

TEXTE

07/2024

Promotionscluster ,Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz‘

Abschlussbericht

TEXTE 07/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3717 31 106 0

FB000847

Promotionscluster ‚Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz‘

Abschlussbericht

von

Dustin Jessen

Folkwang Universität der Künste

und

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

Charlotte Joachimsthaler

Lehrstuhl für Ressourcen- und Energiesysteme (RES),

Technische Universität Dortmund

Thomas Kippes

Wissenschaftszentrum Umwelt, Universität Augsburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Ressourcen- und Energiesysteme
August-Schmidt-Straße 10
44227 Dortmund

Folkwang Universität der Künste
Klemensborn 39
45239 Essen

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
Döppersberg 19
42103 Wuppertal

Universität Augsburg, Wissenschaftszentrum Umwelt
Universitätsstr. 1a
86159 Augsburg

Abschlussdatum:

Dezember 2021

Redaktion:

Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,
Ressourcenschonung
Philip Nuss

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: ‚Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz‘

Im Rahmen des Promotionscluster „Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz“, welches an die Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (UBA) angegliedert ist, wurden drei Promotionsvorhaben mit Mitteln des Ressortforschungsplans des Bundesumweltministeriums (BMUV) gefördert und durchgeführt: Das Promotionsvorhaben I beschäftigt sich mit dem Thema „Die Gestalt der Nachhaltigkeit“ und wurde an der Folkwang Universität in Essen von Herrn Dustin Jessen bearbeitet. Mit dem Promotionsvorhaben II zum Thema „Ressourcenleichter Aufbau der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)-Infrastruktur“ befasste sich von 01.07.2018 bis zum 31.08.2019 Herr Florian Fiesinger an der Technischen Universität (TU) Clausthal. Dieses Vorhaben wurde von Frau Charlotte Joachimsthaler an der Technischen Universität (TU) Dortmund fortgeführt und auf den thematischen Schwerpunkt „Ressourcenbedarf der Energiewende“ fokussiert. Das Promotionsvorhaben III wurde von Herrn Thomas Kippes an der Universität Augsburg bearbeitet und trägt den Titel „Dissipation von Funktionsmaterialien“. Dieser Forschungsbericht fasst die zentralen Ergebnisse der drei Promotionsvorhaben zusammen. Eine Übersicht der drei Projekte sowie Verlinkungen zu bereits erfolgten Veröffentlichungen sind zu Beginn des Berichts kurz dargestellt.

Abstract: ‚Nexus: Sustainable Resource Use and Climate Protection‘

Within the Doctoral Cluster “Nexus: Sustainable Resource Use and Climate Protection” (German: Promotionscluster „Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz“) three doctoral students were funded by research grants of the departmental research plan (“Ressortforschungsplan”) of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection (BMUV). The doctoral cluster was also affiliated with the the Resources Commission at the German Environment Agency (UBA).

PhD-project I dealt with the appearance of sustainability and related design questions and was conducted by Dustin Jessen at the Folkwang University in Essen. PhD-project II (carried out from 01.07.2018 to 31.08.2019) was started by Florian Fiesinger at Clausthal University of Technology focussing on resource demands of information and communications technologies (ICT) and was later continued by Charlotte Joachimsthaler at the Technical University (TU) of Dortmund, condensing the focus to the resource demand of the energy transition. PhD-project III was conducted by Thomas Kippes at the University of Augsburg who investigated the dissipation of functional metals. This project report provides a concise overview of the results of the three PhD projects. Brief project summaries can be found at the beginning of this report including links to already published papers by the three authors.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	6
Abbildungsverzeichnis	8
Tabellenverzeichnis.....	8
Zusammenfassung	10
Summary.....	15
1 Einleitung.....	19
2 Promotionsvorhaben I „Die Gestalt der Nachhaltigkeit“	20
2.1 Einleitung	20
2.2 Thesen	22
2.3 Methodik und weiteres Vorgehen.....	32
2.4 Fragestellung & Zielsetzung.....	33
2.4.1 Learning from Nail Design Dustin Jessen & Christoph Tochtrop	33
2.4.2 Designing Beyond the Common Good – an Evolutionary Process between Speculation and Reality Dustin Jessen & Simon Meienberg	33
2.4.3 Welcome to the End of the Circle Dustin Jessen & Christoph Tochtrop	33
2.4.4 Designing Futures with Pasts – Rediscovering and transforming abandoned paths of food preservation under today’s paradigm of sustainability Christoph Tochtrop & Dustin Jessen.....	34
2.4.5 Exaptation – A missing term in design theory Dustin Jessen	34
2.4.6 Design Depends Dustin Jessen & Prof. Dr. Christa Liedtke	35
2.4.7 Transition Design Guide [English Version] Prof. Dr. Christa Liedtke et al.....	35
2.5 Ergebnisse	35
3 Promotionsvorhaben II „Ressourcenbedarf der Energiewende“	37
3.1 Einleitung	37
3.1.1 Politische Zielsetzungen der Energie- und Ressourcenwende	37
3.1.2 Die Nachhaltigkeit der Energiewende.....	38
3.2 Stand der Forschung.....	39
3.2.1 Bestehende Energie- und Klimaszenarien.....	39
3.2.2 Verdichtung der Problemstellung und Zielsetzung	42
3.3 Vorgehensweise zur Diskussion bestehender Literatur	43
3.4 Mögliche Entwicklungen des Ressourcenbedarfs für das deutsche Windenergiesystem	44
3.4.1 Zubau und Flächenbedarf der Windenergie an Land.....	44
3.4.2 Rohstoffbedarf der Windenergie	47
3.5 Diskussion der Variablen	54

3.6	Ansätze der Reduktion des Ressourcenbedarfs.....	56
3.7	Fazit	58
4	Promotionsvorhaben III „Dissipation von Funktionsmetallen“	60
4.1	Einleitung	60
4.1.1	Fragestellung & Zielsetzung	60
4.1.2	Historischer Kontext der anthropogenen Stoffmobilisierung	61
4.2	Stand der Forschung & Begriffe.....	67
4.2.1	Der Begriff Dissipation	67
4.2.2	Abgeleitete Dissipationsursachen	67
4.3	Auswahl von Fallbeispielen.....	68
4.4	Fallbeispiel Gadolinium – Zusammenfassung.....	68
4.4.1	Die Gruppe der Seltenen Erden und Gadolinium im Besonderen	68
4.4.2	Materialflussanalyse von Gd.....	69
4.4.3	Räumliche Betrachtung von Gadolinium in sächsischen Oberflächengewässern	70
4.4.4	Fazit zum Fallbeispiel Gadolinium.....	71
4.5	Fallbeispiel Helium - Zusammenfassung.....	72
4.5.1	Theoretische Grundlagen zur Dissipation von Helium.....	72
4.5.2	Ökobilanz von Helium in der MRT-Anwendung.....	73
4.5.3	Zwischenfazit zum Fallbeispiel Helium.....	76
4.6	Schlussfolgerungen	77
5	Quellenverzeichnis.....	79

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Polysemie von „Design“ – ein Wort zwischen Abstraktum und Konkretum	22
Abbildung 2: Die Entstehung eines Pfades im Entwurfsprojekt	25
Abbildung 3: Schematische Darstellung eines evolutionären Designprozesses als Möglichkeitsraum	27
Abbildung 4: Installierte Gesamtkapazität und dazugehörige, auf Basis der Nennleistung je Anlage berechnete Anzahl von Onshore-WEAs im Jahr 2050 gegenübergestellt den statistischen Werten aus 2021	56
Abbildung 5: Roheisen- und Stahlproduktion zwischen 1900 und 1960	63
Abbildung 6: Warenexporte nach Kontinenten im Zeitraum 1948 – 2018	64
Abbildung 7: Produktionsanstieg verschiedener Metalle von 1915 – 2015 (dargestellt als Index (100 = 1915))	65
Abbildung 8: Entwicklung der genutzten Elemente in Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)	66
Abbildung 9: Globale Materialflussanalyse (MFA) von Gadolinium für das Jahr 2016	70
Abbildung 10: Gd-Messwerte in sächsischen Oberflächengewässern für das Jahr 2019 (links: Gd > 1.000 ng/l; rechts: Gd < 1.000 ng/l (rechts))	71
Abbildung 11: Untersuchungsrahmen und Systemgrenze der Ökobilanz	74
Abbildung 12: Anstieg der THG-Emissionen in Folge von Dissipation, nach Prozessen	75
Abbildung 13: Anteil der Lebenszyklusphasen an den gesamten THG-Emissionen, Verlust-Szenario (Vergrößerung der kleinen Werte im rechten Diagramm)	76

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug an Szenarienarbeiten für das Literaturscreening	40
Tabelle 2: Charakteristika der <i>Green</i> Szenarien der UBA RESCUE-Studie im Bereich Energie	41
Tabelle 3: Flächenverfügbarkeit und Zubaupotenzial 2018, 2025 und 2030	45
Tabelle 4: Durchschnittlicher jährlicher Flächenbedarf des Bruttozubaues der <i>Green</i> Szenarien	46
Tabelle 5: Eingesetzte Massen von Neodym und Dysprosium in Permanentmagneten der Getriebearbeiten Direktantrieb, Hybridgetriebe und Schnellläufer in dem Jahr 2014 und Prognosen für 2025 und 2050	49
Tabelle 6: Annahmen zukünftiger Recyclingraten und Rezyklatanteile verschiedener Materialgruppen im Jahr 2050 in den <i>Green</i> Szenarien	50

Tabelle 7:	Treibhauspotenzial von MRT-Scans in Deutschland im Jahr	
	2018	76

Zusammenfassung

Im Rahmen des Promotionsclusters „Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz“, welches an die Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (UBA) angegliedert ist, wurden im Zeitraum Juli 2018 bis Dezember 2021 drei Promotionsvorhaben gefördert, welche die Thematik „Ressourcenschonung und Klimaschutz“ aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten. Das Promotionscluster wurde in diesem Zeitraum mit Mitteln des Ressortforschungsplans des Bundesumweltministeriums gefördert. Dieser Abschlussbericht gibt eine kurze Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse der drei Forschungsvorhaben.

Promotionsvorhaben I „Die Gestalt der Nachhaltigkeit“:

In dem Promotionsvorhaben I wird durch Design Grundlegendes über Design erforscht, um Aussagen darüber zu treffen, inwieweit insbesondere durch Produkt- und Industriedesign ressourcenschonende und klimafreundliche Interventionen angestoßen werden können. Die Grundannahme (und zugleich Problemstellung) besteht darin, dass Design, so wie es als Disziplin historisch gewachsen ist, klassischerweise unter Bedingungen und Abhängigkeitsverhältnissen (z.B.: Briefing, Kostenrahmen, Bearbeitungszeit, ...) geschieht, die weder ermöglichen noch darauf abzielen – auch nicht kategorisch ausschließen –, systemische Veränderungen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung herbeizuführen. Gleichwohl haben die Ergebnisse von Design erheblichen Einfluss auf die Umwelt und das Klima. Ein Dilemma, das auch den Vertreter*innen der Disziplin seit langem bekannt ist und durch zahlreiche Theorien und Ansätze, wie Sustainable Design, Ecodesign, Emotionally Durable Design, Transition Design, Social Design, Service Design, Universal Design oder Transformation Design, auf unterschiedlichste Weise adressiert wird.

In dem Promotionsvorhaben wird anhand der Gestaltung von mehreren Produkten gezeigt, wie sich Design – im Sinne eines gestalterischen Prozesses – projektspezifisch je nach Gegenstand, welcher entworfen wird, oder Design-Vorhaben immer wieder neu konstituiert. Design bedeutet in der Regel, dass Varianten und Veränderungsvorschläge erstellt werden, doch der Raum zur Erkundung von Varianz und Möglichkeiten ist stets bedingt und endlich. So wirkt beispielsweise die Konstellation der am Gestaltungsprozess beteiligten Akteure ebenso maßgeblich auf das zu Gestaltende ein wie Kosten- und Zeitfaktoren oder die Limitierungen durch die Verwendung eines bestimmten Herstellungsverfahrens oder Materials. Die Gestaltung der Produkte dient im Rahmen des Promotionsprojekts somit der Exploration von Gestaltungsräumen und dem Ergründen vom Verhältnis zwischen den konstituierenden Bedingungen und Möglichkeiten von Design. Die Gestaltung von Produkten dient dabei der Erforschung der Grenzen von Design.

