Anwendungsgebieten, z. B. in der Chloralkali-Elektrolyse, und im Elektronikbereich (als Tiegelmaterial in der Produktion von Kristallen für Elektronikanwendungen) eingesetzt. Als ein vielseitiger Katalysator findet Platin v. a. als Katalysator Anwendung. Daneben entfällt ein großer Teil des Platinbedarfs auf die Schmuckindustrie. Zu der drittwichtigsten Anwendungskategorie von Platin zählt die Nutzung als Investitionsgut/Wertaufbewahrungsmittel (JM 2021). Weitere Anwendungsbereiche sind in Tab. 4.31 aufgelistet.

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten PGM-haltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Rechenzentren
- Wasser-Elektrolyse
- Superlegierungen

4.8.4 PGM-Bedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe für die PGM Ruthenium, Iridium und Platin in Tab. 4.32 bis Tab. 4.34 geschätzt worden und sind in Abb. 4.8 bis Abb. 4.10 dargestellt. Bei Ruthenium bestand für die betrachteten Zukunftstechnologien im Jahr 2018 ein Bedarf von ca. 37 % der Produktion; bei Platin und Iridium bestand 2018 nahezu kein Bedarf an der heutigen Produktion. Der Bedarf könnte bei Ruthenium bis zum Jahr 2040 je nach Szenario auf bis zu 1.922 % der Raffinadeproduktion des Jahres 2018 anwachsen, vor allem getrieben durch die Nachfrage in Rechenzentren. Auch bei Platin und Iridium könnte der Bedarf steigen.

Tab. 4.31: Weltweite Verwendung von Ruthenium, Iridium und Platin 2019 (Quelle: JM 2021)

Anwendungsbereich	Ruthenium [%]	Iridium [%]	Platin [%]
Autoabgaskatalysatoren			34
Schmuck			24
Investment			13
Chemische Anwendungen	37	9	8
Glas			5
Petrochemie			3
Medizin und Biomedizin			3
Elektronik	37	21	3
Elektrochemische Anwendungen	13	35	
Andere Anwendungen	13	36	7
Gesamt	**100**	**100**	**100**

Tab. 4.32: Rutheniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Superlegierungen	12	22	21	29
Synthetische Kraftstoffe	0	13,8	6,8	13,4
Rechenzentren	0,1	44	167	592
Bedarfssumme	**12**	**80**	**195**	**634**
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	37 %	242 %	590 %	1.922 %

Tab. 4.33: Iridiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Wasser-Elektrolyse	0,01	34	20	2
Bedarfssumme	**0,01**	**34**	**20**	**2**
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	0 %	500 %	294 %	29 %

Tab. 4.34: Platinbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Wasser-Elektrolyse	0,01	6	2	0,33
Rechenzentren	0,1	60	230	810
Bedarfssumme	**0,11**	**66**	**232**	**810**
Bedarf / Primärproduktion 2018	0 %	35 %	122 %	426 %

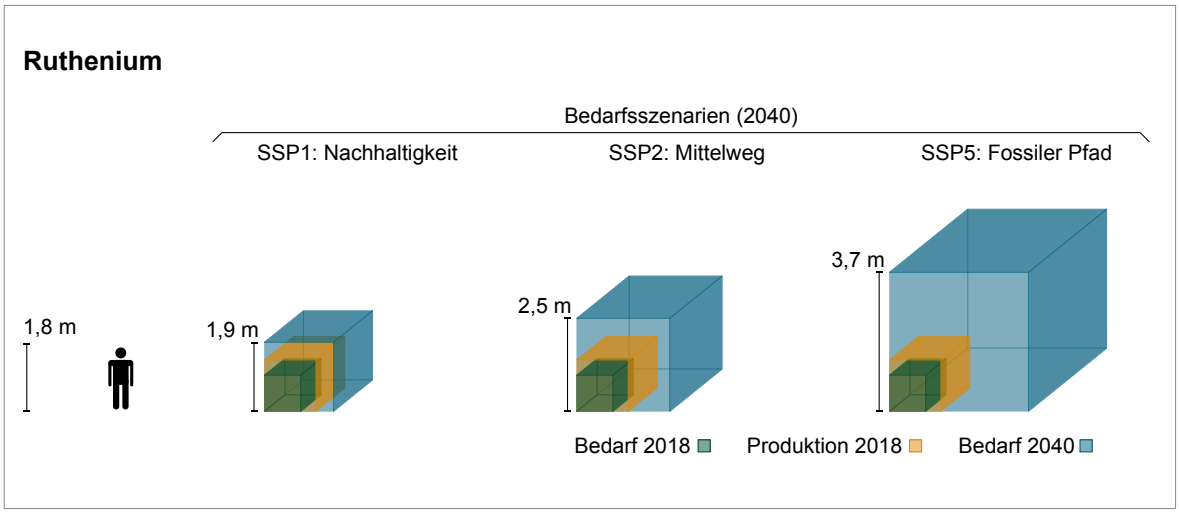


Abb. 4.8: Produktion 2018 und Bedarf von Ruthenium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

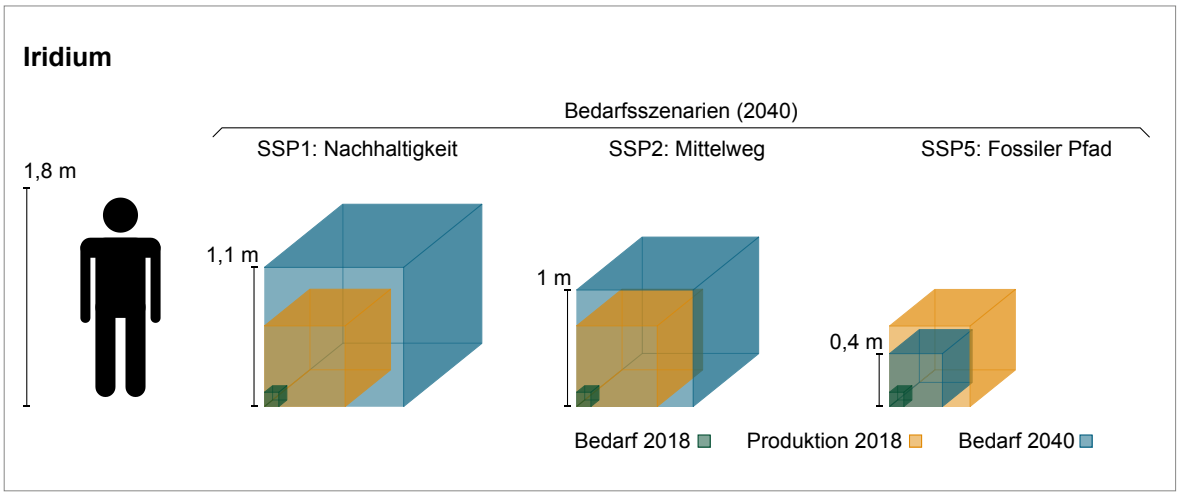


Abb. 4.9: Produktion 2018 und Bedarf von Iridium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

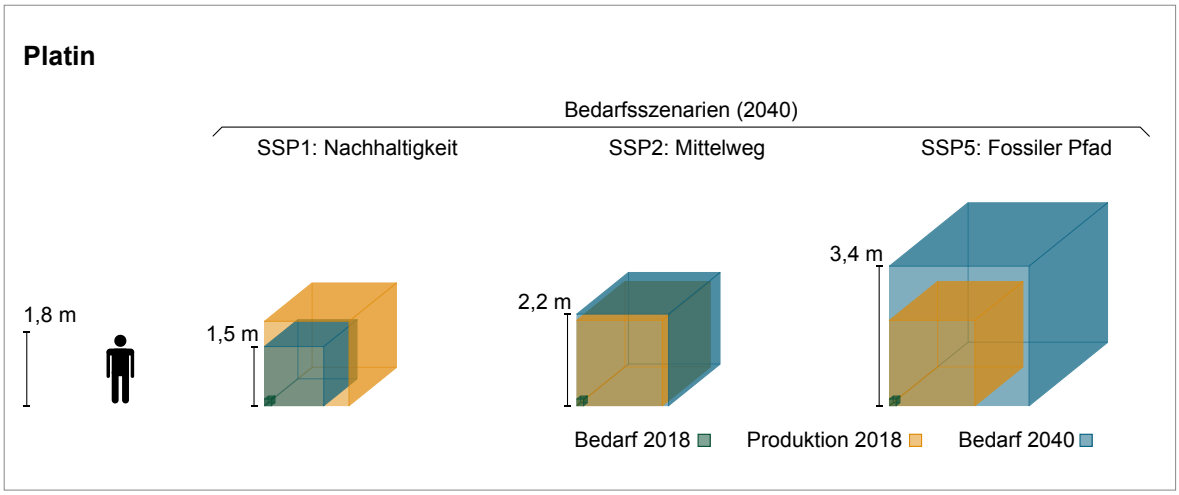


Abb. 4.10: Produktion 2018 und Bedarf von Platin für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.9 Rhenium

Rhenium steht zusammen mit Mangan und Technetium in der 7. Nebengruppe, der Mangangruppe, des Periodensystems der Elemente. Es wurde 1871 vorhergesagt, jedoch erst 1925 isoliert und ist somit das letzt-entdeckte natürliche Element. Die erste industrielle Rheniumproduktion wurde in den 1930er Jahren aufgenommen, doch aufgrund der hohen Produktionskosten wurde Rhenium erst ab den 1950er Jahren (als Legierungsmaterial) industriell bedeutend (Römpp o. J; Nadler 2003; John 2015; MMTA 2015; USGS 2020j).

4.9.1 Eigenschaften

Rhenium ist ein silberweißes Übergangsmetall. Es wirkt katalytisch, hat eine hohe Dichte und wird (manchmal) zu den Edelmetallen gezählt. Unter allen Metallen hat es den höchsten Siedepunkt (5.596 °C) und den zweithöchsten Schmelzpunkt (nach Wolfram) (Tab. 4.35). Allgemein weist es ähnliche Eigenschaften wie Molybdän auf. Als Legierungsbestandteil erhöht Rhenium u. a. die Duktilität bei niedrigen Temperaturen und die Stärke bei hohen Temperaturen (Römpp o. J; Nadler 2003; Quadbeck-Seeger 2007; John et al. 2017).

Tab. 4.35: Eigenschaften von Rhenium

Dichte	21,0 g/cm³
Schmelzpunkt	3186 °C
Elektrische Leitfähigkeit	5,56 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	48 W/(m · K)

4.9.2 Vorkommen und Produktion

In der Kontinentalkruste gehört Rhenium zu den seltensten Elementen. Natives Rhenium (in Spurenform) und das Rheniummineral Rheniit (ReS_2) kommen selten vor. Rheniumreiche Minerale (insbesondere Tarkianit mit einem Rheniumgehalt von ca. 54 %) sind wirtschaftlich unbedeutend. Die wichtigste Rheniumquelle ist Molybdänit (MoS_2), in dem Rhenium als Substitut von Molybdän in stark variierenden Konzentrationen vorkommt (Kojonen et al. 2004; John 2015; John et al. 2017).

Rhenium ist v. a. ein Beiprodukt des Kupferbergbaus und insbesondere der Molybdängewinnung. Hierbei werden primär porphyrische aber auch schichtgebundene Kupferlagerstätten genutzt. Große Mengen von Rhenium werden recycelt und

Tab. 4.36: Versorgungssituation bei Rhenium 2010, 2013 und 2018 (Quellen: BGR 2021, USGS 2011e, USGS 2014e, USGS 2020i)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]	45	49	50
Raffinadeproduktion [t Inh.]	–	–	–
Reserven [t Inh.]	2.453	2.453	2.372
Ressourcen [t Inh.]	11.000	11.000	11.000
Größte Bergbauländer	Chile 55 % USA 14 % Polen 10 %	Chile 51 % Polen 15 % USA 15 %	Chile 54 % Polen 18 % USA 16 %
Größte Raffinadeländer	–	–	–
Länderkonzentration Bergbau[1]	3.439	3.165	3.552
Länderkonzentration Raffinade	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau[1]	0,81	0,81	0,81
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade	–	–	–
Preis[2] [USD/kg]	4.828,53	3.400,21	1.519,17

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *in warehouse Rotterdam, duty unpaid, APR catalytic grade*

dienen als Sekundärrheniumquelle. Das weltweit im Jahr 2019 produzierte Primärrhenium stammt zu (geschätzten) 55 % aus Chile; weitere bedeutende Produzenten sind Polen und USA. In der Produktion von Sekundärrhenium sind Deutschland und USA führend. Die weltweiten Rheniumreserven verteilen sich größtenteils auf Chile, USA, Russland und Kasachstan (John et al. 2017; USGS 2017e; USGS 2020i). Tab. 4.36 bietet eine Zusammenfassung der weltweiten Versorgungssituation bei Rhenium.

4.9.3 Verwendungen

Aufgrund der zuvor beschrieben (thermischen und katalytischen) Eigenschaften von Rhenium ist es ein wichtiger Bestandteil von hitzebeständigen Materialien/Superlegierungen und Katalysatoren. So wird Rhenium in der Produktion von Turbinenblättern, die u. a. in Flugzeugen verbaut werden, und Katalysatoren, die in Erdölraffinerieprozessen (für das Reforming) eingesetzt werden, verwendet. Daneben finden sich Rheniumlegierungen in zahlreichen anderen Produkten, so z. B. in elektrischen Kontakten, Elektromagneten, Halbleitern und Elektronenröhren (Quadbeck-Seeger 2007; USGS 2017e; USGS 2020i). Weltweit entfallen 80 % des Rheniumbedarfs auf Superlegierungen (Europäische Kommission 2020a). Einen Überblick über die Anwendungsbereiche in der EU bietet Tab. 4.37.

Tab. 4.37: Verwendung von Rhenium in der EU (Quellen: Europäische Kommission 2020a, Europäische Kommission 2020b)

Anwendungsbereich	2012–2016 [%]
Luft- und Raumfahrt	83
Katalysatoren (für die Erdölindustrie)	17
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigste rheniumhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

– Superlegierungen

4.9.4 Rheniumbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.38 und Abb. 4.11 geschätzt worden. Die hier untersuchten Zukunftstechnologien benötigen heute schon etwa 30 % der gesamten Raffinadeproduktion. Der Bedarf für Superlegierungen könnte bis zum Jahr 2040 je nach Szenario auf bis zu 72 % der Bergwerksproduktion des Jahres 2018 anwachsen.

Tab. 4.38: Rheniumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Superlegierungen	15	28	26	36
Bedarfssumme	**15**	**28**	**26**	**36**
Bedarf / Primärproduktion 2018	30 %	56 %	52 %	72 %

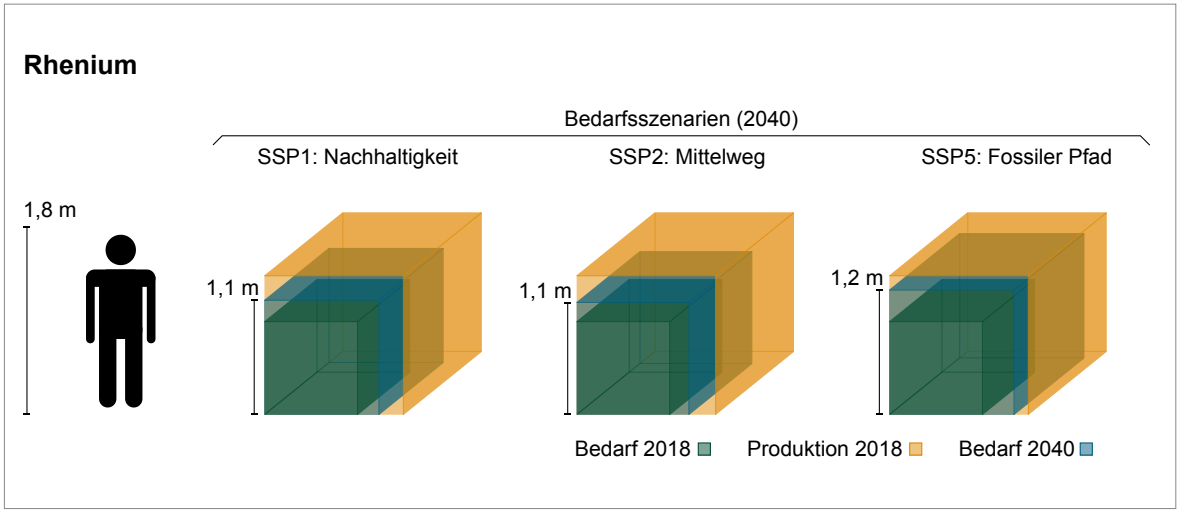


Abb. 4.11: Produktion 2018 und Bedarf von Rhenium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.10 Scandium

Scandium steht in der dritten Nebengruppe, der Scandiumgruppe, des Periodensystems der Elemente. Es wurde 1879 entdeckt, erfuhr jedoch über die folgenden Jahrzehnte wenig wissenschaftliche Aufmerksamkeit aufgrund von Schwierigkeiten es in ausreichender Menge und Reinheit zu gewinnen. So wurde (zu 95 % reines) Scandium in seiner metallischen Form erst 1937 zum ersten Mal hergestellt. Ab den 1950er Jahren fand eine verstärkte Erforschung von Scandium – u. a. dank seiner Gewinnbarkeit aus Kernspaltungsprozessen – statt, die zusammen mit den Entdeckungen im Anwendungsbereich der Legierungen in den 1960/70er Jahren den Weg für den (heutigen) Industrieeinsatz bereitete (Horovitz 1975; Bünzli & Mcgill 2018).

4.10.1 Eigenschaften

Scandium ist ein silberweißes, weiches Metall. Es wird zu den Leicht-, Übergangs- und (meistens auch) Seltenerdmetallen gezählt. So ist es ist fast so leicht wie Aluminium, in Pulverform brennbar und weist Katalysatoreigenschaften auf. Ähnlich wie Aluminium bildet es in der Luft eine schützende Oxidschicht. Lange Zeit waren v. a. die Legierungseigenschaften von Scandium von primären wirtschaftlichen Interesse: Ein Scandiumzusatz von 0,1 – 0,5 % erhöht die Stärke und den Schmelzpunkt des Aluminiums ohne eine (signifikante) Gewichtserhöhung; die so resultierende Legierung ist schweißbar (Römpp o. J; Enghag 2004; Emsley 2014; Binnemans et al. 2018).

Tab. 4.39: Eigenschaften von Scandium

Dichte	2,98 g/cm³
Schmelzpunkt	1.541 °C
Elektrische Leitfähigkeit	1,81 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	16 W/(m · K)

4.10.2 Vorkommen und Produktion

Scandium ist in der Erdkruste relativ weit verbreitet – so kommt es z. B. häufiger als Blei vor –, doch ist es dispers verteilt. In wirtschaftlich nutzbaren Konzentrationen ist es selten vorzufinden. Zu den Scandium(reichen)mineralen zählen u. a. Thortveitit ($Sc_2Si_2O_7$), Sterrettit ($ScPO_4 \cdot 2H_2O$) und Kolbeckit ($(Sc,Be,Ca)(SiO_4,PO_4) \cdot 2H_2O$). Daneben kommt Scandium niedrigkonzentriert in Verbindung mit zahlreichen anderen Mineralen (in Form von Mischkristallen) vor. Wolframerze (insbesondere Wolframit) und Zinnerze (insbesondere Kassiterit) können bis zu 1 % Scandium enthalten. Die als Scandiumquelle wirtschaftlich genutzten Uranerze haben dagegen deutlich niedrigere Konzentrationen. In den meisten Seltenerdmineralen kommt Scandium als Spurenelement vor (Römpp o. J; Emsley 2014; Bünzli & Mcgill 2018; USGS 2020k).

Aufgrund der niedrigen Konzentrationen, in denen es primär vorkommt, wird Scandium nur als Neben-/Beiprodukt der Gewinnungsprozesse von Eisenerz, Seltenen Erden, Titan, Zirkonium, Uran, Kobalt, Nickel und Apatit gewonnen. Da die Eigenschaften von Scandium denen von Aluminium ähneln, ist das Element auch in einigen Lateriten, beispielsweise in Australien, stark angereichert. Methoden und Machbarkeitsstudien zur Gewinnung von Scandium als Beiprodukt der Aluminiumförderung, -verarbeitung und -raffinierung werden entwickelt bzw. sind im Gange (Elsner et al. 2010; Al Barazi et al. 2016; USGS 2020k).

Im Vergleich mit anderen Metallmärkten ist der Scandiummarkt relativ klein; der Jahresbedarf von Scandium wird auf 10 bis 15 t geschätzt. Die führenden Produzenten sind China, Philippinen und Russland. Detailangaben zu den Länderkonzentrationen bzw. Länderrisiken können nicht gemacht werden, da die produzierten Scandiummengen nicht veröffentlicht werden (Elsner et al. 2010; USGS 2020k).

Auch Angaben zu Reserven und Ressourcen liegen nicht im Detail bzw. nur unvollständig vor (vgl. Tab. 4.40). Scandiumreserven werden u. a. für Australien und Philippinen berichtet. Die Scandiumressourcen sind umfangreich und finden sich in Australien, Kanada, China, Kasachstan, Madagaskar, Norwegen, Philippines, Russland, Ukraine und USA (USGS 2020k).

4.10.3 Verwendungen

Laut Grandfield (2018) entfielen im Jahr 2017 ungefähr drei Viertel des Scandium-Marktes auf den Bereich der Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC). In diesen wird u. a. Scandium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid als Elektrolyt eingesetzt und erlaubt im Vergleich zu den üblichen Alternativen niedrigere Betriebstemperaturen und somit eine längere Lebensdauer der SOFC. Daneben wird Scandium als Legierungsmaterial für den Bau von Sportgeräten (z. B. Fahrrädern) und in der Luftfahrtindustrie genutzt (Binnemans et al. 2018; CM 2018; Grandfield 2018). Tab. 4.41 ordnet diese Anwendungsbereiche quantitativ ein.

Tab. 4.41: Verwendung von Scandium 2017 (Quelle: Grandfield 2018)

Anwendungsbereich	2017 [%]
Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC)	74
Sportgeräte	10
Luftfahrtindustrie	3
Sonstige	13
Gesamt	**100**

Tab. 4.40: Versorgungssituation bei Scandium 2010, 2013 und 2018 (Quelle: BGR 2021)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Sc_2O_3]	8,2	9,6	14 (9,1 t Inh.)
Raffinadeproduktion [t Inh.]	–	–	–
Reserven [t Inh.]	–	–	–
Ressourcen [t Inh.]	–	–	–
Größte Bergbauländer	–	–	–
Größte Raffinadeländer	–	–	–
Länderkonzentration Bergbau	–	–	–
Länderkonzentration Raffinade	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade	–	–	–
Preis Scandiumoxid[1] [RMB/kg]	11.500,00	22.507,94	7.025,44

[1] *Scandium Oxide, 99,5 % min., China*

Zukunftstechnologien

Die wichtigste scandiumhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

– SOFC-Stationäre Brennstoffzelle

4.10.4 Scandiumbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.42 und Abb. 4.12 geschätzt worden. Es wird im Technologieszenario davon ausgegangen, dass Sc-Al-Verbindungen in der Luftfahrt langfristig kaum mehr eine Rolle spielen werden. Der Scandiumbedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2018 bei 55 % der Bergwerksförderung, 2040 könnten es in Bezug auf die Produktion 2018 je nach Szenario bis zu 791 % sein.

4.11 Seltenerdmetalle

In der Literatur werden verschiedene Definitionen und Untergruppierungen der Seltenerdmetalle genutzt. Im Folgenden werden die Seltenerdmetalle als eine Gruppe von 16 Metallen definiert, zu der Lanthan und die im Periodensystem auf das Lanthan folgenden 14 Elemente, die Lanthanoide, sowie Yttrium gehören. Die Seltenerdmetalle werden in die Leichten Seltenerdmetalle und die Schweren Seltenerdmetalle unterteilt. Die Untergruppe der Leichten Seltenerdmetalle umfasst Lanthan, Cer, Praseodym, Neodym, Promethium, Samarium und Europium (Cer-Gruppe). Zu der Untergruppe der Schweren Seltenerdmetallen gehören Yttrium, Gadolinium, Terbium, Dysprosium, Holmium, Erbium, Thulium, Ytterbium und Lutetium. Auch die Unterteilung in Leichte und Schwere Seltenerdmetalle ist in der Literatur nicht fest. So wird z. B. Europium z. T. nicht zu

Tab. 4.42: Scandiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien [in t Sc]

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Wasser-Elektrolyse	0,01	24	7	1
SOFC-Stationäre Brennstoffzelle	5	48	27	5
Bedarfssumme	**5**	**72**	**34**	**6**
Bedarf / Primärproduktion 2018	55 %	791 %	374 %	66 %

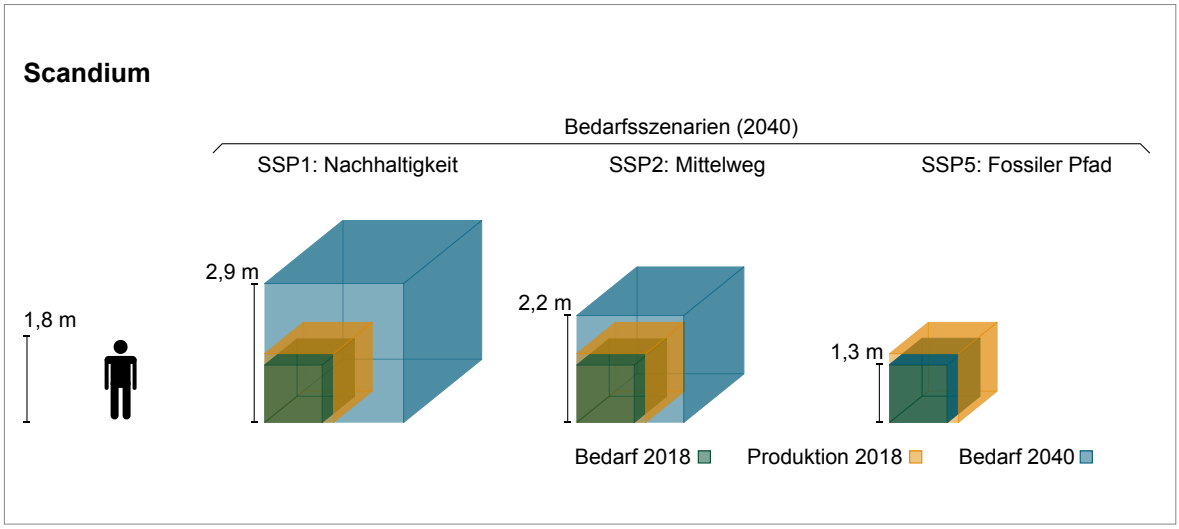


Abb. 4.12: Produktion 2018 und Bedarf von Scandium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

den Leichten sondern zu den Schweren Seltenen Erden gezählt (Elsner 2011; Binnemans et al. 2018; Bünzli & Mcgill 2018).

Die Entdeckung der Seltenerdmetalle zog sich über einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren – so wurde Yttrium als erstes, im Jahr 1794, und Lutetium als letztes, im Jahr 1907, entdeckt. Erste industrielle Einsatzgebiete zeichneten sich Ende des 19. Jahrhunderts im Metall-/Legierungsbereich (u. a. mit der Erfindung von „Mischmetall"). Um die Mitte des 20. Jahrhunderts kamen in einer zweiten Entwicklungswelle viele neue Einsatzgebiete z. B. in Gläsern und im Bereich des katalytischen Crackens (Erdölverarbeitung) hinzu. So stellte sich ab Mitte der 1960er Jahre ein starkes Wachstum der industriellen Nutzung der Seltenerdmetalle ein und setzte sich dank fortschreitender Entwicklung neuer Einsatzgebiete (u. a. im Bereich der Automobilabgaskatalysatoren, FCC Katalysatoren, Magnete, Batterien etc.) bis in die 2000er Jahre fort (Bünzli & Mcgill 2018; Wang et al. 2020).

4.11.1 Eigenschaften

Seltenerdmetalle in elementarer Form sind eisengrau bis silbrig glänzend. Sie sind relativ weich; ihr Elastizitätsgrad steigt mit dem Reinheitsgrad an. Innerhalb der Seltenerdmetallgruppe variiert der Schmelzpunkt im Bereich zwischen 798 °C (Cer) und 1.663 °C (Lutetium). Die meisten Seltenerdmetalle sind stark paramagnetisch; die schwereren Seltenerdmetalle sind bei tiefen Temperaturen ferromagnetisch. Allgemein sind Seltenerdmetalle sehr reaktionsfreudige und ziemlich unedle Metalle. Sie sind bei erhöhten Temperaturen entzündlich; fein pulverisiert sind sie oft pyrophor. Alle oxidieren schnell an der Luft, können in Pulverform viel Wasserstoff aufnehmen und lösen sich bei Einwirkung schwacher Säuren schnell auf. (Einzelne) Seltenerdmetalle und ihre chemischen Verbindungen weisen noch viele weitere, industriell bedeutende Eigenschaften auf (u. a. optische, katalytische und Legierungseigenschaften). Ein Überblick findet sich z. B. bei Bünzli & Mcgill (2018). Allgemein sind sich Seltenerdmetalle in ihren chemischen Eigenschaften ähnlich, weil sie alle die gleiche äußere Elektronenzahl haben (Römpp o. J; Quadbeck-Seeger 2007; Bünzli & Mcgill 2018).

4.11.2 Vorkommen und Produktion

Seltenerdmetalle sind trotz ihres Namens, der ihrer historischen Einordnung im 18. und 19. Jahrhundert geschuldet ist, nicht unbedingt selten. Tatsächlich unterscheidet sich die Elementhäufigkeit innerhalb der Seltenerdmetallgruppe stark. So hat Promethium kein stabiles

Tab. 4.43: Eigenschaften von ausgewählten Leichten Seltenerdmetallen

	Lanthan	Praseodym	Neodym
Dichte	6,2 g/cm³	6,5 g/cm³	7,0 g/cm³
Schmelzpunkt	920 °C	935 °C	1.024 °C
Elektrische Leitfähigkeit	1,63 · 10⁶ S/m	1,43 · 10⁶ S/m	1,56 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	13 W/(m · K)	13 W/(m · K)	17 W/(m · K)

Tab. 4.44: Eigenschaften von ausgewählten Schweren Seltenerdmetallen

	Yttrium	Terbium	Dysprosium
Dichte	4,4 g/cm³	8,2 g/cm³	8,6 g/cm³
Schmelzpunkt	1.526 °C	1.356 °C	1.407 °C
Elektrische Leitfähigkeit	1,66 · 10⁶ S/m	0,87 · 10⁶ S/m	1,08 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	17 W/(m · K)	11 W/(m · K)	11 W/(m · K)

Isotop und kommt daher so gut wie nicht natürlich vor (abgesehen von Beständen, die sich z. B. aufgrund von spontaner Kernspaltung von Uran-238 ergeben) – der Anteil von Promethium in Seltenerdmineralen ist kleiner als 10^{-19} %. Lutetium und Thulium fallen zwar nicht unter diese extreme Kategorie, sind dennoch sehr selten – ihre Häufigkeit in der oberen Erdkruste ist vergleichbar mit der von Silber. Andere Seltenerdmetalle sind durchaus weniger selten. Das unter ihnen am häufigsten in der (oberen) Kontinentalkruste Vorkommende ist Cer – es ist verbreiteter als z. B. Kobalt, Kupfer oder Blei. Allgemein kommen Leichte Seltenerdmetalle häufiger als Schwere Seltenerdmetalle vor (Elsner 2011; van Gosen et al. 2017; Binnemans et al. 2018; Bünzli & Mcgill 2018; USGS 2020h).

Seltenerdmetalle kommen in zahlreichen Mineralen vor, von denen die meisten zu der Gruppe der Silikate, Oxide, Karbonate oder Phosphate gehören. Daneben ist eine Kategorisierung der Seltenerdminerale anhand der in ihnen dominierenden (bzw. ihre Hauptkomponente bildenden) Seltenerduntergruppen möglich. So lassen sich drei Kategorien definieren: 1. Minerale, in denen Leichte Seltenerdmetalle dominieren, 2. Minerale, in denen Schwere Seltenerdmetalle dominieren, und 3. komplexe Minerale, in denen sowohl Leichte als auch Schwere Seltenerdmetalle dominierend sein können. Als repräsentative Minerale dieser drei Kategorien lassen sich jeweils Bastnäsit und Monazit, Xenotim sowie Fergusonit nennen, die allesamt relativ hohe Seltenerdanteile aufweisen (Römpp o. J; Dostal 2017; van Gosen et al. 2017; Bünzli & Mcgill 2018).