Nachhaltigkeitsziele fordern einen systemischen Blick, der in der gestalterischen Praxis oftmals nicht möglich ist und dort wo er möglich wird – insbesondere in der Forschung und Lehre –, geht er meist mit der Abgabe von Handlungsmacht einher. So beleuchtet das Promotionsvorhaben, wie Nachhaltigkeit als Paradigma Kräfteverhältnisse und Akteurs-Konstellationen in Designprozessen verändert und Design als Disziplin de- und rekonstruiert. Die aus der Praxis des Entwerfens gewonnenen Erkenntnisse werden als Thesen im Rahmen von Experteninterviews mit Designer*innen wissenschaftlich überprüft und weiterentwickelt. Der Hintergrund dieses Vorgehens ist, dass die aus der eigenen Praxis des Gestaltens gewonnenen, individuellen Erkenntnisse dahingehend eine Überprüfung erfahren sollen, ob sie von anderen in der Praxis tätigen Designer*innen Zustimmung erfahren und somit allgemeinere Gültigkeit bekommen.

Schlussendlich sollen Designer*innen auf Grundlage der in Designprozessen gesammelten Erfahrungen befähigt werden, verdinglichte Bedingungen erkennen zu können. Die Kompetenz,

die Gestaltungs- und Entstehungsprozesse in den Dingen sehen können, soll als Kernkompetenz für nachhaltige Entwicklungsprozesse herausgestellt werden.

Als Basis für dieses Vorhaben schien eine Untersuchung des Designbegriffs unumgänglich, da sich auf Grund seiner Mehrdeutigkeit kaum widerspruchsfrei über Design schreiben lässt. Es geht weniger darum, eine bestimmte Bedeutung von Design – im Sinne einer Definition – zu profilieren, sondern vielmehr um den Versuch, den Umstand der Mehrdeutigkeit des Wortes zu beschreiben, um auf grundlegende Widersprüche und Missverständnisse beim Gespräch über Design hinzuweisen. In der Designtheorie wird die Polysemie des Designbegriffs zwar häufig erwähnt, aber dennoch zu wenig berücksichtigt, was diesen Teil des Vorhabens zu einem wichtigen Beitrag der Grundlagenforschung im Design werden lässt. Die intensive sprachliche Auseinandersetzung ist auch vor dem Hintergrund zu betrachten, dass das Promotionsvorhaben im Bereich der Designwissenschaft an der Folkwang Universität der Künste – die als eine der wenigen Kunsthochschulen in Deutschland das Promotionsrecht hat – angesiedelt ist und am Fachbereich Gestaltung der akademische Grad Doktor*in der Philosophie (Dr. phil.) vergeben wird. Dieses Promotionsvorhaben ist mit Stand Mai 2022 noch in Bearbeitung.

Promotionsvorhaben II „Ressourcenbedarf der Energiewende“:

Ziel des Forschungsvorhabens II ist es, das theoretische Potenzial einer gekoppelten Ressourcen- und Energiewende am Fallbeispiel der Windenergie (WE) mit erforderlichen Rohstoffen und Flächeninanspruchnahmen zu beleuchten.

Studien, die Energie- und Klimaszenarien für die Transformation bis 2050 konzipieren und bewerten (z.B. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI 2015; UBA 2017; Prognos AG 2018; UBA 2019a; Fraunhofer ISE 2020; FZJ 2020) zeigen eine Vielzahl von Einflussfaktoren für den Ressourcenbedarf der WE, die sich aus Wechselwirkungen mit weiteren Teilsystemen der Transformation im Bereich der Energie und Ressourcen erschließen. Die nutzbaren Energiesysteme und deren erforderlicher Ausbau sind abhängig von der inländischen Energienachfrage sowie dem Umfang des Imports grüner Energieträger. Nachfrageseitig sind beispielsweise das Bewusstsein der Gesellschaft und Verhaltensänderungen, der Grad der Sektorenkopplung und die Flexibilisierung von Speichersystemen wichtige Faktoren. Verschiedene Ausgestaltungsmöglichkeiten des Energieangebots ergeben sich mit dem Wandel der energieerzeugenden Systeme, der inländischen Entwicklung der Erzeugung von Strom und Wärme, des Anteils der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung, sowie der Effizienz eingesetzter Technologien. Für die Windenergie sind die Anlagengrößen, die Installationsorte und die mögliche Konkurrenz zu anderen erneuerbaren Technologien ausschlaggebend. Hinzu kommt die Relevanz der Regularien für den Rückbau, des Repowering, der Akzeptanz eines verstärkten Ausbaus und, des Natur- und Ressourcenschutzes.

Die Spanne der erforderlichen Zubaurate der erneuerbaren Energien ist bei unterschiedlichen Strategien und Ambitionsniveaus entsprechend hoch. Die Untergrenze für den Zubau der WE an Land liegt bei 4 GW/a (UBA 2019a, S.109), während die meisten Strategien höher ansetzen, beispielsweise für die Jahre 2040 bis 2050 einen Bruttozubau von 11,2 GW/a verlangen (UBA 2019a, S.109ff.; Dittrich et al. 2020a-2020e). Für ein energieeffizientes Szenario (Dittrich et al. 2020a) ist in der vorliegenden Arbeit ist ein Flächenbedarf für den Netto-Zubau der WE an Land der Jahre 2018 bis 2050 von mindestens 70 km²/a und höchstens 89 km²/a zu errechnen. Wird die Nutzungsdauer von 20 Jahren auf 30 Jahre verlängert, so kann nicht nur die Zahl in Betrieb befindlicher Anlagen um mehr als die Hälfte, sondern auch die installierte Leistung um mehr als 15 % erhöht werden. Die Folge wäre eine Senkung des erforderlichen Netto-Zubaus und des damit verbundenen Rohstoff- und Flächenbedarfs für Herstellung und Betrieb (UBA 2019c, S.76ff., 165f.).

Ausbau und Repowering haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Nachfrage nach Primärrohstoffen in Deutschland. Wird eine materialeffiziente Strategie verfolgt, die Ressourceneffizienz über alle Sektoren und Branchen anvisiert (Dittrich 2020d), könne der inländische Einsatz an Primärrohstoffen aus dem Jahr 2010 bis 2050 um fast 70 % gesenkt werden (Dittrich 2020d, S.7). Nicht zuletzt wäre eine solche Entwicklung der stets verstärkten Verwendung von Recyclingrohstoffe zu verdanken (Dittrich 2020d, S.116). Bei der Herstellung von Windenergieanlagen (WEAs) werden, unabhängig von unterschiedlichen Anlagentypen, über 80 % des Gesamtmaterials in Fundament und Turm verarbeitet. Da fast 85 % bestehender WEAs Stahltürme besitzen, ist der Stahlbedarf zur Herstellung der WEAs hoch und macht mit restlichen Metallen einer WEA, wie Kupfer, Aluminium und diversen Legierungen, bis zu 200 t pro WEA aus (Müller 2018, S.16f.). Komponenten und Materialien mit größten Anteilen der Gesamtmasse besitzen eine Recyclingquote von bis zu 90 %, weswegen der WEA grundsätzlich eine hohe Kreislauffähigkeit zuzuschreiben ist. Eine tatsächliche Kreislaufführung wird bislang jedoch kaum umgesetzt, da Rezyklate nur zu geringen Teilen wieder zur Herstellung neuer Komponenten rückgeführt und eingesetzt werden (BMWi 2019, S.13; Zotz et al. 2019, S.184). Weitere Herausforderungen bestehen in Bezug auf die Recyclingfähigkeit weiterer Komponenten und Materialien, wie kohlenstoff- und glasfaserverstärkte Kunststoffe für Rotorblätter, Seltene Erden, zumeist Neodym, für Permanentmagnete und hochlegierte Stähle. Rückgewinnungsprozesse dieser Materialien sind ineffizient, mit Downcycling- und Dissipationseffekten verbunden und/oder nicht wirtschaftlich anwendbar. Ursachen hierfür sind beispielsweise verfahrenstechnische Grenzen, zu geringe Massenströme zur wirtschaftlichen Verwertung sowie eine hohe, kaum trennbare Materialvielfalt.

Ansätze der Circular Economy können die genannten Chancen und Herausforderungen der Ressourcenschonung von Flächen zu Errichtung und Betrieb und von Rohstoffen zur Herstellung aufgreifen und in effektive Einsparstrategien Ressourcenbedarf des WE-Systems Deutschlands münden. So konnten im Forschungsvorhaben 17 Optimierungsoptionen mit Konstruktion und Technologien zur Ressourcenschonung, der Materialeffizienz in der Herstellung, der Betriebsführung zur Langlebigkeit und für die Wiederverwendung und hochwertige Verwertung erarbeitet werden, wie etwa eine Mindestvorgabe der Rezyklateinsatzquote, Maximalvorgaben für Legierungselemente, recyclingfreundliche Herstell-, Auf- und Rückbauverfahren, mehrkanalige Sammelwege, etc. Zuverlässige Entscheidungen der Akteur*innen aus Industrie und Politik bedingen die Transparenz relevanter Daten, die im Spagat zwischen Geheimhaltung sensibler Daten und der notwendigen Offenlegung gesichert werden muss. Dieses Promotionsvorhaben ist mit Stand Mai 2022 noch in Bearbeitung.

Promotionsvorhaben III „Dissipation von Funktionsmetallen“¹:

Die letzten Jahrzehnte waren in der Menschheitsgeschichte in ihrer Dynamik einzigartig. Diese Zeit ist auch als die Phase der *Great Acceleration* bekannt (Steffen et al. 2015, S. 82). Hauptmerkmale sind das dynamische Wachstum der Weltwirtschaft und der Weltbevölkerung. Der Abbau, die Verarbeitung, die Funktionalisierung sowie die Mobilisierung von Rohstoffen bildet das Fundament dieser Entwicklung. Eine damit einhergehende Entwicklung ist die zunehmende Dissipation von Rohstoffen. Dissipation bezeichnet Materialflüsse, durch die Rohstoffe einer weiteren Nutzung durch den Menschen entgehen. Die Stoffe gelangen in einer so geringen Stoffkonzentration in unterschiedliche Empfangskompartimente, sodass eine Rückgewinnung aus energetischen Gründen und aufgrund technischer Grenzen ausgeschlossen ist. Neben der erschwerten Rückgewinnung zur weiteren Nutzung innerhalb der Wirtschaft,

¹ Dieser Text zum Promotionsvorhaben III basiert auf der Dissertation von Thomas Kippes an der Universität Augsburg mit dem Titel „Dissipation von Funktionsmaterialien“ und einzelne Textabschnitte wurden teilweise direkt übernommen (<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-915587>).

birgt die Feinverteilung von Substanzen auch potentielle Risiken für Mensch und Umwelt, etwa, wenn sie ungewollt in die Umwelt gelangen.

Die Forschungsarbeit zum Thema Dissipation liefert zunächst einen umfassenden historischen Überblick und zeigt darin auf, wie sich die anthropogene Rohstoffnutzung und die Rohstoffmobilisierung über die Jahrtausende seit der neolithischen Revolution hinweg entwickelt haben. Dabei zeigte sich, analog zur Zivilisationsgeschichte, ein Übergang von lokal und regional geprägten Rohstoffnutzungsmustern hin zu globalen Mustern. Entsprechend vollzog sich auch der Wandel dissipativer Stoffströme, von regionalen hin zu vermehrt globalen Strömen und damit verbunden auch zu globalen ökologischen Auswirkungen. Mit der Industrialisierung ging auch ein völlig neues Tempo anthropogen bedingter Stoffmobilität über den kompletten Planeten einher, die in den letzten Jahrzehnten in die bereits angesprochene Great Acceleration mündete und schließlich im aktuell viel diskutierten Menschenzeitalter – dem Anthropozän – gipfelte.

Angeichts dieser Entwicklungen untersuchte die vorliegende Arbeit das Phänomen Dissipation anhand von zwei beispielhaften Rohstoffen (Gadolinium (Gd) und Helium (He)), die aktuell beide im Bereich der medizinischen Diagnostik unabdingbar sind. **Gadolinium** ist ein Metall aus der Gruppe der Seltenen Erden, das typische Charakteristika unseres dissipativen anthropogenen Umgangs mit Materialien entlang der gesamten Prozesskette aufweist. Insbesondere anhand der Verwendung als Kontrastmittel in der Magnetresonanztomographie (MRT) wird dies deutlich. Zur Quantifizierung der globalen Flüsse wurde eine globale Materialflussanalyse von Gadolinium durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass 100% des extrahierten Gadoliniums spätestens nach der Nutzungsphase verloren gehen. Ein, wenn auch mengenmäßig geringer Eintrag in die Umwelt führt zu ökologischen Risiken. Anhand einer räumlichen Analyse der Gadoliniumbelastung sächsischer Oberflächengewässer wurde aufgezeigt, dass die Kontaminationsquellen vielfältig sein können, was Handlungsmöglichkeiten zur Minderung der ökologischen Belastung erschwert.

Das zweite Fallbeispiel, **Helium**, offenbarte eine weitere Betrachtungsebene von Dissipation aus einem ökologischen Blickwinkel. Dieses reaktionsträge Edelgas ist aufgrund seiner Flüchtigkeit sehr schwer zu handhaben und entflieht an vielen Stellen der Prozesskette. Einmal dissipiertes Helium entweicht im Laufe der Zeit zwangsläufig aus der Atmosphäre und entzieht sich damit endgültig dem anthropogenen Zugriff, was die Endlichkeit dieser Ressource verdeutlicht. Diese Verluste müssen zur ökonomischen Bedarfsdeckung durch eine erhöhte Primärförderung ausgeglichen werden. Diese indirekt mit der Dissipation verbundenen ökologische Auswirkungen wurden anhand einer Ökobilanzierung eines Magnetresonanztomographie (MRT)-Scans, bei dem Helium als Kühlmittel von essenzieller Bedeutung ist, quantitativ analysiert. Die Ergebnisse zeigen grundsätzlich sehr geringe Treibhausgasemissionen pro Scan, die aber angesichts der weltweiten Anzahl an MRT-Untersuchungen eine nicht zu vernachlässigende Größenordnung annehmen. Der überwiegende Anteil an den Treibhausgasemissionen entlang der gesamten Helium-Prozesskette geht auf den Stromverbrauch in der Nutzungsphase zurück und wird damit maßgeblich von der Zusammensetzung des Strommixes bestimmt.

Die Forschungsarbeit untersuchte das breite Spektrum dissipativer Verluste anhand der zwei Fallbeispiele. Es zeigte sich, dass die Freisetzung dieser Stoffe in die Umwelt mit direkten und indirekten Umweltrisiken verbunden ist. Die Bedeutung von feinverteilten, teils synthetischen und anthropogen funktionalisierten Stoffen nimmt aufgrund der rasanten Zunahme unserer anthropogenen Rohstoffnutzung ebenso schnell zu. Das Wissen über die Auswirkungen stofflicher Dissipation, insbesondere für die Umwelt, hinkt diesem Tempo jedoch hinterher. Das betrifft vor allem die trans- und interdisziplinäre wissenschaftliche Herangehensweise, deren

durch die Komplexität des Themas bedingte Notwendigkeit diese Studie verdeutlichte. Dabei resultiert die Reduzierung bzw. Vermeidung von dissipativen Verlusten sowohl in einer Schonung von Ressourcen, da diese weiterhin zur möglichen Wiederverwertung/Recycling zur Verfügung stehen, als auch in einem verträglicheren Umgang mit unserer Umwelt durch geringere Stoffeinträge. Ein breiteres Wissen über Dissipation ist somit essenziell für einen nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen. Dieses Promotionsvorhaben wurde bereits erfolgreich an der Universität Augsburg abgeschlossen.

Summary

Within the PhD cluster "Nexus: Sustainable Resource Use and Climate Protection", which is affiliated to the Resource Commission at the German Environment Agency (UBA), three PhD projects were funded in the period from July 2018 to December 2021, which examine the topic of "sustainable resource use and climate protection" from different perspectives. During this period, the PhD cluster was funded by the departmental research plan of the German Federal Ministry for the Environment (BMUV). This final report provides a brief summary of the key findings of the three research projects.

PhD project I "The shape of sustainability":

In the PhD project I, basic research on design is being conducted in order to make statements about the extent to which resource-conserving and climate-friendly interventions can be initiated in particular through product and industrial design. The basic assumption (and problem statement) is that design, as it has historically grown as a discipline, classically takes place under conditions and dependencies that neither enable nor aim at – nor categorically exclude – bringing about systemic changes in the sense of sustainable development. Nevertheless, the results of design have a significant impact on the environment and the climate. This is a dilemma that has been known to the representatives of the discipline for a long time and is addressed in many different ways by numerous theories and approaches, such as Sustainable Design, Ecodesign, Emotionally Durable Design, Transition Design, Social Design, Service Design, Universal Design or Transformation Design.

In the PhD project, the design of several products is used to show how design – in the sense of a creative process – is repeatedly reconstituted in a project-specific way depending on the product being designed or the design project. Design usually means that variants and proposals for change are created, but the space for exploring variance and possibilities is always limited and finite. For example, the constellation of actors involved in the design process has just as much of an impact on what is to be designed as cost and time factors or the limitations imposed by the use of a particular manufacturing process or material. In the context of the PhD project, the design of products, thus, serves the exploration of design spaces and the fathoming of the relationship between the constituting conditions and possibilities of design. Designing these products is used as a means to explore the limits of design.

Sustainability goals demand a systemic view that is often not possible in design practice, and where it becomes possible – especially in research and teaching – it is usually accompanied by the relinquishment of power. Thus, the PhD project illuminates how sustainability as a paradigm changes power relations and actor constellations in design processes and de- and reconstructs design as a discipline. The insights gained from the practice of design are scientifically verified and further developed into theses in the context of expert interviews with designers. The background to this procedure is that the individual insights gained from one's own practice of designing are to be examined to see whether they are approved by other designers working in the field and thus become more generally valid.

Finally, designers should be enabled to recognize reified conditions on the basis of the experience gained in design processes. The competence of being able to see the design and creation processes in things should be highlighted as a core competence for sustainable development processes.

As a basis for this project, an investigation of the meaning of the word "design" seemed inevitable, as it is hardly possible to write about design without contradictions due to the ambiguity in defining this term. The aim is not so much to profile a specific meaning of design –

in the sense of a definition – but rather to attempt to describe the circumstance of the word's ambiguity in order to point out fundamental contradictions and misunderstandings when talking about design. In design theory, the ambiguity of the term “design” is frequently mentioned, but nevertheless too little considered, which makes this part of the project an important contribution to basic research in design. The intensive linguistic examination should also be seen against the background that the doctoral project is located in the field of design science at the Folkwang University of the Arts - which is one of the few art colleges in Germany to have the right to award doctorate degrees – and that the academic degree of Doctor of Philosophy (Dr. phil.) is awarded at the Department of Design. As of May 2022, this PhD project is ongoing.

PhD project II "Resource requirements of the energy transition":

The aim of research project II is to shed light on the theoretical potential of a coupled resource and energy transformation. The focus lies upon wind energy (WE) and its required raw materials demands and land use.

Studies evaluating energy and climate scenarios for the transformation into the year 2050 (e.g. Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI 2015; UBA 2017; Prognos AG 2018; UBA 2019a; Fraunhofer ISE 2020; FZJ 2020) show a large number of factors affecting the resource requirements of WE, which are derived from interactions with other subsystems of the transformation in the field of energy and resources. The use and expansion of energy systems depend on domestic energy demand and the extent of green energy imports. Decisive factors on the demand side include, society's awareness and behavioural changes, the degree of integrated energy and the capability of storage systems. The future's energy supply depends on the development, efficiency, combination and share of renewable energy sources. For wind energy, the decisive factors are turbine sizes, installation sites and possible competition with other renewable technologies. In addition, regulations for dismantling, repowering, the acceptance of expansion, nature conservation and resource protection are relevant.

The range of the expansion rate of renewable energies is correspondingly high for different scenarios and ambition levels. The lower limit of expansion of onshore WE is 4 GW/a (UBA 2019a, p.109), while most scenarios set higher targets for expansion, for example requiring a growth of 11.2 GW/a for the years 2040 to 2050 (UBA 2019a, p.109ff.; Dittrich et al. 2020a-2020e). For an energy-efficient scenario (Dittrich et al. 2020a), an area requirement for the net addition of WE on land of at least 70 km²/a and at most 89 km²/a from 2018 to 2050 is expected. If the life-span is extended from 20 to 30 years, not only can the number of plants in operation be increased by more than half, but also the installed capacity can be increased by more than 15 %. This would result in a reduction of the net addition of turbines and the associated raw material and land requirements for production and operation (UBA 2019c, p.76ff., 165f.).

Expansion and repowering have significant impact on the demand for primary raw materials in Germany. If a material-efficient strategy is pursued that targets resource efficiency across all sectors and industries (Dittrich 2020d), the domestic use of primary raw materials could be reduced by almost 70 % by 2050 compared to 2010 (Dittrich 2020d, p.7). Increased use of recycled raw materials, amongst others, would be necessary for this development (Dittrich 2020d, p.116). Regardless of the different types of turbines used in wind energy systems, more than 80 % of the total material are needed for the foundation and tower. Almost 85 % of existing wind technologies (WTs) have steel towers, resulting in large amounts of steel required for the production of WTs. Steel and other metals of a WT, such as copper, aluminium and various alloys, accounts for a total of up to 200 t per WT (Müller 2018, p.16f.). Components and

materials with the largest shares of the total mass have a recycling rate of up to 90 %, and thus in general, high recycling capabilities are expected for wind turbines. Nevertheless, comprehensive recycling has hardly been implemented to date, and only minor fractions recycled materials are returned and used to manufacture new components (BMW 2019, p.13; Zotz et al. 2019, p.184). Further challenges arise with regard to the recyclability of other components and materials, such as carbon and glass-fibre reinforced plastics for rotor blades, rare earths for permanent magnets and high-alloy steels. Recovery processes for these materials are inefficient, associated with downcycling and dissipation effects and/or not economically feasible. The reasons for this are, for example, technical limitations, insufficient mass flows to allow for economic recycling, low separation rates, and a high material diversity.

Circular Economy approaches can address land and material use for wind turbines and outline opportunities and challenges for Germany's wind energy supply of 2050. This research project was able to develop 17 optimisation options for resource conservation, material efficiency in production, operation management for durability and for reuse, and high-quality recycling, such as a minimum specification for recycled material input, maximum specifications for alloying elements, recycling-friendly production options, construction and dismantling processes, etc. Reliable decisions by stakeholders from industry and politics require a solid and transparent data base, which must fulfill a balance between confidentiality of sensitive data and the necessary disclosure. As of May 2022, this PhD project is ongoing.

PhD project III "Dissipation of functional metals"²:

Recent decades have seen a unique dynamic in the history of humankind. This period is also known as the "Great Acceleration" (Steffen et al. 2015, p. 82). The main characteristics are the dynamic growth of the world economy and of the world population. Mining, processing, functionalization, and mobilization of raw materials form the backbone of this development. A concomitant effect is the increasing dissipation of raw materials. Dissipation describes material flows through which raw materials escape further utilization by humans. The substances enter different receiving compartments in such low substance concentrations so that recovery is impossible due to the high energy requirements and technical limitations. This fine distribution of substances poses risks, for instance, if they are released into the environment.

The research thesis on dissipation initially provides a comprehensive historical overview and shows therein how anthropogenic resource use and resource mobilization have evolved over the centuries and millennia. Analogously to the history of civilization, this revealed a transition from local and regional patterns of raw material use to global patterns. Dissipative material flows changed accordingly, from regional to increasingly global flows and thus also to global ecological impacts. The Industrial Revolution initiated a completely new pace of anthropogenic material mobility across the entire planet, which in the last decades led to the aforementioned *Great Acceleration* and finally resulted in the currently much-discussed Age of Humans - the Anthropocene.