Zu den bedeutendsten Seltenerdmineralen zählen Bastnäsit, Monazit und Xenotim – in ihnen ist ein Großteil der Seltenerdressourcen gebunden. Neben diesen drei sind auch verschiedene andere Seltenerdminerale wirtschaftlich nutzbar, darunter Synchisit, Loparit und Eudialyt. Zu den wichtigsten Lagerstätten von Seltenerdmetallen zählen z. B. Karbonatite, die u. a. Bastnäsit enthalten, Monazit-/Xenotim-haltige Seifenlagerstätten, magmatische Alkaligesteine, in denen u. a. Loparit zu finden ist, und Ionen-Adsorptionstone in lateritischen Verwitterungskrusten. Die letzteren sind eine Hauptquelle für Schwere Seltenerdmetalle; Leichte Seltenerdmetalle werden hauptsächlich aus Karbonatiten und den zuvor erwähnten Seifenlagerstätten gewonnen (Römpp o. J; Schorn o. J; Adler & Müller 2014; Dostal 2017; USGS 2017d; van Gosen et al. 2017; Bünzli & Mcgill 2018; Balaram 2019).

Die Produktion, d. h. Förderung/Verarbeitung, und die Versorgungssituation sind durch drei (zusammenhängende) Eigenschaften der Seltenerdmetalle/-minerale geprägt: Seltenerdmetalle ähneln sich in ihren chemischen Eigenschaften und kommen in Lagerstätten/Mineralen gemeinsam in z. T. sehr unterschiedlichen Konzentrationen vor; die heute hauptsächlich genutzten Seltenerdminerale enthalten signifikante Mengen an Uran und Thorium. Aus diesen Gegebenheiten ergeben sich die zentralen Charakteristika der Seltenerdmetallproduktion: Seltenerdmetalle werden zu einem großen Teil als Beiprodukte hergestellt – dabei sind sie nicht nur Beiprodukte der Förderung von Nicht-Seltenerdmetallen (z. B. Eisenerz, Schwermineralen und Zinnerz), sondern können auch z. T. untereinander als Beiprodukte verstanden werden (s. u.). In der Produktion kommt der Separation der Seltenerdelemente (voneinander) eine zentrale Rolle zu; sie ist vom chemischen Standpunkt herausfordernd, und die dafür angewandten Methoden sind nicht sehr selektiv. Die Uran-/Thoriumgehalte der Seltenerdmineralen stellen nicht nur eine produktionstechnische Herausforderung vom Standpunkt des Umweltschutzes dar, sondern führen auch zur teilweisen Nichtnutzung einiger Minerale in spezifischen Lagerstätten. Allgemein ergibt sich aus diesen Produktionseigenheiten eine komplexe Versorgungssituation, die durch eine hohe Länderkonzentration im Bergbau (siehe Tab. 4.45), „Kritikalität“ der Seltenerdmetalle und Ungleichgewichte zwischen der Nachfragestruktur und der geologisch-technisch vorgegebenen Produktions-/Angebotsstruktur auf dem Seltenerdmarkt gekennzeichnet ist. Insbesondere das letztgenannte Problem wird durch die starke Koppelung der Produktion der einzelnen Seltenerdmetalle ausgelöst, sodass einige Seltenerdmetalle, die in den Erzen in hohen Konzentrationen vorkommen, eine Überschussproduktion aufweisen, damit die Nachfrage nach anderen Seltenerdmetallen, die in eher niedrigen Konzentrationen vorkommen, gedeckt werden kann (Elsner 2011; van Gosen et al. 2017; Binnemans et al. 2018; Bünzli & Mcgill 2018).

Heute beträgt Chinas Anteil an der weltweiten (dokumentierten) Seltenerdgewinnung ca. 65 % und ist somit deutlich kleiner als vor einigen Jah-

Tab. 4.45: Versorgungssituation bei Seltenerdmetallen 2010, 2013 und 2018 (Quelle: BGR 2021)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung[1] [t SEO]	139.393	92.884	173.800
Raffinadeproduktion [t]			
– Dysprosium	–	–	1.000
– Lanthan	–	–	35.800
– Neodym	–	–	23.900
– Praseodym	–	–	7.500
– Terbium	–	–	280
– Yttrium	–	–	7.600
Reserven[1] [1.000 t SEO]	113.778	136.230	111.731
Ressourcen [1.000 t SEO]	–	–	–
Größte Bergbauländer[1]	China 85 % Vietnam 8 % Thailand 4 %	China 90 % USA 4 % Vietnam 2 %	China 69 % Australien 10 % Myanmar 9 %
Größte Raffinadeländer[1]	–	–	–
Länderkonzentration Bergbau[1,2]	7.357	8.066	4.997
Länderkonzentration Raffinade[1,2]	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau[1,2]	–0,54	–0,46	–0,08
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade[1,2]	–	–	–
Preis Dysprosium[3] [USD/kg]	310,29	698,65	261,97
Preis Neodym[3] [USD/kg]	60,74	90,93	63,72
Preis Praseodym[3] [USD/kg]	62,21	104,59	114,48
Preis Terbium[3] [USD/kg]	718,26	1.356,06	604,25

[1] *Alle Seltenerdoxide*
[2] *zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[3] *min. 99 % fob China*

ren. Andere große Förderländer sind USA, Myanmar und Australien, die zusammen einen Anteil von ca. 33 % aufweisen. Der Großteil der Seltenerdreserven verteilt sich auf China, Brasilien, Vietnam und Russland. Ihr kumulativer Anteil an den weltweiten Reserven beträgt 83 % (USGS 2016; USGS 2020h). Tab. 4.45 bietet einen Überblick über die Versorgungssituation.

4.11.3 Verwendungen

Seltenerdmetalle haben zahlreiche Anwendungsgebiete, die sich den folgenden Bereichen zuordnen lassen: Magnete (in Festplatten, Lautsprechern, Kopfhörern, Motoren, Generatoren), Katalysatoren (FCC-, Automobilkatalysatoren), Metallurgie/Legierungen (Erhöhung der Warmumformbarkeit, Kupfer- und Aluminiumlegierungen), Energie (Brennstoffzellen, Metallhydride in Batterien), Glas und Keramik (UV-Blocker, Färbemittel/Pigmente, Poliermittel für Glas), Elektronik (Bildschirme/Displays, Kondensatoren, Thermistoren, Halbleiter), Photonik (Leuchtstoffe, Laser in Medizin, Telekommunikationssystemen) etc. Ein vertiefter Überblick über diese und weitere Anwendungsgebiete findet sich bei Bünzli & Mcgill 2018). Die (mengenmäßig) bedeutendsten Einsatzbereiche der Seltenerdmetalle sind Magnete und Katalysatoren. Sie machen mehr als die Hälfte des Seltenerdbedarfs aus (siehe Tab. 4.46).

Tab. 4.46: Weltweite Verwendung von Seltenerdmetallen 2018 (Quelle: Gao et al. 2019)

Anwendungsbereich	2018 [%]
Magnete	34
Katalysatoren	17
Poliermittel (Pulver)	11
Batterien (NiMH)	6
Sonstige (Metallurgie/Legierungen, Gläser/Keramiken, Leuchtstoffe)	32
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten Zukunftstechnologien für Seltenerdmetalle mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge
- Windkraftanlagen
- Hochleistungs-Permanentmagnete

4.11.4 Bedarf der Seltenerdmetalle 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.47 bis Tab. 4.50 geschätzt worden und sind in Abb. 4.13 bis Abb. 4.16 dargestellt.

Tab. 4.47: Bedarf von Lanthan für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Feststoffbatterie	–	38.000	11.000	1.200
Wasser-Elektrolyse	0,1	370	100	20
SOFC-Stationäre Brennstoffzelle	2	270	150	29
Bedarfssumme	**2,1**	**38.640**	**11.250**	**1.249**
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	0 %	108 %	31 %	3 %

Tab. 4.48: Bedarf Leichter Seltenerdmetalle (Neodym, Praseodym) für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Elemente	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge	Pr, Nd	1.430	34.050	31.350	31.960
Automatisches Pilotieren von Kraftfahrzeugen	Pr, Nd	0	15	16	22
Luftfahrzeuge für 3D-Mobilität (eVOTL)	Pr, Nd	–	11	30	70
Windkraftanlagen	Nd	2.430	13.470	8.900	3.180
Windkraftanlagen	Pr	390	2.420	1.480	520
Hochleistungs-Permanentmagnete	Pr, Nd	5.620	19.630	20.340	24.270
Rechenzentren	Pr, Nd	180	62	530	9.220
Bedarfssumme		**10.050**	**69.658**	**62.646**	**69.242**
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	Pr, Nd	32 %	222 %	200 %	221 %

Für Leichte Seltenerdmetalle könnte der Bedarf in der Anwendung an Neodym und Praseodym bis zum Jahr 2040 je nach Szenario auf bis zu 227 % der Primärproduktion des Jahres 2018 ansteigen (Tab. 4.48). Bei den Schweren Seltenerdmetallen könnte der Bedarf bis zum Jahr 2040 bei Dysprosium und Terbium insgesamt auf bis zu 687 % der Raffinadeproduktion des Jahres 2018 ansteigen (Tab. 4.50). Die Bedarfe an Lanthan sind der Tab. 4.47 und die Yttriumbedarfe der Tab. 4.49 zu entnehmen.

Tab. 4.49: Bedarf von Yttrium für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Automatisches Pilotieren von Kraftfahrzeugen	0	930	1.050	1.400
Wasser-Elektrolyse	0,7	2.800	800	150
SOFC-Stationäre Brennstoffzelle	2	840	470	90
Bedarfssumme	**2,7**	**4.570**	**2.320**	**1.640**
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	0 %	60 %	31 %	22 %

Tab. 4.50: Bedarf Schwerer Seltenerdmetalle (Dysprosium, Terbium) für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Elemente	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
			SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Elektrische Traktionsmotoren für Kraftfahrzeuge	Dy, Tb	500	5.140	7.530	7.680
Windkraftanlagen	Dy	270	1.370	970	350
Windkraftanlagen	Tb	77	480	290	100
Bedarfssumme		**847**	**6.990**	**8.790**	**8.130**
Bedarf / Raffinadeproduktion 2018	Dy, Tb	66 %	546 %	687 %	635 %

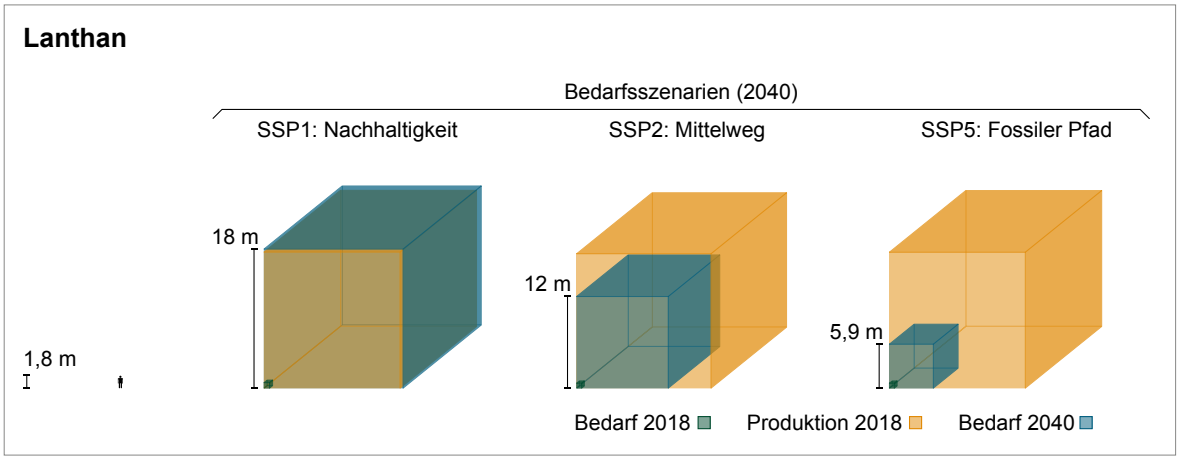


Abb. 4.13: Produktion 2018 und Bedarf von Lanthan für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

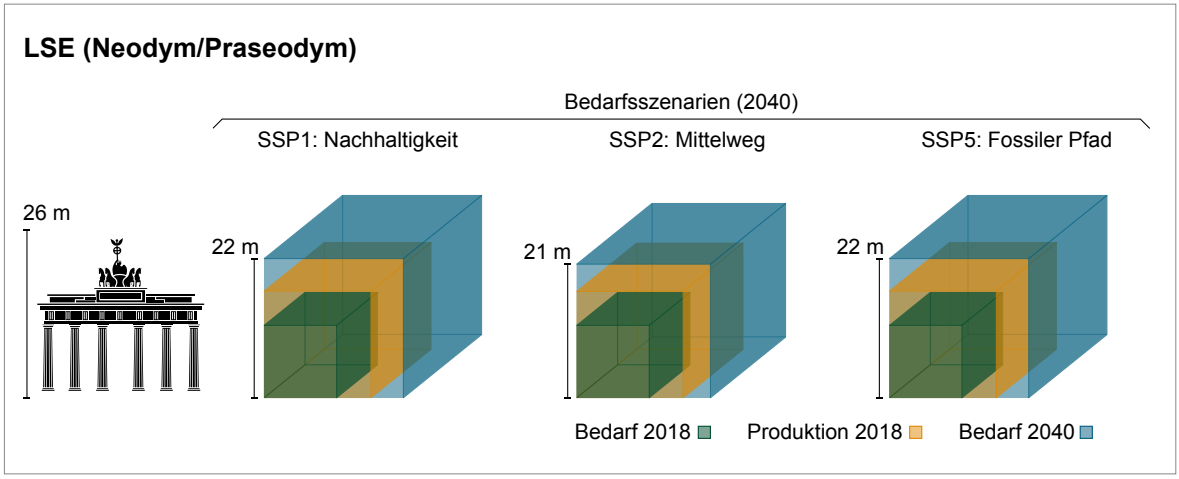


Abb. 4.14: Produktion 2018 und Bedarf von Neodym/Praseodym für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

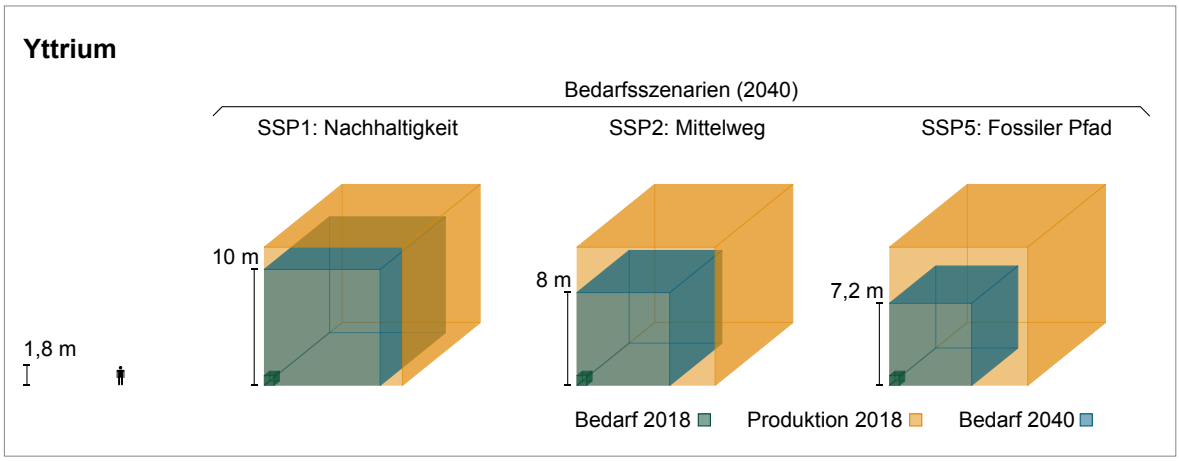


Abb. 4.15: Produktion 2018 und Bedarf von Yttrium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

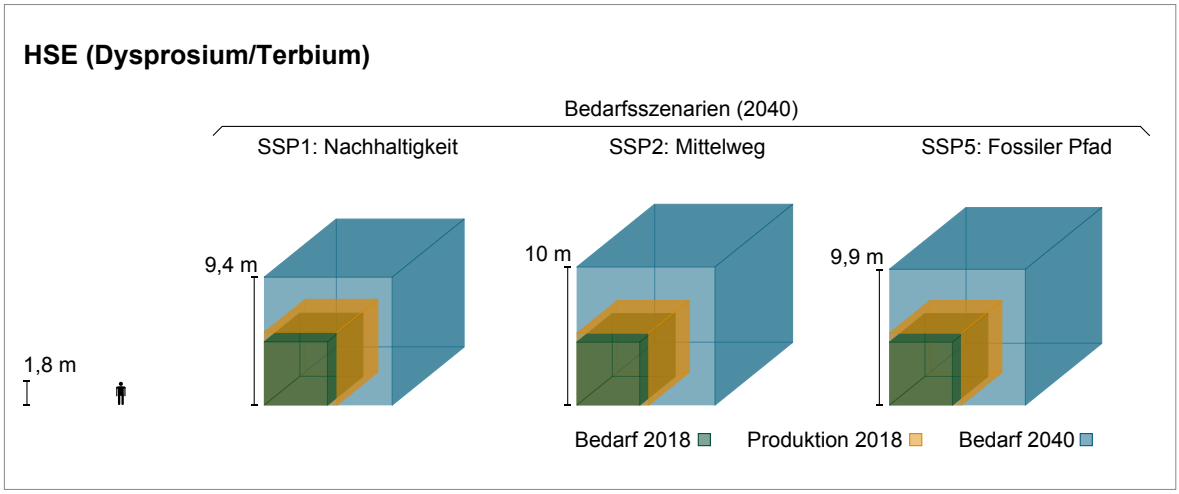


Abb. 4.16: Produktion 2018 und Bedarf von Dysprosium/Terbium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.12 Tantal

Tantal steht in der 5. Nebengruppe des Periodensystems der Elemente unterhalb von Vanadium und Niob. Es wurde 1802 (als Oxid) entdeckt und 1903 das erste Mal isoliert. Im 20. Jahrhundert durchging Tantal verschiedene Anwendungsbereiche, die sich u. a. seine Hitze- und Korrosionsbeständigkeit sowie Härte zu Nutze machten. Für die heutige Verwendungsstruktur von Tantal ist u. a. die Entwicklung der Tantal-Elektrolytkondensatoren in den 1950er Jahren von Bedeutung, die ein starkes Nachfragewachstum in diesem Bereich zur Folge hatte (Römpp o. J; Albrecht et al. 2012; Tercero Espinoza 2012).

4.12.1 Eigenschaften

Tantal ist ein platingraues Metall. Neben seinen hohen Schmelz- und Siedepunkten und einer hohen thermischen und elektrischen Leitfähigkeit verfügt es über eine hohe Festigkeit und Duktilität (Tab. 4.51). Durch eine dünne, jedoch sehr dichte, stabile Schicht aus Tantalpentoxid (Ta_2O_5) entsteht die Passivierung, welche eine Korrosionsbeständigkeit gegen die meisten Säuren bewirkt. Als Refraktärmetall ähnelt es in vielerlei Hinsicht Titan und Niob und kann diese in Anwendungen z. T. ersetzen (Römpp o. J; Albrecht et al. 2012; Schulz et al. 2017).

Tab. 4.51: Eigenschaften von Tantal

Dichte	16,7 g/cm³
Schmelzpunkt	2.996 °C
Elektrische Leitfähigkeit	7,6 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	57 W/(m · K)

4.12.2 Vorkommen und Produktion

Tantal kommt fast ausschließlich gemeinsam mit Niob vor. Beide haben ähnliche physikalische und chemische Eigenschaften, wobei Tantal mit durchschnittlich 2 ppm in der Erdkruste etwa zehnmal seltener ist als Niob (20 ppm). Es kommt in der Natur nicht gediegen vor. Die wirtschaftlich bedeutendsten Tantal- und Niobverbindungen sind Oxide, für die bergbauliche Gewinnung sind vor allem die Minerale der Columbit-Tantalit-Mischkristallreihe bedeutend. Beispiele für Tantalminerale/-erze mit Ta_2O_5-Gehalten im Bereich zwischen 40 % und 85 % sind Tantalit ($(Fe,Mn)Ta_2O_6$), Wodginit ($(Mn,Sn,Ti)Ta_2O_6$), Mikrolith ($Ca_2Ta_2O_6(O,OH,F)$) und Tapiolit ($FeTa_2O_6$); Columbit ($(Fe,Mn)(Nb,Ta)_2O_6$) hat einen Ta_2O_5-Gehalt zwischen 1 % und 40 % (Römpp o. J; Albrecht et al. 2012; Schulz et al. 2017; Damm 2018).

Tantal wird größtenteils aus Tantalit und Columbit-Tantalit-Mischerz („Coltan“) gewonnen. Dane-

Tab. 4.52: Versorgungssituation bei Tantal 2010, 2013 und 2018 (Quelle: BGR 2021)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]	739	1.265	1.832
Raffinadeproduktion [t Inh.]	–	–	–
Reserven [t Inh.]	108.200	98.001	110.001
Ressourcen [t Inh.]	–	–	–
Größte Bergbauländer	Ruanda 23 % Brasilien 19 % DR Kongo 14 %	Ruanda 44 % Brasilien 15 % DR Kongo 13 %	DR Kongo 27 % Ruanda 20 % Brasilien 20 %
Größte Raffinadeländer	–	–	–
Länderkonzentration Bergbau[1]	1.453	2.566	1.720
Länderkonzentration Raffinade	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau[1]	–0,48	–0,45	–0,65
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade	–	–	–
Preis[2] [USD/kg Ta_2O_5]	121,18	236,73	203,03

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *Tantalite: concentrate, 30 % Ta_2O_5, cif China*

ben werden auch Kassiterit, Loparit und als Beiprodukt gewonnene tantalhaltige Zinnschlacken genutzt. Die (wirtschaftlich) wichtigsten Tantallagerstätten sind Selten-Metall-Granite und Selten-Metall-Pegmatite; der Großteil der weltweiten Ressourcen ist in ihnen gebunden (Römpp o. J; Albrecht et al. 2012; Schulz et al. 2017; USGS 2017a; Damm 2018).

Der Großteil der weltweiten Tantalressourcen verteilt sich auf Südamerika, insbesondere Brasilien, und Australien. Für diese Länder werden auch signifikante Reserven angegeben. Die bedeutendsten Bergbauländer sind aktuell die DR Kongo, Ruanda und Brasilien; 67 % des weltweit geförderten Tantals stammen aus diesen drei Ländern (USGS 2017a; Damm 2018; USGS 2020l). Ein Überblick über die Versorgungssituation bei Tantal findet sich in Tab. 4.52.

4.12.3 Verwendungen

Heute stellen Kondensatoren, die u. a. in der Unterhaltungs- und Telekommunikationstechnologie eingesetzt werden, den größten Anwendungsbereich von Tantal dar. Auch die Beschichtungsverfahren, in denen Tantal eingesetzt wird, dienen der Herstellung von Produkten (z. B. Displays), die in elektronische Endprodukte eingehen. Zwei weitere quantitativ wichtige Einsatzbereiche von Tantal sind Superlegierungen, die unter anderem in Gasturbinen eingesetzt werden, und Chemikalien, die als Zwischenprodukte einen breiten Anwendungsbereich u. a. in der Optoelektronik und optischen Gläsern haben (Nassar 2017; Damm 2018; USGS 2020l). Einen Überblick über die Verwendung von Tantal bietet Tab. 4.53.

Tab. 4.53: Weltweite Verwendung von Tantal (Quelle: USGS 2017a)

Anwendungsbereich	2016 [%]
Kondensatoren	33
Superlegierungen	18
Sputtertargets für Beschichtungsverfahren	14
Walzprodukte	9
Karbidhaltige Werkzeug- und Schneidstähle	8
Chemikalien	18
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigsten tantalhaltigen Zukunftstechnologien mit hohen Wachstumspotenzialen sind:

- Mikroelektrische Kondensatoren
- Rechenzentren
- Superlegierungen
- Radiofrequenz-Mikrochips

4.12.4 Tantalbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.54 und Abb. 4.17 geschätzt worden. Der Tantalbedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2018 bei 69 % der Bergwerksförderung. Der Bedarf könnte bis zum Jahr 2040 je nach Szenario auf bis zu 221 % der Bergwerksproduktion des Jahres 2018 anwachsen.

Tab. 4.54: Tantalbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Superlegierungen	260	470	440	610
Mikroelektronische Kondensatoren	740	1.720	1.460	2.010
Radiofrequenz-Mikrochips	194	360	430	530
Rechenzentren	0,01	48	185	650
Bedarfssumme	**1.194**	**2.598**	**2.515**	**3.800**
Bedarf / Primärproduktion 2018	65 %	142 %	137 %	207 %

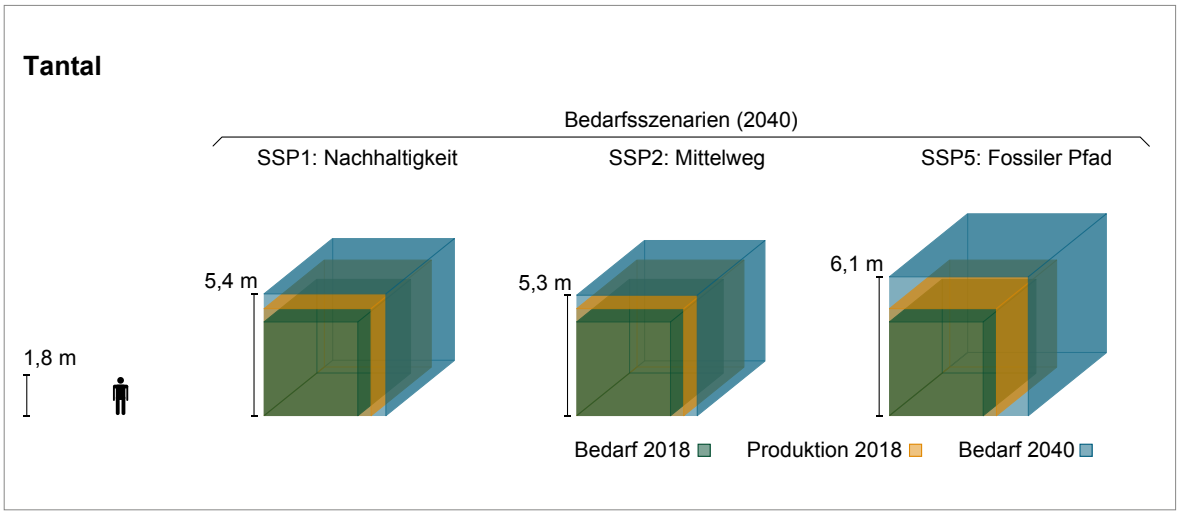


Abb. 4.17: Bergwerksproduktion 2018 und Bedarf von Tantal für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.13 Titan

Titan steht in der 4. Nebengruppe, der Titangruppe, des Periodensystems der Elemente oberhalb von Zirkonium und Hafnium. Es wurde Ende des 18. Jahrhunderts entdeckt und 1910 (in hochgradiger Form) isoliert. Die Entwicklung des Kroll-Prozesses Ende der 1930er Jahre ermöglichte die industrielle Produktion im großen Umfang, die ab 1946 einsetzte (Römpp o. J; Woodruff & Bedinger 2013; Sibum et al. 2017; Woodruff et al. 2017).

4.13.1 Eigenschaften

Titan in seiner Reinform ist ein silbrig-weiß glänzendes Metall. Es zählt zu den Leicht-, Übergangs- und Refraktärmetallen. So ist metallisches Titan relativ leicht und hat eine hohe mechanische Festigkeit sowie einen relativ hohen Schmelzpunkt (Tab. 4.55). Reinstes Titan ist duktil (es kann kaltgewalzt werden), doch schon bei geringen Verunreinigungen ist es spröde und hart. Allgemein sind viele Charakteristika von Titan, darunter die mechanischen Eigenschaften und die elektrische/thermische Leitfähigkeit, stark vom Reinheitsgrad und der thermischen/mechanischen Vorbehandlung abhängig – die Härte/Stärke von Titan und sein spezifischer Widerstand nehmen mit abnehmendem Reinheitsgrad (und durch Kaltumformung) zu. So wird Titan auf dem Markt in verschiedenen Reinheitsgraden angeboten, die je nach Anforderungsprofil (Härtegrad, Korrosionsbeständigkeit, Leitfähigkeit etc.) für verschiedene Anwendungen genutzt werden können. Titan ist unedel; es bildet eine schützende Oxidschicht, die seine Korrosionsbeständigkeit erhöht. Die Korrosionsbeständigkeit von Titan kann durch kleine Zusätze von anderen/edlen Metallen (Legierungen) erhöht werden. Titanpulver ist pyrophor (Römpp o. J; Quadbeck-Seeger 2007; Sibum et al. 2017).

Tab. 4.55: Eigenschaften von Titan

Dichte	4,5 g/cm^3
Schmelzpunkt	1.941 °C
Elektrische Leitfähigkeit	2,5 · 10^6 S/m
Wärmeleitfähigkeit	22 W/(m · K)

4.13.2 Vorkommen und Produktion

Titan gehört zu den in der Natur am häufigsten vorkommenden Metallen. In der oberen Erdkruste ist es häufiger als z. B. Kohlenstoff oder Stickstoff vorzufinden. Es kommt gediegen sowie in zahlreichen Mineralen (auch mit Seltenerdmetallen vergesellschaftet) vor. Zu den wichtigsten Titanmineralen/-erzen zählen u. a. zwei der natürlich vorkommenden Titanoxid-Modifikationen, Anatas (TiO_2) und Rutil (TiO_2), sowie Ilmenit ($FeTiO_3$),

das einen TiO_2-Gehalt von bis zu 53 % aufweisen kann. Leukoxen ist ein Verwitterungsprodukt von Ilmenit bzw. Titanomagnetit und besteht u. a. aus Rutil und Anatas neben eisenhaltigen Phasen und Phasen von Siliziumoxid. Der TiO_2-Gehalt liegt bei 76 – 90 %. Ein Großteil der weltweiten Titanressourcen sowie 89 % des weltweiten Titanmineralbedarfs entfallen auf Ilmenit, das aus Seifenlagerstätten abgebaut wird (Römpp o. J; Fang et al. 2013; Sibum et al. 2017; Woodruff et al. 2017; USGS 2020n).

Im Jahr 2018 wurde Ilmenit u. a. in China, Südafrika, Australien und Kanada abgebaut. Der Ilmenit-Output dieser Länder macht mehr als die Hälfte der weltweiten kumulierten Ilmenit- und Rutil-Förderung des Jahres 2018 aus. Die größten Ilmenit-/Rutil-Reserven werden für Australien, China und Indien berichtet, die allesamt Ilmenit-Reserven aufweisen (USGS 2020n). Eine Zusammenfassung der Versorgungssituation bei Titan findet sich in Tab. 4.56.