In light of these developments, the study investigated the phenomenon of dissipation focusing on two exemplary raw materials (Gadolinium (Gd) & Helium (He)), both of which are currently indispensable in the field of medical diagnostics. **Gadolinium** is a metal from the Rare Earths group that exhibits typical characteristics of our dissipative anthropogenic use of materials along the process chain. This becomes particularly apparent considering its use as a contrast agent in magnetic resonance imaging (MRI). A global material flow analysis of gadolinium was

² This section about PhD project III is based on the doctoral thesis of Thomas Kippes at the University of Augsburg entitled „Dissipation von Funktionsmaterialien“ and some text blocks were directly taken from this source (<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-915587>).

conducted to quantify the global fluxes. The results showed that a total of 100% of the extracted gadolinium gets lost along the process chain. A release into the environment, even if small in quantity, leads to ecological risks. A geospatial analysis of gadolinium contamination of surface waters in Saxony (Germany) was used to show that sources of contamination can be diverse, complicating possible actions to mitigate ecological contamination.

Helium, the second case study, revealed another dimension of dissipation from an ecological point of view. This inert noble gas is very difficult to handle due to its volatility and escapes at many points in the process chain. Once dissipated, helium inevitably escapes from the atmosphere over time and thus finally eludes anthropogenic use, highlighting the finite nature of this resource. These losses must be compensated for by increased primary production in order to meet economic demand. These indirect ecological impacts associated with dissipation were quantitatively analysed by an LCA of an Magnetic resonance imaging (MRI) scan, where helium is essential as a coolant. The results show basically very low greenhouse gas emissions per scan, which, in view of the worldwide number of MRI examinations, take on a non-negligible order of magnitude. The vast majority of greenhouse gas emissions along the entire helium process chain are a result of electricity consumption in the use phase and are, thus, largely determined by the composition of the electricity mix.

The research investigated the broad spectrum of dissipative losses using the two case studies as an example. It was shown that the release of these substances into the environment is associated with direct and indirect environmental risks. The relevance of finely dispersed, partly synthetic and anthropogenically functionalized substances is increasing accordingly to the rapid increase of our anthropogenic raw material use. However, our knowledge about the (adverse) effects of material dissipation, especially for the environment, is lagging behind the pace of increased raw materials use. This applies above all to the trans- and interdisciplinary scientific approach, whose necessity, due to the complexity of the topic, was made clear by this study. The reduction or avoidance of dissipative losses results both in the conservation of resources and in a more benign treatment of our environment through reduced substance losses. A broader knowledge of dissipation is therefore essential for a sustainable use of raw materials. This PhD project has already been successfully completed at the University of Augsburg.

1 Einleitung

Im Rahmen des Promotionscluster „Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz“, welches an die Ressourcenkommission am Umweltbundesamt (UBA) angegliedert ist, wurden im Zeitraum Juli 2018 bis Dezember 2021 unter der Leitung von Prof. Dr. Martin Faulstich drei Promotionsvorhaben gefördert und durchgeführt. Die drei Promotionsvorhaben wurden in diesem Zeitraum mit Mitteln des Ressortforschungsplans des Bundesumweltministeriums gefördert.

Das **Promotionsvorhaben I** mit dem Titel „Die Gestalt der Nachhaltigkeit“ wurde von Herrn Dustin Jessen an der Folkwang Universität der Künste in Essen bearbeitet und von der Co-Vorsitzenden der UBA-Ressourcenkommission Prof. Dr. Christa Liedtke, Professorin für Nachhaltigkeit im Design an der Folkwang Universität der Künste und Abteilungsleiterin am Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, betreut. Im vorliegenden Bericht werden Veröffentlichungen, die im Rahmen des Promotionsvorhaben I bereits erfolgt, geplant oder in Arbeit sind, aufgegriffen.

Das **Promotionsvorhaben II** mit dem Titel „Ressourcenleichter Aufbau der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)-Infrastruktur“ wurde vom 01.07.2018 bis zum 31.08.2019 von Herrn Florian Fiesinger an der Technischen Universität (TU) Clausthal bearbeitet. Die Arbeit wurde wissenschaftlich betreut durch den Co-Vorsitzenden der UBA-Ressourcenkommission, Prof. Dr. Martin Faulstich, und erbrachte drei Veröffentlichungen³. Seit 2020 ist Prof. Faulstich Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls Ressourcen- und Energiesysteme der Technischen Universität (TU) Dortmund. Das Forschungsvorhaben wurde ab Januar 2021 mit einem Fokus auf den „Ressourcenbedarf der Energiewende“ von Frau Charlotte Joachimsthaler an der Technischen Universität (TU) Dortmund fortgeführt.

Das **Promotionsvorhaben III** wurde von Herrn Thomas Kippes an der Universität Augsburg bearbeitet und beschäftigt sich mit dem Thema „Dissipation von Funktionsmetallen“. Es wurde von Prof. Dr. Armin Reller (Lehrstuhl für Ressourcenstrategie der Universität Augsburg) wissenschaftlich begleitet. Die Dissertation ist als digitale Veröffentlichung im Opus-Publikationsserver der Universität Augsburg frei verfügbar⁴.

Der vorliegende Abschlussbericht fasst die wesentlichen Ergebnisse der drei Forschungsvorhaben kurz zusammen. Dabei ist zu beachten, dass für diesen Übersichtsbericht einzelne Textabschnitte direkt aus den bereits erfolgten Veröffentlichungen der Autor*innen übernommen wurden.

³ Fiesinger, F.; Seelig, J.; Faulstich, M.: Dissipative Structure / Streams. In: CEC4Europe, 2018 (Online), S. 1-5. https://www.cec4europe.eu/wp-content/uploads/2018/11/Chapter-2.5.1_Dissipativestructure-streams_Fiesinger_Seelig_Faulstich.pdf.

Fiesinger, F.; Greiff, K.: Stoffstrommodell der IKT-Infrastruktur in Deutschland. In: DGAW Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., Berlin (Hrsg.): 9. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft, 14. und 15. März 2019, Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden. Tagungsband, ISBN 978-3-903187-48-1, Innsbruck University Press, 2019, S.105-110

Greiff, K.; Fiesinger, F.; Liedtke, C.; Faulstich, M.: C like Clever and Cycle – Without a Smart and Systematic Conception of the Metal Industry, Product Labelling and an Indicator System, Nothing Will Happen. In Lehmann, H. (Ed.): Factor X: The Nexus of Sustainable Development and Resource Productivity. The Nexus Approaches. Taylor and Francis, 2021. S. 262-274

⁴ Online verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-915587>

2 Promotionsvorhaben I „Die Gestalt der Nachhaltigkeit“

Dustin Jessen, Folkwang Universität der Künste

2.1 Einleitung

„Prinzipien des Designs sind keineswegs allein Fragen der Ästhetik, sondern transdisziplinäre Fragen der Konstruktion von sozialen und subjektiven Lebenswelten, nach einem elementaren Modus der Umweltgerechtigkeit, verantwortet durch Gemeinwesen, Hersteller und Nutzer. Was als scheinbar stabile Oberflächenstruktur der lebensweltlichen Wirklichkeit erscheint, erschließt sich wissenschaftlicher Rekonstruktion ebenso wie gestalterischer Konstruktion als ein System mit komplizierter Binnenstruktur, gegenseitigen Abhängigkeiten und Anpassungen, das allein aus einer Perspektive, linear, nicht zu fassen ist. Das Prinzipielle im Design erschließt sich erst einer multiperspektivischen, lebensweltlichen Sicht, dieses gilt für die Theoretische, Angewandte und Historische Designwissenschaft ebenso wie für Bildung und Wissenschaft insgesamt.“ (Komar 2008, S.54)

In dem Promotionsvorhaben I wird *durch* Design Grundlegendes über Design erforscht (vgl. Frayling 1993/94), um Aussagen darüber zu treffen, inwieweit insbesondere durch Produkt- und Industriedesign ressourcenschonende und klimafreundliche Interventionen angestoßen werden können. Die Grundannahme (und zugleich Problemstellung) besteht darin, dass Design, so wie es als Disziplin historisch gewachsen ist, klassischerweise unter Bedingungen und Abhängigkeitsverhältnissen geschieht, die weder ermöglichen noch darauf abzielen – auch nicht kategorisch ausschließen –, *systemische* Veränderungen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung herbeizuführen. Gleichwohl haben die Ergebnisse von Design erheblichen Einfluss auf die Umwelt und das Klima. Ein Dilemma, das auch den Vertreter*innen der Disziplin seit langem bekannt ist und durch zahlreiche Theorien und Ansätze, wie Social Design (Papanek [1971] 2009, Manzini 2015), EcoDesign (Tischner et al. 2000), Emotionally Durable Design (Chapman 2015), Transition Design (Liedtke et al. 2020, Irwin 2015) oder Transformation Design (Jonas et al. 2016) auf unterschiedlichste Weise adressiert wird.

In dem Promotionsvorhaben wird anhand der Gestaltung von mehreren Produkten gezeigt, wie sich Design – im Sinne eines gestalterischen Prozesses – projektspezifisch je nach Gegenstand oder Vorhaben immer wieder neu konstituiert. Design beinhaltet in der Regel, dass Varianten und Veränderungsvorschläge erstellt werden, doch der Raum zur Erkundung von Varianz und Möglichkeiten ist stets bedingt und endlich. So wirkt beispielsweise die Konstellation der am Gestaltungsprozess beteiligten Akteure ebenso maßgeblich auf das zu Gestaltende ein wie Kosten- und Zeitfaktoren oder die Limitierungen durch die Verwendung eines bestimmten Herstellungsverfahrens oder Materials. Die Gestaltung der Produkte dient im Rahmen des Promotionsprojekts somit der Exploration von Gestaltungs- und Möglichkeitsräumen und dem Ergründen vom *Verhältnis zwischen den konstituierenden Bedingungen und Möglichkeiten von Design*. Die Arbeit folgt somit der Forderung Gert Selles: „So bedarf jedes Design mehrfacher Untersuchung, Erklärung und Kritik: durch Rekonstruktion der Absichten, Entstehungsbedingungen und tatsächlichen Wirkungsweisen. Die designhistorische Analyse muß die Beziehung zwischen den Produktionskulturen, den Produktkulturen und den sozialen Gebrauchskulturen offenlegen“ (Selle 1997, S.14).

Es geht weniger darum die Gestaltung von Produkten zum Ergebnis eines wissenschaftlichen Prozesses zu machen, sondern vielmehr darum, die Dynamiken, Widerstände und Grenzen von Designprozessen zu erforschen. Denn „[d]as Entwerfen zu den Wissenschaften in Bezug zu setzen, sollte nicht als Postulat eines wissenschaftlichen Design interpretiert werden oder als

Versuch, aus dem Design eine Wissenschaft machen zu wollen“ (Bonsiepe 2009, S.17), wohl aber lassen sich im Sinne einer Kybernetik 2. Ordnung (Jonas 2010, S.82) durch die Praxis des Gestaltens wissenschaftliche Beobachtungen und Reflexionen über eben diese Praxis anstellen.

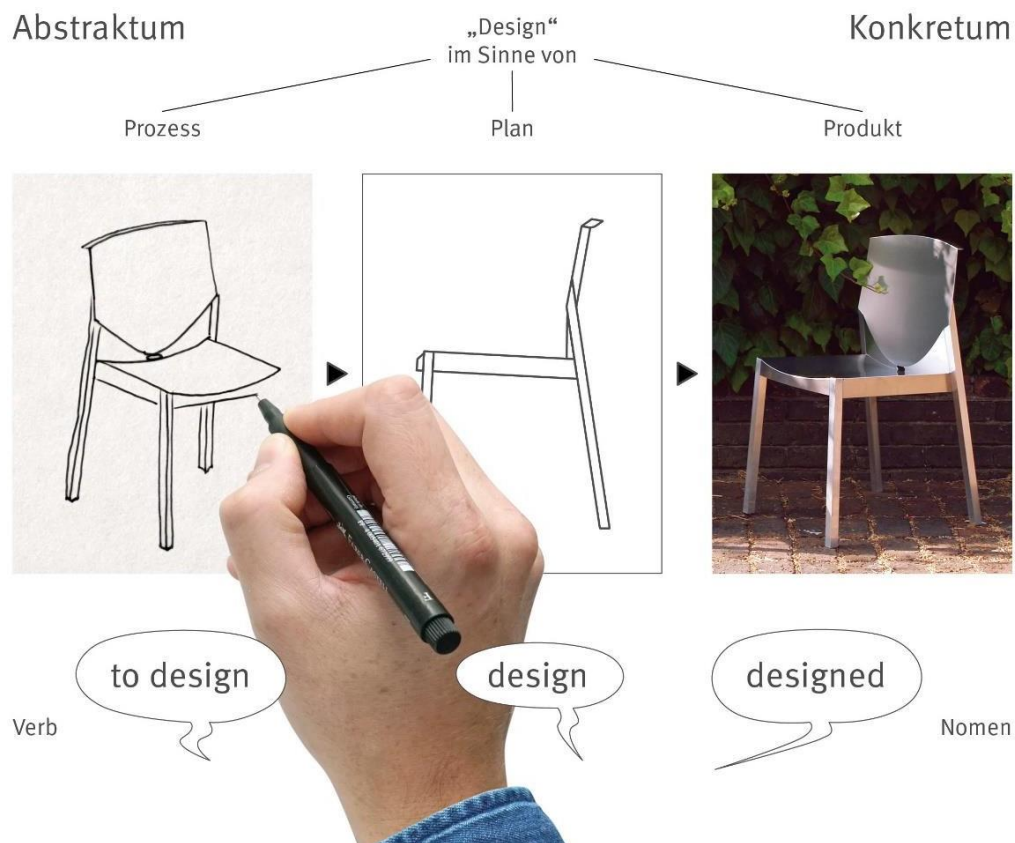
Nachhaltigkeitsziele fordern einen systemischen Blick, der in der gestalterischen Praxis oftmals nicht möglich ist und dort wo er möglich wird – insbesondere in der Forschung und Lehre –, geht er meist mit dem Verlust von Handlungsmacht einher. So beleuchtet das Promotionsvorhaben, wie Nachhaltigkeit als Paradigma (Blühdorn 2017) Kräfteverhältnisse und Akteurs-Konstellationen in Designprozessen verändert und Design als Disziplin dadurch de- und rekonstruiert. Die aus der Praxis des Entwerfens gewonnenen Erkenntnisse werden als Thesen im Rahmen von Experteninterviews mit Designer*innen diskutiert und weiterentwickelt. Der Hintergrund dieses Vorgehens ist, dass die aus der eigenen Praxis des Gestaltens gewonnenen, individuellen Erkenntnisse dahingehend eine Überprüfung erfahren sollen, ob sie von anderen in der Praxis tätigen Designer*innen Zustimmung erfahren und somit allgemeinere Gültigkeit bekommen.

Eine zentrale zu überprüfende These lautet, dass Designer*innen aufgrund der in Designprozessen gesammelten Erfahrungen die in den Dingen, bzw. in den Ergebnissen von Design, verdinglichten Bedingungen erkennen können. Die Kompetenz, die Gestaltungs- und Entstehungsprozesse (zumindest im Ansatz) in den Dingen sehen zu können – was mit dem Begriff „Design Literacy“⁵ beschrieben werden soll –, soll als Kernkompetenz für nachhaltige Entwicklungsprozesse herausgestellt werden.

Als Basis für dieses Vorhaben schien eine Untersuchung des Designbegriffs (Abbildung 1) unumgänglich, da sich auf Grund seiner Mehrdeutigkeit kaum widerspruchsfrei über Design schreiben lässt. Es geht weniger darum, eine bestimmte Bedeutung von Design – im Sinne einer Definition – zu profilieren, sondern vielmehr um den Versuch, den Umstand der Mehrdeutigkeit des Wortes zu *beschreiben* und zu untersuchen, um auf grundlegende Widersprüche und Missverständnisse beim Gespräch über Design hinzuweisen. In der Designtheorie wird die Polysemie des Designbegriffs zwar häufig erwähnt (z. B. bei Walker 1992, S.35), aber dennoch zu wenig berücksichtigt, was diesen Teil des Vorhabens zu einem wichtigen Beitrag der Grundlagenforschung im Design werden lässt. Die intensive sprachliche Auseinandersetzung ist auch vor dem Hintergrund zu betrachten, dass das Promotionsvorhaben im Bereich der Designwissenschaft an der Folkwang Universität der Künste – die als eine der wenigen Kunsthochschulen in Deutschland das Promotionsrecht hat – angesiedelt ist und am Fachbereich Gestaltung der akademische Grad *Doktor*in der Philosophie* (Dr. phil.) vergeben wird.

⁵ Der Begriff „Design Literacy“ wurde 1997 durch den Grafikdesigner Steven Heller eingeführt, der jedoch bereits in der zweiten Auflage seines gleichnamigen Buches große Teile seines ursprünglichen Konzepts widerrufen hat (Heller 2004). Grundlage für diese Arbeit sind neuere, erweiterte Verständnisse des Begriffs, wie sie von Christopher Pacione, Ingvi Gjerdrum Maus oder Liv Merete Nielsen diskutiert werden (Pacione 2010, Maus 2019, Nielsen et al. 2019).

Abbildung 1: Die Polysemie von „Design“ – ein Wort zwischen Abstraktum und Konkretum



Quelle: Eigene Darstellung, Folkwang Universität der Künste

Als Basis für dieses Vorhaben schien eine Untersuchung des Designbegriffs (Abbildung 1) unumgänglich, da sich auf Grund seiner Mehrdeutigkeit kaum widerspruchsfrei über Design schreiben lässt. Es geht weniger darum, eine bestimmte Bedeutung von Design – im Sinne einer Definition – zu profilieren, sondern vielmehr um den Versuch, den Umstand der Mehrdeutigkeit des Wortes zu *beschreiben*, um auf grundlegende Widersprüche und Missverständnisse beim Gespräch über Design hinzuweisen. In der Designtheorie wird die Polysemie des Designbegriffs zwar häufig erwähnt, aber dennoch zu wenig berücksichtigt, was diesen Teil des Vorhabens zu einem wichtigen Beitrag der Grundlagenforschung im Design werden lässt. Die intensive sprachliche Auseinandersetzung ist auch vor dem Hintergrund zu betrachten, dass das Promotionsvorhaben im Bereich der Designwissenschaft an der Folkwang Universität der Künste – die als eine der wenigen Kunsthochschulen in Deutschland das Promotionsrecht hat – angesiedelt ist und am Fachbereich Gestaltung der akademische Grad *Doktor*in der Philosophie* (Dr. phil.) vergeben wird.

2.2 Thesen

Im sogenannten „anthropozänen Zeitalter“⁶ trifft die Frage der Verantwortung die Disziplinen des Designs ebenso im Sinne ihrer potenziellen Mitschuld am Klimawandel wie im Sinne ihrer

⁶ Der Begriff des „Anthropocene“ wurde von Paul J. Crutzen und Eugene F. Stoermer vorgeschlagen, um das Zeitalter zu beschreiben, in dem die Aktivitäten des Menschen als zentraler Einfluss in der Geologie und Ökologie zu beobachten sind (Crutzen et al. 2000, S.17f.). Kritik an dem Begriff findet sich zum

Potenziale und Pflichten die „Große Transformation“ (WBGU 2011) mitzugestalten. Ernst Ulrich von Weizsäcker stellte daher einst die Frage, ob „Designer Teil der ökologischen Lösung oder Teil des ökologischen Problems“ sind und befand: „Typischerweise sind sie eher Teil des Problems“ (Schmidt-Bleek et al. 1995, S.5). Spätestens seit dem gestiegenen öffentlichen Umweltbewusstsein der 1970er Jahre stellen sich Designerinnen und Designer auch selbst Fragen zu den sozialökologischen Folgen ihrer Arbeit (Papanek 2009; Fuller et al. 2013; Fuller 1981) und urteilen mitunter zynisch: „Es gibt Berufe, die mehr Schaden anrichten als der des Industriedesigners, aber viele sind es nicht.“ (Papanek 2009, S.7). Dabei sollten wir uns mit pauschalen Schuldzuweisungen ebenso zurückhalten wie mit dem Postulat Design könne die Welt retten; führen solche Polemiken doch eher zu Polarisierungen als zu praktikablen Ansätzen. Während die Antwort auf die Frage, ob Design dazu beitragen kann, die sogenannte „nachhaltige Entwicklung“ zu befördern von vielen Vertretenden der Design-Disziplinen tendenziell bejahend ausfallen wird, wäre ein entschlossenes „It depends!“ oftmals die ehrliche und differenzierte Antwort. Denn die Praxis des Designs ist an zahlreichen Bedingungen geknüpft und das, was uns im Alltag als Ergebnisse des Designs – beispielsweise in Form von Produkten oder Dienstleistungen – begegnet, offenbart uns mit Blick auf seine Entstehungen ein komplexes Beziehungsgeflecht aus – um es in den Worten Bruno Latours zu sagen – „Menschen [...] und nicht-menschlichen Wesen“ (Latour et al. 2016, S.11).

Wenn wir uns Gestaltungsprozesse anschauen, treffen wir auf zahlreiche Akteure und es entfaltet sich ein Netz aus Interessen, Gesetzen, Normen, Pflichten, Traditionen, Werten, Konventionen, Annahmen, Erwartungen, Spekulationen, Vorgaben, Intentionen, Investitionen, Vorstellungen, Wünschen und Mythen. Und diese „metaphysischen“ Bedingungen sind verwoben mit physischen Bedingungen – mit Dingen. Wir begegnen Lager- und Produktionshallen, Maschinen, Robotern, Werkzeugen, Transportfahrzeugen, Unternehmenszentralen, Showrooms, Büroeinrichtungen, Verpackungen, Geschäftspapieren, Katalogen, Messeständen und vielen anderen Dingen, die als materialisierte Bedingungen ebenso gestaltgebend auf Designprozesse einwirken können wie sie potenziell durch Design verändert werden können.

Um zu begreifen, welche Konflikte und Hindernisse sich beim Versuch auftun, Nachhaltigkeitsziele – wie die von der UN formulierten Sustainable Development Goals (SDGs) – beim Gestalten zu verfolgen oder gar verwirklichen zu wollen, sollten die Bedingungen und Abhängigkeiten studiert werden, unter und mit denen gestaltet wurde und wird. Gestaltung ist immer *bedingt*, immer *abhängig*; und sofern sie kraftvoll sein und berühren soll, müssen Abhängigkeitsverhältnisse und Komplizenschaften⁷ wohl oder übel eingegangen werden. Auf gewisse Bedingungen werden wir uns einlassen müssen, denn etwas in vollständiger Isolation zu Bestehendem hervorbringen zu wollen, wäre wohl weder gestaltbar noch würde etwas oder jemand damit erreicht.

„Das, was wir gestalten, entsteht nicht voraussetzungslos. Unser Leben unterliegt Bedingungen. Wir entscheiden nicht frei, sondern bewegen uns in einem Feld von Normen, Werten, Prägungen. Die von uns erzeugten Dinge [...] sind diesen Bedingungen unterworfen. Diese

Beispiel bei Donna Haraway, die die anthropozentrische Sicht für überholt hält und darüber hinaus auf den blinden Fleck hinweist, dass aufgrund von systemischen Ungerechtigkeiten, Imperialismus und Rassismus, nicht alle Menschen gleichermaßen für den Klimawandel verantwortlich sein können. Haraway hält unter anderem den Begriff „Capitalocene“ für treffender, um zu beschreiben, welche Kräfte des heutigen Zeitalters den Klimawandel maßgeblich beeinflussen (Haraway 2015, S.159–165).

⁷ Wie man Komplizenschaft ins Positive gewendet als Form der Kollektivierung in Kunst, Wissenschaft und Wirtschaft betrachten kann, hat Gesa Ziemer dargelegt (Ziemer 2013).

Bedingungen sind in der Welt, in die wir geworfen sind, gegeben – und werden durch das Design, das wir projektierend der Welt entgegenwerfen, verändert“ (von Borries 2016, S.16).