Tab. 4.56: Versorgungssituation bei Titan 2010, 2013 und 2018 (Quellen: BGR 2021, USGS 2012, USGS 2015, USGS 2020l, USGS 2020n)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung[1] [t TiO_2]	6.400.000	7.400.500	7.460.000
Raffinadeproduktion [t Inh.]			
– Titanschwamm	152.400	190.900	198.050
– Titanmetall (Primär-/Sekundärraffinade)	–	217.992	260.548
Reserven[1] [1.000 t Inh.]	690.000	770.000	820.000
Ressourcen [1.000 t TiO_2]	2.000.000	2.000.000	2.000.000
Größte Bergbauländer	Australien 23 % Kanada 18 % Südafrika 18 %	Australien 18 % Kanada 16 % Südafrika 16 %	Südafrika 17 % Australien 13 % Norwegen 9 %
Größte Raffinadeländer			
– Titanschwamm	–	China 40 % Russland 22 % Japan 21 %	China 36 % Japan 25 % Russland 22 %
– Titanmetall (Primär-/Sekundärraffinade)	–	USA 30 % China 28 % Russland 25 %	USA 33 % China 29 % Russland 23 %
Länderkonzentration Bergbau	–	–	–
Länderkonzentration Raffinade[2]			
– Titanschwamm	2.339	2.646	2.565
– Titanmetall (Primär-/Sekundärraffinade)	–	2.423	2.509
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade[2]			
– Titanschwamm	–0,07	–0,07	0,08
– Titanmetall (Primär-/Sekundärraffinade)	–	0,17	0,30
Preis[3] [USD/kg]	8,95	9,06	9,17

[1] *Titan-Mineralkonzentrat aus Ilmenit und Rutil*
[2] *zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[3] *Titanschwamm, 99,7 % Ti, ex-work China*

4.13.3 Verwendungen

Wie zuvor erwähnt, wird Titan(metall) in verschiedenen Reinheitsgraden angeboten. Titan vom höchsten Reinheitsgrad, Grad 1, wird in den Anwendungsbereichen eingesetzt, in den es weniger auf Festigkeit als auf Korrosionsbeständigkeit, Leitfähigkeit und Kaltumformbarkeit ankommt, z. B. in elektrischen Anwendungen. Grad 4 wird eingesetzt, wenn die Stärke/Festigkeit des Titans genutzt werden soll, z. B. in der Luft- und Raumfahrt und in einigen medizinischen Anwendungen. Daneben kommen verschiedene Titanlegierungen zum Einsatz, die verbesserte Eigenschaften (z. B. höhere Korrosionsbeständigkeit) im Vergleich zu reinem Titan aufweisen. Fast der gesamte Titanmetallbedarf entfällt auf die Bereiche Luft- und Raumfahrt, Legierungen und sonstige industrielle Anwendungen. Die sonstigen, nichtindustriellen Anwendungen, z. B. medizinische Anwendungen, haben einen nur geringen Anteil am Titanmetallbedarf. Doch spielen alle Anwendungen des Titanmetalls eine nur untergeordnete Rolle im Vergleich zu den Anwendungen des Titanoxids. Der Großteil (95 %) der geförderten Titanerze wird nicht zu Titanmetall, sondern zu Titanoxid verarbeitet. Dieses findet dank seiner hohen Lichtbrechung weite Anwendung als Weißpigment in Farben, Kunststoffen, Papier etc. Weitere Titananwendungsbereiche sind Katalysatoren, Keramiken, Stoff-/Faserbeschichtungen etc. (Quadbeck-Seeger 2007; Sibum et al. 2017; DERA 2019; USGS 2020m). Ein Überblick über die Verwendung des Titans in der EU findet sich in Tab. 4.57.

Tab. 4.57: Verwendung von Titan in der EU (Quelle: Europäische Kommission 2020a)

Anwendungsbereich	2012–2016 [%]
Farben	54
Kunststoffe	24
Luft- und Raumfahrt	8
Medizinisches Equipment	6
Kraftfahrzeuge	3
Legierungen	2
Andere	3
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigste titanhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

– Meerwasserentsalzung

4.13.4 Titanbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.58 und Abb. 4.18 geschätzt worden. Die betrachteten Zukunftstechnologien benötigten 2018 ca. 29 % der Produktion von Titanmetall. Der Bedarf könnte bis zum Jahr 2040 je nach Szenario auf bis zu 55 % der Produktion von 2018 anwachsen.

Tab. 4.58: Titanbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
Legierungen für den Airframe-Leichtbau	57.000	75.000	80.000	110.000
Superlegierungen	5.000	8.500	8.000	11.100
Feststoffbatterie	–	15.000	4.400	500
Additive Fertigung von Metallbauteilen („3D-Drucker“)	308	6.460	7.000	6.900
Wasser-Elektrolyse	4	13.600	3.900	720
Meerwasserentsalzung	12.500	9.400	6.300	12.900
Bedarfssumme	**74.812**	**127.960**	**109.600**	**142.120**
Bedarf / Produktion Titanschwamm 2018	38 %	65 %	55 %	72 %
Bedarf / Produktion Titanmetall 2018	29 %	49 %	42 %	55 %

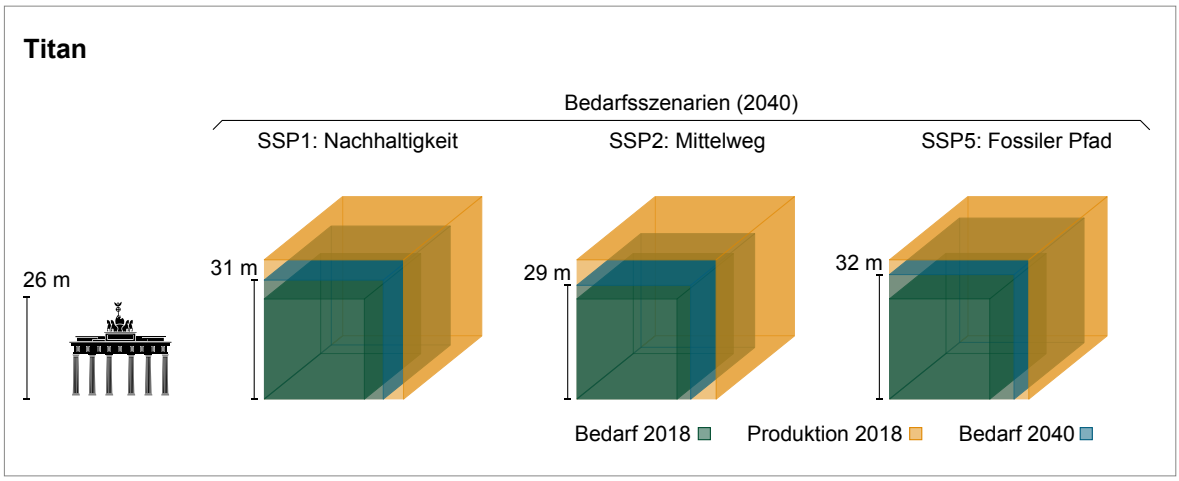


Abb. 4.18: Raffinadeproduktion (Titanmetall) 2018 und Bedarf von Titan für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

4.14 Vanadium

Vanadium steht an erster Stelle der 5. Nebengruppe des Periodensystems der Elemente. Es wurde 1801 entdeckt und 1867 in sehr reiner Form isoliert. Die erste größere Anwendung erfolgte im Jahr 1903 in der Produktion einer Vanadium-Stahl-Legierung und darauffolgend in der Automobilindustrie (Römpp o. J; Bauer et al. 2017a).

4.14.1 Eigenschaften

Vanadium ist ein stahlgraues und bläulich schimmerndes Metall. Seine mechanischen Eigenschaften hängen stark vom Reinheitsgrad ab: Relativ reines Vanadium ist duktil und lässt sich in kaltem Zustand schmieden und wälzen; bei Verunreinigung mit z. B. Sauerstoff oder Kohlenstoff nimmt die Duktilität ab und die Härte/Stärke zu. Bei niedrigen Raumtemperaturen ist Vanadium relativ korrosionsbeständig. Es ist mit verschiedenen Metallen gut legierbar (Römpp o. J; Bauer et al. 2017a).

Tab. 4.59: Eigenschaften von Vanadium

Dichte	6,11 g/cm³
Schmelzpunkt	1.910 °C
Elektrische Leitfähigkeit	5 · 10⁶ S/m
Wärmeleitfähigkeit	31 W/(m · K)

4.14.2 Vorkommen und Produktion

Vanadium ist nicht selten; in der Erdkruste kommt es häufiger als Nickel oder Kupfer vor. Es ist auch gediegen vorzufinden. Zu den wichtigen Vanadiummineralen zählen u. a. Montroseit ((V,Fe)OOH), Corvusit ($V_2^{4+} \cdot V_{12}^{5+}\ 0_{34} \cdot nH_20$) und Roscoelith ($[KV_2(OH)_2/AlSi_3O_{10}]$), die Vanadiumgehalte jeweils von etwa 45,5 %, 40,8 % und 11,2 – 14 % aufweisen. Vanadiumvorkommen finden sich in Titanomagnetit-Erz, Phosphatgestein, uranhaltigem Sand- und Siltstein, Bauxit sowie kohlenstoffhaltigen Materialien, z. B. Kohle und Erdöl (Römpp o. J; Ostrooumov & Taran 2016; Bauer et al. 2017a; Kelley et al. 2017; USGS 2020o).

Titanomagnetitlagerstätten, in denen Magnetit (Fe_3O_4) und Ilmenit ($FeTiO_3$) die wichtigsten vanadiumhaltigen Minerale sind, dienen als Hauptquelle für die heutige Vanadiumproduktion. Bei der Produktion von Vanadium aus Titanomagnetit wird Vanadium als Primärprodukt aus Titanomagnetit und als Beiprodukt aus der Schlacke, die bei der Verhüttung von Titanomanetit zu Roheisen entsteht, gewonnen. In der Sekundärproduktion gewinnt man Vanadium u. a. aus vanadiumhaltigen Flugaschen, verbrauchten Katalysatoren und Industrieabfallprodukten. Im Jahr 2018 wurde Vanadium u. a. in China, Russland und Südafrika gefördert. Die größten Reserven wurden für China, Russland und Australien berichtet (Römpp o. J; Bauer et al. 2017a; Kelley et al. 2017; USGS 2017f; USGS 2020o). Ein Überblick über die Versorgungssituation findet sich in Tab. 4.60.

Tab. 4.60: Versorgungssituation bei Vanadium 2010, 2013 und 2018 (Quellen: BGR 2021, USGS 2011f, USGS 2014f, USGS 2020o)

	2010	2013	2018
Bergwerksförderung [t Inh.]	54.714	61.600	90.661
Raffinadeproduktion [t Inh.]	–	–	–
Reserven [t Inh.]	13.645.100	13.645.100	20.275.000
Ressourcen [t Inh.]	> 63.000.000	> 63.000.000	> 63.000.000
Größte Bergbauländer	China 47 % Südafrika 33 % Russland 18 %	China 55 % Südafrika 26 % Russland 18 %	China 58 % Russland 19 % Südafrika 16 %
Größte Raffinadeländer	–	–	–
Länderkonzentration Bergbau[1]	3.595	4.062	4.104
Länderkonzentration Raffinade	–	–	–
Gewichtetes Länderrisiko Bergbau[1]	–0,29	–0,36	–0,30
Gewichtetes Länderrisiko Raffinade	–	–	–
Preis[2] [USD/kg]	30,06	27,70	81,37

[1] *Zur Bedeutung der Farben s. im Glossar unter HHI und GLR*
[2] *Ferro-Vanadium, basis min. 78 %, free delivered duty paid, consumer plant, 1st grade Western Europe*

4.14.3 Verwendungen

Vanadium wird zum größten Teil als Bestandteil von Stahl- und anderen (z. B. Titan-) Legierungen verwendet. Durch Zugabe von Vanadium wird u. a. die Zug-, Warmfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit erhöht. Vanadiumhaltige Legierungen haben ein breites Einsatzgebiet das von Werkzeugen über Fahrzeuge und Schiffe bis zu Pipelines und Brücken reicht. Des Weiteren wird Vanadium in Energiespeichern (z. B. Vanadium-Redox-Batterien) und zahlreichen Chemikalien (die z. B. als Katalysatoren verwendet werden) eingesetzt (Bauer et al. 2017a; Kelley et al. 2017; USGS 2017f; USGS 2020o).

Tab. 4.61: Weltweite Verwendung von Vanadium (Quelle: TNT Limited o. J.)

Anwendungsbereich	2017 [%]
Stahl	86
Nichteisenlegierungen	5
Energiespeicher	5
Chemikalien	4
Gesamt	**100**

Zukunftstechnologien

Die wichtigste vanadiumhaltige Zukunftstechnologie mit hohem Wachstumspotenzial ist:

– Redox-Flow-Speicher

4.14.4 Vanadiumbedarf 2040

Aus der Analyse der Technologiesynopsen sind die zusätzlichen Rohstoffbedarfe in Tab. 4.62 und Abb. 4.19 geschätzt worden. Der Vanadiumbedarf für das untersuchte Segment der Zukunftstechnologien lag im Jahr 2018 bei ca. 0,4 % der Bergwerksförderung. Der Bedarf könnte bis zum Jahr 2040 je nach Szenario auf bis zu 77 % der Bergwerksproduktion des Jahres 2018 anwachsen.

Tab. 4.62: Vanadiumbedarf für ausgewählte Zukunftstechnologien in t

Technologie	Bedarf 2018	Bedarf 2040		
		SSP1 Nachhaltigkeit	SSP2 Mittelweg	SSP5 Fossiler Pfad
CCS – Carbon Capture and Storage	–	3.200	8.800	0
Redox-Flow-Speicher	60	60.500	60.500	60.500
Meerwasserentsalzung	260	200	130	270
Bedarfssumme	**320**	**63.900**	**69.430**	**60.770**
Bedarf / Primärproduktion 2018	0,4 %	70 %	77 %	67 %

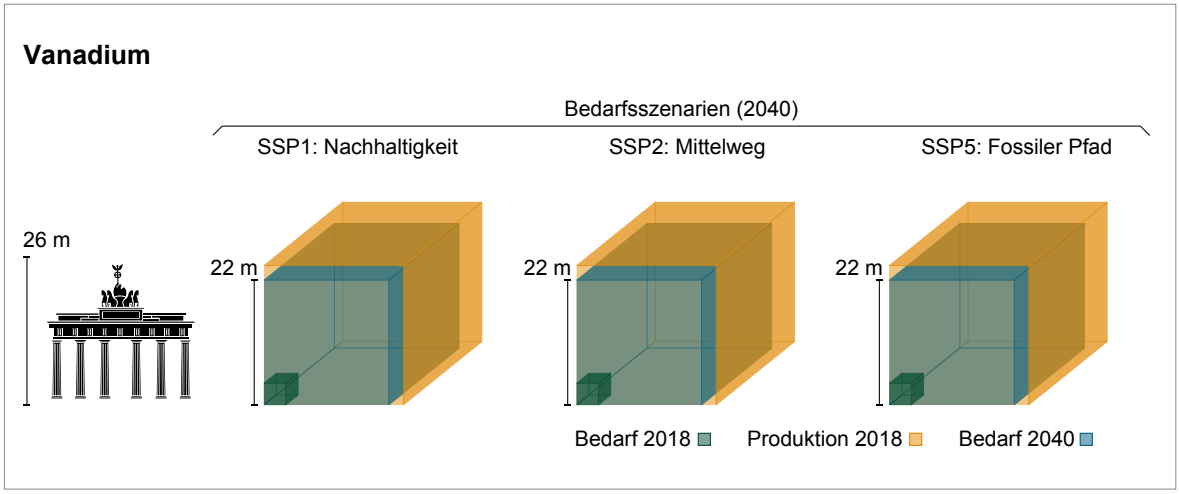


Abb. 4.19: Bergwerksproduktion 2018 und Bedarf von Vanadium für Zukunftstechnologien 2018 und 2040

5 Schlussfolgerungen

In den Vorgängerstudien aus den Jahren 2009 und 2016 (Angerer et al. 2009; Marscheider-Weidemann et al. 2016) waren es die Elektromobilität und Dünnschicht-Photovoltaik, die den größten Einfluss auf die jeweils in den Studien am kritischsten dargestellten Rohstoffe hatten. Lithium-Ionen-Hochleistungsspeicher, Feststoffbatterien und Elektrische Traktionsmotoren erzeugen auch in dieser Studie einen wesentlichen Bedarf an Lithium, Kobalt und Seltenerdmetallen. Bei der Dünnschicht-PV haben bessere Wirkungsgrade, dünnere Absorberschichten und ressourceneffizientere Herstellungsverfahren zu einer Verringerung des Galliumbedarfs geführt.

Die in dieser Studie untersuchen 33 Technologien wurden ausgewählt, weil sie wesentlich für die analysierten Cluster sind. Die Cluster sind „Mobilität, Luft- und Raumfahrt“, „Digitalisierung und Industrie 4.0“, „Energietechnologien und Dekarbonisierung“, „Kreislauf- und Wasserwirtschaft“ sowie „Strom- und Datennetzwerke“. So sind z. B. Glasfaserkabel oder Rechenzentren wesentliche Technologien der Infrastruktur, die für das Cluster Digitalisierung und Industrie 4.0 notwendig ist. Bei Rechenzentren ergeben sich aufgrund der großen gespeicherten Datenmengen große Bedarfe an HDD-Festplatten, für die Ruthenium und Platin gebraucht werden. Aufgrund der „ungehemmten Datennutzung“ in SSP5 ergibt sich so bei Ruthenium im Jahr 2040 ein 19-facher Bedarf gegenüber der Produktion 2018, bei Platin ist es der vierfache Bedarf. Es steht aber mit SSD-Festplatten eine Technologie zur Verfügung, die zur Substitution von HDDs genutzt werden kann. Da diese deutlich teurer ist als HDD-Festplatten, setzt sie sich aber nicht so schnell wie früher angenommen am Markt durch, so dass HDDs auch im Jahr 2040 noch eine große Rolle spielen werden.

Im Cluster Energietechnologien und Dekarbonisierung spielt die Wasser-Elektrolyse eine große Rolle, um mit regenerativen Strom, CO_2-frei Wasserstoff herzustellen. Die am Markt verfügbaren bzw. beforschten Technologien sind Alkalische Elektrolysen (AEL), Polymerelektrolytmembran Elektrolysen (PEMEL) und die Festkörperoxid-Elektrolyse (SOEL). Während bei der AEL unedle Metalle eingesetzt werden, verwendet die PEMEL in der Anode meist Iridium und in der Kathode Platin. Bei der SOEL werden u. a. Scandium und Yttrium im Festelektrolyt eingesetzt. Da die SOEL ähnlich wie die SOFC – Festoxid-Brennstoffzelle funktioniert, werden hier dieselben Rohstoffe eingesetzt.

Bei den Vorgängerstudien war es eine Herausforderung, Szenarien-Annahmen zu treffen, die möglichst für alle untersuchten Technologien Geltung hatten. Diese gemeinsame Sicht auf die Entwicklung gelang nur partiell, z. B. durch die Nutzung eines gemeinsamen Modells zur Marktdiffusion von Elektroautos. In der vorliegenden Studie wurden die Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) genutzt, welche ab dem Jahr 2011 im Rahmen des 5. Sachstandsberichts des Weltklimarates (IPCC) für klimapolitische Fragestellungen erstellt wurden (Kriegler et al. 2012). Es wurden drei SSPs ausgewählt, welche unterschiedliche globale sozioökonomische Entwicklungen für das 21. Jahrhundert darstellen: SSP1 Nachhaltigkeit – Auf dem grünen Weg, SSP2 Der Mittelweg und SSP5 Fossil-angetriebene Entwicklung – Der fossile Pfad.

Soweit möglich, wurden für die Technologiekapitel die Narrative und die Daten aus den für die SSPs entwickelten Modellen genutzt, etwa zum globalen BIP, zum Energieverbrauch oder zur Entwicklung der Bevölkerung (IIASA o. J.). Wo es in den SSPs keine Aussagen zur Entwicklung von Indikatoren gab, die für den Markt der Technologien notwendig waren, wurden die Narrative ergänzt und mit Zahlen hinterlegt. Dies war vor allem im Bereich der Elektromobilität und der Digitalisierung nötig, da es für diese Sektoren keine direkten Aussagen aus den Veröffentlichungen zu den SSPs gibt.

Ergebnisse für die verschiedenen SSPs

Je nach Entwicklungspfad unterscheiden sich die im Jahr 2040 benötigten Rohstoffmengen für die untersuchten Technologien zum Teil sehr deutlich.

Aufgrund der nachhaltigen Entwicklung in SSP1 wird vor allem die Dekarbonisierung vorangetrieben, was zu einem hohen Rohstoffbedarf an Scandium, Lithium, Schweren und Leichten Seltenerdmetallen, Iridium und Kobalt führt, siehe Abb. 5.1. Der Bedarf resultiert vor allem aus den Wasserstofftechnologien, Lithium-Ionen-Hochleistungsspeichern, Feststoffbatterien, Elektrischen Traktionsmotoren, Windkraftanlagen und

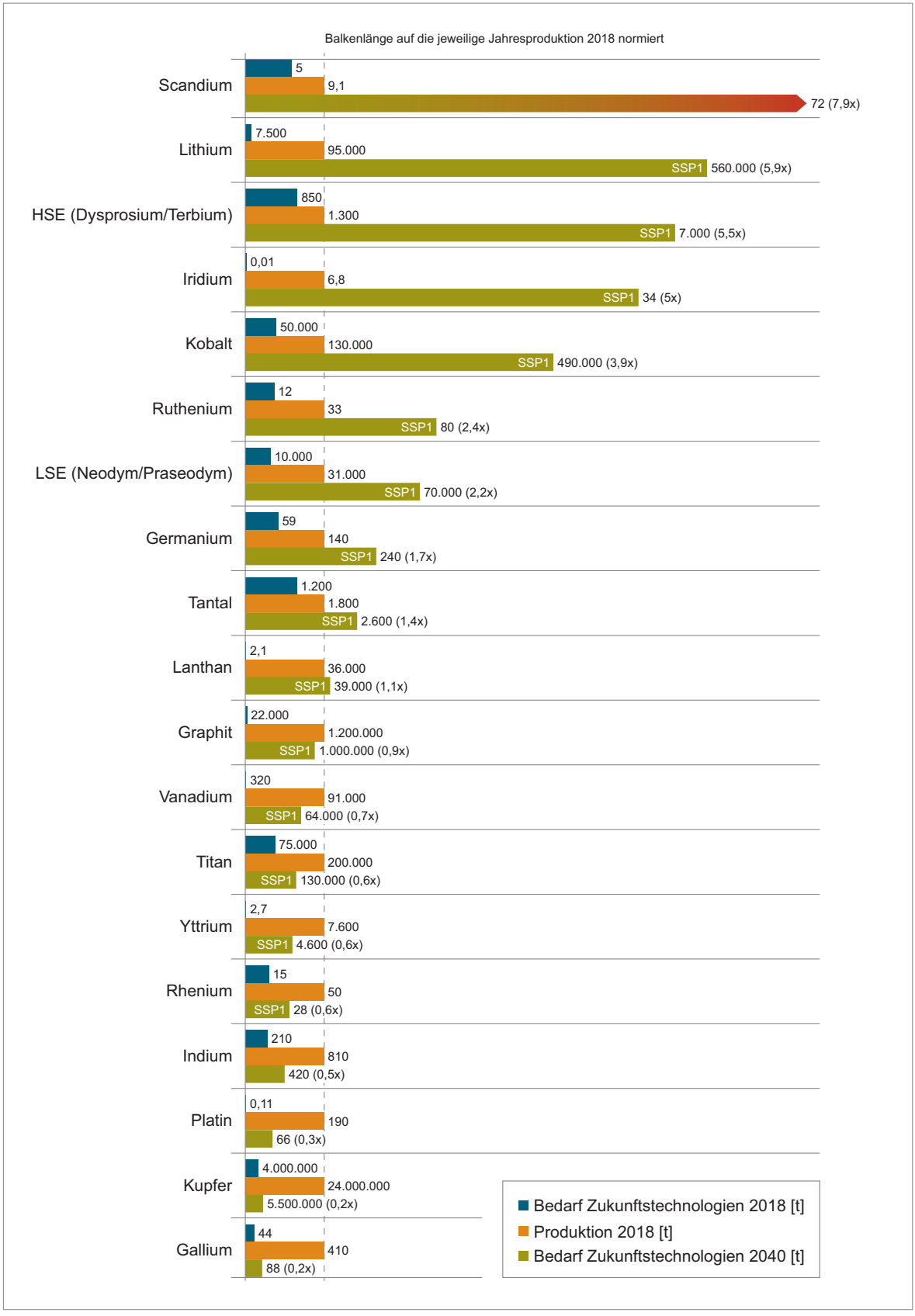


Abb. 5.1: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien für das Jahr 2018 und im SSP1 im Jahr 2040 im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2018

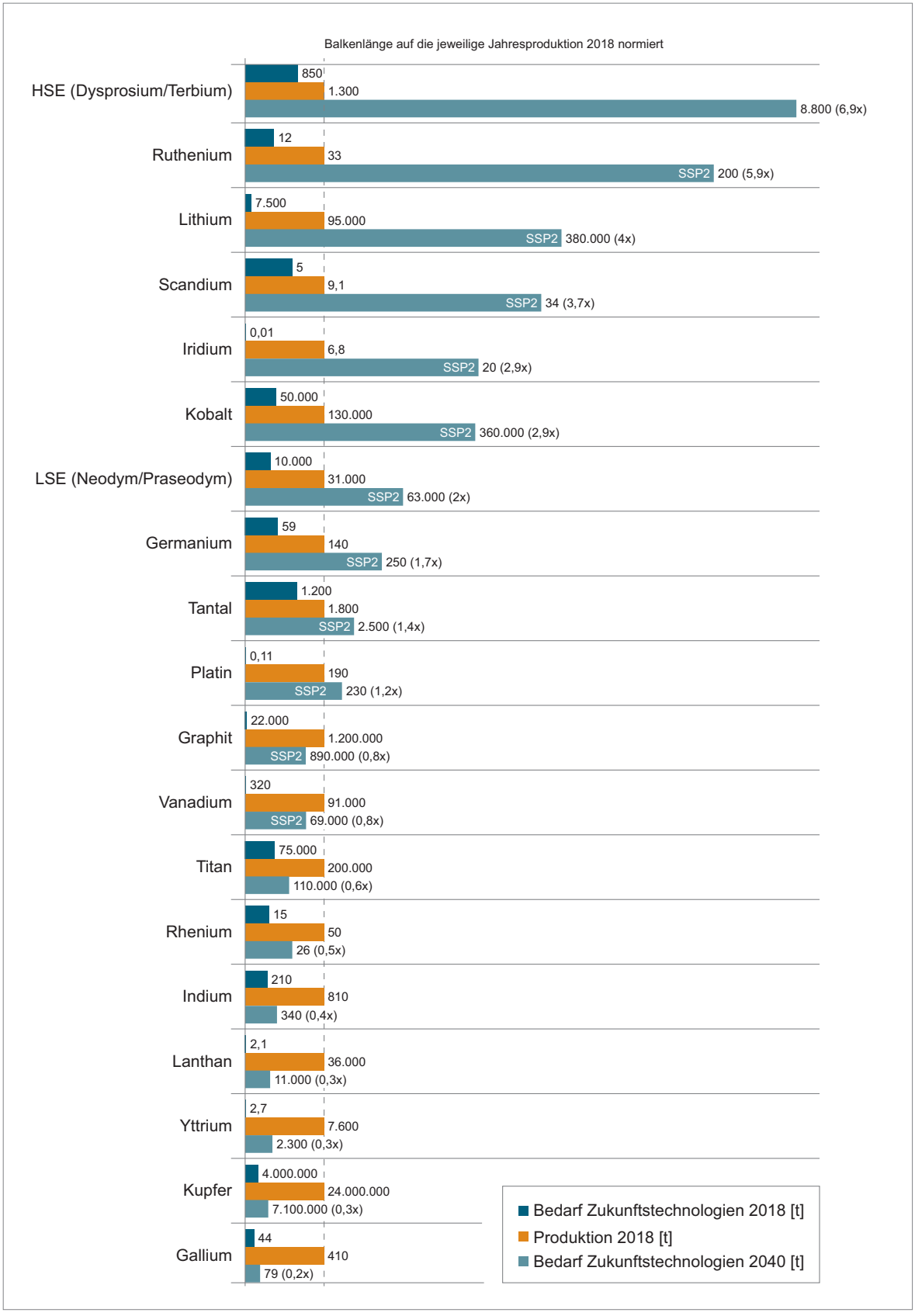


Abb. 5.2: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien für das Jahr 2018 und im SSP2 im Jahr 2040 im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2018

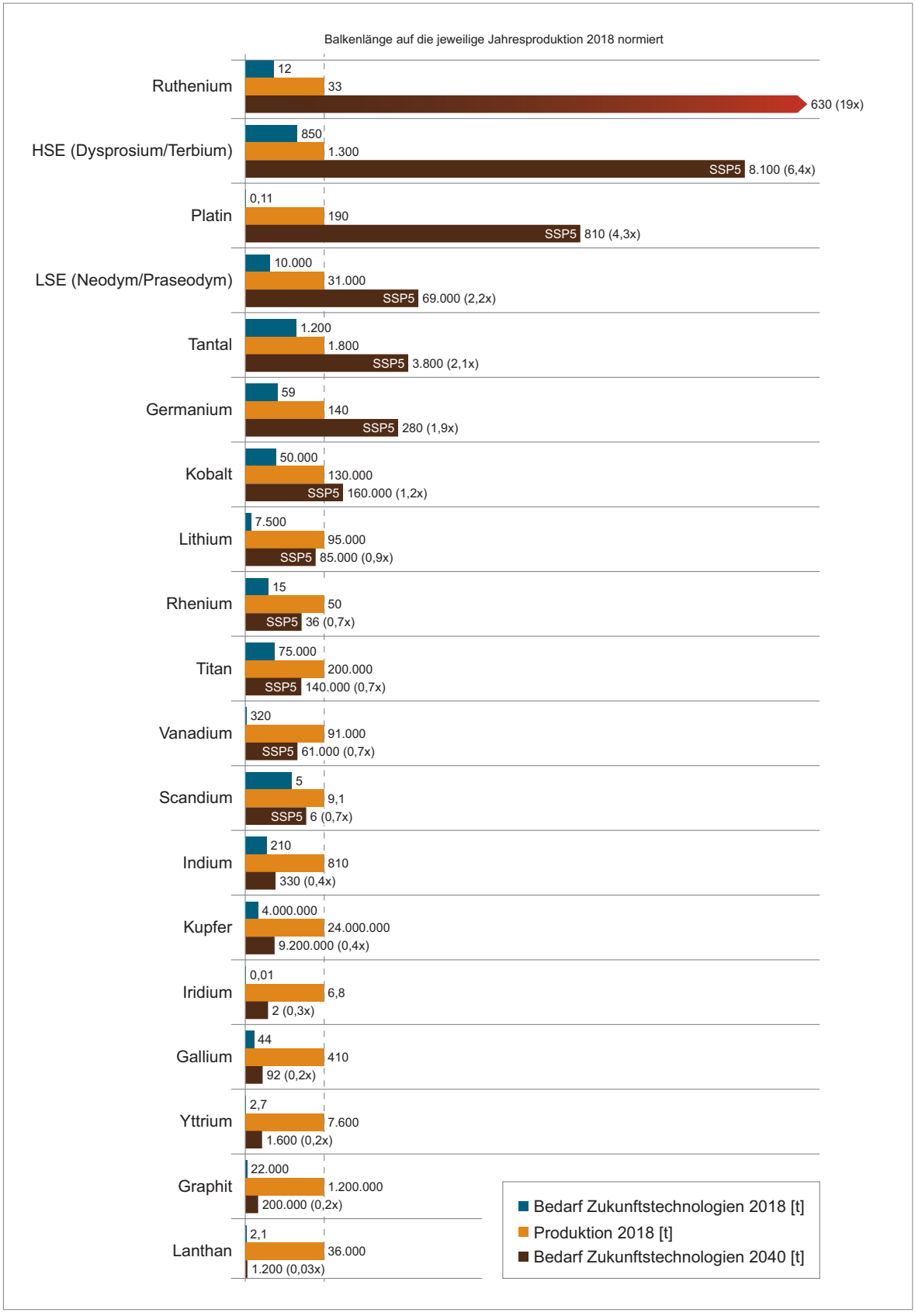


Abb. 5.3: Bedarf unterschiedlicher Rohstoffe für ausgewählte Zukunftstechnologien für das Jahr 2018 und im SSP5 im Jahr 2040 im Vergleich zur Primärproduktion der jeweiligen Rohstoffe im Jahr 2018

Hochleistungs-Permanentmagneten. Im Bereich der Digitalisierung wird in SSP1 unterstellt, dass alle Menschen an dieser Entwicklung teilhaben sollen, so dass auch Ruthenium (HDDs) und Germanium (Glasfaserkabel) einen hohen Bedarf ausweisen.

Im SSP5 fällt vor allem der hohe Bedarf an Ruthenium auf, der durch den hohen Speicherbedarf in den Rechenzentren hervorgerufen wird, siehe Abb. 5.3. Dieser ergibt sich aus einer im SSP5 unterstellten „ungehemmten" Nutzung der Digitalisierung durch Streaming-Dienste in hohen Auflösungen, zahlreichen Backup-Daten u. a. Die Bedarfe an Rohstoffen für die Elektromobilität und die Dekarbonisierung im Jahr 2040 sind deutlich geringer und liegen teilweise unter der Produktion von 2018.

SSP2 bietet ein gemischtes Bild, vergleiche Abb. 5.2. Die Rohstoffbedarfe sind nicht so extrem wie in SSP1 und SSP5, erfordern zu ihrer Deckung bei sieben Metallen, nämlich bei den Leichten Seltenerdmetallen, Kobalt, Iridium, Scandium, Lithium, Ruthenium und den Schweren Seltenerdmetallen, eine Verdopplung bis etwa eine Versiebenfachung der jeweiligen Produktion aus dem Jahr 2018.