Design konstituiert sich somit stets durch gewisse Rahmenbedingungen, die im Rahmen des Gestaltungsprozesses jedoch nicht bloß affirmativ berücksichtigt werden, sondern zum großen Teil überhaupt erst ermittelt und im gleichen Zuge auf Gültigkeit überprüft werden. So werden durch Design stets auch die Bedingungen für zukünftige Gestaltungsprozesse beeinflusst. Ähnlich wie Friedrich von Borries beschrieb es 30 Jahre zuvor auch der Biochemiker und Systemforscher Frederic Vester:

„Einer Änderung unseres Denkens und Handelns [...] steht weniger der Mangel an geistigen und technischen Möglichkeiten entgegen als vielmehr ein ungeheurer Ballast an Traditionen und Tabus, an Lehrmeinungen und Dogmen. Obwohl keineswegs genetisch verankert, wurden sie doch von Generation zu Generation als unverrückbare „Wahrheiten“ weitergegeben. Eine der wichtigsten Aufgaben in Richtung eines neuen Denkens wird daher sein, die eigentliche Natur jener Normen zu analysieren. Es gilt, die Scheinkonstanten unter ihnen zu erkennen, die – abgesehen von der Tatsache, daß sie unsere festgefahrene Situation zum Teil mitverschuldet haben – mit unserer heutigen Realität nicht mehr das geringste zu tun haben“ (Vester 1986, S.456).

Für das Design gilt also: Das Blatt ist nie weiß. Überall begegnen uns Bedingungen, „Scheinkonstanten“ und *Pfade*, die wir fortschreiten oder verlassen können; Anknüpfungspunkte um das Bestehende mit dem Möglichen zu verweben. Aber die Möglichkeiten sind immer bedingt und nicht alles was möglich, richtig oder notwendig erscheint – mag es noch so dringend oder wohl intendiert sein –, lässt sich unmittelbar realisieren. Jede Veränderung tritt in Konkurrenz zu Bewährtem. So wie sich individuelles Handeln und die Struktur sozialer Systeme in der Strukturationstheorie nach Anthony Giddens wechselseitig bedingen und herstellen (Giddens 1984), sei für das Design folgende These erhoben:

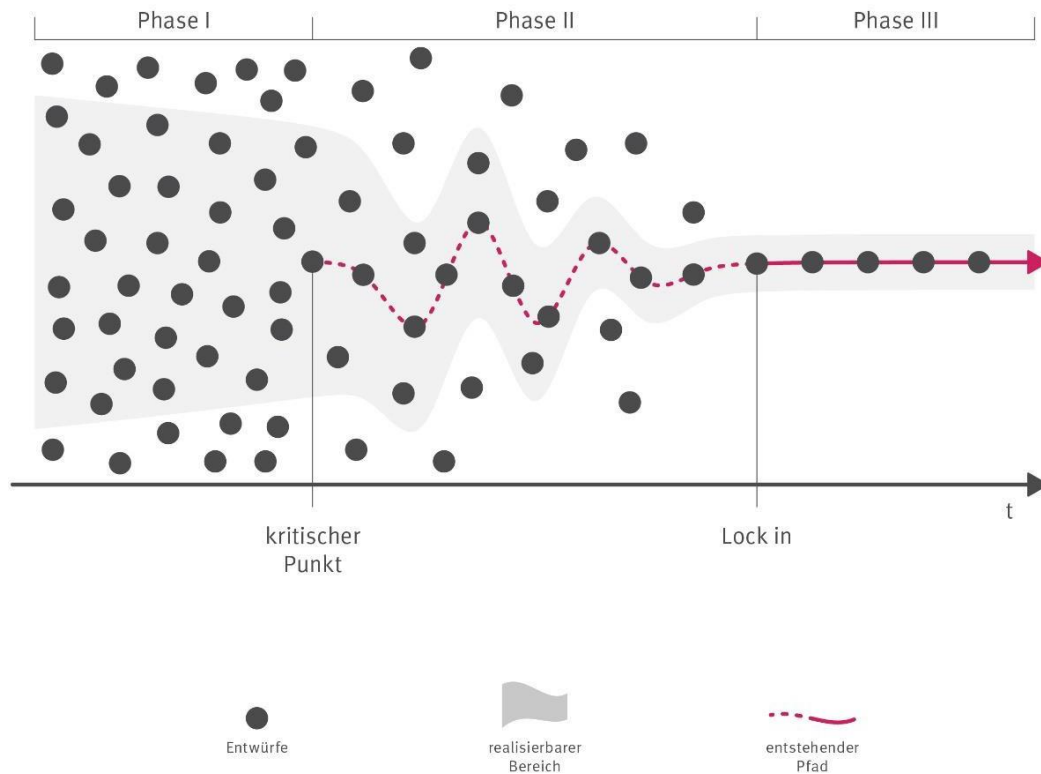
Gestaltbarkeit (Handeln) und bereits Gestaltetes (Struktur) bedingen sich.

Das, was gestaltbar ist, ist weder bedingungslos, noch allein durch seine jeweiligen Rahmenbedingungen determiniert. Die Bedingtheit von Gestaltbarkeit und Gestaltetem findet sich auch in der Theorie der „Pfadabhängigkeit“ wieder. Als Paradebeispiel wird oft die QWERTY-Tastatur (David 1985, S.332–37) angeführt, die sich als Relikt der Schreibmaschine – bei der diese spezifische Buchstabenanordnung aus mechanischen Gründen vorteilhaft war – auch bei Computertastaturen durchgesetzt hat, obwohl man den alten mechanisch bedingten Abhängigkeiten nicht mehr hätte folgen müssen und es ergonomisch bessere Alternativen wie die DVORAK-Tastatur gäbe. Die QWERTY-Tastatur war zur Einführung des Computers jedoch bereits so etabliert, dass weder die nicht mehr gegebenen mechanischen Bedingungen noch die Aussicht auf eine verbesserte Ergonomie als Gründe ausgereicht haben, um sie zu verändern. So bleiben viele Dinge trotz ihrer grundsätzlich vorstellbaren Veränderbarkeit und Nicht-Notwendigkeit (Kontingenz) schlichtweg deshalb so wie sie sind, weil sie bereits *sind*.

Die Entstehung von Pfadabhängigkeiten geschieht laut Sydow et al. (Sydow et al. 2009, S.689–709) über drei Phasen. In der ersten Phase existiert eine große Vielfalt an Möglichkeiten und es herrschen fast chaotische Verhältnisse, die es nahezu unmöglich machen vorhersagen zu können, welche Optionen sich durchsetzen werden. Sydow et al. betonen in der ersten Phase den Aspekt der Kontingenz: „Phase I should build on a historically framed or imprinted contingency and, therefore, neither on the assumption of determinacy nor on that of completely unrestricted choice“. Mehr oder weniger willkürlich kommt es in der zweiten Phase zur „gradual emergence of an organizational path“ und schon jetzt haben es Alternativen abseits des sich formierenden Pfades sehr schwer, sich noch zu behaupten. Das emergente Durchsetzen einzelner Optionen

leitet schließlich durch einen „Lock in“ die dritte Phase ein und ein Pfad, der alle weiteren Entwicklungen dominiert, ist entstanden. Dieses Phänomen lässt sich nicht bloß bei Produkten am Markt, sondern auch bei der Entstehung von Produkten innerhalb von Entwurfsprojekten beobachten (Abbildung 2).

Abbildung 2: Die Entstehung eines Pfades im Entwurfsprojekt



Quelle: Eigene Darstellung, adaptiert von Sydow et al. 2009, S.692

In dem vom Borderstep Institut von 2015 bis 2017 durchgeführten Projekt „Evolution2Green“ wurden Pfadabhängigkeiten sehr breit definiert:

„Der Begriff Pfadabhängigkeit beschreibt, dass ein Ereignis von vorangegangenen Ereignissen oder bislang üblichen Denk- und Verhaltensweisen abhängig ist. Das Konzept der Pfadabhängigkeit besagt allgemein, dass eine kausale Wirkung von früheren Ereignissen der Ereigniskette A, B, C, D, E ... auf spätere vorliegt“ (Fichter et al. 2018, S.3).

Ferner werden fünf verschiedene Formen der Pfadabhängigkeit unterschieden: (1.) Rechtliche, (2.) ökonomische, (3.) infrastrukturelle und technologische, (4.) organisationale und (5.) nutzerbezogene Pfadabhängigkeiten.

Dieser differenzierte Blick auf Pfadabhängigkeiten erweist sich aus designwissenschaftlicher Perspektive nicht bloß für die Betrachtung von Mechanismen des Marktes, sondern vor allem auch für die Erforschung der Strukturen und Dynamiken von Designprozessen als aussichtsreicher Ansatz, ermöglicht er doch eine komplexere Erörterung der Abhängigkeitsverhältnisse und Bedingungen gestalterischer Praktiken. Denn wie David schon

für die QWERTY-Tastatur feststellte: „[I]t is sometimes not possible to uncover the logic (or illogic) of the world around us except by understanding how it got that way“ (David 1985, S.332).

So lässt sich das Schaubild von Sydow et al. auch als Abbild eines Designprozesses interpretieren. Der Prozess eines sich formierenden Artefakts, das sich im Designprozess unter Zeit- und Kostendruck gegenüber anderen Varianten durchsetzt, weist jedenfalls große Parallelen zu dem Prozess auf, in dem sich das gleiche Artefakt (als Ergebnis eines Designprozesses gegenüber anderen Ergebnissen aus anderen Designprozessen) am Markt durchzusetzen versucht. In Designprozessen treffen Designer*innen ebenfalls auf Pfade unterschiedlichster Art, die den Möglichkeitsraum für Interventionen maßgeblich bedingen. Durch die gestalteten Interventionen werden diese Bedingungen gefestigt, aber auch neue Bedingungen für die Gestaltbarkeit zukünftiger Interventionen geschaffen.

So wären bei der Gestaltung eines Produkts die Produkttypologie, typische Farbgebungen, etablierte Materialien und die damit einhergehenden Herstellungsverfahren ebenso als Pfadabhängigkeiten zu nennen wie beispielsweise die bisherigen Vertriebs- und Vermarktungswege. Auf der Seite der Nutzenden gilt es unter anderem vertraute Produktsemantiken, soziale Praktiken, formal-ästhetische Gewohnheiten und kulturelle Gepflogenheiten als Pfadabhängigkeiten zu erkennen. Designerinnen und Designer verhandeln darüber, welche Pfade fortgeführt, gekappt, miteinander verknüpft oder initiiert werden, sind in diesem Aushandlungsprozess jedoch bei weitem nicht die einzigen, geschweige denn mächtigsten, Akteure; schon Wilhelm Braun-Feldweg nannte den Designer „einen Mann unter anderen“ (Braun-Feldweg 1966, S.47f).

Ob das oben aufgeführte Modell aus fünf Arten der Pfadabhängigkeit für Designprozesse anwendbar ist, gilt es zu erforschen, denn jeder Designprozess eröffnet ein einzigartiges Geflecht von Abhängigkeitsverhältnissen. Augenscheinlich fehlen die für das Design immanenten ästhetischen, kulturellen oder auch ethischen Pfadabhängigkeiten. Der Prozess des Gestaltens wird aufdecken, welche spezifischen Pfadabhängigkeiten innerhalb eines Designprozesses gestaltgebend auf die Ergebnisse einwirken, denn Design untersucht als *forschende Praktik* stets die *Möglichkeiten der Veränderung*, woraus sich folgende These ergibt:

Design erforscht Gestaltbarkeit.

Der Designwissenschaftler Wolfgang Jonas beschreibt anhand seines *Generic Design Process Model* (Jonas 2007, S.199), in welcher Weise Design in einem größeren sozio-kulturellen Evolutionsprozess agiert; laut Jonas im Bereich der Variation und weniger im Bereich der (Re-) Stabilization (Jonas 2007, S.254). Wobei hier der Gedanke eingeworfen sei, dass durch jede gestaltete Intervention immer auch bestimmte bestehende Pfade *stabilisiert* werden; zum Beispiel auch dann, wenn Designerinnen und Designer zu dem Ergebnis kommen, *nichts zu verändern*. Ein Beispiel hierfür wäre die erfolgreiche Nicht-Umgestaltung des Place Léon Aucoc in Bordeaux durch das Architekturbüro Lacaton et Vassal im Jahr 1996 – „even ‚not making‘ is still ‚acting‘“ (Findeli 2001, S.14).

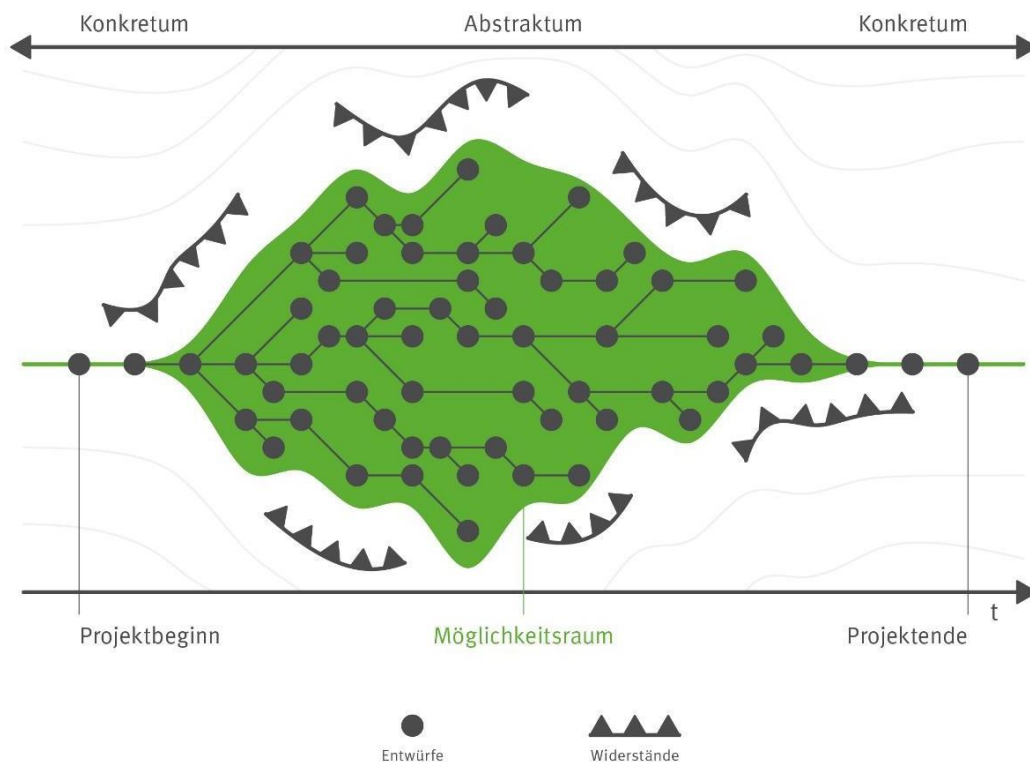
Jonas argumentiert, dass sich der Designprozess im Bereich der Variation in drei im Kreis verlaufende Phasen gliedern lässt: Analysis (A), Projection (P) und Synthesis (S). Wobei das, was als synthetisiertes Ergebnis aus dem Designprozess hervorgeht, stets projektierend in die Welt geworfen wird und großen Unsicherheiten ausgesetzt ist, sodass die sich real entfaltenden Effekte stets andere sein werden, als angenommen wurde. Jonas fasst es wie folgt zusammen:

„The theory of socio-cultural evolution seems to be a useful framework to denote the unpredictability of project outcomes, and thus the limits of causal explanations, in a

scientific manner. This is not to deny that designers are able intentionally to design and manufacture a new teapot, a new aircraft, or a new constitution. But these designs are temporal interventions into evolutionary processes. Most results disappear, a few are integrated into the further process. Failures as well as successes become part of the socio-cultural archive of humankind“ (Jonas 2007, S.195).

Aufbauend auf den Überlegungen von Jonas zeigt die Abbildung 3 die schematische Form eines Designprozesses als einen (zeitlich) begrenzten „Möglichkeitsraum“, der durch die Gestaltung von Varianten und Variationen gleichermaßen hergestellt wie erschlossen wird (basierend auf Jessen et al. 2021). Jede gestalterische Intervention (Skizzen, Vormodelle, Prototypen, etc.) hat stets ein spekulatives Momentum, fordert die Widerstände der Realität heraus und deckt gestalterische Freiräume auf. Visualisierte man eine Reihe unterschiedlicher Designprozesse nach diesem Schema, würden z. B. je nach Projektdauer und Iterationsdichte in Abhängigkeit zu den umliegenden Bedingungen und Anforderungen unterschiedliche Formen sichtbar werden.

Abbildung 3: Schematische Darstellung eines evolutionären Designprozesses als Möglichkeitsraum



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf Jessen et al. 2021

„Ein Entwurf gleicht einem Netz, das der Verstand über die Umstände auswirft, um sie zu verändern“ (Flusser 2016, S.90). Veränderungsprozesse finden laut Kora Kristof „in einem komplexen und dynamischen System statt, in dem vielfältige Akteure mit dem Ziel zusammenwirken, die Veränderungsidee voranzubringen oder sie zu verhindern“ (Kristof 2010, S.124). Jonas betont daher, dass wir „andauernd und immer wieder neu bedenken [sollten] was es bedeutet, gezielt in unsere komplexen sozialen, kulturellen und natürlichen Umgebungen zu

intervenieren“ (Jonas 2018a, S.17). Es ist daher Vorsicht geboten, wenn man meint, man könne mit Design Nachhaltigkeit als Ziel „erreichen“. Denn wie Herbert A. Simon es trefflich formulierte: „The idea of final goals is inconsistent with our limited ability to foretell or determine the future“ (Simon 1981, S.187). These:

Design befragt Gestaltetes auf seine Gültigkeit und Angemessenheit; und unterbreitet Veränderungsvorschläge.⁸

Bald ein halbes Jahrhundert nach Erscheinen des Berichts „The Limits of Growth“ (Meadows et al. 1972) hat sich unser Konsumverhalten noch immer nicht an die Realität der planetaren Grenzen angepasst und der Kapitalismus scheint sein Wesen als Wachstumsökonomie beizubehalten. Befriedigten Produkte einst Bedürfnisse, so stützt sich laut Gernot Böhme das ökonomische Wachstum heute auf Begehrnisse, welche jedoch nicht befriedigt, nur beruhigt, werden können (Böhme 2016, S.10f.). Der Wunsch nach Gestaltung, die sich allein an den Bedürfnissen der Menschen orientiert, hat mit dem Ansatz des Human-Centered-Design die Diskurse der letzten Jahre bestimmt, aber die Vorstellung, es gäbe Bedürfnisse, die im Designprozess eindeutig ermittelbar sind und durch Gestaltetes unmittelbar befriedigt werden (können), hat etwas Naives und Anmaßendes zugleich. Bedürfnisse und Gestaltetes verhalten sich in keine Richtung deterministisch zueinander, sondern entwickeln sich *dialogisch* fortwährend weiter. So gab der Bundesgerichtshof 2013 einem Kläger recht, der sich durch eine Unterbrechung seines Internetzugangs in der materialen Grundlage seiner Lebenshaltung eingeschränkt sah. Der BGH verglich die Auswirkungen einer Unterbrechung des Internetzugangs „in ihrer Intensität mit dem Fortfall der Möglichkeit, ein Kraftfahrzeug zu nutzen“ (BGH 2013, S.12). Die Möglichkeiten, die sich durch Kraftfahrzeuge und das Internet für viele Menschen ergeben haben, entstanden erst durch die Existenz und den Gebrauch der jeweiligen Produkte und Dienstleistungen und waren vor der Existenz der Dinge als Bedürfnis allenfalls zu erahnen. Durch den Gebrauch entsteht ein Brauchen, ein Bedarf. Da Gebrauch jedoch immer mit Interpretationen, Umdeutungen und Aneignungen einhergeht (Brandes et al. 2009), entspricht er nie ganz dem im Designprozess Intendierten und Antizipierten, sodass neue Ideen und Anforderungen aufkommen, die im Ergebnis die Gestalt der Dinge wieder verändern. Ob nun die Designer*innen oder die Nutzenden bei diesem „Spiel“ das Sagen haben, lässt sich kaum feststellen, zumal noch unzählige weitere Akteure und Faktoren gestaltgebende Rollen spielen. Von der Vorstellung, Design als Instrument der Problemlösung zu engagieren, sollten wir uns ebenso verabschieden, wie vom Glauben an lineare Kausalitäten.

Während innerhalb einzelner Projekte Design durchaus als planerisches Instrument wahrgenommen wird und die Illusion aufkommen mag, dass sich Intendiertes tatsächlich realisieren lässt, muss aus einer zeitlich wie räumlich vom einzelnen Designprozess distanzierten Perspektive nüchtern festgestellt werden, dass sich die Ergebnisse des Designs keinesfalls allein im Sinne ihrer Intentionen entfalten und weniger durch das Prinzip eines aufgehenden Plans als durch das Prinzip der Emergenz zu entstehen scheinen. Das emergente Entstehen von Gestaltetem und die komplexen Wechselwirkungen, Interpretationen und Aneignungen, die Gestaltetes stets erfährt, nagen an der Annahme, man könne durch Design das 1987 im Brundtland Report formulierte Versprechen einlösen, „die Bedürfnisse der Gegenwart [zu befriedigen], ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“ (World Commission on Environment and Development 1987).

⁸ Diese These ist selbstverständlich etwas überspitzt und idealisiert formuliert, sind Designerinnen und Designer oftmals nicht in der Position so grundlegend zu analysieren, urteilen und intervenieren wie es aus Gründen der Ressourcenschonung und des Klimaschutzes nötig wäre.

Die Vorstellung, Design könne heutige und zukünftige Bedürfnisse befriedigen, liegt ein Determinismus zu Grunde der ebenso streitbar ist, wie die einseitige Vorstellung, Design würde „Nutzen stiften“. Damit soll nicht gesagt werden, dass Design nicht etwa Ergebnisse hervorbringen könnte, die sich für Menschen als nützlich erweisen mögen, sondern es soll auf ein komplexeres Verhältnis zwischen den Dingen, dem Bedürfnis nach ihnen und ihrem Nutzen hingewiesen werden. Andreas Dorschel formuliert dieses Verhältnis wie folgt: „Zwar schaffen sich neue Zwecke neue Mittel. Aber umgekehrt kommt man auf manche Zwecke erst, weil einem entsprechende Mittel angeboten werden.“ (Dorschel 2003, S.18) Welche Angebote uns die Dinge unterbreiten, ist nicht allein durch Design zu bestimmen, sondern hängt davon ab, welche Angebote wir in ihnen entdecken⁹. Nutzen ist keine dem Gegenstand inhärente Eigenschaft, sondern entsteht erst durch die Nutzenden, deren Interpretationen, Aneignungen und Umdeutungen. These:

Nutzen entsteht „dialogisch“ zwischen Menschen und Gestaltetem.

In dem Aufsatz „Über die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Reden“ (von Kleist et al. 2004) beschreibt Heinrich von Kleist, dass das Aussprechen eines Gedankens diesem überhaupt erst zu seiner Entstehung verhilft. Er selbst wandte dieses Vorgehen methodisch an, um beispielsweise Probleme der Mathematik zu lösen; wobei seine Zuhörenden den Inhalt seiner Überlegungen dabei nicht zwingend verstehen mussten. Es war ausreichend, dass er selbst hörte, was er sagte. Das Ausformulieren eines Gedankens formt und vervollständigt ihn überhaupt erst; zumindest, wenn wir ihn sprachlich ausdrücken oder kommunizieren wollen. Bei der Entwurfstätigkeit und den dazugehörigen Praktiken wie dem Zeichnen oder dem Prototyping passiert ganz ähnliches wie beim Akt des Sprechens. Es verhält sich keinesfalls so, dass eine Idee lediglich aus dem Kopf (oder Bauch) heraus auf das Papier gebracht oder unmittelbar materialisiert wird. Wäre dem so, könnte man sich den gesamten Designprozess im Grunde sparen und gleich zur „Umsetzung“ der Idee springen. Es ist jedoch vielmehr so, dass ein dialogisches Verhältnis zwischen dem Designer und seinen Zeichnungen und Modellen entsteht, indem die durch den Designer erstellten Formalisierungen, Visualisierungen, Materialisierungen, etc. begutachtet werden und die nächsten Schritte beeinflussen. Ranulph Glanville beschreibt diesen Prozess wie folgt:

„In the case of design, the central act of designers is claimed to be a form of conversation that takes place largely with the self, via paper and pencil. This central act is argued to be circular, and the workings of this circularity are explored – in part as a way of introducing novelty“ (Glanville 2007, S.1200).