Insgesamt wird durch die SSPs ein breites Bild einer zukünftigen Entwicklung aufgespannt, die jeweils unterschiedliche Schwerpunkte in der Technologieentwicklung setzt.

6 Literaturverzeichnis

5G-Anbieter (2021): 5G Ping. – URL: https://www.5g-anbieter.info/speed/5g-ping.html [Stand: 31.05.2021].

Abuelsamid, S. (2019): New vehicles keep getting heavier? – Or are they? – URL: https://www.forbes.com/sites/samabuelsamid/2019/01/03/new-vehicles-keep-getting-heavier-or-are-they/#fc3ac8145186 [Stand: 07.09.2020].

ACEA (2020): Association Registration Statistics. – URL: https://www.acea.be/ [Stand: 12.06.2020].

Aceto, G., Persico, V. & Pescape, A. (2019): A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges. – IEEE Commun. Surv. Tutorials, 21: 3467–3501.

Adler, B. & Müller, R. (2014): Seltene Erdmetalle. Gewinnung, Verwendung und Recycling. – Ilmenau.

Agora Verkehrswende (2019a): Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. – URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf [Stand: 05.05.2021].

Agora Verkehrswende (2019b): Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen. – URL: https://static.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2019/Klimabilanz_Batteriefahrzeugen/32_Klimabilanz_strombasierten_Antrieben_Kraftstoffen_WEB.pdf [Stand: 10.02.2021].

AIRBUS (2018): Metals and composites: finding the right material for each application. – URL: https://www.airbus.com/newsroom/stories/metals-and-composites--finding-the-right-material-for-each-appli.html [Stand: 25.06.2020].

AIRBUS (2019a): Cities, Airports & Aircraft. Global Market Forecast 2019-2038. – [Stand: 26.06.2020].

AIRBUS (2019b): Airbus achieves new commercial aircraft delivery record in 2018.

AIRBUS GROUP (2015): Scalmalloy: Aluminum-Magnesium-Scandium Alloy. – URL: http://www.technology-licensing.com/etl/int/en/What-we-offer/Technologies-for-licensing/Metallics-and-related-manufacturing-technologies/Scalmalloy.html [Stand: 14.11.2015].

AIRWISE (2013): Aluminium Makers Fight Plastic Planes With New Alloys. – URL: http://news.airwise.com/story/view/1371778684.html [Stand: 14.11.2015].

Al Barazi, S. (2018): Rohstoffrisikobewertung – Kobalt. – DERA Rohstoffinformationen 36: 120 S., Berlin. – URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-36.html [Stand: 28.07.2020].

Al Barazi, S., Elsner, H., Kärner, K., Liedtke, M., Schmidt , M., Schmitz, M. & Szurlies, M. (2016): Mineralische Rohstoffe in Australien. Investitions- und Lieferpotenziale. – DERA Rohstoffinformationen 29, Berlin. – URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/studie-australien-rosit-29.pdf?__blob=publicationFile&v=6 [Stand: 30.07.2020].

Alassi, A., Bañales, S., Ellabban, O., Adam, G. & MacIver, C. (2019): HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112: 530–554.

Albrecht, S., Cymorek, C., Andersson, K., Reichert, K. & Wolf, R. (2012): Tantalum and Tantalum Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 25.07.2020].

Allen, M. (2014): Data Center Redundancy N+1, N+2 vs. 2N vs. 2N+1. – URL: https://www.data-centers.com/news/redundancy-n-1-n-2-vs-2n-vs-2n-1 [Stand: 09.12.2020].

Allied Market Research (2017): Global Optical Fiber Market by Mode (Single Mode and Multi-Mode), Type (Glass Optical Fiber and Plastic Optical Fiber), and Industry Vertical (Telecom & IT, Public Sector, Healthcare, Energy & Utilities, Aerospace & Defense, Manufacturing, and Others): Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2018 – 2025. – URL: https://www.alliedmarketresearch.com/optical-fiber-market [Stand: 22.02.2021].

AltfahrzeugV (2016): Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen.

Aluminium-Messe (2014): Flugzeug-Hersteller fliegen auf Aluminium. – URL: https://www.aluminium-messe.com/Pressemitteilung/Flugzeug-Hersteller-fliegen-auf-Aluminium/n71/ [Stand: 14.11.2015].

Amato, A. & Beolchini, F. (2018): End of life liquid crystal displays recycling: A patent review. – Journal of environmental management, 225: 1–9.

Amato, A. & Beolchini, F. (2019): End-of-life CIGS photovoltaic panel: A source of secondary indium and gallium. – Prog Photovolt Res Appl, 27: 229–236.

Amprion GmbH (o. J.a): Erdkabel. Aufbau. – URL: https://www.amprion.net/%C3%9Cbertragungsnetz/Technologie/Erdkabel/Aufbau-einer-Kabelanlage.html [Stand: 06.07.2020].

Amprion GmbH (o. J.b): Freileitungen. – URL: https://www.amprion.net/%C3%9Cbertragungsnetz/Technologie/Freileitung/ [Stand: 06.07.2020].

Andrae, A. & Edler, T. (2015): On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. – Challenges, 6: 117–157.

Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Lüllmann, A., Erdmann, L., Scharp, M., Handke, V. & Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. – Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. 2. Aufl., Stuttgart.

Antão, L., Pinto, R., Reis, J. P. & Gonçalves, G. (2018): Requirements for Testing and Validating the Industrial Internet of Things.

Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W. & Nichols, M. C. (2001a): Handbook of Mineralogy. Indite. – URL: http://www.handbookofmineralogy.org/ [Stand: 14.07.2020].

Anthony, J. W., Bideaux, R. A., Bladh, K. W. & Nichols, M. C. (2001b): Handbook of Mineralogy. Roquesite. – URL: http://www.handbookofmineralogy.org/ [Stand: 14.07.2020].

Apworks (k.D.): As ductile as titaium, as light as aluminium. – URL: https://apworks.de/en/scalmalloy/.

Aravindan, V., Lee, Y.-S. & Madhavi, S. (2017): Best Practices for Mitigating Irreversible Capacity Loss of Negative Electrodes in Li-Ion Batteries. – Adv. Energy Mater., 7: 1602607.

Arconic (2020): Lighter, Stronger and Bigger Than Ever. – URL: https://www.arconic.com/aluminum-lithium/ [Stand: 06.07.2020].

Argus Media (2020): Aerospace crisis drags on high-temp metal prices. – URL: https://www.argusmedia.com/en/news/2119363-aerospace-crisis-drags-on-hightemp-metal-prices.

Asenbauer, J., Eisenmann, T., Kuenzel, M., Kazzazi, A., Chen, Z. & Bresser, D. (2020): The success story of graphite as a lithium-ion anode material – fundamentals, remaining challenges, and recent developments including silicon (oxide) composites. – Sustainable Energy Fuels, 4: 5387–5416.

Audi (2017): Die Audi Space Frame-Technologie – Meilensteine seit 1994. – URL: https://www.audi-mediacenter.com/de/karosserieentwicklung-bei-audi-innovation-qualitaet-und-praezision-7559/die-audi-space-frame-technologie-meilensteine-seit-1994-7563 [Stand: 07.09.2020].

Auel, C., Falter, W., Jansz, J. & Sudau, C. (2020): Kunststoffabfälle – das neue Gold. – CHEManager: 9–10.

Auer, J. (2019): 3D-Druck: Starkes Wachstum in der Nische.

AUVSI (2013): The Economic Impact of Unmanned Aircraft Systems Integration in the United States. – URL: http://www.auvsi.org/auvsiresources/economicreport [Stand: 16.04.2015].

Aviation Safety Bureau (2007): FAA Definitions. – URL: http://www.faa-aircraft-certification.com/faa-definitions.html.

Avnet Abacus (2020): MLCCs Vs Polymer Capacitors. Replacing MLCCs with polymer capacitors. – URL: https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/passive/

capacitors/replacing-mlccs-with-polymer-capacitors/ [Stand: 17.12.2020].

AVX (2021): Highest CV/cc Conductive Polymer Chip Capacitors Undertab. – URL: https://www.mouser.de/datasheet/2/40/TCN_Undertab-934935.pdf [Stand: 15.01.2021].

AXT (2020): URL: http://www.axt.com/site/index.php?q=node/36.

Balaram, V. (2019): Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. – Geoscience Frontiers, 10: 1285–1303.

Bareiss, K., La Rua, C. de, Möckl, M. & Hamacher, T. (2019): Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. – Applied Energy, 237: 862–872.

Bartos, R. (2014): Leichtere Autos aus Stahl – die Kombination macht's! – URL: http://www.stahl-blog.de/index.php/leichtere-autos-aus-stahl-die-kombination-machts/ [Stand: 07.09.2020].

BASF (2018): ChemCycling™. Chemisches Recycling von Kunststoffabfällen. – URL: https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/mass-balance-approach/chemcycling.html.

Bass, F. M. (1969): A new product growth for model consumer durables. – Management Science, 15: 215–227.

Bast, U., Blank, R., Buchert, M., Elwert, T., Finsterwalder, F., Hörnig, G., Klier, T., Langkau, S., Marscheider-Weidemann, F., Müller, J.-O., Thürigen, C., Treffer, F. & Walter, T. (2015): Abschlussbericht zum Verbundvorhaben „Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrantrieben". – Kennwort: MORE (Motor Recycling).

Battery University (2020): Types of lithium-ion. – URL: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/charging_lithium_ion_batteries [Stand: 19.08.2020].

Bauer, G., Güther, V., Hess, H., Otto, A., Roidl, O., Roller, H., Sattelberger, S., Köther-Becker, S. & Beyer, T. (2017a): Vanadium and Vanadium Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 27.07.2020].

Bauer, N., Calvin, K., Emmerling, J., Fricko, O., Fujimori, S., Hilaire, J., Eom, J., Krey, V., Kriegler, E., Mouratiadou, I., Sytze de Boer, H., van den Berg, M., Carrara, S., Daioglou, V., Drouet, L., Edmonds, J. E., Gernaat, D., Havlik, P., Johnson, N., Klein, D., Kyle, P., Marangoni, G., Masui, T., Pietzcker, R. C., Strubegger, M., Wise, M., Riahi, K. & van Vuuren, D. P. (2017b): Shared Socio-Economic Pathways of the Energy Sector \textendash Quantifying the Narratives. – Global Environmental Change, 42: 316–330.

Bauer, R. (2018a): HDD vs SSD: What Does the Future for Storage Hold? – URL: https://www.backblaze.com/blog/ssd-vs-hdd-future-of-storage/ [Stand: 08.12.2020].

Bauer, R. (2018b): HDD vs SSD: What Does the Future for Storage Hold? Part 2. – URL: https://www.backblaze.com/blog/hdd-vs-ssd-in-data-centers/ [Stand: 08.12.2020].

BDEW (2018): Zahl der Woche. 1,84 Millionen Kilometer Stromleitungen vernetzen Deutschland. – Berlin.

BDI (2016): Implikationen des 3D-Drucks für die Rohstoffsicherung der deutschen Industrie. – URL: http://bdi.eu/media/themenfelder/rohstoffe/publikationen/20151022_Positionspapier_3D-Druck_Rohstoffsicherung.pdf.

Bedder, J. & Baylis, R. (2013): Into the melting pot: the superalloy market and its impact on minor metals. – Minor Metals Conference 28.2.2013. – URL: https://roskill.com/news/download-roskills-paper-on-the-superalloy-and-minor-metal-markets/ [Stand: 08.11.2015].

Beiderbeck, R., Ngo, K., Rolon, J. E. C., Tudgay, J., Villarreal, F. C., Zwemmer, E. & Coyne, L. (2020): IBM TS4500 R6 Tape Library Guide.

Belkhir, L. & Elmeligi, A. (2018): Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. – Journal of Cleaner Production, 177: 448–463.

Beretta, D., Neophytou, N., Hodges, J. M., Kanatzidis, M. G., Narducci, D., Martin-Gonzalez, M., Beekman, M., Balke, B., Cerretti, G., Tremel, W., Zevalkink, A., Hofmann, A. I., Müller, C., Dörling, B., Campoy-Quiles, M. & Caironi, M. (2019): Thermoelectrics: From history, a window to the future. – Materials Science and Engineering: R: Reports, 138: 100501.

Berwald, A., Faninger, T., Bayramoglu, S., Tinetti, B. & Mudgal, S. (2015): Preparatory study for implementing measures of the Ecodesign Directive 2009/125/EC – DG ENTR Lot 9 – Enterprise servers and data equipment.

BGR (2021): Fachinformationssystem Rohstoffe. – unveröff. [Stand: März 2021]. Hannover.

Bhutto, G. M. & Jalbani, A. H. (2012): Life cycle assessment of Autoliv's Night vision camera. – Journal of Environmental Sciences, 3: 498–508.

Bi, Z., Kleine, R. de & Keoleian, G. A. (2017): Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Model for Comparing Plug-in versus Wireless Charging for an Electric Bus System. – Journal of Industrial Ecology, 21: 344–355.

Bicer, Y. & Khalid, F. (2020): Life cycle environmental impact comparison of solid oxide fuel cells fueled by natural gas, hydrogen, ammonia and methanol for combined heat and power generation. – International Journal of Hydrogen Energy, 45: 3670–3685.

BINE Informationsdienst (2011): Supraleiter für große Windenergieanlagen. Die Abhängigkeit von seltenen Erden lässt sich vermindern. – URL: http://www.bine.info/ [Stand: 30.04.2014].

Binnemans, K., Jones, P. T., Müller, T. & Yurramendi, L. (2018): Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? – J. Sustain. Metall., 4: 126–146.

Birnbaum, K. U., Steinberger-Wilckens, R. & Zapp, P. (2019): Solid Oxide Fuel Cells: Sustainability Aspects. – In: Lipman, T. E. & Weber, A. Z. (Hrsg.): Fuel Cells and Hydrogen Production. New York, NY.

Blagoeva, D., Pavel, C., Wittmer, D., Huisman, J. & Pasimeni, F. (2019): Materials dependencies for dual-use technologies relevant to Europe's defence sector [er]. – Background report. Luxembourg.

Blankenbach, K. (2016): Die Zukunft von Display-Technologien. »Früher war alles besser, sogar die Zukunft«. – URL: https://www.elektroniknet.de/automotive/elektromobilitaet/frueher-war-alles-besser-sogar-die-zukunft.131691.html [Stand: 06.01.2021].

BloombergNEF (2020): Electric Vehicle Sales to Fall 18% in 2020 but Long-term Prospects Remain Undimmed. – URL: https://about.bnef.com/blog/electric-vehicle-sales-to-fall-18-in-2020-but-long-term-prospects-remain-undimmed/ [Stand: 15.06.2020].

BMVI (2020): Entwurf eines Gesetzes zur Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge. – URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Gesetze/Gesetze-19/entwurf-gesetz-anpassung-nationaler-regelungen-unbemannte-luftfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile.

BMWi (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. – [Stand: 20.09.2012].

Boeing (2019a): Commercial Market Outlook 2019-2038. – [Stand: 26.06.2020].

Boeing (2019b): Boeing sets new airplane delivery records, expands order backlog. Strong finish to 2018 results in delivery records.

Boeing (2020): Commercial Market Outlook 2020–2039. – [Stand: 02.03.2021].

Bombardier (2017): Market forecast. 2017–2036. – [Stand: 26.06.2020].

bonesmart.org (2015): Total knee replacement implants. – URL: http://bonesmart.org/knee/total-knee-replacement-implants/ [Stand: 17.11.2015].

Böni, H., Wäger, P., Thiebaud, E., Du, X., Figi, R., Nagel, O., Bunge, R., Stäubli, A., Spörry, A., Wolfensberge-Malo, M., Brechbühler-Peskova, M. & Grösser, S. (2015): Rückgewinnung von kri-

tischen Metallen aus Elektronikschrott am Beispiel von Indium und Neodym. – Projekt e-Recmet.

Bookhagen, B., Bastian, D., Buchholz, P., Faulstich, M., Opper, C., Irrgeher, J., Prohaska, T. & Koeberl, C. (2020): Metallic resources in smartphones. – Resources Policy, 68: 101750.

Bookhagen, B., Obermaier, W., Opper, C., Koeberl, C., Hofmann, T., Prohaska, T. & Irrgeher, J. (2018): Development of a versatile analytical protocol for the comprehensive determination of the elemental composition of smartphone compartments on the example of printed circuit boards. – Anal. Methods, 10: 3864–3871.

Bosch (2014): Doppelbatterie für den Stromspeicher Braderup. – Pressemitteilung vom 27.5.2014. – URL: http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6876&locale=de [Stand: 13.08.2015].

Bourhis, F., Kerbrat, O., Hasco, J.-Y. & Mognol, P. (2013): Sustainable manufacturing: evaluation and modeling of environmental impacts in Additive manufacturing. – The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69: 1927–1939.

Bradley, D. C., Stillings, L. L., Jaskula, B. W., Munk, L. & McCauley, A. D. (2017): Lithium. Chapter K of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. – [Stand: 14.07.2020].

Bradshaw, A. M., Reuter, B. & Hamacher, T. (2013a): The Potential Scarcity of Rare Elements for the Energiewende. – Green, 3: 93–111.

Bradshaw, A. M., Reuter, B. & Hamacher, T. (2013b): The Potential Scarcity of Rare Elements for the Energiewende. – Green, 3: 93–111.

Broadcom (2020): Optical transceiver. – Product description.

Brumby, A., Verhelst, M. & Cheret, D. (2005): Recycling GtL – a New Challange. – Catalysis Today, 106: 166–169.

Buchert, M. (2011): Rare Earths – a Bottleneck for Future Wind Turbine Technologies? – Wind turbine supply chain and logistics (2011).

Buchert, M., Manhart, A., Bleher, D. & Pingel, D. (2012): Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten.

Budde, F. & Volz, D. (2019): The next big thing? Quantum computing's potential impact on chemicals. – URL: https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/the-next-big-thing-quantum-computings-potential-impact-on-chemicals [Stand: 31.08.2020].

Bughin, J., Seong, J., Manylka, J., Chui, M. & Joshi, R. (2018): Notes from the frontier: modeling the impact of AI on the world economy.

Bünzli, J.-C. G. & Mcgill, I. (2018): Rare Earth Elements. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 20.07.2020].

Burkhardt, Y., Schleicher, K. & Klöpzig, M. (2014): A novel hybrid excited synchronous machine for (H)EV applications. – IEEE.

Business Wire (2014): Research and Markets. – URL: http://www.businesswire.com/news/home/20130704005265/en/Research-Markets-Global-Chinese-Optical-Fiber-Preform#.VHSbtWMhBHc [Stand: 05.04.2016].

Butaud, E., Tavel, B., Ballandras, S., Bousquet, M., Drouin, A., Huyet, I., Courjon, E., Ghorbel, A., Reinhardt, A., Clairet, A., Bernard, F. & Bertrand, I. (2020): Smart Cut™ Piezo On Insulator (POI) substrates for high performances SAW components. – 2020 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS): 1–4.

Calderone, V. R., Shiju, N. R., Curulla-Ferré, D., Chambrey, S., Khodakov, A., Rose, A., Thiessen, J., Jess, A. & Rothenberg, G. (2013): De novo design of nanostructured iron-cobalt Fischer-Tropsch catalysts. – Angewandte Chemie (International ed. in English), 52: 4397–4401.

Carbon Engineering (2019): CE expanding capacity of commercial Direct Air Capture plant. – URL: https://carbonengineering.com/news-updates/expanding-dac-plant/.

Carmo, M., Keeley, G. P., Holtz, D., Grube, T., Robinius, M., Müller, M. & Stolten, D. (2019): PEM water electrolysis: Innovative approaches towards catalyst separation, recovery and recycling. – International Journal of Hydrogen Energy, 44: 3450–3455.

Carrara, S., Alves Dias, P., Plazzotta, B. & Pavel, C. (2020): Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system. Luxembourg. – URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/19aae047-7f88-11ea-aea8-01aa75ed71a1/language-en [Stand: 23.04.2020].

Caviezel, C., Grünwald, R., Ehrenberg-Silies, S., Kind, S., Jetztke, T. & Bovenschulte, M. (2017): Additive Fertigungsverfahren (3-D-Druck). – Innovationsanalyse. Berlin.

CDI (2006): Cobalt Facts. Cobalt in Chemicals. – URL: http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/COBALT_FACTS-Chemicals%20 2015.pdf [Stand: 22.10.2015].

Champier, D. (2017): Thermoelectric generators: A review of applications. – Energy Conversion and Management, 140: 167–181.

Chandler, D. (2918): Cell-sized robots can sense their environment. Made of electronic circuits coupled to minute particles, the devices could flow through intestines or pipelines to detect problems. – URL: https://news.mit.edu/2018/cell-sized-robots-sense-their-environment-0723.

Chau, K. T. & Li, W. (2014a): Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles. – International Journal of Vehicle Design, 64: 46–71.

Chau, K. T. & Li, W. (2014b): Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles. – 64.

Chen, J., Cranton, W. & Fihn, M. (2016): Handbook of Visual Display Technology. – Cham.

Chen, K. & Jiang, S. P. (2016): Review—Materials Degradation of Solid Oxide Electrolysis Cells. – J. Electrochem. Soc., 163: F3070-F3083.

Chen, Q., Chen, Z., Shi, L., Li, X., Zhou, G. & Zhang, Y. (1996): Preparation of zinc sulfide thin films by the hydrothermal method. – Thin Solid Films, 272: 1–3.

Chen, R., Kim, S. & Chang, Z. (2017a): Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications. – In: Khalid, M. A. A. (Hrsg.): Redox – Principles and Advanced Applications.

Chen, W.-C., Chang, B.-C. & Chiu, K. L. (2017b): Recovery of germanium from waste Optical Fibers by hydrometallurgical method. – Journal of Environmental Chemical Engineering, 5: 5215–5221.

Chiang, M. & Zhang, T. (2016): Fog and IoT: An Overview of Research Opportunities. – IEEE Internet of Things Journal, 3: 854–864.

Cichy, M. (2017): Kritische mineralische Ressourcen von Photovoltaik-Dünnschicht-Technologien. – Eine Analyse unter Betrachtung der technologischen und marktwirtschaftlichen Entwicklung (2017-02-16). Wien.

Ciller, P. & Lumbreras, S. (2020): Electricity for all: The contribution of large-scale planning tools to the energy-access problem. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 120: 109624.

Cisco (2016): Cisco Global Cloud Index 2015–2020. – URL: https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/service-provider/ciscoknowledgenetwork/files/622_11_15-16-Cisco_GCI_CKN_2015-2020_AMER_EMEAR_NOV2016.pdf.

Cisco (2017): Cisco Visual Networking Index.

Cisco (2018): Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016–2021. – White Paper.

Cisco (2019): Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2017–2022. – [Stand: 22.03.2021].

Clemm, C., Bugge, F., Rothenbacher, S., Dethlefs, N., Ferkinghoff, C., Bergunde, T. & Lang, K.-D. (Hrsg.) (2017): Material flow of gallium arsenide and risk analysis in the III-V semiconductor industry in Germany.

Clemm, C., Emmerich, J. & Dethlefs, N. (2016): Toxikologische, physikalisch-chemische und gesellschaftliche Erforschung innovativer Materi-

alien und Prozesse der Optoelektronik (TEMPO). Stoffflussanalysen, Lebenzyklusbetrachtung und Freisetzungspotenziale in Produktionsprozessen und Produkten. – Öffentlicher Bericht. – URL: https://www.tmp.tu-berlin.de/menue/forschung/stoffstromanalysen_fuer_elektronik/projekt_tempo/parameter/en/font3/maxhilfe/.

Clifton, A. (2013): Material Challenges for the Aerospace Sector. Presentation for COST Symposium: Materials in a resource-constrained world. – URL: http://www.cost.eu/events/materials [Stand: 17.08.2015].

CM (2018): Outlook for the global Scandium market to 2028. – URL: https://www.cmgroup.net/reports/outlook-for-the-global-scandium-market/.

CMBlue Energy AG (2020): Organic-Flow-Batterien: Stromspeicher für die Energiewende. – Alzenau.

Colomina, I. & Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92: 79–97.

Colthorpe (2020): High safety level, ease of recyclability makes flow batteries 'very promising' in circular economy.

Columbus, L. (2018): 2018 Roundup Of Internet Of Things Forecasts And Market Estimates. – URL: https://www.forbes.com/sites/louiscolumbus/2018/12/13/2018-roundup-of-internet-of-things-forecasts-and-market-estimates/#767e94c67d83.

Combes, G. B., Claridge, J. B., Gallagher, J. R., Rosseinsky, M. J. & Boldrin, P. (2016): Fischer Tropsch Catalyst comprising Cobalt, Magnesium and precious Metal. – US2016/0222301 [Stand: 10.03.2021].

Constellium (o. J.): Airware®, our aluminium-lithium alloy solutions. – URL: https://www.constellium.com/markets-applications/aerospace/products-and-solutions [Stand: 06.07.2020].

Constellium (2013): Airware. – URL: http://www.constellium.com/aluminium-innovation/aluminium-innovation-success-stories/airware-r [Stand: 14.11.2015].

Constellium (2017a): Airware® 2050-T84 Plate. – URL: https://www.constellium.com/sites/default/files/markets/airware_2050_t84_plate.pdf [Stand: 06.07.2020].

Constellium (2017b): Airware® 2065-T84 extrusions. – URL: https://www.constellium.com/sites/default/files/markets/airware_2065_t84_extrusions.pdf [Stand: 06.07.2020].

Constellium (2017c): Airware® 2098-T8 sheet. – URL: https://www.constellium.com/sites/default/files/markets/airware_2098_t8_sheet.pdf [Stand: 06.07.2020].

Constellium (2017d): Airware® 2195-T84 plate. – URL: https://www.constellium.com/sites/default/files/markets/airware_2195_t84_plate.pdf.

Constellium (2017e): Airware® 2196-T8511 Extrusions. – URL: https://www.constellium.com/sites/default/files/markets/airware_2196_t8511_extrusions.pdf [Stand: 06.07.2020].

Constellium (2017f): Airware® 2198-T8 fuselage sheet. – URL: https://www.constellium.com/sites/default/files/markets/airware_2198_t8_fuselage_sheet.pdf [Stand: 06.07.2020].

Constellium (2017g): Airware® 2297-T87 plate. – URL: https://www.constellium.com/sites/default/files/markets/airware_2297_t87_plate.pdf [Stand: 06.07.2020].

Copper Alliance (2019): Global 2019 Semis End Use Data. – URL: https://copperalliance.org/trends-and-innovations/data-set/.

Cormos, C.-C., Vatopoulos, K. & Tzimas, E. (2013): Assessment of the consumption of water and construction materials in state-of-the-art fossil fuel power generation technologies involving CO_2 capture. – Energy, 51: 37–49.

Coughlin, T. (2019): CQ3 2019 Hard Disk Drive Results. – Forbes (2019-11-14). – URL: https://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2019/11/14/cq3-2019-hard-disk-drive-results/?sh=33f0192f1236#4390fbc31236 [Stand: 08.12.2020].

Coyne, L., Browne, S. & Engelbrecht, M. (2017): IBM Tape Library Guide for Open Systems.

Cramer, C. L., Wang, H. & Ma, K. (2018): Performance of Functionally Graded Thermoelectric Materials and Devices: A Review. – Journal of Elec Materi, 47: 5122–5132.

Crastan, V. (2015): Elektrische Energieversorgung 1. Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik. – 4. Aufl., Berlin, Heidelberg.

Cremer, C. (2007): Zukunftsmarkt CO_2-Abscheidung und -Speicherung. – Fallstudie im Auftrag des Umweltbundesamtes im Rahmen des Forschungsprojektes Innovative Umweltpolitik in wichtigen Handlungsfeldern. – URL: http://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/zukunftsmarkt-co2-abscheidung-speicherung [Stand: 16.11.2015].

Crespo Cuaresma, J. (2017): Income projections for climate change research: A framework based on human capital dynamics. – Global Environmental Change, 42: 226–236.

Culver, S. P., Koerver, R., Zeier, W. G. & Janek, J. (2019): On the Functionality of Coatings for Cathode Active Materials in Thiophosphate-Based All-Solid-State Batteries. – Adv. Energy Mater., 9: 1900626.

Da Silva, F. S. & Souza, T. M. de (2017): Novel materials for solid oxide fuel cell technologies: A literature review. – International Journal of Hydrogen Energy, 42: 26020–26036.

D'Alessandro, D. M., Smit, B. & Long, J. R. (2010): Carbon dioxide capture: prospects for new materials. – Angewandte Chemie, 49: 6058–6082.

Damm, S. (2018): Rohstoffrisikobewertung – Tantal. – DERA Rohstoffinformationen 31, Berlin. – URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-31.html [Stand: 25.07.2020].

Damm, S. (2020): Tantalmarkt. – Persönliche Mitteilung.

Damm, S. & Zhou, Q. (2020): Supply and Demand of Natural Graphite. – DERA Rohstoffinformationen 43, Berlin. – URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie%20Graphite%20eng%202020.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 24.02.2021].

DatacenterDynamics (2015): Investitionen in Rechenzentren weltweit in den Jahren 2010 bis 2014 und Prognose für 2020. – URL: datacenterdynamics.com.

David, M., Ocampo-Martínez, C. & Sánchez-Peña, R. (2019): Advances in alkaline water electrolyzers: A review. – Journal of Energy Storage, 23: 392–403.

Deal, W. R. (2014): InP HEMT for Sub-Millimeter Wave Space Applications: Status and Challenges. – 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz).

Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E. & Magné, B. (2017): Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. – Global Environmental Change, 42: 200–214.

DENA (2020): Privates Ladeinfrastrukturpotenzial in Deutschland. – URL: file:///C:/Users/rol/Downloads/dena-STUDIE_Privates_Ladeinfrastrukturpotenzial_in_Deutschland.pdf [Stand: 14.07.2020].

DePuy Orthopaedics (2008): DePuy Hips Designed to Restore Your Motion and Reduce Your Pain. – URL: https://www.hipreplacement.com/technology/depuy_hipimplants [Stand: 18.11.2015].

DERA (2019): Chart des Monats, Oktober 2019. – URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/DERA%202019_cdm_10_Titan.pdf [Stand: 26.07.2020].

Deutsche Umweltstiftung (2020): Raus aus der Kunststofffalle. Kunststoffverpackungen – das unterschätzte Problem.

Deutz, S. & Bardow, A. (2020): How (Carbon) Negative Is Direct Air Capture? Life Cycle Assessment of an Industrial Temperature-Vacuum Swing Adsorption Process.

DGUV – Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2015): DGUV Information 209-074 „Industrieroboter". – Berlin.

Di Cioccio, L., Jalaguier, E. & Letertre, F. (2005): III–V layer transfer onto silicon and applications. – physica status solidi (a): 509–515.

Díaz-Ramírez, M. C., Ferreira, V. J., García-Armingol, T., López-Sabirón, A. M. & Ferreira, G. (2020): Environmental Assessment of Electrochemical Energy Storage Device Manufacturing to Identify Drivers for Attaining Goals of Sustainable Materials 4.0. – Sustainability, 12: 342.

Diermann, R. (2019): Forscher erreichen mit ultradünner Galliumarsenid-Zelle Wirkungsgrad von fast 20 Prozent. – (2019-08-06). – URL: https://www.pv-magazine.de/2019/08/06/forscher-erreichen-mit-ultraduenner-galliumarsenid-zelle-wirkungsgrad-von-fast-20-prozent/ [Stand: 26.11.2020].

Ding, Y., Cano, Z. P., Yu, A., Lu, J. & Chen, Z. (2019): Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. – Electrochem. Energ. Rev., 2: 1–28.

Display Daily (2020a): Flat Panel Display Area Demand Comes Roaring Back to Robust Growth, with a 9.1 Percent Expansion Expected in 2020. – URL: https://www.displaydaily.com/article/press-releases/flat-panel-display-area-demand-comes-roaring-back-to-robust-growth-with-a-9-1-percent-expansion-expected-in-2020 [Stand: 11.01.2021].

Display Daily (2020b): Q2 OLED Supply/Demand Update – Oversupply in Phones to Persist to 2025. – URL: https://www.displaydaily.com/article/press-releases/q2-oled-supply-demand-update-oversupply-in-phones-to-persist-to-2025 [Stand: 11.02.2021].

Dittmeyer, R., Klumpp, M., Kant, P. & Ozin, G. (2019): Crowd oil not crude oil. – Nature communications, 10: 1818.

Dittrich, M., Kämper, C., Ludmann, S., Ewers, B., Giegrich, J., Sartorius, C., Hummen, T., Marscheider-Weidemann, F. & Schoer, K. (2018): Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz. – Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRess). Dessau-Roßlau.

DJI (2020): Vergleich Hobby Drohnen. – URL: https://www.dji.com/de/products/compare-consumer-drones.

Djukanovic, G. (2017): Are Aluminium-Scandium Alloys the Future? – URL: https://aluminium-insider.com/aluminium-scandium-alloys-future/ [Stand: 06.07.2020].

DLR (2014): Fahrdrahtlose Energieübertragung bei Schienenfahrzeugen des Vollbahnverkehrs. – URL: http://elib.dlr.de/90435/1/20140423_Abschlussbericht_Fahrdrahtlose_Energie%C3%BCbertragung_Langfassung.pdf [Stand: 14.07.2020].

DOE (2020): American-Made Challenges – Solar Desalination Prize. – URL: https://www.energy.gov/eere/solar/american-made-challenges-solar-desalination-prize.

Donaldson, J. D. & Beyersmann, D. (2012): Cobalt and Cobalt Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 14.07.2020].

Dorin, T., Ramajayam, M., Vahid, A. & Langan, T. (2018): Aluminium Scandium Alloys. – In: Lumley, R. N. (Hrsg.): Fundamentals of aluminium metallurgy. Recent advances. United Kingdom.

Dorner, U. (2020): Rohstoffrisikobewertung – Kupfer. – DERA Rohstoffinformationen 45, Berlin. URL: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-45.html [Stand: 26.05.2021].

Dostal, J. (2017): Rare Earth Element Deposits of Alkaline Igneous Rocks. – Resources, 6: 34.

DRONEII (2020): The Drone Industry Barometer 2020: Consolidating New Trends and Perspectives of the Commercial Drone Industry.

Dry, M. E. (2002): The Fischer-Tropsch process: 1950–2000. – Catalysis Today, 71: 227–241.

Du, Y., Xu, J., Paul, B. & Eklund, P. (2018): Flexible thermoelectric materials and devices. – Applied Materials Today, 12: 366–388.

Duan, J., Tang, X., Dai, H., Yang, Y., Wu, W., Wei, X. & Huang, Y. (2020): Building Safe Lithium-Ion

Batteries for Electric Vehicles: A Review. – Electrochem. Energ. Rev., 3: 1–42.

Dubbel (1983): Taschenbuch für den Maschinenbau. – Heidelberg.

Durmus, Y. E., Zhang, H., Baakes, F., Desmaizieres, G., Hayun, H., Yang, L., Kolek, M., Küpers, V., Janek, J., Mandler, D., Passerini, S. & Ein-Eli, Y. (2020): Side by Side Battery Technologies with Lithium-Ion Based Batteries. – Adv. Energy Mater., 10: 2000089.

Dursun, T. & Soutis, C. (2014): Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. – Materials & Design (1980-2015), 56: 862–871.

Dutta, S. & Lanvin, B. (2019): The Network Readiness Index 2019. Towards a Future-Ready Society.

Duwe, D., Keicher, L., Ruess, P. & Klausmann, F. (2019): QUO VADIS 3D MOBILITY. Technological readiness, urban and rural use cases & urban integration of flying cars and passenger drones. – Stuttgart.

D-Wave Systems Inc. (2015): The D-Wave 2X(TM) Quantum Computer. Technology Overview. – URL: https://www.dwavesys.com/sites/default/files/D-Wave%202X%20Tech%20Collateral_0915F.pdf [Stand: 31.08.2020].

E4tech (UK) Ltd (2016): TheFuel CellIndustry Review 2016. – URL: www.FuelCellIndustryReview.com.

E4tech (UK) Ltd (2019a): Study on Value Chain and Manufacturing Competitiveness Analysis for Hydrogen and Fuel Cells Technologies. – FCH contract 192. Evidence Report. – URL: www.e4tech.com.

E4tech (UK) Ltd (2019b): TheFuel CellIndustry Review 2019. – URL: www.FuelCellIndustryReview.com.

EAFO (2020): Vehicles & Fleet data. – URL: https://www.eafo.eu/ [Stand: 12.06.2020].

Eberhard, M., Santo, U., Böning, D., Schmid, H., Michelfelder, B., Zimmerlin, B., Günther, A., Weigand, P., Müller-Hagedorn, M., Stapf, D. & Kolb, T. (2018): Der bioliq®-Flugstromvergaser – ein Baustein der Energiewende. – Chemie Ingenieur Technik, 90: 85–98.

EC (2018): A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. – URL: https://ec.europa.eu/environment/strategy/plastics-strategy_en [Stand: 04.02.2021].

EcoGraf (2020): Significant Battery Recycling Results. – Recovered high-purity battery anode material supports the global efforts to increase recycling of lithium-ion batteries.

Ecoloop (2018): Ecoloop Recycle to Gas. – URL: https://www.ecoloop.eu/wp-content/uploads/2019/05/Ecoloop-Prospekt_02-2019_deutsch.pdf.

Eichenseer, M. (2003): Aufbau und Charakterisierung eines hochstabilen Nd:YAG Lasers für ein Indium Frequenznormal. – Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität.

Electronicsnotes (2021): Photodiode structures. – URL: https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-structures-fabrication-materials.php.

elektroniknet.de (2021): Ab 2020: 5G lässt GaAs-Chips kräftig wachsen. – URL: https://www.elektroniknet.de/markt-technik/halbleiter/5g-laesst-gaas-chips-kraeftig-wachsen-167102.html.

Ellen MacArthur Foundation (2016): The New Plastics Economy. Rethinking the future of plastics. – URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/EllenMacArthurFoundation_TheNewPlasticsEconomy_Pages.pdf [Stand: 08.02.2021].

Elsner, H. (2011): Kritische Versorgungslage mit schweren Seltenen Erden. Entwicklung „Grüner Technologien“ gefährdet? – Commodity Top News, 36: 8. Hannover.

Elsner, H., Melcher, F., Schwarz-Schampera, U. & Buchholz, P. (2010): Elektronikmetalle – zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage. – Commodity Top News, 33: 13. Hannover.

Emsley, J. (2014): Unsporting scandium. – Nature chemistry, 6: 1025.

Enerdata (2020): Global Enerergy Statistical Yearbook 2020. Electricity domestic consumption. – URL: https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html [Stand: 22.01.2021].

Energieallianz Austria GmbH (2019): Weniger Stromausfälle in Österreich. – URL: https://www.energieallianz.com/de/at/ueber-eaa/presse/aktuelles/weniger-stromausfaelle-in-oesterreich.html [Stand: 19.01.2021].

Enghag, P. (2004): Encyclopedia of the elements. Technical data, history, processing, applications. – Weinheim.

Enlitech (o. J.): VCSEL structure. – URL: https://www.enlitechnology.com/show/application-semiconductor.htm.

EnOcean (2020): EnOcean – The World of Energy Harvesting Wireless Technology.

EnOcean (2021): Products. – URL: https://www.enocean.com/en/products/.

Environment Park SPA, UNIVERZA V LJUBLJAN, Fundación Hidrógeno Aragón, Fundación IMDEA Energía & Industrias López Soriano SA (2018): HyTechCycling – New technologies and strategies for fuel cells and hydrogen technologies in the phase of recycling and dismantling. – WP2 Regulatory analysis, critical materials and components identification and mapping of recycling technologies D2.2 Existing end-of-life technologies applicable to FCH products. Grant No. 700190. – URL: https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b9d244af&appId=PPGMS.

Environment Park SPA, UNIVERZA V LJUBLJAN, Fundación Hidrógeno Aragón, Fundación IMDEA Energía & Industrias López Soriano SA (2019): HyTechCycling – New technologies and strategies for fuel cells and hydrogen technologies in the phase of recycling and dismantling. – WP4 LCA for FCH technologies considering new strategies & technologies in the phase of recycling and dismantling D4.3 Case studies with new strategies in dismantling and recycling stage. Grant No. 700190. – URL: https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5b9d244af&appId=PPGMS.

EOS (2020): EOS Materials Metal: Portfolio Overview. – URL: https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/material_pdf/eos_materials_overview_metal_en.pdf.

Erlich, Y. & Zielinski, D. (2017): DNA Fountain enables a robust and efficient storage architecture. – Science (New York, N.Y.), 355: 950–954.

ESS (2017): Technical White Paper. All-Iron Flow Battery – Overview. – URL: https://www.essinc.com/white-papers/ [Stand: 16.07.2020].

EuRIC aisbl (2020): Metal Recycling Factsheet. – URL: https://www.euric-aisbl.eu/position-papers/download/591/335/32.

Europäische Kommission (2019): The European Green Deal. – Brüssel, Belgien.

Europäische Kommission (2020a): Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020). – Factsheets on Critical Raw Materials. Brüssel. – URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ff34ea21-ee55-11ea-991b-01aa75ed71a1/language-en [Stand: 24.02.2021].

Europäische Kommission (2020b): Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020). – Factsheets on Non-critical Raw Materials. Brüssel. – URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ff34ea21-ee55-11ea-991b-01aa75ed71a1/language-en [Stand: 24.02.2021].

Europäische Kommission (2020c): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020.

Europäische Union (2020): Silberstreif am Horizont für dünnere undeffizientere Solarzellen. Advanced aRchitectures for ultra-thinhigh-efficiency CIGS solar cells with highManufacturability. – URL: https://cordis.europa.eu/article/id/396756-a-silver-lining-lights-the-way-to-thinner-more-efficient-solar-cells/de.

European Commission (2015): Carbon Capture and Storage. – URL: https://setis.ec.europa.eu/mis/technology/carbon-capture-and-storage [Stand: 12.11.2015].

European Commission (2020a): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU – a foresight study. – URL: https://ec.europa.eu/docsroom/documents/42881 [Stand: 18.11.2020].

European Commission (2020b): Study on the EU's list of Critical Raw Materials.

EUWID (2015): Illegale Exporte von Altautos kritisiert. – Euwid Recycling und Entsorgung, 8: 17.

EV Sales Blog (2020): EV Sales. – URL: http://ev-sales.blogspot.com/ [Stand: 08.06.2020].

Eveland, K. (2011): Fibre optic cable growth continues in 2012. – Integer Research Limited. – URL: https://www.integer-research.com/integer-alert/fibre-optic-cable-growth-continues-in-2012 [Stand: 09.12.2015].

FAA (2020): Unmanned Aircraft Systems. – URL: https://www.faa.gov/uas/.

Falk, F. (2006): Physik und Technologie von Solarzellen. – Vorlesungsscript. – URL: www.ipht-jena.de/fileadmin/user_upload/redaktion/Lehre/Vorlesungsscripte/PVtot_deutsch.pdf [Stand: 11.08.2015].

Fan, Z., Zhang, Y., Pan, L., Ouyang, J. & Zhang, Q. (2021): Recent developments in flexible thermoelectrics: From materials to devices. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137: 110448.

Fang, Q., Bai, W., Yang, J., Rong, H., Shi, N., Li, G., Xiong, M. & Ma, Z. (2013): Titanium, Ti, A New Mineral Species from Luobusha, Tibet, China. – Acta Geologica Sinica, 87: 1275–1280.

Fasihi, M., Efimova, O. & Breyer, C. (2019): Techno-economic assessment of CO_2 direct air capture plants. – Journal of Cleaner Production, 224: 957–980.

Feldman, S. (2019): 20 Years of Quantum Computing Growth. – URL: https://www.statista.com/chart/17896/quantum-computing-developments/ [Stand: 31.08.2020].

Felix, N. (2012): Indium and Indium Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 14.07.2020].

Ferraro, E. & Prati, E. (2020): Is all-electrical silicon quantum computing feasible in the long term? – Physics Letters A, 384.

Fialka, J. (2021): Mining the sky for CO_2 with metal trees, towers and pumps. – URL: https://www.eenews.net/stories/1063721733 [Stand: 20.01.2021].

Finch, M. (2020): Optical fibre and cable industry review. Highlights from 2019 and what's hot or not in 2020. – URL: https://www.crugroup.com/knowledge-and-insights/spotlights/2020/optical-fibre-and-cable-industry-review/ [Stand: 23.02.2021].

Fischedick, M., Esken, A., Luhmann, H.-J., Schüwer, D. & Supersberger, N. (2007): Geologische CO_2-Speicherung als klimapolitische Handlungsoption. – Technologien, Konzepte, Perspektiven. Wuppertal.

Fischedick, M., Görner, K. & Thomeczek, M. (Hrsg.) (2015): CO_2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung. – Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie. Berlin.

Fisia Italimpianti S.p.A. (2020): Desalination: a growing market. – URL: https://www.fisiait-the-future-of-water.com/en/facts-data/desalination-a-growing-market.html.

Fortune Business Insights (2019): Fiber Optics Market Size, Share and Industry Analysis. – URL: https://www.fortunebusinessinsights.com/fiber-optics-market-102904 [Stand: 22.02.2021].

FPV (2020): Best 6S LiPo Battery Comparison Table. – URL: https://fpvcompare.com/6s-lipo-battery-comparison-matrices/.

Fraunhofer ICT (2015): Großprojekt »Redox-Wind«. – URL: http://www.ict.fraunhofer.de/de/komp/ae/rfb/redoxwind.html#tabpanel-3 [Stand: 13.08.2015].

Fraunhofer IPM (2017): Thermoelektrik: Abwärmenutzung. – [Stand: 05.03.2021].

Fraunhofer ISE (2020): Photovoltaics Report. – URL: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf [Stand: 23.09.2020].

Freer, R. & Powell, A. V. (2020): Realising the potential of thermoelectric technology: a Roadmap. – J. Mater. Chem. C, 8: 441–463.

Freiberger Compound Materials (2020a): URL: https://freiberger.com/en/products/specifications/.

Freiberger Compound Materials (2020b): Wireless Communication. – URL: https://freiberger.com/en/products/applications/wireless-communication/ [Stand: 09.12.2020].

Freund et al. (2020): 5G-Datentransport mit Höchstgeschwindigkeit. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-55890-4_7 [Stand: 06.10.2020].

Fricko, O., Havlik, P., Rogelj, J., Klimont, Z., Gusti, M., Johnson, N., Kolp, P., Strubegger, M., Valin, H., Amann, M., Ermolieva, T., Forsell, N., Herrero, M., Heyes, C., Kindermann, G., Krey, V., McCollum, D., Obersteiner, M., Pachauri, S., Rao, S., Schmid, E., Schoepp, W. & Riahi, K. (2017): The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. – Global Environmental Change, 42: 251–267.

Friedrich, H. E. (Hrsg.) (2013): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. – Wiesbaden, s.l.

Frohs, W., Sturm, F. von, Wege, E., Nutsch, G. & Handl, W. (2012): Carbon, 3. Graphite. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry.

Frost & Sullivan (2016): Lightweighting in Aerospace. – Future of Composites [Stand: 25.06.2020].

Frost & Sullivan (2019): Composite Material Use in Global Commercial Aerospace. – [Stand: 25.06.2020].

Frost & Sullivan (2020a): Cobots Transforming the Global Industrial Robotics Market. – Opportunities Forecast. Santa Clara.

Frost & Sullivan (2020b): Growth Opportunities for Superalloys. – Increasing Focus on Technology Developments and Application Extension Drive Growth of Superalloys.

FSM: Technik – Stromversorgung. Das schweizerische Stromversorgungsnetz. – URL: https://www.emf.ethz.ch/de/emf-info/themen/technik/stromversorgung/das-schweizerische-stromversorgungsnetz/?text=&author=964 [Stand: 19.01.2021].

Fthenakis, V. (2009): Sustainability of photovoltaics: The case for thin-film solar cells. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13: 2746–2750.

Gambhir, A. & Tavoni, M. (2019): Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation. – One Earth, 1: 405–409.

Gandiglio, M., Sario, F. de, Lanzini, A., Bobba, S., Santarelli, M. & Blengini, G. A. (2019): Life Cycle Assessment of a Biogas-Fed Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Integrated in a Wastewater Treatment Plant. – Energies, 12: 1611.

Gao, A., Wietlisbach, S. & Schlag, S. (2019): Rare earth elements – The vitamins of modern industry. – URL: https://ihsmarkit.com/research-analysis/rare-earth-elements--the-vitamins-of-modern-industry.html.

Gao, Y., Wang, C., Zhang, J., Jing, Q., Ma, B., Chen, Y. & Zhang, W. (2020): Graphite Recycling from the Spent Lithium-Ion Batteries by Sulfuric Acid Curing–Leaching Combined with High-Temperature Calcination. – ACS Sustainable Chem. Eng., 8: 9447–9455.

Garside, M. (2020): Demand for rare earth oxides worldwide by application 2019 & 2025. – URL: https://www.statista.com/statistics/449722/rare-earth-estimated-demand-globally-by-application/ [Stand: 15.3.21].

Gartner (2020): Prognose zu den weltweiten IT-Ausgaben für Datencenter-Systeme von 2012 bis 2021. – URL: gartner.com.

Gärtner, M., Hermes, W., Marudhachalam, P., Schidleja, M. & Schierle-Arndt, K. (2003): Ther-

moelectricity. – In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 6. Aufl., Weinheim, Germany.

Gellings, C. W. (2015): Let's Build a Global Power Grid. With a little DC wizardry and a lot of cash, we could swap power across continents. – IEEE Spectrum (2015-07-28). – URL: https://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/lets-build-a-global-power-grid [Stand: 26.06.2020].

Geoengineering Monitor (2018): Direct Air Capture. – [Stand: 15.06.2020].

Georgescu, I. (2020): Trapped ion quantum computing turns 25. – Nature Reviews Physics, 2: 278.

Ghaffarzadeh, K. (2018): ITO alternatives 2018-2028: progress review of technology options. – URL: https://www.linkedin.com/pulse/ito-alternatives-2018-2028-progress-review-technology-ghaffarzadeh/ [Stand: 07.01.2020].

Gille, G. & Meier, A. (2012): Recycling von Refraktärmetallen. – In: Thomé-Kozmiensky, K. J. & Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin.

Global CCS Institute (2019): Global Status Report. Targeting Climate Change.

Global CCS Institute (2020): Remove: Carbon capture and storage. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/11/Remove-Carbon-Capture-and-Storage-6.pdf [Stand: 17.2.21].

Global Data (2018): Internet of Things. Hot Topic Report GDTMT-TR-S176. – URL: https://hot-topics.globaldata.com/internet-of-things/.

Global Data (2019): Drones. Report GDTMT-TR-S206. – URL: https://hot-topics.globaldata.com/drones/.

Glöser-Chahoud, S. & Tercero Espinoza, L. (2015): Dynamische Materialfluss-Analyse von Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe.

Gok, A. (2020): Reliability and ecological aspects of photovoltaic modules. – London.

Gomatam, B. (2014): Optical Communications Infrastructure, Investment and Emerging Markets. State of the Industry. – OFC 2014 Marketwatch Panel.

Gossart, C. (2015): Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. – In: ICT Innovations for Sustainability.

Götz, U. (2018): Sobald sie über einen Schutzzaun nachdenken müssen, springen die Meisten schon ab. – URL: https://www.blog.kuka.com/2018/09/07/collaboration-and-coexistence/.

Gouveia, J., Mendes, A., Monteiro, R., Mata, T. M., Caetano, N. S. & Martins, A. A. (2020): Life cycle assessment of a vanadium flow battery. – Energy Reports, 6: 95–101.

Graedel, T. E., Gunn, G. & Tercero Espinoza, L. (Hrsg.) (2014): Metal resources, use and criticality.

Grand View Research (2019): Commercial Drone Market Size, Share & Trends Analysis Report. – URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/global-commercial-drones-market.

Grand View Research (2020): Water Desalination Equipment Market Size. – URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/water-desalination-equipment-market.

Grandfield, J. (2018): CM 10-Year Outlook for the Global Scandium Market to 2028. – (2018-11-26). Berlin, Germany.

Grandl, G., Ostgathe, M., Cachay, J., Doppler, S., Salib, J. & Ross, H. (2018): The Future of Vertical Mobility Sizing the market for passenger, inspection, and goods services until 2035. – A Porsche Consulting Study.

Greber, J. F. (2012): Gallium and Gallium Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 14.07.2020].

Green Car Congress (2019): TeraWatt Technology solid-state battery prototype tests showing 432 kWh/kg. – URL: https://www.greencarcongress.com/2019/08/20190822-tera.html.

Green Car Congress/Adamas Intelligence (2020): Adamas: "Unfathomable" rare earth demand growth awaits post-2030. – URL: https://www.greencarcongress.com/2020/09/20200929-adamas.html [Stand: 15.3.21].

Groesser, S. & Brechbuehler-Peskova, M. (2015): Rückgewinnung von Indium aus Bildschirmen: Ist das sinnvoll?

Grumbling, E. & Horowitz, M. (2019): Quantum Computing. – Washington, D.C.

Grünwald, R. (2007): CO_2-Abscheidung und -Lagerung bei Kraftwerken. – Arbeitsbericht des Büros für Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages Nr. 120.

Guina, M., Rantamäki, A. & Härkönen, A. (2017): Optically pumped VECSELs: review of technology and progress. – J. Phys. D: Appl. Phys., 50: 383001.

Güttel, R., Kunz, U. & Turek, T. (2007): Reaktoren für die Fischer-Tropsch-Synthese. – Chemie Ingenieur Technik, 79: 531–543.

GWEC (2019): Global wind market development – Supply side data 2018. – Brussels.

Häfele, S., Hauck, M. & Dailly, J. (2016): Life cycle assessment of the manufacture and operation of solid oxide electrolyser components and stacks. – International Journal of Hydrogen Energy, 41: 13786–13796.

Harmsen, J., Roes, A. L. & Patel, M. K. (2013): The impact of copper scarcity on the efficiency of 2050 global renewable energy scenarios. – Energy, 50: 62–73.

Hassan, A. & Richter, S. (2002): Kreislaufführung von verbrauchtenaus der chemischen Industrie. – Chemie Ingenieur Technik, 74: 219–227.

HEATRECAR Consortium (2013): Reduced Energy Consumption by Massive Thermoelectric Waste Heat Recovery in Light Duty Trucks. – URL: https://cordis.europa.eu/project/id/218541/reporting [Stand: 05.03.2021].

Heckmann, D. (2020): Urban Air Mobility – Ein neuer Markt für Automobilakteure. – URL: https://magazine.fev.com/de/urban-air-mobility-ein-neuer-markt-fuer-automobilakteure/.

Heer, C. (2020): Top Trends Robotics 2020. – Frankfurt.

Hegmann, G. (2019): Lilium-Jet gegen Volocopter – Duell um das Billionen-Flugtaxi. – URL: https://www.welt.de/wirtschaft/article202308066/Flugtaxis-Lilium-und-Volocopter-kaempfen-um-Millionenmarkt.html.

Herweijer, C., Combes, J. & Gillham, J. (2020): How AI can enable a sustainable future. – URL: https://www.pwc.de/de/nachhaltigkeit/how-ai-can-enable-a-sustainable-future.pdf.

Heske, C., Lincot, D., Powalla, M., Salome, P., Schlatmann, R., Tiwari, A., Linden, H., Melkonyan, K., Petrova-Koch, V., Wade, A., Dalibor, T., Dimmler, B., Lundberg, O., Petroncini, S., Poplavskyy, D., Rühle, U., Schneider, H., Fischer, M. & Jaremalm, Eric, Reinhardt, Hannes (2019): CIGS_White_Paper_2019_online. – CIGS White Paper 2019.

Hettesheimer, T., Hirzel, S. & Ross, H. B. (2018): Energy savings through additive anufacturing: an analysis of selective laser sintering for automotive and aircraft components. – Energy Efficiency, 11: 1227–1245.

Hilbert, M. (2014): How much of the global information and communication explosion is driven by more, and how much by better technology? – Journal of the Association for Information Science and Technology, 65: 856–861.

Hilbert, M. (2015): Quantifying the Data Deluge and the Data Drought. Background note for the World Development Report 2016. World Bank, Washington, DC. – URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2984851 [Stand: 22.3.21].

Hilbert, M. (2019): Digital Data Divide Database. – URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3345756 [Stand: 22.3.21].

Hilbert, M. & López, P. (2011): The world's technological capacity to store, communicate, and compute information. – Science (New York, N.Y.), 332: 60–65.

Hildenbrand, P. (2019): Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess. – FAU Studien aus dem Maschinenbau. Band 318. FAU University Press.

Hirsch-Kreinsen, H., Ittermann, P. & Niehaus, J. (Hrsg.) (2018): Digitalisierung industrieller Arbeit. Die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen. – Baden-Baden.

Hochschule Landshut (2020): Kostengünstige Stromspeicher für die Welt. – URL: https://www.haw-landshut.de/aktuelles/news/news-detailansicht/article/kostenguenstige-stromspeicher-fuer-die-welt.html [Stand: 17.07.2020].

Hoenderdaal, S. Tercero Espinoza, L. Marscheider-Weidemann, F. Graus, W. (2013): Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? – Energy, 49: 344–355.

Hofmann, L. (2015): Einsatz von Erdkabeln und Freileitungen in Hochspannungs-Drehstrom- und -Gleichstromübertragungssystemen. – (2015-05-05). – Hannover.

Horovitz, C. T. (Hrsg.) (1975): Scandium Its Occurrence, Chemistry Physics, Metallurgy, Biology and Technology. – London.

Horowitz, K. A. W., Remo, T., Smith, B. & Ptak, A. (2018): A Techno-Economic Analysis and Cost Reduction Roadmap for III-V Solar Cells.

Hovde, D. C. Prouty, M.D. Hrvoic, I. Slocum, R.E. (2013): Commercial Magnetometers and their Application. – Cambridge.

Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J. & Masanet, E. (2016): Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. – Journal of Cleaner Production: 1559–1570.

Hussain, S. & Yangping, L. (2020): Review of solid oxide fuel cell materials: cathode, anode, and electrolyte. – Energy Transit, 4: 113–126.

IBM (o. J.): Quantum technology & computing. – URL: https://www.zurich.ibm.com/st/quantum/alternativeplatforms.html [Stand: 31.08.2020].

IBM Knowledge Center (2020): IBM TS4500 documentation. 3592 tape drives. – URL: https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/STQRQ9/com.ibm.storage.ts4500.doc/ts4500_ipg_drives_3592.html [Stand: 08.12.2020].

IBM Systems (2016): Tape goes high speed. Technical White Paper. – URL: https://www.ibm.com/downloads/cas/Q8BZDXZE [Stand: 15.02.2021].

ICA (2020): EV motors boost copper demand. – URL: https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2020/03/COR-04-Copper-motors2403.pdf.

IDA (2020): Desalination and Water Reuse by the Numbers. – URL: https://idadesal.org/ [Stand: 18.06.2020].

IDC (2019): The Growth in Connected IoT Devices Is Expected to Generate 79.4ZB of Data in 2025, According to a New IDC Forecast. – URL: https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS45213219.

IEA (2012): Barriers to implementation of CCS: capacity Constraints. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/103746/barriers-implementation-ccs-capacity-constraints.pdf [Stand: 16.11.2015].

IEA (2013a): Technology Roadmap. Carbon Capture and StorageCarbon Capture and Storage. – URL: https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2013 [Stand: 16.11.2015].

IEA (2013b): World Energy Outlook 2013. – URL: http://www.worldenergyoutlook.org/weo2013/ [Stand: 20.01.2015].

IEA (2013c): World Energy Outlook 2013. Renewable Energy Outlook.

IEA (2015): Storing CO_2 through Enhanced Oil Recovery. Paris. – URL: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/iea_pdf/reports/iea_ghg_storing_co2_trough_enhanced_oil_recovery.pdf [Stand: 21.01.2021].

IEA (2016): 20 Years of Carbon Capture and Storage – Accelerating Future Deployment. – International Energy Agency.

IEA (2019): World Energy Outlook 2019.

IEA (2020a): Direct Air Capture. – URL: https://www.iea.org/reports/direct-air-capture.

IEA (2020b): Global electrolysis capacity becoming operational annually, 2014-2023, historical and announced. IEA hydrogen project database (2020). – URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electrolysis-capacity-becoming-operational-annually-2014-2023-historical-and-announced.

IEA (2020c): Hydrogen Projects Database. – URL: https://www.iea.org/reports/hydrogen-projects-database.

IEA (2020d): World Energy Outlook 2020.

IEA (2021): The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. – URL: https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions [Stand: 12.05.2021].

IEA ETSAP (2010): Liquid Fuels Production from Coal & Gas. IEA ETSAP – Technology Brief S02. – URL: https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/S02-CTL&GTL-GS-gct.pdf [Stand: 27.11.2015].

IFAK (2011): Begleitforschung zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen. – Chancen und Risiken beim kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen, Technologiefolgenabschätzung für eine Schlüsseltechnologie in der Durchbruchphase der Elektromobilität. Abschlussbericht. – URL: https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/publications/abschlussbericht-justpark_1.pdf [Stand: 14.07.2020].

IFR (2020): Executive Summary World Robotics. Industrial Robots. – URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Industrial_Robots_1.pdf.

IHS Markit (2019): News Release | IHS Markit Online Newsroom. – URL: https://news.ihsmarkit.com/prviewer/release_only/slug/technology-flat-panel-display-demand-increased-double-digits-2018-first-time-four-year [Stand: 11.02.2021].

IIASA (o. J.): SSP Database, 2012 – 2018. – URL: https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb [Stand: 13.05.2021].

Imarc (2020): Rare Earth Magnet Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2021-2026. – URL: https://www.imarcgroup.com/rare-earth-magnet-manufacturing-plant [Stand: 15.3.21].

IMOA (2014): Practical Guidelines forthe Fabrication of Duplex Stainless Steels. – URL: https://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_3rd_Edition.pdf [Stand: 20.10.2020].

Informationszentrum Mobilfunk (2020): Infobaukasten Mobilfunk 2/4 – Infrastruktur und Technik. DOKUMENTATION NO 156. – URL: https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/sites/default/files/medien/Informationsbaustein%20Infrastruktur%20und%20Technik%20DStGB.pdf.

International Telecommunication Union & WEEE Forum (2020): Internet Waste. – A thought paper for International E-Waste Day 2020. Geneva. – URL: https://www.itu.int/en/ITU-D/Environment/Documents/Publications/2020/Internet-Waste%202020.pdf?csf=1&e=iQq5Zi.

Ionic Materials (2020): Breakthrough Innovation – Our solid polymer is the first of its kind to conduct ions at room temperature. – URL: https://ionicmaterials.com/.

IonQ (o. J.): Atoms make better quantum computers. – URL: https://ionq.com/technology [Stand: 09.05.2021].

IÖW (2014): Dezentrale Produktion, 3D-Druck und Nachhaltigkeit. Trajektorien und Potenziale innovativer Wertschöpfungsmuster zwischen Maker-Bewegung und Industrie 4.0. Schriftenreihe des IÖW 206/14. Berlin.

IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. – Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York.

Irena (2017): Electricity Storage and Renewables: Costs and markets to 2030. – Abu Dhabi.

Irena (2019): Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. – A Global Energy Transformation paper. Abu Dhabi.

IRENA (2020a): Green Hydrogen Cost Reduction. Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5 °C Climate Goal. Abu Dhabi. – URL: https://forum.xumuk.ru/applications/core/interface/file/attachment.php?id=47419.

IRENA (2020b): Renewable Energy Technologies. – URL: https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Capacity-and-Generation/Technologies [Stand: 12.06.2020].

IRENA (2020c): Wind Energy. – URL: https://www.irena.org/wind [Stand: 09.12.2020].

ISO/IEC 20924 (2018): Information technology – Internet of Things (IoT) – Vocabulary.

IWCC (2020): Global Copper Semis End-Use Reports. – End use summary – copper content. – URL: http://www.coppercouncil.org/iwcc-statistics-and-data [Stand: 25.02.2021].

IZES GGMBH, BET GMBH & POWERENGS (2011): Ausbau elektrischer Netze mit Kabel oder Freileitung unter besonderer Berücksichtigung der Einspeisung Erneuerbarer Energien. – Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Saarbrücken. – URL: https://www.bet-energie.de/fileadmin/redaktion/PDF/Studien_und_Gutachten/BET-Studie_Netzausbau_bf_BMU.pdf [Stand: 19.01.2021].

JARA, A. D., BETEMARIAM, A., WOLDETINSAE, G. & KIM, J. Y. (2019): Purification, application and current market trend of natural graphite: A review. – International Journal of Mining Science and Technology, 29: 671–689.

JAZIRI, N., BOUGHAMOURA, A., MÜLLER, J., MEZGHANI, B., TOUNSI, F. & ISMAIL, M. (2020): A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. – Energy Reports, 6: 264–287.

JETZKE, T. (2018): Flugtaxis – bemannte, vollelektrische Senkrechtstarter. – URL: https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/themenprofile/Themenkurzprofil-021.pdf [Stand: 27.04.2021].

JIANG, L. & O'NEILL, B. C. (2017): Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways. Global Environ. Change. – URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959378015000394.

JM (o. J.): Hard Disks. – URL: http://www.platinum.matthey.com/about-pgm/applications/industrial/hard-disks [Stand: 17.05.2021].

JM (2019): Pgm Market Report. May 2019. – URL: http://www.platinum.matthey.com/documents/new-item/pgm%20market%20reports/pgm_market_report_may_19.pdf [Stand: 17.12.2020].

JM (2020): pgm Market Report. February 2020. – URL: http://www.platinum.matthey.com/documents/new-item/pgm-market-reports/pgm_market_report_february_2020.pdf [Stand: 16.03.2021].

JM (2021): Pgm market report. May 2021. – URL: http://www.platinum.matthey.com/documents/new-item/pgm-market-reports/pgm-market-report-may-21.pdf [Stand: 27.05.2021].

JOHN, D. (2015): Rhenium – A Rare Metal Critical to Modern Transportation. – [Stand: 15.07.2020].

JOHN, D. A., SEAL II, R. R. & POLYAK, D. E. (2017): Rhenium. Chapter P of Critical Mineral Resources of the United States – Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. – [Stand: 15.07.2020].

JOHNSON, K. M., HAMMARSTROM, J. M., ZIENTEK, M. L. & DICKEN, C. L. (2014): Estimate of Undiscovered Copper Resources of the World, 2013. – Global Mineral Resource Assessment [Stand: 14.07.2020].

JONES, E., QADIR, M., VAN VLIET, M. T. H., SMAKHTIN, V. & KANG, S.-M. (2019): The state of desalination and brine production: A global outlook. – The Science of the total environment, 657: 1343–1356.

JONGE, M. M. DE, DAEMEN, J., LORIAUX, J. M., STEINMANN, Z. J. & HUIJBREGTS, M. A. (2019): Life cycle carbon efficiency of Direct Air Capture systems with strong hydroxide sorbents. – International Journal of Greenhouse Gas Control, 80: 25–31.

JOOSTING, J.-P. (2020): Soitec to produce POI substrates for Qualcomm 5G RF filters. – eeNEWS Europe, 2020 2020 (2020-07-08). – URL: https://

www.eenewseurope.com/news/soitec-produce-poi-substrates-qualcomm-5g-rf-filters.

Jorge, R. S., Hawkins, T. R. & Hertwich, E. G. (2012a): Life cycle assessment of electricity transmission and distribution – part 1: power lines and cables. – Int J Life Cycle Assess, 17: 9–15.

Jorge, R. S., Hawkins, T. R. & Hertwich, E. G. (2012b): Life cycle assessment of electricity transmission and distribution – part 2: transformers and substation equipment. – Int J Life Cycle Assess, 17: 184–191.

Jorge, R. S. & Hertwich, E. G. (2013): Environmental evaluation of power transmission in Norway. – Applied Energy, 101: 513–520.

Jorge, R. S. & Hertwich, E. G. (2014): Grid infrastructure for renewable power in Europe: The environmental cost. – Energy, 69: 760–768.

Jorgenson, J. D. & George, M. W. (2005): Indium. Mineral Commodity Profile. – [Stand: 14.07.2020].

Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Axcell, B., Wrobel, L. & Dai, S. (2021): Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. – International Journal of Thermofluids, 9: 100063.

JPCIC (2020): LCD Panel Project of Gongzhuling. – URL: http://www.jl.gov.cn/szfzt/tzcj/zdxm/english/dzxxjgxjs/202004/t20200423_7150649.html [Stand: 11.02.2021].

Kaese, R. W. (2020): Storage Trends 2019. – URL: https://www.toshiba-storage.com/trends-technology/its-not-raining-data-its-pouring-storage-trends-2019/ [Stand: 08.12.2020].

Kamalasanan, M. N. (1996): Sol-gel synthesis of ZnO thin films. – Thin Solid Films, 288: 112–115.

Kaminsky, W., Sinn, H. & Janning, J. (1979): Technische Prototypen für die Altreifen- und Kunststoff-Pyrolyse. – Chemie Ingenieur Technik, 51: 419–429.

Kampker, A., Vallée, D. & Schnettler, A. (2018): Elektromobilität. – Berlin, Heidelberg.

Kane, M. (2020): Tesla Model 3's IPM-SynRM electric motor explained. – URL: https://uk.motor1.com/news/462107/video-tesla-model-3-electric-motor-explained/ [Stand: 17.3.21].

Karimi, M., Mokhlis, H., Naidu, K., Uddin, S. & Bakar, A. (2016): Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network – A review. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53: 594–605.

Kc, S. & Lutz, W. (2017): The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. – Global Environmental Change, 42: 181–192.

Keith, D. W., Holmes, G., St. Angelo, D. & Heidel, K. (2018): A Process for Capturing CO_2 from the Atmosphere. – Joule, 2: 1573–1594.

Kelley, K. D., Scott, C. T., Polyak, D. E. & Kimball, B. E. (2017): Vanadium. – Chapter U of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply [Stand: 27.07.2020].

Kendall, K. & Kendall, M. (2016): High-Temperature Solid Oxide Fuel Cells for the 21st Century.

Khan, M. A., Zhao, H., Zou, W., Chen, Z., Cao, W., Fang, J., Xu, J., Zhang, L. & Zhang, J. (2018): Recent Progresses in Electrocatalysts for Water Electrolysis. – Electrochem. Energ. Rev., 1: 483–530.

Khavarian, K. & Kockelman, K. M. (2020): Lifecycle Analysis of Electric Vertical Take-Off and Landing Vehicles.

Kim, T., Song, W., Son, D.-Y., Ono, L. K. & Qi, Y. (2019): Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. – J. Mater. Chem. A, 7: 2942–2964.

Kirsch, H., Brübach, L., Loewert, M., Riedinger, M., Gräfenhahn, A., Böltken, T., Klumpp, M., Pfeifer, P. & Dittmeyer, R. (2020): CO_2-neutrale Fischer-Tropsch-Kraftstoffe aus dezentralen modularen Anlagen: Status und Perspektiven. – Chemie Ingenieur Technik, 92: 91–99.

KIT (2012): Miniatur-Radar mit Millimeter-Genauigkeit. – URL: http://www.pro-physik.de/details/news/2559291/Miniatur-Radar_mit_Millimeter-Genauigkeit.html [Stand: 15.04.2015].

Klein, B. (2012): Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung. – 9. Aufl., Wiesbaden.

Klerk, A. de (2008): Fischer-Tropsch Refining. – A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Philosophiae Doctor (Chemical Engineering). University of Pretoria. – URL: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/26754/Complete.pdf [Stand: 15.02.2021].

Kluy, L. (2020): Was verspricht der Einsatz von Cobots? – URL: https://www.vdi.de/news/detail/was-verspricht-der-einsatz-von-cobots [Stand: 16.12.20].

Köhler, A. R., Gröger, J. & Liu, R. A. (2018): Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung. – Berlin.

Koiwanit, J. (2018): Analysis of environmental impacts of drone delivery on an online shopping system. – Advances in Climate Change Research, 9: 201–207.

Koj, J. C., Schreiber, A., Zapp, P. & Marcuello, P. (2015): Life Cycle Assessment of improved high pressure alkaline electrolysis.

Koj, J. C., Wulf, C., Schreiber, C. & Zapp, P. (2017): Site-Dependent Environmental Impacts of Industrial Hydrogen Production by Alkaline Water Electrolysis. – Energies, 10: 860.

Kojonen, K. K., Roberts, A. C., Isomäki, O.-P., Knauf, V. V., Johnason, B. & Pakkanen, L. (2004): Tarkanite, (Cu,Fe)(Re,Mo)4S8, A new mineral species from the hitura mine, nivala, Finland. – The Canadian Mineralogist, 42: 539–544.

König, J., Tarantik, K., Heuer, J. & Bartholomé K. (2015): Thermoelectric research and developments at Fraunhofer IPM. Thermoelectrics: Ready for Progress to industrialization. – Symposium on waste heat recovery, 24.02.2015. Tokio.

Konter, M. (2012): Gas Turbine Materials with Focus on Re and RE Utilization and Trends. – The MMTA's International Minor Metals Conference. Köln.

Kopacek, B. & Kopacek, P. (2013): End of life management of industrial robots. – Elektrotech. Inftech., 130: 67–71.

Korthauer, R. (2013): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. – Berlin, Heidelberg.

Kowsar, A., Rahaman, M., Islam, M. S., Imam, A. Y., Debnath, S. C., Sultana, M., Hoque, M. A., Sharmin, A., Mahmood, Z. H. & Farhad, S. (2019): Progress in Major Thin-film Solar Cells: Growth Technologies, Layer Materials and Efficiencies. – International Journal of Renewable Energy Research (2019).

Krail, M., Dütschke, E., Hellekes, J., Schneider, U., Schellert, M., Rüdiger, D., Steindl, A., Luchmann, I., Wassmuth, V., Flämig, H., Schade, W., Mader, S. & Wagner, U. (2019): Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. – Karlsruhe.

Krapp, M. (2020): SONAR. Modelling for the search for new active materials for redox flow batteries. – URL: https://www.sonar-redox.eu/en/About.html [Stand: 08.07.2020].

Krause, T., Strauss, O., Scheffler, G., Kett, H., Lehmann, K. & Renner, T. (2017): IT-Plattformen für das Internet der Dinge (IoT). Basis intelligenter Produkte und Services.

Kräusslich, W. (2020): Alles Wissenswerte zu Robotern: Geschichte, Typen, Anwendung. – URL: https://www.kollegeroboter.de/industrie/alles-wissenswerte-zu-robotern-geschichte-typen-einsatzbereiche-101.html#cobots.

Kreft, S. & Jackel, F. (2019): 3D Printing and the World of Metal Powders (2019).

Kreiger, M. & Pearce, J. M. (2013): Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products. – ACS Sustainable Chem. Eng., 1: 1511–1519.

Kriegler, E., Bauer, N., Alexander, P., Humpenöder, F., Leimbach, M., Strefler, J., Baumstark, L., Bodirsky, B., Hilaire, J., Klein, D., Mouratiadou, I., Weindl, I., Bertram, C., Dietrich, JP., Luderer, G., Pehl, M., Pietzcker, R., Piontek, F., Lotze- Campen, H., Biewald, A., Bonsch, M., Giannousakis, A., Kreidenweis, U., Müller, C., Rolinski, S., Schultes, A., Schwanitz, J., Stevanovic, M., Calvin, K., Emmerling, J., Fujimori, S. & Edenhofer, O. (2017): Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. – Global Environmental Change, 42: 297–315.

Kriegler, E., O'Neill, B. C., Hallegatte, S., Kram, T., Lempert, R. J., Moss, R. H. & Wilbanks, T. (2012): The need for and use of socio-economic scenarios for climate change analysis: a new approach based on shared socio-economic pathways. – Global Environmental Change, 22: 807–822.

Ku, A. Y. (2018): Anticipating critical materials implications from the Internet of Things (IOT): Potential stress on future supply chains from emerging data storage technologies. – Sustainable Materials and Technologies, 15: 27–32.

Kuckshinrichs, W. (Hrsg.) (2013): CO_2-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung. Technische, wirtschaftliche, umweltseitige und gesellschaftliche Perspektive. – Jülich.

KUKA (2021): Industrieroboter. – Persönliche Mitteilung.

Kuroki, T., Murai, R., Makino, K., Nagano, K., Kajihara, T., Kaibe, H., Hachiuma, H. & Matsuno, H. (2015): Research and Development for Thermoelectric Generation Technology Using Waste Heat from Steelmaking Process. – Journal of Elec Materi, 44: 2151–2156.

Kurzweil, P. & Dietlmeier, O. K. (2018): Elektrochemische Speicher. – Wiesbaden.

Labs, L. (2020a): Grundlagen Bandlaufwerke. – Heise (2020-03-27). – URL: https://www.heise.de/select/ct/2020/8/2006413101160501970 [Stand: 14.02.2021].

Labs, L. (2020b): Seagate: HAMR-Festplatte mit 20 TByte kommt im Dezember. – heise Online (2020-09-24). – URL: https://www.heise.de/news/Seagate-HAMR-Festplatte-mit-20-TByte-kommt-im-Dezember-4912052.html [Stand: 14.02.2021].

Lambert, F. (2018): Tesla motor designer explains Model 3's transition to permanent magnet motor. – URL: https://electrek.co/2018/02/27/tesla-model-3-motor-designer-permanent-magnet-motor/ [Stand: 17.3.21].

Lang, P. (2019): Mehr Reichweite und Power dank Model-3-Antrieb. – URL: https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/tesla-model-s-x-synchronmotor-facelift-reichweite-leistung/ [Stand: 17.3.21].

Langione, M., Tillemann-Dick, C., Kumar, A. & Taneja, V. (2019): Where Will Quantum Computers Create Value—and When? – URL: https://www.bcg.com/publications/2019/quantum-computers-create-value-when [Stand: 31.08.2020].

Langner, B. E. (2011): Understanding copper. Technologies, markets, business. – Winsen.

Lantz, M. (2020): Why the Future of Data Storage is (Still) Magnetic Tape – IEEE Spectrum. – URL: https://spectrum.ieee.org/computing/hardware/why-the-future-of-data-storage-is-still-magnetic-tape [Stand: 08.12.2020].

Laschi, C., Mazzolai, B. & Cianchetti, M. (2016): Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities. – Science robotics, 1.

Lau, W. W. Y., Shiran, Y., Bailey, R. M., Cook, E., Stuchtey, M. R., Koskella, J., Velis, C. A., Godfrey, L., Boucher, J., Murphy, M. B., Thompson, R. C., Jankowska, E., Castillo Castillo, A., Pilditch, T. D., Dixon, B., Koerselman, L., Kosior, E., Favoino, E., Gutberlet, J., Baulch, S., Atreya, M. E., Fischer, D., He, K. K., Petit, M. M., Sumaila, U. R., Neil, E., Bernhofen, M. V., Lawrence, K. & Palardy, J. E. (2020): Evaluating scenarios toward zero plastic pollution. – Science (New York, N.Y.), 369: 1455–1461.

Lechleitner, A., Schwabl, D., Schubert, T., Bauer, M. & Lehner, M. (2020): Chemisches Recycling von gemischten Kunststoffabfällen als ergänzender Recyclingpfad zur Erhöhung der Recyclingquote. – Österr Wasser- und Abfallw, 72: 47–60.

Lee, G. C., Cushner, F. D., Cannella, L. Y. & Scott, W. N. (2005): The effect of total knee arthroplasty on body weight. – Orthopedics, 28: 321–323.

Lee, Y. D. (2015): Thermodynamic, economic and environmental evaluation of solid-oxide fuel-cell hybrid power-generation systems. – Dissertation. Technische Universität Berlin. – URL: https://opus4.kobv.de/opus4-tuberlin/files/6857/lee_young_duk.pdf [Stand: 25.10.2015].

Lee, Y.-G., Fujiki, S., Jung, C., Suzuki, N., Yashiro, N., Omoda, R., Ko, D.-S., Shiratsuchi, T., Sugimoto, T., Ryu, S., Ku, J. H., Watanabe, T., Park, Y., Aihara, Y., Im, D. & Han, I. T. (2020): High-energy long-cycling all-solid-state lithium metal batteries enabled by silver–carbon composite anodes. – Nat Energy, 5: 299–308.

Leimbach, M., Kriegler, E., Roming, N. & Schwanitz, J. (2017): Future growth patterns of world regions – a GDP scenario approach. – Global Environmental Change, 42: 215–225.

Li, L., Liu, G., Pan, D., Wang, W., Wu, Y. & Zuo, T. (2017): Overview of the recycling technology for copper-containing cables. – Resources, Conservation and Recycling, 126: 132–140.

Li, M.-J., Tandon, P., Bookbinder, D. C., Bickham, S. R. & McDermott, M. A. (2008): Ultra-low Bending Loss Single-Mode Fiber for FTTH. – Journal of Lightwave Technology, 2008: 376–382.

Li, Q. & Lau, K. M. (2017): Epitaxial growth of highly mismatched III-V materials on (001) silicon for electronics and optoelectronics. – Progress in crystal growth and characterization of materials: 105–120.

Lian, B., Sun, X.-Q., Vaezi, A., Qi, X.-L. & Zhang, S.-C. (2018): Topological quantum computation based on chiral Majorana fermions. – Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115: 10938–10942.

Licht, C., Peiró, L. T. & Villalba, G. (2015): Global Substance Flow Analysis of Gallium, Germanium, and Indium: Quantification of Extraction, Uses, and Dissipative Losses within their Anthropogenic Cycles. – Journal of Industrial Ecology, 19: 890–903.

Liedtke, M. & Huy, D. (2018): Rohstoffrisikobewertung – Gallium. DERA Rohstoffinformationen 35, Berlin.

Lilley, P. D., Erdle, E. & Gross, F. (1989): Market potential of solid oxide fuel cells (SOFC). – European Commission.

Linne, K. (2020): Was ist eine Festplatte? Einfach erklärt. – URL: https://praxistipps.chip.de/was-ist-eine-festplatte-einfach-erklaert_41663 [Stand: 08.12.2020].

Lipinski, K. (2015): Magnetband. – URL: https://www.itwissen.info/Magnetband-magnetic-tape-MT.html [Stand: 08.02.2021].

Liu, C. M., Sandhu, N. K., McCoy, S. T. & Bergerson, J. A. (2020a): A life cycle assessment of greenhouse gas emissions from direct air capture and Fischer–Tropsch fuel production. – Sustainable Energy Fuels, 4: 3129–3142.

Liu, J. & Chinnasamy, C. (2012): Rare Earth Magnet Recycling. – Rare Earth Elements Workshop, 10.05.2012. Colorado.

Liu, K., Yang, S., Luo, L., Pan, Q., Zhang, P., Huang, Y., Zheng, F., Wang, H. & Li, Q. (2020b): From spent graphite to recycle graphite anode for high-performance lithium ion batteries and sodium ion batteries. – Electrochimica Acta, 356: 136856.

López de Lacalle, L. Norberto, Campa, F. J. & Lamikiz, A. (2011): Milling. – In: Davim, J. (Hrsg.): Modern Machining Technology.

Lossin, A. (2012): Copper. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 14.07.2020].

Lotrič, A., Sekavčnik, M., Kuštrin, I. & Mori, M. (2021): Life-cycle assessment of hydrogen technologies with the focus on EU critical raw materials and end-of-life strategies. – International Journal of Hydrogen Energy, 46: 10143–10160.

LTEmobile (2021): 5G Frequenzen und Frequenzbänder. – URL: https://ltemobile.de/5g-frequenzen-und-frequenzbaender/ [Stand: 31.05.2021].

Lutsey, N. (2010): Review of technical literature and trends related to automobile mass-reduction

technology. Davis. – URL: https://escholarship.org/uc/item/9t04t94w [Stand: 07.09.2020].

Lutz, C., Becker, L., Ulrich, P. & Distelkamp, M. (2019): Sozioökonomische Szenarien als Grundlage der Vulnerabilitätsanalysen für Deutschland. Teilbericht des Vorhabens „Politikinstrumente zur Klimaanpassung". – Dessau-Roßlau. – URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-29_cc_25-2019_soziooekonomszenarien.pdf.

Mahmoudi, S., Huda, N., Alavi, Z., Islam, M. T. & Behnia, M. (2019): End-of-life photovoltaic modules: A systematic quantitative literature review. – Resources, Conservation and Recycling, 146: 1–16.

Mantel, M. (2020): Magnetbänder: Fujifilm stellt 400-TByte-Tapes in Aussicht. – heise Online (2020-07-06). – URL: https://www.heise.de/news/Magnetbaender-Fujifilm-stellt-400-TByte-Tapes-in-Aussicht-4836606.html [Stand: 12.02.2021].

Market Research Future (2021): Global Data Center Market. By Type (Corporate data centers, Web hosting data centers), Density (Low, Medium, High, Extreme), and Verticals (Banking & Financial Services, Telecom & IT, Government, Healthcare) – Forecast to 2023. – URL: https://www.marketresearchfuture.com/reports/data-centre-market-4721 [Stand: 23.3.21].

Markets and Markets (2014): Fiber Optics Market by Application (Telecom & Broadband, Utilities, Oil & Gas, Private Data Networks, Military/Aerospace, Cable Television & Others) – Global Trends & Forecasts to 2019. – URL: http://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/fiber-optics-market-238443438.html [Stand: 20.11.2015].

MARKLINES CO Ltd. (2020): Automotive Industry Portal. – URL: http://www.marklines.com [Stand: 12.06.2020].

Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Tercero Espinoza, L. A., Angerer, G., Marwede, M. & Benecke, S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. – DERA Rohstoffinformationen 28: 353 S., Berlin. – URL: https://www.bgr.bund.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf;jsessionid=69AF2CA7D87C8AEE74782EFF3D20DB15.1_cid284?__blob=publicationFile&v=5.

Marti, P., Lampus, F., Benevento, D. & Setacci, C. (2019): Trends in use of 3D printing in vascular surgery: a survey. – Int Angiol., 38: 418–424.

Martin, D., Johnson, K., Stolberg, A., Zhang, X. & De Young, C. (2017): Carbon Dioxide Removal Options. – A Literature Review Identifying Carbon Removal Potentials and Costs.

Marwede, M. (2013): Cycling critical absorber materials of CdTe- and CIGS-photovoltaics: Material efficiency along the life-cycle. – Dissertation. Universität Augsburg. – URL: http://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/2440 [Stand: 23.06.2015].

Marwede, M. & Reller, A. (2014): Estimation of Life Cycle Material Costs of Cadmium Telluride- and Copper Indium Gallium Diselenide-Photovoltaic Absorber Materials based on Life Cycle Material Flows. – Journal of Industrial Ecology, 18: 254–267.

Marx, A., Hoess, J. & Uhlig K. (2014): Dry Dilution Refrigerator for Experiments on Quantum Effects in the Microwave Regime. – URL: https://arxiv.org/abs/1412.3619 [Stand: 31.08.2020].

Massa, N. (2000): Fundamentals of photonics. – Module 1.8. Fiber Optic telecommunication.

Massimo, R., Thaker, A. & Suhare, A. (2018): The Coming Quantum Leap in Computing. – URL: https://www.bcg.com/publications/2018/coming-quantum-leap-computing [Stand: 31.08.2020].

Matthews, N. (2018): Additive metal technologies for aerospace sustainment. – Aircraft Sustainment and Repair: 845–862.

Mattke, S. (2020): Luftnummer Lilium? – URL: https://www.heise.de/tr/artikel/Luftnummer-Lilium-4665642.html.

MatWeb (2020): Material Property Data. – URL: http://www.matweb.com [Stand: 10.10.2020].

Maximize Market Research (2020): Global Optical Fiber Market Industry Analysis and Forecast (2020-2027) – by Mode, by Type, by Industry

Vertical, by Application, and by Geography. – URL: https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-optical-fiber-market/23623/ [Stand: 22.2.21].

May, N. (2005): Ökobilanz eines Solarstromtransfers von Nordafrika nach Europa. – Diplomarbeit. Technische Universität Braunschweig. – URL: https://www.dlr.de/tt/Portaldata/41/Resources/dokumente/institut/system/publications/Oekobilanz_eines_Solarstromtransfers.pdf [Stand: 09.06.2020].

Mayyas, A., Steward, D. & Mann, M. (2019): The case for recycling: Overview and challenges in the material supply chain for automotive li-ion batteries. – Sustainable Materials and Technologies, 19: e00087.

McKinsey & Company (2008): Carbon Capture & Storage. Assessing the Economics. – McKinsey Climate Change Initiative. – URL: https://assets.wwf.ch/downloads/mckinsey2008.pdf [Stand: 16.11.2015].

McKinsey & Company (2019): Growing opportunities in the Internet of Things. – URL: https://www.mckinsey.com/industries/private-equity-and-principal-investors/our-insights/growing-opportunities-in-the-internet-of-things#.

Meetham, G. W. (2012): High-Temperature Materials. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry.

Mehmeti, A., McPhail, S. J., Pumiglia, D. & Carlini, M. (2016): Life cycle sustainability of solid oxide fuel cells: From methodological aspects to system implications. – Journal of Power Sources, 325: 772–785.

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. & Meyer, F. (2019): A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. – ICT Express, 5: 1–7.

Mellor, C. (2018): Seagate HAMRs out a roadmap for future hard drive recording tech. – The Register (2018-11-02). – URL: https://www.theregister.com/2018/11/02/seagate_hamr_roadmap/ [Stand: 09.12.2020].

Mellor, C. (2019): Seagate: our disk drives are safe from SSDs for at least 15 years. – URL: https://blocksandfiles.com/2019/09/23/seagate-assumes-ssds-wont-kill-disk-drives/ [Stand: 08.12.2020].

Mellor, C. (2020a): Hard disk drives will disappear from your data centre – unless you work for a hyperscaler. – URL: https://blocksandfiles.com/2020/02/07/hard-disks-disappear-small-data-centres/ [Stand: 08.12.2020].

Mellor, C. (2020b): Fujifilm points to 400TB tape cartridge on the horizon. – URL: https://blocksandfiles.com/2020/06/29/fujifilm-400tb-magnetic-tape-cartridge-future/ [Stand: 09.12.2020].

Merklein, M., Johannes, M., Lechner, M. & Kuppert, A. (2014): A review on tailored blanks – Production, applications and evaluation. – Journal of Materials Processing Technology, 214: 151–164.

Meroufel, A. (2017): Controlling corrosion in Saudi Arabia's desalination plants. – URL: https://www.stainless-steel-world.net/webarticles/2017/07/04/controlling-corrosion-in-saudi-arabias-desalination-plants.html [Stand: 10.10.2020].

Mertens, A. & Koch, M. (2003): Tailored Blank: Geschichte eines Erfolgs. – Stuttgarter Lasertage, 2003: 169–172.

Merwerth, J. (2014): The hybrid-synchronous machine of the new BMW i3 and i8. – URL: http://hybridfordonscentrum.se/wp-content/uploads/2014/05/20140404_BMW.pdf [Stand: 17.3.21].

Metal AM (2020): Constellium launches Aheadd® high-performance aluminium powders. – URL: https://www.metal-am.com/constellium-launches-aheadd-high-performance-aluminium-powders/ [Stand: 07.07.2020].

Meteyer, S., Xub, X., Perryc, N. & Zhaob, Y. F. (2014): Energy and Material Flow Analysis of Binder-jetting Additive Manufacturing Processes. – Procedia CIRP, 15: 19–25.

Mewawalla, C. (2019): Robotics. – Thematic Research at GlobalData.

Michaels, K. (2018): Overlooked: Looming Threats In The Aerospace Raw Material Supply Chain. – URL: https://www.linkedin.com/pulse/overlooked-looming-threats-aerospace-raw-material-supply-michaels/ [Stand: 08.07.2020].

Micke, P., Stark, J., King, S. A., Leopold, T., Pfeifer, T., Schmöger, L., Schwarz, M., Spiess, L. J., Schmidt, P. O. & Crespo López-Urrutia, J. R. (2019): Closed-cycle, low-vibration 4 K cryostat for ion traps and other applications. – The Review of scientific instruments, 90: 65104.

MIT (2015): Power Plant Carbon Dioxide Capture and Storage Projects. Pilot Projects. – URL: https://sequestration.mit.edu/tools/projects/index_pilots.html [Stand: 11.11.2015].

MMTA (2015): Re – Rhenium. – URL: http://www.mmta.co.uk/metals/Re [Stand: 02.02.2016].

Modis GmbH (2021): Persönliche Mitteilung.

Monreal, C. (2020): Chemical recycling in Practice. – (2020-10-13).

Moore, S. K. & Nordrum, A. (2018): Intel's New Path to Quantum Computing. Intel's director of quantum hardware, Jim Clarke, explains the company's two quantum computing technologies. – URL: https://spectrum.ieee.org/nanoclast/computing/hardware/intels-new-path-to-quantum-computing [Stand: 31.08.2020].

Mordor Intelligence (2020a): Fiber Optic Cable Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 – 2026). – URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/fiber-optic-cable-market [Stand: 22.02.2021].

Mordor Intelligence (2020b): Rare Earth Elements Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 – 2026). – URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/rare-earth-elements-market [Stand: 15.3.21].

Mordor Intelligence (2020c): Synthetic Graphite Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 – 2026). – URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/synthetic-graphite-market.

Morimoto, T., Kobayashi, S., Nagao, Y. & Iwahori, Y. (2017): A new cost/weight trade-off method for airframe material decisions based on variable fuel price. – Cogent Engineering, 4: 17.

Morrish, J. (2020): Global IoT market to grow to $1.5trn annual revenue by 2030. – URL: https://www.iot-now.com/2020/05/20/102937-global-iot-market-to-grow-to-1-5trn-annual-revenue-by-2030/.

Moss, R. L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P. & Kooroshy, J. (2011): Critical Metals in Strategic Energy Technologies. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. – European Commission. – URL: http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC65592 [Stand: 15.11.2012].

MPIF & APMI International (2020): Powder Metallurgy Fact Sheet. – URL: https://www.mpif.org/Resources/IndustryFacts.aspx.

Mraz, S. (2014): Basics of Aerospace Materials: Aluminum and Composites. – URL: https://www.machinedesign.com/materials/article/21831769/basics-of-aerospace-materials-aluminum-and-composites.

Mulligan, J. & Lashof, D. (2019): A CO_2 Direct Air Capture Plant Will Help Extract Oil in Texas. Could This Actually Be Good for the Climate? – URL: https://www.wri.org/blog/2019/07/co2-direct-air-capture-plant-will-help-extract-oil-texas-could-actually-be-good-climate [Stand: 20.01.2021].

Münder, P. (2017): Mit dem Auto über die Wolken: Verkehr der Zukunft. – URL: https://www.zeit.de/mobilitaet/2017-05/verkehr-zukunft-flugtaxi-flugzeug-luftverkehr/seite-2.

Murata (2007): Choosing between ceramic and tantalum capacitors. – URL: http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnewsid=27008 [Stand: 21.12.2015].

Mutig, A. (2010): High Speed VCSELs for Optical Interconnects. – PhD Thesis.

Nadler, H. G. (2003): Rhenium and Rhenium Compounds. – In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 6. Aufl., Weinheim, Germany.

Nakamura, K. (2012): Ultrasonic Transducers Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications. – Part 1 – chapter 3: Piezoelectric ceramics for transducers.

NASA (2018): URBAN AIR MOBILITY (UAM) MARKET STUDY. – URL: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/uam-market-study-executive-summary-v2.pdf.

Nassar, N. T. (2015): Limitations to elemental substitution as exemplified by the platinum-group metals. – Green Chem, 17: 2226–2235.

Nassar, N. T. (2017): Shifts and trends in the global anthropogenic stocks and flows of tantalum. – Resources, Conservation and Recycling, 125: 233–250.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019): Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration. – A Research Agenda.

Ndip (2021a): 5G und 6G: Schlüsseltechnologien und -bauelemente, Trends. – Interview Dr. Otmar Deubzer mit Dr. Ivan Ndip.

Ndip (2021b): »6G kommt, um die Erwartungen zu erfüllen, die 5G geweckt hat«. – Interview mit Dr. Ivan Ndip, Fraunhofer IZM. – URL: https://www.elektroniknet.de/kommunikation/mobilfunk/6g-kommt-um-die-erwartungen-zu-erfuellen-die-5g-geweckt-hat.182475.html [Stand: 18.01.2021].

NETL (2019): Assessing the Export Potential for High-Performance Materials. – URL: https://www.netl.doe.gov/sites/default/files/2019-05/2019_Annual_Reports/Tuesday/Materials%20and%20Modeling/3%20-%202300.202.015_High%20Performance%20Materials%20Final%20Slide%20Deck%20-%20Shuster.pdf [Stand: 03.03.2021].

Neumeier, S. (2020): MRK – Hype oder Erfolgsmodell für die Automobilindustrie? – URL: https://www.blog.kuka.com/2020/10/28/mrk-hype-oder-erfolgsmodell-fuer-die-automobilindustrie/ [Stand: 15.02.21].

Noll, R., Bergamos, M., Bergmann, K., Brumm, H., Eschen, M., Fricke-Begemann, C., Gorewoda, T., Makowe, J., Saenz, J., Schreckenberg, F., Torim, A. & Veglia, F. (2020): Process Line for the Automated Dismantling and Sorting of Valuable Components from Printed Circuit Boards. – In: Thomé-Kozmiensky, E., Holm, O., Friedrich, B. & Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Sekundärrohstoffe, Band 13. Nietwerder.

NOW GmbH (2018): Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme. – Studie IndWEDe.

O'Donnell, N. (2020): ABB makes manufacturing more sustainable by recycling and remanufacturing thousands of old robots. – URL: https://new.abb.com/news/detail/64305/remanufacturing-old-robots [Stand: 02.02.2021].

O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M. & Solecki, W. (2017): The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. – Global Environmental Change, 42: 169–180.

OECD (2021): OECD Science, Technology and Innovation Outlook 2021. Times of Crisis and Opportunity. – Paris.

Oertel, D. (2008): Energiespeicher – Stand und Perspektiven. Sachstandsbericht zum Monitoring „Nachhaltige Energieversorgung". – URL: http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab123.pdf [Stand: 05.05.2014].

OICA (2020): Production statistics. – URL: http://www.oica.net/category/production-statistics/2013-statistics/ [Stand: 12.06.2020].

Ojo, M. O., Giordano, S., Procissi, G. & Seitanidis, A. I. N. (2018): A Review of Low-End, Middle-End, and High-End Iot Devices. – IEEE Access, 6.

Ökopol GmbH (2016): Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra). – Abschlussbericht.

Oleg Satanovsky (2019): BMW Expands 530e Sedan Inductive Charging Pilot Program to U.S. – URL: https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0299828EN_US/bmw-expands-530e-sedan-inductive-charging-pilot-program-to-u-s.

OMV (2018): Factsheet ReOil. – URL: https://www.omv.com/services/downloads/00/omv.com/1522138335117/Factsheet%20ReOil_de.

Oppenheimer, S. (2020): Elektromotoren: Es gibt drei Arten – doch die Zukunft gehört wohl dieser Technik. – URL: https://www.24auto.de/technik/antriebsarten/elektromotor-e-auto-stromer-permanenterregter-synchronmotor-rotor-stator-90066208.html [Stand: 17.3.21].

Or, T., Gourley, S. W. D., Kaliyappan, K., Yu, A. & Chen, Z. (2020): Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. – Carbon Energy, 2: 6–43.

Orth, M. (2014): Experimentelle Untersuchung des Chemical Looping Verfahrens an einer 1 MW Versuchsanlage. – Darmstadt. – Ph.D. Thesis.

Ostler, U. (2019): Warum das Tape im Datacenter noch lange nicht am Ende ist. Die Rolle von LTO Tape Libraries in einer Storage-Architektur. – URL: https://www.datacenter-insider.de/warum-das-tape-im-datacenter-noch-lange-nicht-am-ende-ist-a-855997/ [Stand: 08.12.2020].

Ostrooumov, M. & Taran, Y. (2016): Vanadium, V – a new native element mineral from the Colima volcano, State of Colima, Mexico, and implications for fumarole gas composition. – Mineralogical Magazine, 80: 371–382.

Oubbati, M. (2007): Robotik. – Skript zur Vorlesung. Ulm.

Outokumpu (o. J.): Produktlebenszyklus. – URL: http://www.outokumpu.com/de/nachhaltigkeit/nachhaltiger-produkte/produktlebenszyklus/Seiten/default.aspx.

Outokumpu (2020): The stainless steel family – introducing the different categories and grades. – URL: https://www.outokumpu.com/expertise/2020/the-stainless-steel-family [Stand: 10.10.2020].

Pachauri, R. K. & Meyer, L. A. (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. – Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.

PATHION (2020): Lithium-ion Rich Anti-Perovskite (LiRAP)™. – URL: https://www.pathion.com/li-rap/.

Peither, M. (2020): VoltStorage. – Aktuelle Entwicklungen zu Redox-Flow-Batterien.

Perpetua (2021): Use Cases. Thermoelectric delivers power for all industries. – URL: https://perpetuapower.com/use-cases/ [Stand: 04.03.2021].

Pervaiz, S., Anwar, S., Qureshi, I. & Ahmed, N. (2019): Recent Advances in the Machining of Titanium Alloys using Minimum Quantity Lubrication (MQL) Based Techniques. – Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech., 6: 133–145.

Petavratzi, E., Gunn, G. & Kresse, C. (2019): BGS Commodity Review – Cobalt. – [Stand: 14.07.2020].

Petermann, K. (2015): Herstellung von Lichtwellenleitern (TECH). Einführung in die optische Nachrichtentechnik.

Petrogas Gas-systems B.V (2020): Plastic to Chemicals. – URL: https://www.petrogas.nl/process-systems/plastic-to-oil/ [Stand: 08.02.2021].

Plankers, B. (2015): The data center SSD takeover is well underway. – TechTarget (2015-04-14). – URL: https://searchdatacenter.techtarget.com/feature/The-data-center-SSD-takeover-is-well-underway [Stand: 09.12.2020].

PlasticsEurope (2019): Plastics – the Facts 2019.

Podbregar, N. (2019): Kühlen ohne Kältemittel. Forscher optimieren die Kälteerzeugung durch Magnete. – URL: https://www.scinexx.de/news/technik/kuehlen-ohne-kaeltemittel/ [Stand: 15.3.21].

Pontes, J. (2021): 2020 Sales by OEM. – URL: http://ev-sales.blogspot.com/2021/02/2020-sales-by-oem.html [Stand: 17.3.21].

Powalla, M., Paetel, S., Ahlswede, E., Wuerz, R., Wessendorf, C. D. & Magorian Friedlmeier, T. (2018): Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on CdTe-, Cu(In,Ga)Se 2 –, and perovskite-based materials. – Applied Physics Reviews, 5: 41602.

Pradhan, D., Panda, S. & Sukla, L. B. (2018): Recent advances in indium metallurgy: A review. – Mineral processing and extractive metallurgy review, 39: 167–180.

Priemer, B. (2015): Selbstversuch mit BMW i3 Remote Parking. Auto Motor Sport Online. – URL: http://www.auto-motor-und-sport.de/news/selbstversuch-bmw-i3-remote-parking-parken-mit-hang-zur-perfektion-9143838.html [Stand: 19.02.2015].

Princeton Optronics (o. J.): Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Technology.

Protopapadaki, C. & Saelens, D. (2017): Heat pump and PV impact on residential low-voltage distribution grids as a function of building and district properties. – Applied Energy, 192: 268–281.

Prouvé, T., Godfrin, H., Gianèse, C., Triqueneaux, S. & Ravex, A. (2007): Pulse-Tube Dilution Refrigeration Below 10 mK. – Journal of Low Temperature Physics, 148: 909–914.

Quadbeck-Seeger, H.-J. (2007): Die Welt der Elemente – Die Elemente der Welt.

Quantafuel (2020): Plants and Projects. – URL: https://www.quantafuel.com/map-over-projects [Stand: 08.02.2021].

Radziukynas, V. (2020): EnergyKeeper. – URL: http://www.energykeeper.eu/ [Stand: 09.07.2020].

Rahimzei, E., Sann, K. & Vogel, M. (2015): Kompendium: Li-Ionen-Batterien. – Frankfurt.

Raluy, R. G., Serra, L., Uche, J. & Valero, A. (2005): Life Cycle Assessment of Water Production Technologies – Part 2: Reverse Osmosis Desalination versus the Ebro River Water Transfer (9 pp). – Int J Life Cycle Assess, 10: 346–354.

Ramseyer, C. (2018): Intel SSD 760p And 660p QLC Leak Online. – URL: https://www.tomshardware.com/news/intel-760p-660p-700p-specifications,36335.html [Stand: 08.12.2020].

Rao, A. S. & Verweij, G. (2017): Sizing the prize. What's the real value of AI for your business and how can you capitalise?

Rao, M. (2019): The Future Of Data Centers. – URL: https://www.cbinsights.com/research/future-of-data-centers/ [Stand: 08.12.2020].

Rasenack, K. & Goldmann, D. (2014): Herausforderungen des Indium-Recyclings aus LCD-Bildschirmen und Lösungsansätze. – Recycling und Rohstoffe.

Ravikumar, D., Seager, T., Sinha, P., Fraser, M. P., Reed, S., Harmon, E. & Power, A. (2020): Environmentally improved CdTe photovoltaic recycling through novel technologies and facility location strategies. – Prog Photovolt Res Appl, 28: 887–898.

Reinhardt, R., Amante García, B., Canals Casals, L. & Gassó Domingo, S. (2019): A Critical Evaluation of Cathode Materials for Lithium-Ion Electric Vehicle Batteries. – In: Ayuso Muñoz, J. L., Yagüe Blanco, J. L. & Capuz-Rizo, S. F. (Hrsg.): Project Management and Engineering Research. Cham.

Reinhold, J. (2020): Recyclingpotenzial von W, Ta und Nd aus Smartphones. – Bachelorarbeit. TU Berlin.

Reinsel, D., Gantz, J. & Rydning, J. (2018): The Digitization of the World – From Edge to Core.

Renner, H., Schlamp, G., Kleinwächter, I., Drost, E., Lüschow, H. M., Tews, P., Panster, P., Diehl, M., Lang, J., Kreuzer, T., Knödler, A., Starz, K. A., Dermann, K., Rothaut, J., Drieselmann, R., Peter, C., Schiele, R., Coombes, J., Hosford, M. & Lupton, D. F. (2018): Platinum Group Metals and Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 14.07.2020].

Research and Markets (2019): Rare Earth Elements: The Future of the Market to 2024 – High Demand from Emerging Economies. – URL: https://www.prnewswire.com/news-releases/rare-earth-elements-the-future-of-the-market-to-2024---high-demand-from-emerging-economies-300877742.html [Stand: 15.3.21].

Research Interfaces (2020): What do we know about next-generation NMC 811 cathode? – URL: https://researchinterfaces.com/know-next-generation-nmc-811-cathode/ [Stand: 19.08.2020].

Reuter, Benjamin, Hendrich, A., Hengstler, J., Kupferschmid, S. & Schwenk, M. (2019): Rohstoffe für innovative Fahrzeugtechnologien. Herausforderungen und Lösungsansätze. – URL: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Material-Studie_e-mobilBW.pdf.

rggroup (2020): COBOTS Vs. Industrial Robots: What's the Difference? – URL: https://www.rg-group.com/resources/blog/cobots-vs-industrial-robots.

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Humpenöder, F., Da Silva, L. A., Smith, S., Stehfest, E., Bosetti, V., Eom, J., Gernaat, D., Masui, T., Rogelj, J., Strefler, J., Drouet, L., Krey, V., Luderer, G., Harmsen, M., Takahashi, K., Baumstark, L., Doelman, J., Kainuma. M., Klimont, Z., Marangoni, G., Lotze-Campen, H., Obersteiner, M., Tabeau, A. & Tavoni, M. (2017): The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. – Global Environmental Change, 42: 153–168.

Robinson, G. R., Hammarstrom, J. M. & Olson, D. W. (2017): Graphite. Chapter J of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. – [Stand: 24.02.2021].

Rohrig, K. (2014): Windenergie Report Deutschland 2013. –

Römpp (o. J.): Chemisches Lexikon. – URL: https://roempp.thieme.de/ [Stand: 08.04.2016].

Römpp (2020): Meerwasserentsalzung. – Römpp-online. – URL: https://roempp.thieme.de.

Rongguo, C., Juan, G., Liwen, Y., Huy, D. & Liedtke, M. (2016): Supply and Demand of Lithium and Gallium. – URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/EN/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/studie_Li_Ga.pdf;jsessionid=4A572F-B6D71EB86041EAEEB3A0E5138B.2_cid321?__blob=publicationFile&v=4 [Stand: 14.07.2020].

Roskill (2011): Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015. – London, England.

Roskill (2018): Tantalum: Global Industry, Markets and Outlook to 2028. – 14th Edition. – URL: http://roskill.cn/Uploads//20190503/5ccb197ab69fa.pdf [Stand: 17.12.2020].

Roskill (2019): Natural and synthetic graphite: Global Industry, Markets & Outlook. – London.

Roskill (2020a): Rare Earths. Outlook to 2030. – 20th Edition. – URL: https://roskill.com/market-report/rare-earths/ [Stand: 15.3.21].

Roskill (2020b): Roskill: Tantalum industry to be shaped by supply over next decade. – URL: https://www.globenewswire.com/news-release/2020/04/16/2017499/0/en/Roskill-Tantalum-industry-to-be-shaped-by-supply-over-next-decade.html [Stand: 14.12.2020].

Roskill (2020c): Tantalum Outlook to 2029. 15th Edition. – URL: https://www.globenewswire.com/news-release/2020/04/16/2017499/0/en/Roskill-Tantalum-industry-to-be-shaped-by-supply-over-next-decade.html.

Roskill Information Services (2011): Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015. A quick introductory guide to rare earths.

Rozier, P. & Tarascon, J. M. (2015): Review—Li-Rich Layered Oxide Cathodes for Next-Generation Li-Ion Batteries: Chances and Challenges. – J. Electrochem. Soc., 162: A2490-A2499.

RP Photonics Encyclopedia (2019): Avalanche Photodiodes. – URL: https://www.rp-photonics.com/avalanche_photodiodes.html [Stand: 18.01.2021].

Rudervall, R., Charpentier, J. P. & Sharma, R. (2000): High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper.

Ruffo, G. H. (2019): Imec Doubles Its Solid-State Battery Energy Density. They now reach 400 Wh/liter, enough for a 100 kWh EV battery pac. – URL: https://insideevs.com/news/360300/imec-energy-density-solidstate-batteries/.

Ryon, B. (2019): With a “hello,” Microsoft and UW demonstrate first fully automated DNA data storage. – Microsoft (2019-03-21). – URL: https://news.microsoft.com/innovation-stories/hello-data-DNA-storage/ [Stand: 09.12.2020].

Sainathan, P. (2018): Supply Chain Visibility Evolution: Barcodes, RFID, NFC, BLE Beacons. – URL: https://blog.roambee.com/supply-chain-technology/evolution-in-supply-chain-visibility-barcodes-to-rfid-to-ble-beacons#:~:text=The%20most%20unique%20difference%20between,which%20is%20highly%20energy%2Defficient.&text=High%20Read%2DRange%3A%20Beacons%20have,nature%20of%20the%20BLE%20technology.

Salehi, A., Fu, X., Shin, D.-H. & So, F. (2019): Recent Advances in OLED Optical Design. – Adv. Funct. Mater., 29: 1808803.

Sander, K., Schilling, S., Wambach, K., Schlenker, S., Müller, A., Springer, J., Fouquet, D., Jelitte, A., Stryi-Hipp, G. & Chrometzka, T. (2007): Studie zur Entwicklung eines Rücknahme- und Verwertungssystems für Photovoltaische Produkte. – URL: http://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2012/12655/pdf/Gesamtbericht_PVCycle_de.pdf [Stand: 30.06.2015].

Sander, K., Otto, S.J., Rödig L., Wagner, L (2018): Behandlung von Elektroaltgeräten (EAG) unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten. – 2018. Aufl., Dessau-Roßlau.

Sashank, S. S., Rajakumar, S., Karthikeyan, R. & Nagaraju, D. S. (2020): Weldability, Mechanical Properties and Microstructure of Nickel Based Super Alloys: a review. – E3S Web Conf., 184: 1040.

Savage, N. (2018): Building Quantum Computers With Photons. Silicon chip creates two-qubit processor. – URL: https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/building-quantum-computers-with-photons [Stand: 31.08.2020].

Schaal, S. (2019): Induktives Laden. BMW startet Pilotprojekt in den USA. – URL: https://www.electrive.net/2019/08/12/induktives-laden-bmw-startet-pilotprojekt-in-den-usa/.

Schadhauser, W. & Graefen, R. (2016): Was ist Flape? – Storage-Insider (2016-03-22). – URL: https://www.storage-insider.de/stichwort-flape-a-526963/ [Stand: 15.02.2021].

Scheirs, J. & Kaminsky, W. (Hrsg.) (2016): Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics. – Converting waste Plastics into Diesel and other Fuels. Chichester u. a.

Schlücker, I. (2016): Tapes und Disks besser jährlich wechseln. Lebenszyklus von Storage und Server. – URL: https://www.it-zoom.de/it-mittelstand/e/tapes-und-disks-besser-jaehrlich-wechseln-14555/ [Stand: 12.02.2021].

Schmal, V. (2010): Neodym-Nachfrage für Zukunftstechnologien. – Diplomarbeit. Duale Hochschule Baden-Württemberg.

Schmidt, M. (2015): Rohstoffrisikobewertung – Platingruppenmetalle. Platin, Palladium, Rhodium. 2014. – DERA Rohstoffinformationen 26, Berlin. – URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/studie_Platin_2015.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

Schmidt, M. (2017): Rohstoffrisikobewertung – Lithium. – DERA Rohstoffinformationen 33, Berlin. – URL: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_lithium_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [Stand: 29.07.2020].

Schmidt, U. (2020): Elektromobilität und Klimaschutz: Die große Fehlkalkulation. – Kiel Policy Brief. – URL: https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/-ifw/Kiel_Policy_Brief/2020/KPB_143.pdf [Stand: 06.05.2021].

Schmirgel, V. (2021): Schriftlicher Austausch über Industrierobotik: Persönliche Mitteilung.

Schorn, S. (o. J.): Mineralienatlas – Fossilienatlas. Seltene Erden. Lagerstätten und Vorkommen. – URL: https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Mineralienportrait/Seltene%20Erden/Lagerst%C3%A4tten%20und%20Vorkommen#Lagerst.24.24ttentypen.

Schraven, S., Kley, F. & Wietschel, M. (2010): Induktives Laden von Elektromobilen. Eine

techno-ökonomische Bewertung. – Working Paper Sustainability and Innovation.

Schuh, G., Dumitrescu, R., Krüger, A., Anderl, R. & Hompel, M. ten (2020): Industrie 4.0 Maturity Index. – Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten – UPDATE 2020 – (acatech STUDIE). UPDATE 2020. München.

Schüler, D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S. & Merz, C. (2011): Study on Rare Earths and Their Recycling. – Studie des Öko-Institut e. V. für die Fraktion der Grünen/EFA im Europäischen Parlament. – URL: www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf [Stand: 13.04.2016].

Schulz, K., Piatak, N. M. & Papp, J. F. (2017): Niobium and Tantalum. – Chapter M of Critical Mineral Resources of the United States-Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply [Stand: 25.07.2020].

Scoyer, J., Guislain, H. & Wolf, H. U. (2012): Germanium and Germanium Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 14.07.2020].

Seagate Blog (2017): HAMR: the Next Leap Forward is Now | Seagate Blog. – URL: https://blog.seagate.com/craftsman-ship/hamr-next-leap-forward-now/ [Stand: 09.12.2020].

Seiler, E. & Woidasky, J. (2013): Recycling von Windkraftanlagen (2013-02-06). – HamburgT.R.E.N.D.

Selenium-Tellurium Development Association (2021): Se & Te. – URL: https://stda.org/pages/SE-%26-TE.html.

SESAR (2016): European Drones Outlook Study: Unlocking the value for Europe.

Shah, A. (2020): Solar Cells and Modules. – 1st Edition. DOI 10.1007/978-3-030-46487-5

Shiva Kumar, S. & Himabindu, V. (2019): Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. – Materials Science for Energy Technologies, 2: 442–454.

Sibum, H., Güther, V., Roidl, O., Habashi, F., Uwe Wolf, H. & Siemers, C. (2003-2020): Titanium, Titanium Alloys, and Titanium Compounds. – In: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. 7. Aufl., Weinheim, Germany.

Sibum, H., Güther, V., Roidl, O., Habashi, F., Uwe Wolf, H. & Siemers, C. (2017): Titanium, Titanium Alloys, and Titanium Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 26.07.2020].

Simon, R. W., Hammond, R. B., Berkowitz, S. J. & Willemsen, B. A. (2004): Superconducting microwave filter systems for cellular telephone base stations. – Proc. IEEE, 92: 1585–1596.

Sloan, J. (2020): The markets: Aerospace (2020). – URL: https://www.compositesworld.com/articles/the-markets-aerospace.

Slussarenko, S. & Pryde, G. J. (2019): Photonic quantum information processing: A concise review. – Applied Physics Reviews, 6: 41303.

Smit, M., Williams, K. & van der Tol, J. (2019): Past, present, and future of InP-based photonic integration. – APL Photonics, 4: 50901.

Smith, F. (2013): The Use of composites in aerospace: Past, present and future challenges. – URL: https://avaloncsl.files.wordpress.com/2013/01/avalon-the-use-of-composites-in-aerospace-s.pdf [Stand: 02.07.2020].

Smith, L., Ibn-Mohammed, T., Yang, F., Reaney, I. M., Sinclair, D. C. & Koh, S. L. (2019): Comparative environmental profile assessments of commercial and novel material structures for solid oxide fuel cells. – Applied Energy, 235: 1300–1313.

Sojka, R., Pan, Q. & Billmann, L. (2020): Comparative study of Li-ion battery recycling processes. – URL: https://accurec.de/wp-content/uploads/2021/04/Accurec-Comparative-study.pdf.

Sparks, P. (2017): The route to a trillion devices: The outlook for IoT investment to 2035.

Special Metals (2021): Inconel nickel-chromium-iron alloy 601. – URL: https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-601.pdf [Stand: 08.03.2021].

Srivastava, R. R., Kim, M., Lee, J., Jha, M. K. & Kim, B.-S. (2014): Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. – J Mater Sci, 49: 4671–4686.

Staffell, I., Scamman, D., Velazquez Abad, A., Balcombe, P., Dodds, P. E., Ekins, P., Shah, N. & Ward, K. R. (2019): The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. – Energy Environ. Sci., 12: 463–491.

Statista (2018): Revenue of Internet of Things subsystems worldwide from 2012 to 2018.

Statista (2019a): Absatz von Industrierobotern weltweit nach Branchen in den Jahren 2018 und 2019. – URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/188246/umfrage/installationen-von-industrierobotern-durch-robotik-seit-1998/.

Statista (2019b): Development of the world population until 2050 – URL: https://www.statista.com/statistics/262875/development-of-the-world-population/ [Stand: 26.01.2021].

Statista (2019c): Quantum computing global market projections and forecast comparison 2017 to 2030 (in million U.S. dollars). – URL: https://www.statista.com/statistics/936010/quantum-computing-future-market-outlook-forecast/.

Statista (2020): Umsatz mit Industrierobotern weltweit in den Jahren von 2018 bis 2025. – URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/870571/umfrage/umsatz-von-industrierobotern-weltweit/.

Statista (2021a): Anzahl der Mobilfunkanschlüsse weltweit von 1993 bis 2020. – URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2995/umfrage/entwicklung-der-weltweiten-mobilfunkteilnehmer-seit-1993/.

Statista (2021b): Global new installed solar PV capacity from 2000 to 2019. – URL: https://www.statista.com/statistics/280200/global-new-installed-solar-pv-capacity/ [Stand: 10.06.2021].

Steffen, A. D. (2020): Toyota's Solid-State Battery Set To Revolutionize EVs And Electronics. – URL: https://www.intelligentliving.co/toyotas-solid-state-battery/.

Steinfeldt, M., Gleich, A. von, Petschow, U., Haum, R., Chudoba, T. & Haubold, S. (2004): Nachhaltigkeitseffekte durch Herstellung und Anwendung nanotechnologischer Produkte. – TATuP, 13: 34–41.

Steinfort, T. (2020): Der Effizienzbegriff in der klimapolitischen Debatte zum Strassenverkehr. – URL: https://www.mwv.de/wp-content/uploads/2020/12/201026-Frontier-Studie-deutsch-NEU.pdf [Stand: 10.03.2021].

Stengel, O., van Looy, A. & Wallaschkowski, S. (Hrsg.) (2017): Digitalzeitalter – Digitalgesellschaft. Das Ende des Industriezeitalters und der Beginn einer neuen Epoche. – Wiesbaden.

Stenzel, M. (2021): Tantalbedarf. – Persönliche Mitteilung.

Stiftung ear (o. J.): Kategorien des ElektroG Jedes Elektrogerät,. – https://www.stiftung-ear.de/de/themen/elektrog/herstellerbevollmaechtigte/kategorien. – URL: https://www.stiftung-ear.de/de/themen/elektrog/herstellerbevollmaechtigte/kategorien.

Stone, P., Brooks, R., Brynjolfsson, E., Calo, R., Etzioni, O., Hager, G., Hirschberg, J., Kalyanakrishnan, S., Kamar, E., Kraus, S., Leyton-Brown, K., Parkes, D., Press, W., Saxenian, A., Shah, J., Tambe, M. & Teller, A. (2016): Artificial Intelligence and Life in 2030. One Hundred Year Study on Artificial Intelligence. – Report of the 2015-2016 Study Panel. Stanford, CA. – URL: http://ai100.stanford.edu/2016-report.

Strassburg, F. W. (2019): Nickel Alloys. – In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.

StrategyR (2020): Germanium. Global Markez Trajectory & Analytics. MCP-2637. – URL: https://www.strategyr.com/market-report-germanium-forecasts-global-industry-analysts-inc.asp.

Strazza, C., Del Borghi, A., Costamagna, P., Gallo, M., Brignole, E. & Girdinio, P. (2015): Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of a SOFC system for distributed power generation. – Energy Conversion and Management, 100: 64–77.

Suh, N. P. & Cho, D. H. (2017): The On-line Electric Vehicle. – Cham.

Sun, L. & He, Y. (2014): Research Progress of High Temperature Superconducting Filters in China. – IEEE Trans. Appl. Supercond., 24: 1–8.

Sun, W., Huang, R., Li, H., Hu, Y., Zhang, C., Sun, S., Zhang, L., Ding, X., Li, C., Zartman, R. E. & Ling, M. (2015): Porphyry deposits and oxidized magmas. – Ore Geology Reviews, 65: 97–131.

Sun, X., Hao, H., Zhao, F. & Liu, Z. (2017): Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis. – Resources, Conservation and Recycling, 124: 50–61.

Sweeney, S. J. & Mukherjee, J. (2017): Optoelectronic Devices and Materials. – In: S. Kasap, P. C. (Hrsg.): Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. Perspectives on electronic and photonic materials. Cham.

Tachikawa, K., Kesler, M. & Atasoy, O. (2018): Feasibility Study of Bi-directional Wireless Charging for Vehicle-to-Grid. – In: SAE Technical Paper Series.

Takada, K. (2013): Progress and prospective of solid-state lithium batteries. – Acta Materialia, 61: 759–770.

Takahashi, C. N., Nguyen, B. H., Strauss, K. & Ceze, L. (2019): Demonstration of End-to-End Automation of DNA Data Storage.

Tan, D. H. S., Banerjee, A., Chen, Z. & Meng, Y. S. (2020a): From nanoscale interface characterization to sustainable energy storage using all-solid-state batteries. – Nature nanotechnology, 15: 170–180.

Tan, D. H. S., Xu, P., Yang, H., Kim, M., Nguyen, H., Wu, E. A., Doux, J.-M., Banerjee, A., Meng, Y. S. & Chen, Z. (2020b): Sustainable design of fully recyclable all solid-state batteries. – MRS Energy & Sustainability, 7.

Tan, Y. N., Wen, H. C., Park, C., Gilmer, D. C., Young, C. D., Heh, D., Sivasubramani, P., Huang, J., Majhi, P., Kirsch, P. D., Lee, B. H., Tseng, H. H. & Jammy, R. (2008): Tunnel Oxide Dipole Engineering in TANOS Flash Memory for Fast Programming with Good Retention and Endurance. – In: 2008 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Applications (VLSI-TSA).

TEC Microsystems (2021): Miniature thermoelectric generators. – URL: https://www.tec-microsystems.com/products/thermoelectric-generators/index.html.

Technavio (2019): Global Data Center Market Outlook 2019-2023. – URL: https://www.businesswire.com/news/home/20190823005139/en/Global-Data-Center-Market-Outlook-2019-2023-17 [Stand: 23.3.21].

Technavio (2020): Research Report: Global Rare Earth Metal Market 2020-2024 | Rising Demand For Electronic Appliances to boost the Market Growth | Technavio. – URL: https://finance.yahoo.com/news/research-report-global-rare-earth-233000385.html [Stand: 15.3.21].

TEGnology (2021): Products. – URL: https://www.tegnology.dk/.

Tekin (2021): Photonische Bauelemente und deren materielle Basis für 5G und 6G. – Interviews und schriftliche Kommunikation Dr. Otmar Deubzer mit Dr. Tolga Tekin, Fraunhofer IZM.

TeraWatt Technology (2020): Ultra-high energy density cells that work at scale. – URL: https://terawatt-technology.com.

Tercero Espinoza, L. (2012): Case study: Tantalum in the world economy: History, uses and demand. – [Stand: 25.07.2020].

Terryn, S., Brancart, J., Lefeber, D., van Assche, G. & Vanderborght, B. (2017): Self-healing soft pneumatic robots. – Science robotics, 2.

The AI Blog (2016): Microsoft and University of Washington researchers set record for DNA storage. – URL: https://blogs.microsoft.com/ai/synthetic-dna-storage-milestone/#sm.0000k81a37qr6dijzdl15reujpheo [Stand: 09.12.2020].

The Pew Charitable Trusts (2020): Breaking the Plastic Wave.

The Quantum Daily (2020): TQD Exclusive: A Detailed Review of Qubit Implementations for Quantum Computing. – URL: https://thequantumdaily.com/2020/05/21/tqd-exclusive-a-detailed-review-of-qubit-implementations-for-quantum-computing/ [Stand: 31.08.2020].

Thellaputta, G. R., Chandra, P. S. & Rao, C. (2017): Machinability of Nickel Based Superalloys: A Review. – Materials Today: Proceedings, 4: 3712–3721.

Thielmann, A., Neef, C., Fenske, C. & Wietschel, M. (2018): Energiespeicher-Monitoring 2018. – Leitmarkt- und Leitanbieterstudie: Lithium-Ionen-Batterien für die Elektromobilität. Karlsruhe.

Thielmann, A., Neef, C. & Hettesheimer, T. (2019): All solid state batteries – What is the benchmark for a future commercialization? (2019).

Thielmann, A., Neef, C., Hettesheimer, T., Döscher, H., Wietschel, Prof Dr Martin & Tübke, Prof Dr Jens (2017): Energiespeicher-Roadmap. – Update 2017. Karlsruhe.

Thielmann, A., Sauer, A. & Wietschel, M. (2015): Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. – Karlsruhe.

Thormann, B. & Kienberger, T. (2020): Evaluation of Grid Capacities for Integrating Future E-Mobility and Heat Pumps into Low-Voltage Grids. – Energies, 13: 5083.

Thyssen-Krupp (2004): Großauftrag für Titanrohre zur Meerwasserentsalzung. – URL: https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/gro-auftrag-fuer-titanrohre-zur-meerwasserentsalzung-2446.html [Stand: 20.10.2020].

TIC (2020a): Applications for tantalum. – [Stand: 17.12.2020].

TIC (2020b): The T.I.C. annual statistics presentation and data. – URL: https://www.tanb.org/images/T_I_C__Bulletin_no_180_(January%202020).pdf [Stand: 04.01.2020].

TIC (2020c): Tantalum: a market overview by DERA. – URL: https://www.tanb.org/images/T_I_C__Bulletin_no_181_(April%202020).pdf [Stand: 04.01.2021].

Titanium Asia (2018): Titanium Asia 2018. – Executive Summary.

Titanium USA (2018): Titanium USA 2018. – Executive Summary.

TNT Limited (o. J.): About Vanadium. – basierend auf Daten von Vantitec. – URL: https://www.tmtlimited.com.au/about-vanadium.

Truebb, L. F. & Rüetschi, P. (1998): Batterien und Akkumulatoren. – Mobile Energiequellen für heute und morgen.

TWI2050 (2018): Transformations to Achieve the Sustainable Development Goals. The World in 2050. – Laxenburg, Austria. – URL: http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15347/1/TWI2050_Report081118-web-new.pdf [Stand: 22.05.2021].

Ugweje, O. (2004): The Internet Encyclopedia. Radio Frequency and Wireless Communications Security.

Ultrium LTO (2015): LTO-7: Questions & Answers. – URL: https://www.lto.org/2015/10/lto-7-specifications-questions-answers/ [Stand: 01.11.2020].

Ultrium LTO (2020): Roadmap | Ultrium LTO. – URL: https://www.lto.org/roadmap/ [Stand: 12.02.2021].

United Nations (2015): Übereinkommen von Paris. – URL: https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en [Stand: 24.3.21].

United Nations (2019): World Population Prospects 2019.

Universität Hamburg (2012): Pyrolyse Gruppe. – URL: http://www.chemie.uni-hamburg.de/tmc/kaminsky/html/pyrolyse-gruppe.html [Stand: 04.02.2020].

Urlings, H. (2019): EMEA Page Industry Trends – News Analysis – Market Intelligence and Opportunities Satellite IoT: A Game Changer for the Industry? How New Space and Old Space are Moving Into the New IoT Era. – URL: http://satellitemarkets.com/satellite-iot-game-changer-industry.

USENIX Association (2016): FAST '16. 14th USENIX Conference on File and Storage Technologies. Berkeley, CA.

USENIX Association (2020): FAST 20. 18th USENIX Conference on File and Storage Technologies. Santa Clara, CA.

USGS (2011a): Gallium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 28.07.2020].

USGS (2011b): Graphite (natural). – Mineral Commodity Summaries [Stand: 24.02.2021].

USGS (2011c): Lithium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 29.07.2020].

USGS (2011d): Platinum-group metals. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 29.07.2020].

USGS (2011e): Rhenium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 29.07.2020].

USGS (2011f): Vanadium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 31.07.2020].

USGS (2012): Titanium mineral concentrates. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 31.07.2020].

USGS (2014a): Gallium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 28.07.2020].

USGS (2014b): Graphite (natural). – Mineral Commodity Summaries [Stand: 24.02.2021].

USGS (2014c): Lithium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 29.07.2020].

USGS (2014d): Platinum-group metals. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 29.07.2020].

USGS (2014e): Rhenium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 29.07.2020].

USGS (2014f): Vanadium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 31.07.2020].

USGS (2015): Titanium Mineral Concentrates. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 31.07.2020].

USGS (2016): Rare Earths. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 23.07.2020].

USGS (2017a): Tantalum [Advance Release]. – Minerals Yearbook [Stand: 25.07.2020].

USGS (2017b): Germanium [Advance Release]. – Minerals Yearbook Minerals Yearbook [Stand: 28.07.2020].

USGS (2017c): Indium [Advance Release]. – Minerals Yearbook [Stand: 28.07.2020].

USGS (2017d): Rare Earths. – Minerals Yearbook [Stand: 23.07.2020].

USGS (2017e): Rhenium [Advance Release]. – Minerals Yearbook [Stand: 29.07.2020].

USGS (2017f): Vanadium [Advance Release]. – [Stand: 27.07.2020].

USGS (2019a): Gallium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 28.07.2020].

USGS (2019b): Graphite (natural. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 24.02.2021].

USGS (2020a): Cobalt. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 14.07.2020].

USGS (2020b): Copper. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 14.07.2020].

USGS (2020c): Gallium. – Mineral Commodity Summaries. – URL: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-gallium.pdf [Stand: 14.07.2020].

USGS (2020d): Germanium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 14.07.2020].

USGS (2020e): Indium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 14.07.2020].

USGS (2020f): Lithium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 14.07.2020].

USGS (2020g): Platinum Group Metals. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 14.07.2020].

USGS (2020h): Rare Earths. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 22.07.2020].

USGS (2020i): Rhenium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 29.07.2020].

USGS (2020j): Rhenium Statistics and Information. – URL: https://www.usgs.gov/centers/nmic/rhenium-statistics-and-information.

USGS (2020k): Scandium. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 20.07.2020].

USGS (2020l): Tantalum. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 25.07.2020].

USGS (2020m): Titanium and Titanium Dioxide. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 26.07.2020].

USGS (2020n): Titanium Mineral Concentrates. – Mineral Commodity Summaries [Stand: 26.07.2020].

USGS (2020o): Vanadium. – Mineral Commodity Summaries. [Stand: 26.07.2020].

USGS (2021a): Germanium. – URL: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-germanium.pdf [Stand: 23.02.2021].

USGS (2021b): Rare Earths. – URL: https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-rare-earths.pdf [Stand: 15.3.21].

van Gosen, B. S., Verplanck, P. L., Seal, R. R., II, Long, K. R. & Gambogi, J. (2017): Rare-Earth Elements. – Chapter O of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply [Stand: 22.07.2020].

van Vuuren, D. P., Stehfest, E., David E.H.J. Gernaat, Jonathan C. Doelman, Maarten van den Berg, Mathijs Harmsen, Harmen Sytze de Boer, Lex F. Bouwman, Vassilis Daioglou, Oreane Y. Edelenbosch, Bastien Girod, Tom Kram, Luis Lassaletta, Paul L. Lucas, Hans van Meijl, Christoph Müller, Bas J. van Ruijven, Sietske van der Sluis & Andrzej Tabeau (2017): Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. – Global Environmental Change, 42: 237–250.

van Winkle, W. (2019): The death of disk? HDDs still have an important role to play. – URL: https://venturebeat.com/2019/09/02/the-death-of-disk-hdds-still-have-an-important-role-to-play/ [Stand: 08.12.2020].

Vatopoulos, K. & Tzimas, E. (2012): Assessment of CO_2 capture technologies in cement manufacturing process. – Journal of Cleaner Production, 32: 251–261.

VCI (2018): VCI-Position zu Kreisläufen für Kohlenstoff. Zirkuläre Wirtschaft: Kohlenstoff. – URL: https://www.vci.de/themen/energie-klima-rohstoffe/rohstoffe/vci-position-kreislaeufe-fuer-kohlenstoff.jsp [Stand: 05.02.2020].

VDI (2014): Additive Fertigungsverfahren – Grundlagen, Begriffe, Verfahrensbeschreibungen. – 3405. – URL: https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3405-additive-fertigungsverfahren-grundlagen-begriffe-verfahrensbeschreibungen.

VDI ZRE (2014): Ressourceneffizienz von Windenergieanlagen. – VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 9.

VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences (2013): Bionik; Bionische Roboter. – URL: https://term.vdi-online.de/index.php/definition/updateDefinition/519/15286/show [Stand: 22.10.2020].

Velázquez-Martínez, Valio, Santasalo-Aarnio, Reuter & Serna-Guerrero (2019): A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective. – Batteries, 5: 68.

Velodyne (2020): High Definitian Lidar HDL-64E. – URL: http://hypertech.co.il/wp-content/uploads/2015/12/HDL-64E-Data-Sheet.pdf [Stand: 09.12.2020].

Verhoefa, L. A., Budde, B. W., Chockalingam, C., Nodar, B. G. & van Wijk, A. J. (2018): The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. – Energy Policy: 349–360.

VGB (2011): Pre-Engineering Study “NRW Power Plant 700 °C”. – URL: https://www.vgb.org/en/research_project297.html [Stand: 23.02.2021].

Viaud, A. (2019): Dominating the data center – the rise of SSD technology. – URL: https://www.

datacenterdynamics.com/en/opinions/dominating-data-center-rise-ssd-technology/ [Stand: 09.12.2020].

Viebahn, P., Arnold, K., Friege, J., Krüger, C., Nebel, A., Ritthoff, M., Samadi, S., Soukup, O., Teubler, J. & Wiesen, K. (2014): KRESSE – Kritische mineralische Ressourcen und Stoffstroeme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht. – URL: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5419/file/5419_KRESSE.pdf.

Viebahn, P., Scholz, A. & Zelt, O. (2019): The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program—Results of a Multi-Dimensional Analysis. – Energies, 12: 3443.

Villanueva, J. C. (2009): How Many Atoms Are There in the Universe? – URL: https://www.universetoday.com/36302/atoms-in-the-universe/ [Stand: 31.08.2020].

Vollmers, F. (2008): „Tailored Blanks“ senken Autogewicht um 20 Prozent. – URL: https://www.handelsblatt.com/unternehmen/mittelstand/massgeschneiderter-stahl-tailored-blanks-senken-autogewicht-um-20-prozent/2937592.html?ticket=ST-13416288-IULM7rnNJK7aaHinpSkD-ap5 [Stand: 07.09.2020].

volterion (2020): Technical Specifications. – URL: file:///C:/Users/rol/Downloads/VOLT_powerRFB_Productsheet.pdf [Stand: 09.07.2020].

VoltStorage GmbH: Voltstorage Smart. Weiterführende Informationen. – URL: https://voltstorage.com/wp-content/uploads/2020/06/VoltStorage-SMART-Weiterführende-Produktinformationen.pdf [Stand: 08.07.2020].

Von Ardenne GmbH (2020): Einblicke in die Praxis der Herstellung von Dünnschichtphotovoltaik: Persönliche Mitteilung.

Wagner, M. (2020): Tailored Blanks: Persönliche Mitteilung.

Wagner, M., Jahn, A., Brenner, B. & Beyer, E. (2014): Innovative joining technologies for multi-material lightweight car body structures. – URL: https://www.iws.fraunhofer.de/content/dam/iws/en/documents/projects/joining/component_design/Paper_IABC2014_Fraunhofer_IWS_Dresden.pdf [Stand: 24.06.2020].

Wagner, R. S. (1958): Production of Dislocations in Germanium by Thermal Shock. – Journal of Applied Physics, 29: 1679–1682.

Wambsganss, P. & Parspour, N. (2010): Kontaktlose Energieübertragung: Stromversorgung aus dem HF-Feld. – URL: https://www.elektroniknet.de/elektronik/power/stromversorgung-aus-dem-hf-feld-1644.html [Stand: 14.07.2020].

Wang, J., Guo, M., Liu, M. & Wei, X. (2020): Long-term outlook for global rare earth production. – Resources Policy, 65: 101569.

Wang, Y., Yang, L., Shi, X.-L., Shi, X., Chen, L., Dargusch, M. S., Zou, J. & Chen, Z.-G. (2019): Flexible Thermoelectric Materials and Generators: Challenges and Innovations. – Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 31: e1807916.

WBGU (2019): Unsere gemeinsame digitale Zukunft.

Weidner, E., Ortiz Cebolla, R. & Davies, J. (2019): Global deployment of large capacity stationary fuel cells. Drivers of, and barriers to, stationary fuel cell deployment. – Luxembourg.

Weltenergierat – Deutschland e. V. & Frontier Economics (2018): International aspects of a Power-to-X roadmap. – A report prepared for the World Energy Council Germany.

Werwitzke, C. (2019): ElectReon: Renault Zoe lädt induktiv während der Fahrt. – URL: https://www.electrive.net/2019/09/23/electreon-renault-zoe-laedt-induktiv-waehrend-der-fahrt/ [Stand: 14.07.2020].

Wesseler, B. (2020): Ultrium9-Kassetten speichern 18 Terabyte. – URL: https://www.it-zoom.de/dv-dialog/e/ultrium9-kassetten-speichern-18-terabyte-26601/ [Stand: 12.02.2021].

Wetzel, M. (2016): Materialbilanzen und Auswirkungen von Materialverfügbarkeit auf europäische Energieszenarien unter Berücksichtigung von Importen regelbaren Solarstroms. – Masterthesis. Universität Stuttgart. – URL: https://elib.

dlr.de/110449/1/Wetzel_Materialbilanzen_Materialverf%C3%BCgbarkeit.pdf [Stand: 09.06.2020].

Wietelmann, U. & Steinbild, M. (2013): Lithium and Lithium Compounds. – Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry [Stand: 14.07.2020].

Wietschel, M. (2020): Stellungnahme zum Policy Brief Elektromobilität und Klimaschutz: Die große Fehlkalkulatio. – URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2020/Stellungnahme_IfW-Langfassung.pdf [Stand: 06.05.2021].

Wietschel, M., Arens, M., Dötsch, C. & Herkel, S. (2010): Energietechnologien 2050 – Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung. – Technologienbericht. Stuttgart.

Wietschel, M., Ullrich, S., Markewitz, P., Schulte, F. & Genoese, F. (Hrsg.) (2015): Energietechnologien der Zukunft. – Wiesbaden.

Wilts, H., Lucas, R., Gries, N. von & Zirngiebl, M. (2014): Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. – URL: https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/SuM-Recycling-in-Deutschland-Wuppertal-Institut-Januar-2015.pdf [Stand: 13.08.2015].

Winkel, P., Borisov, K., Grünhaupt, L., Rieger, D., Spiecker, M., Valenti, F., Ustinov, A. V., Wernsdorfer, W. & Pop, I. M. (2020): Implementation of a Transmon Qubit Using Superconducting Granular Aluminum. – Phys. Rev. X, 10: 4.

WiTricity (2018): The Next Wireless Revolution: Electric Vehicle Wireless Charging. Power and Efficiency.

Wittenauer, R., Smith, L. & Aden, K. (2013): Background Paper 6.12. Osteoarthritis. – URL: http://www.who.int/medicines/areas/priority_medicines/BP6_12Osteo.pdf.

Woidasky, J. & Jeanvré, S. (2015): Flugzeuge in der Kreislaufwirtschaft. – Wasser und Abfall, 2015: 36–40.

Woidasky, J., Klinke, C. & Jeanvré, S. (2017): Materials Stock of the Civilian Aircraft Fleet. – Recycling, 2: 21.

Wolf, J., Brüning, R., Nellesen, L. & Schiemann, J. (2017): Anforderungen an die Behandlung spezifischer Elektroaltgeräte unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten.

Woodhouse, M. & Goodrich, A. (2013): A Manufacturing Cost Analysis Relevant to Single-and Dual-Junction Photovoltaic Cells Fabricated with III-Vs and III-Vs Grown on Czochralski Silicon. – (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory).

Woodruff, L. & Bedinger, G. (2013): Titanium – Light, Strong, and White. – [Stand: 26.07.2020].

Woodruff, L. G., Bedinger, G. M. & Piatak, N. M. (2017): Titanium. Chapter T of Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply. – [Stand: 26.07.2020].

World Bank: Access to electricity. – URL: https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS [Stand: 22.01.2021].

World Bank (2013): Sustainable Energy for All. – URL: https://www.worldbank.org/en/topic/energy/brief/sustainable-energy-for-all [Stand: 24.02.2021].

World Bank (2014): Electric power consumption (kWh per capita). – URL: https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC [Stand: 22.01.2021].

World Economic Forum (2018): Harnessing Artificial Intelligence for the Earth.

Wu, F., Maier, J. & Yu, Y. (2020): Guidelines and trends for next-generation rechargeable lithium and lithium-ion batteries. – Chemical Society reviews, 49: 1569–1614.

Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI & IZES (Hrsg.) (2017): Technologien für die Energiewende. – Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken.

Wydra, S. & Schwarz, A. (2021): Synthetic fuels. – URL: https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-02/PtGL%20Synthetic%20fuels.pdf [Stand: 14.03.2021].

Xu, E. (2020): The future of transportation: White Paper on Urban Air Mobility Systems.

Yang, B., Murali, A., Nirmalchandar, A., Jayathilake, B., Prakash, G. K. S. & Narayanan, S. R. (2020): A Durable, Inexpensive and Scalable Redox Flow Battery Based on Iron Sulfate and Anthraquinone Disulfonic Acid. – J. Electrochem. Soc., 167: 60520.

Ying, P., He, R., Mao, J., Zhang, Q., Reith, H., Sui, J., Ren, Z., Nielsch, K. & Schierning, G. (2021): Towards tellurium-free thermoelectric modules for power generation from low-grade heat. – Nature communications, 12: 1121.

Yole développement (2019a): InP Wafer and Epiwafer Market Version 2019 – Photonics and RF Applications.

Yole développement (2019b): Power GaN2019: Epitaxy, Devices, Applications & Technology Trends. – Market and Technology Report 2019.

Yole développement (2020a): 5G's impact on RF front-end and connectivity for cellphones.

Yole développement (2020b): GaAs Wafer and Epiwafer Market Version 2020 RF, Photonics, LED, Display and PV Applications. – Market and Technology Report 2020.

Yole développement (2020c): Optical transceivers for datacom and telecom. – Market and technology report.

Yole développement (2020d): Quantum Technologies. – Market and technology report.

Yusuf, S. M., Cutler, S. & Gao, N. (2019): Review: The Impact of Metal Additive Manufacturing on the Aerospace Industry. – Metals, 9.

Zednicek, T. (2006): Trends in Tantalum and Niobium Capacitors. – URL: https://www.researchgate.net/publication/228895537_Trends_in_Tantalum_and_Niobium_Capacitors.

Zednicek, T. (2019): Tantalum and niobium global trade statistics. Tantalum capacitors: current trends and potential future.

Zendehdel, M., Yaghoobi Nia, N. & Yaghoubinia, M. (2020): Emerging Thin Film Solar Panels. – In: Gok, A. (Hrsg.): Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules.

Zhang, H., Li, X., Fang, Z., Yao, R., Zhang, X., Deng, Y., Lu, X., Tao, H., Ning, H. & Peng, J. (2018): Highly Conductive and Transparent AZO Films Fabricated by PLD as Source/Drain Electrodes for TFTs. – Materials (Basel, Switzerland), 11.

Zhang, J., Lenser, C., Menzler, N. H. & Guillon, O. (2020): Comparison of solid oxide fuel cell (SOFC) electrolyte materials for operation at 500 °C. – Solid State Ionics, 344: 115138.

Zhang, Y. & Park, N.-G. (2020): A thin film (< 200 nm) perovskite solar cell with 18% efficiency. – J. Mater. Chem. A, 8: 17420–17428.

Zhao, T. (2018): Sustainable Developement Strategy for EV Battery.

Zhou, H. & Lee, T.-W. (2020): From Foldable Phones to Stretchy Screens. – URL: https://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/portable-devices/from-foldable-phones-to-stretchy-screens [Stand: 07.01.2021].

Zientek, M. L., Loferski, P. J., Parks, H. L., Schulte, R. F. & Seal, R. R., II (2017): Platinum-Group Elements. – Chapter N of Critical Mineral Resources of the United States—Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply [Stand: 14.07.2020].

Zogbi, D. (2013): A Passion for Tantalum. – URL: https://www.ttii.com/content/ttii/en/marketeye/articles/categories/passives/me-zogbi-20130911.html [Stand: 15.01.2021].

Zubi, G., Dufo-López, R., Carvalho, M. & Pasaoglu, G. (2018): The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89: 292–308.

Zuser, A. & Rechberger, H. (2011): Considerations of resource availability in technology development strategies: The case study of photovoltaics. – Resources, Conservation and Recycling, 56: 56–65.

ZVEI (2003): Umbrella Specification. Passive Components: Ceramic Capacitors. – URL: http://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Fachverbaende/Electronic_Components/Umbrella_Specs/Passive_Components/Ceramic_Capacitors/USpecs_MLCC_DR_Ver02.pdf [Stand: 06.10.2008].

ZVEI (2019): Technologie-Roadmap„Next Generation“. Elektronische Komponenten und Systeme. – URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2019/November/ZVEI_Technologie-Roadmap_Next_Generation/ZVEI_Technologie-Roadmap_Next_Generation.pdf.

7 Abkürzungen und Glossar

3D	Dreidimensional
A	
ABS	Anti-Blockiersystem für Kraftfahrzeuge
ACC	Adaptive Cruise Control
ACP	Adhesive Conductive Paste
AG	Asynchrongenerator
Ah	Amperestunden
AIM	Association for Automatic Identification and Mobility
Al	Aluminium
AM	Asynchronmotor
As	Arsen
a-Si	amorphes Silizium
ASR	Antischlupfregelung
ATO	Antimony-Tin-Oxide
B	
B	Bor
Ba	Barium
Barrel	Volumeneinheit (1 Barrel = 159 l)
BEV	Battery-Electric-Vehicle (rein elektrisches Fahrzeug mit Batterie)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Bi	Bismut (Wismut)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
bpd	barrels per day
BSCCO	Bismut-Strontium-Calzium-Kupfer-Oxide
BSP	Bruttosozialprodukt
BST	Barium Strontium Titanit
BtL	Biomass to liquid
C	
C	Kohlenstoff
C_2H_5OH	Ethanol
Ca	Calcium
CA	Kanada
CAD	Computer Aided Design
CAGR	Compound Annual Growth Rate, durchschnittliche jährliche Wachstumsrate
CCS	Carbon capture and storage
Cd	Kadmium
CDA	Copper Development Association
CdTe	Kadmiumtellurid
Ce	Cer
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid
Cl	Chlor
CLC	Chemical-Looping-Combustion
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor, Halbleiterbauelement
CNT	Carbon Nanotubes
Co	Kobalt
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
CRT	Röhrenfernseher (Cathode Ray Tube)
Cs	Caesium
CSP	Concentrating solar power
CtL	Coal to liquid
Cu	Kupfer
CVD	Chemische Gasabscheidung (Chemical Vapor Deposition)
D	
DC	Gleichstrom (Direct Current)
DD	Direct Drive
DED	Direct Energy Deposition (direkte Abscheidung durch Energieübertragung)
DeNOx	Reduktion von Stickstoffoxiden zu Stickstoff in Abgasen („Entstickung“)
DLAR	Double Layer Anti Reflection
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DNA	Desoxyribonukleinsäure

DR Kongo	Demokratische Republik Kongo
DSK	Doppelschichtkondensator
dt	Differenzial der Zeit
Dy	Dysprosium
E	
ED	Elektrodialyse
EDLC	Electrochemical Double Layer Capacitor
EE	Elektrische und elektronische (Produkte)
EG	Electronic Grade (Silizium)
EnEV	Energie Einsparverordnung
EoL-RR	End of Life Recycling Rate
EOR	Enhanced Oil Recovery
E-Pkw	(teil-)elektrisch angetriebener Personenkraftfahrzeuge
Er	Erbium
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm für Kraftfahrzeuge
ETF	Exchange-traded fund (London)
Ethanol	C_2H_5OH
EU	Europäische Union
eV	Elektronenvolt (Energieeinheit. 10^{19} eV = 1,6 Joule)
EV	Elektrofahrzeug
EVA	Ethylen-Vinyl-Acetat
F	
F	Fluor
F	Faraday (Einheit der Kapazität von elektrischen Kondensatoren)
FCEV	Fuel-Cell-Electric-Vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
Fe	Eisen
FED	Field Emitter Display
FHG IZM	Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration
FIR	Ferninfrarot
ft	foot (1 ft = 30,48 cm)
FT	Fischer-Tropsch (Prozess zur Kraftstoffsynthese)
FTTB	Fibre to the Building
FTTH	Fibre to the Home
FTTP	Fibre to the Premises
FuE	Forschung und Entwicklung
FSZ	Farbstoffsolarzellen
G	
g	Gramm
Ga	Gallium
GE	General Electric Company
Ge	Germanium
Gd	Gadolinium
Gew.-%	Gewichtsprozent
GfK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GIPV	gebäudeintegrierte Photovoltaik
GLR	Das gewichtete Länderrisiko der Förderung (GLR) errechnet sich als Summe der Anteilswerte der Länder an der Bergwerksproduktion multipliziert mit dem Länderrisiko (LR). Das gewichtete Länderrisiko bewegt sich in der Regel in einem Intervall zwischen +1,5 und –1,5. Bei Werten über 0,5 wird das Risiko als niedrig eingestuft (grün makiert), zwischen +0,5 und –0,5 liegt ein mäßiges Risiko vor (gelb) und Werte unter –0,5 gelten als kritisch (rot markiert).
GoI	Germanium on Insulator
GPS	Global Positioning System (Navigationssatellitensystem des US Militärs)
GtL	Gas to liquid
GUS	Gemeinschaft unabhängiger Staaten (Nachfolgestaaten der Sowjetunion)
GWp	Gigawatt peak power (Leistungsangabe bei Solarzellen)
H	
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser(dampf)
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HDL	High definition laser
HEV	Hybrid-Electric-vehicle (elektrisches Hybrid-Fahrzeug)
HF	Hochfrequenz
Hg	Quecksilber

HHI	Herfindahl-Hirschman-Index. Der HHI ist eine Kennzahl, die die Konzentration in einem Markt angibt. Der Index nimmt Werte zwischen 0 und 10.000 an. Bei einem HHI unter 1.500 gilt ein Markt als niedrig konzentriert (grün markiert), zwischen 1.500 und 2.500 Punkten als mäßig (gelb) und über 2.500 als hoch konzentriert (rot gekennzeichnet).
HPDL	dioden-gepumte Hochleistungs-Laser
HPMSR	Hybrid aus permanenterregtem und reluktanzgetriebenen Motor
Hz	Hertz (Frequenzeinheit)
I	
IC	Integrierter Schaltkreis (Integrated Circuit)
ICE	Internal Combustion Engine
IEA	Internationale Energieagentur (International Energy Agency)
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle
IGFC	Integrated Gasification Fuel Cell Cycle
IKT	Informations- und Kommunikations-technik
In	Indium
InGaAs	Indium-Gallium-Arsenid-Halbleiter
IP	Internet Protocol
IPM	Inset-mounted Permanent Magnets (einsatzmontierte PM)
IPTV	Internet Protocol Television
IR	Infrarotstrahlung (Wellenlänge über 800 nm)
ISI	Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnologie
ITO	Indium-Zinn-Oxid (Indium Tin Oxide)
K	
K	Kelvin
k. A.	keine Angaben
KfZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
km	Kilometer
kt	Kilotonnen (1000 t)
ksi	kilo-pound per square inch (1000 psi)
L	
La	Lanthan
LAN	Local Area Network
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Latenz-zeit	„Ping“, Laufzeit eines Datenpaketes vom Client (z. B. Smartphonenutzer) zum Zielserver (z. B. einer Webseite) und zurück
lb	pound. Gewichtseinheit. 1 lb = 0,454 kg
LCD	Liquid-Crystal-Display
LED	Leuchtdiode (Light Emitting Diode)
Li	Lithium
LiCAF	$LiCaAlF_6$
LiDAR	Light detection and ranging
LiLuF	$LiLuF_4$
LiSAF	$LiSrAlF_6$
LiSGAF	$LiSrGaF_6$
Li-Ionen	Lithium-Ionen (wiederaufladbares Batteriesystem)
Lkw	Lastkraftwagen
LME	London Metal Exchange
LNA	Low Noise Amplifier, rauscharmer Verstärker
LR	Das Länderriskio (LR) wird über die Indikatoren der Weltbank zur Regierungsführung (Worldwide Governance Indicators, WGI) bewertet
M	
MBCCO	Quecksilber-Barium-Calcium-Kupfer-Oxide
MED	Multi-Effekt-Destillation
MEMS	Mikroelektromechanischen Systeme
Mg	Magnesium
m(MIMO)	(massive) input massive output, Mehrfachantennensysteme
Mio.	Millionen
MIV	Motorisierter Individualverkehr

MLCC	Multi Layer Ceramic Capacitor
MMIC	Monolithic Microwave Integrated Circuit
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
Mono-coque	Selbsttragende Fahrzeugkarosserie
Mrd.	Milliarden
MSF	multi-stage-flash (Blitzverdampfung)
MW	Megawatt (1 Mio. Watt)
µm	Mikrometer (10^{-6} Meter)
N	
N	Newton (Krafteinheit, 1 N = 1 kg m/s^2)
N	Stickstoff
n. a.	not available
Nb	Niob
Nd	Neodym
Nd:YAG Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzeugzyklus
NFC	Near field communication
NGCC	Natural gas combined cycle
Ni	Nickel
Ni-Cd	Nickel-Kadmium (wiederaufladbares Batteriesystem)
Ni-MH	Nickel-Metallhydrid (wiederaufladbares Batteriesystem)
NIR	Nahinfrarot
nm	Nanometer (1 nm = 10^{-9} m)
Nm	Newtonmeter (Einheit des Drehmoments)
n. v.	nicht verfügbar
O	
O	Sauerstoff
OCR	Optical Character Recognition
OCT	Optische Kohärenz-Tomographie
OECD	Organisation for economic cooperation and development
OICA	International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, Paris
OLED	Organic Light-Emitting Diode
Os	Osmium
P	
P	Phosphor
Pa	Pascal (1 Pa = 1 N/m^2)
PAN	Polyacrylnitril
Pb	Blei
PBB	Polybromierte Biphenyle
PBDE	Polybromierte Dyphenylether
PBF	Powder Bed Fusion (Verschmelzung im Pulverbett)
PCB	Polychlorierte Byphenyle
PC	Polycarbonat
Pd	Palladium
PDP	Plasma Display Panel
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PEM	Polymerelektrolytmembran
PET	Polyethylenterephthalat
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PHEV	Plug-In-Hybrid-Vehicle (netzladefähiges elektrisches Hybrid-Fahrzeug)
pin	positive intrinsic negative diode
PJ	Petajoule (10^{15} Joule)
Pkw	Personkraftwagen
PLA	Polylactic acid (Polymilchsäure)
plc	public limited company
Pm	Promethium (radioaktives Element)
PM	Permanentmagnet
PP	Polypropylen
Pr	Praseodym
PS	Polystyrol
psi	pounds per square inch (1 psi = 6.894,76 N/mm^2)
Pt	Platin
PV	Photovoltaik
PVC	Polyvinylchlorid
PVD	Physical Vapour Deposition (Beschichtungsverfahren)

R	
Radar	Radio detection and ranging
Re	Rhenium
REM	Seltene Erdenmetalle
REEV	Range-Extended-Electric-Vehicle (Reichenweitenverlängertes Elektrofahrzeug)
RFID	Radio Frequency Identification
Rh	Rhodium
RO	Reverse osmosis (Umkehrosmose)
RoHS	Restriction of the use of certain Hazardous Substances (Richtlinie 2002/95/EG)
ROW	Rest Of the World
RTD&E	Research, Development, Test & Evaluation
Ru	Ruthenium

S	
S	Schwefel
Sb	Antimon
Sc	Scandium
SCR	Selective Catalytic Reduction (Reduktion von Stickstoffoxiden)
ScSZ	Scandiumdotiertes Zirkoniumdioxid
Se	Selen
SEO	Seltenerdmetalloxide
SED	Surface Conduction Electron Emitter Display
SG	Synchrongenerator
Si	Silizium
SiGe	Silizium-Germanium-Halbleiter
Sm	Samarium
SM	Synchronmotor
SMD	Surface Mounted Device (elektronische Aufsteckbauteile)
Sn	Zinn
SOFC	Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxid Fuel Cell)
SPECT	Single Photon Emission Computed Tomography
SPM	Surface-mounted Permanent Magnets (oberflächenmontierte PM)
Sr	Strontium
SR	Switched Reluctance
STC	Siliziumtetrachlorid
SWOT	Strength, Weakness, Opportunities and Threats

T	
T	Tesla (Einheit der magnetischen Feldstärke)
t	Tonnen
t Inh.	Tonnen des jeweilis genannten Elements/Metalls
t/a	Tonnen pro Jahr
Ta	Tantal
tag	Smart Label, Smart Ticket, Smart Card (RFID Transponder)
Tailored Blanks	Karosserieblech, das aus verschiedenen Blechstärken unterschiedlicher Stahlgüte verschweißt ist
Tb	Terbium
TBCCO	Thallium-Barium-Calzium-Kupfer-Oxide
TCO	Transparent Conducting Oxide
Te	Tellur
TEG	Thermoelektrische Generatoren
Ti	Titan
TIC	Tantalum-Niobium International Study Center
TJ	Terajoule (10^{12} Joule)
Tm	Thulium

U	
UBA	Umweltbundesamt
UBSW	University of New South Wales, Sydney, Australia
UHF	Ultrahochfrequenz
UHMWPE	Ultra High Molecular Weight PolyEthylene (ultrahochmolekulares Polyethylen)
U/min	Umdrehungen pro Minute (60 U/min = 1 Hz)
Ultra-schall	Schall mit Frequenz oberhalb 16 kHz
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USD	US Dollar

US	United States of America (Länderkürzel)
USGS	United States Geological Survey
UV	Ultraviolet
V	
V	Vanadium
VAE	Vereinigte Arabische Emirate
VCI	Verband der Chemischen Industrie e. V.
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
V-RFB	Vanadium Redox Flow Batterien
W	
W	Wolfram
WEEE	Waste Electric and Electronic Equipment (EU Richtlinie 2002/96/EC)
WiFi	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
WKA	Windkraftanlage
WLAN	Wireless Local Area Network
WLED	Weiße Leuchtdioden (White Light Emitting Diode)
X	
XtL	Sammelbegriff für GtL, CtL, und BtL Verfahren
Y	
Y	Yttrium
YAG	$Y_3Al_5O_{12}$ (Yttrium-Aluminium-Granat)
Yb	Ytterbium
YBCO	Yttrium-Barium-Kupfer-Oxide
YGO	Yttrium-Gadolinium-Oxid
YLF	$YLiF_4$
YSZ	Yttriumdotiertes Zirkoniumdioxid
Z	
Zn	Zink
Zr	Zirkonium
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V.

Deutsche Rohstoffagentur
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Wilhelmstraße 25 – 30
13593 Berlin
Tel.: +49 30 36993 226
dera@bgr.de
www.deutsche-rohstoffagentur.de

ISBN: 978-3-948532-46-8 (Druckversion)
ISBN: 978-3-948532-47-5 (PDF)
ISSN: 2193-5319