Varianten zu bilden, bildet daher ein zentrales, wenn nicht gar das zentrale Element von Designprozessen und designerischen Denkens; ein Denken in Alternativen, in Potenzialen, in Möglichkeiten¹⁰; die Erkenntnis der Nicht-Notwendigkeit alles Bestehenden (Kontingenz). So ließe sich der Designprozess auch als ein Prozess unentwegten Scheiterns beschreiben, ein Prozess, in dem sich durch Falsifikation¹¹ eine Gestalt formalisiert. Man entwirft permanent

⁹ Seit der Einführung des Konzepts der *Affordances* (Gibson 1979) gibt es eine fortwährende Debatte darüber, inwieweit die von Objekten angeregten Nutzungsangebote als objekt-immanente Eigenschaften verstanden werden können, bzw. in welchem Maße sie nur in Abhängigkeit zu vielfältigen anderen Faktoren (wie z.B. kulturelle, räumliche, zeitliche oder kontextuelle Bedingungen) entstehen.

¹⁰ Annette Geiger beschreibt diesen Aspekt als das „Andersmöglichsein“ (Geiger 2018).

¹¹ Für Karl R. Popper war die Methode der Falsifikation die einzige Methode, die tatsächlich zur Stärkung einer Theorie führen kann, während der Versuch eine Theorie durch Induktion zu bestätigen streng genommen immer nur für den Einzelfall gilt und daher oftmals zu pseudo-wissenschaftlichen Vorgehen führt (siehe Popper 1994). Diese Referenz sei jedoch nicht so verstanden, dass der Designprozess per se wissenschaftlich im Sinne Poppers wäre, geht es hier doch vielmehr um die Analogie in der Art des Vorgehens. Im Designprozess entstehen Skizzen, Modelle, Zeichnungen, Prototypen nicht primär, um eine

das, was nicht das Ergebnis ist, um das Ergebnis zu finden. Man rennt in unzählige Sackgassen, um irgendwann einen Weg aus dem Labyrinth zu finden (um eine nicht ganz saubere Metapher zu bemühen). Während sich dabei die Naivität unerfahrener Designer gleichermaßen vor- wie nachteilig auf das Finden neuer Wege auswirken kann, können sich erfahrene Designer einige Irrwege sparen, laufen jedoch auch Gefahr aufgrund ihrer Routinen, alternative Routen zu übersehen.

Unabhängig von Erfahrung formt sich, meist über zahlreiche Iterationen, ein Gedanke zu etwas Konkretem. Nun ist dieses Konkrete jedoch mit dem Abschluss der Arbeit des Designers – oftmals vertraglich bestimmt oder markiert durch so etwas wie einen Produkt-Launch – weniger abgeschlossen als man bisweilen meint. Nicht bloß, weil die Arbeit des Designers dann noch weiter gehen kann, sondern vor allem, weil das Gestaltete in der Phase des Nutzens und darüber hinaus weitere Verfertigung, Interpretation, Aneignung und Umdeutung durch die Nutzenden erfährt. So blickt der Designer – wie Eltern auf das erwachsene Kind, das das Haus verlassen hat –, auch dann noch auf das, was er geschaffen hat, wenn dessen grundlegende Veränderung längst nicht mehr in seinen Händen liegt. Dazu gehört gegebenenfalls auch die schmerzliche Erkenntnis, dass man Gestaltetes in die Welt geworfen hat, welches sich dort auf Weisen entfaltet, die man weder intendiert noch bedacht hatte¹². Eine wichtige Aufgabe von Design besteht daher darin, sich mit der „Nachseite der materiellen Kultur“ (Sennett 2009, S.29) auseinanderzusetzen und eine kritische Reflexion von Fortschritt – und allem was sich „Innovation“ nennt – vorzunehmen. Mitunter verändert das Gestaltete die Gestaltenden nämlich in größerem Maße als sie selbst zur Veränderung ihrer Werke in der Lage sind. Um diesen Gedanken an einem populären Beispiel zu verdeutlichen, stelle man sich vor, wie die Designer*innen von Apple letztlich durch die Ergebnisse ihrer eigenen Arbeit verändert wurden, wie sich durch Smartphones soziale Praktiken, Kommunikation und Sprache, Intimität und Schönheitsideale verändert haben. War all das intendiert? War es überhaupt antizipierbar? These:

Design ist der Prozess, wenn aus einem forschen „Vielleicht?“ ein überzeugtes „Vielleicht!“ wird.

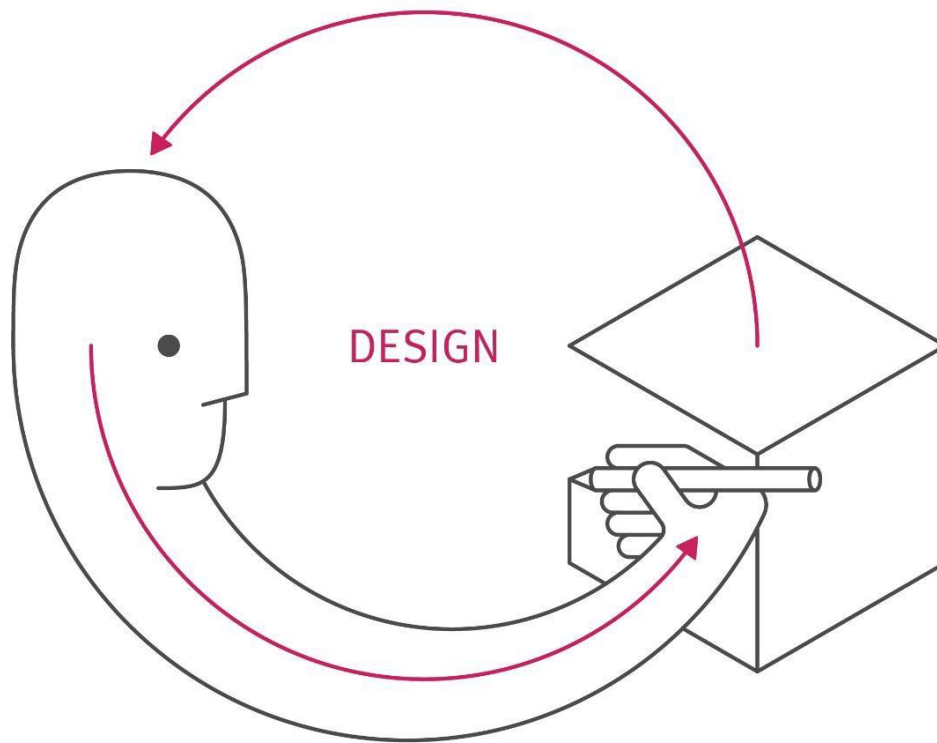
Beatriz Colomina und Mark Wigley beschreiben in ihrem Buch „Are we human?“ den Umstand, dass der Mensch gestaltet und dadurch permanent seine Umwelt und vor allem sich selbst verändert, als einen grundlegenden Unterschied zu anderen Spezies; als das Menschliche schlechthin (Colomina et al. 2016). Und das Gestaltete ist zwar von uns gestaltet, gestaltet uns jedoch nicht minder (Abbildung 4). Dass Gestaltetes bedingt vorhersehbare Effekte erzeugt, immer auch Ungewolltes, nicht Bedachtes und schlichtweg nicht Antizipierbares auslöst und darüber hinaus über die Zeit hinweg mit sich wandelnden Lesarten und Wahrnehmungen konfrontiert wird, steht zu dem Anspruch, Generationengerechtigkeit durch Design möglich machen zu können, tendenziell im Widerspruch. Wie soll ich wissen, was ich gestaltet habe,

Sache zu bestätigen, sondern um sie überhaupt erst herauszubilden. Bei der Variantenbildung finden immer Übertreibungen und Überzeichnung statt, um das zu finden, was *passt*.

¹² So beschrieb beispielsweise der britische Designer Jasper Morrison den Augenblick als er rund 40 von ihm entworfene Stühle in einem Pariser Café erblickte, die in ihrer knalligen pinken Farbe keinen größeren Kontrast zu ihrer Umgebung hätten erzeugen können, als Moment des Horrors.

bevor ich erfahre, was es (mit mir) macht? Oder wie Christopher Frayling es ausdrückte: „How can I tell what I am till I see what I make and do?“ (Frayling 1993, S.5).

Abbildung 4: Der kybernetische Kreis des Designs



...the designer designs something designs the designer...

Quelle: Eigene Darstellung

Wie aber lassen sich Design und Nachhaltigkeit verknüpfen? Design hat zunächst keinen Inhalt, denn es wird kein konstanter Gegenstand behandelt (Buchanan 1985, S.4–22). Im Design geht es um die Vernetzung unterschiedlichster Inhalte, um das Rearrangieren, um die Transformation, um die Interpretation, ggf. um die Provokation oder Spekulation, um das Abwägen, um das Erinnern, um das Umdenken, ganzheitliches Denken und die Erkenntnis, dass letzteres immer ein unerreichbares Ideal bleiben wird. Die Ergebnisse des Designs mögen von unterschiedlichster Art sein, aber sie spannen stets ein Netz aus materiellen und semiotischen Verbindungen (Latour 2015). Damit ist Design prädestiniert dafür, mit komplexen, multidisziplinären Problemen umzugehen, Wechselwirkungen zu erkennen und zwischen ungleichen Faktoren abzuwägen, Kompromisse einzugehen und trotz Ambivalenzen am Ende konkrete Lösungen, bzw. Interventionen, zu entwickeln. Ob sich „Nachhaltigkeit“ und „Design“ antagonistisch gegenüberstehen oder in einer gemeinsamen Agenda verschmelzen, hängt auch davon ab, was wir unter den beiden Begriffen verstehen. Wege aufzuzeigen, wie Letzteres in Theorie und Praxis gelingen könnte, ist ein erklärtes Ziel dieser Arbeit.

Der Nachhaltigkeitsbegriff führt im Design oft zur einseitigen Vorstellung es ginge hauptsächlich um Langlebigkeit oder Rezyklierbarkeit – und schon diese beiden Konzepte stehen potenziell im Widerspruch zueinander, wenn man versucht, sie bei der Produktgestaltung gleichermaßen zu

berücksichtigen. Auch ist kritisch zu hinterfragen, inwieweit ein Produkt überhaupt nachhaltig sein kann. So argumentieren Liedtke et al.: „Letzten Endes ist aber nicht das Produkt an sich nachhaltig, auch nicht etwaige Attribute wie Zerlegbarkeit oder Modularität“ (Liedtke et al. 2015, S.3). Laut Wolfgang Jonas geht es vielmehr darum, „to keep things in flux, to keep options open“ (Jonas 2018b, S.95). Statt des irreführenden Begriffs der Nachhaltigkeit müssten wir eigentlich über den *Erhalt* von *Wandlungsfähigkeit* oder *Gestaltbarkeit* sprechen. Wir sollten so designen, dass Design möglich bleibt. Wenn man ein Ziel formulieren wollte, dann wäre es: Design!

Das populäre Zitat aus dem Brundtland-Report – „die Bedürfnisse der Gegenwart zu befriedigen, ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre Bedürfnisse nicht befriedigen können“ (Hauff 1987) – lässt sich demzufolge zu folgender These umformulieren:

Wir sollten heute so gestalten, dass zukünftige Generationen noch gestalten können.

Cameron Tonkinwise definiert Nachhaltigkeit daher wie folgt: „Nachhaltigkeit ist weniger ein wissenschaftlich definierbarer Zustand als eine Situation, die dem Menschen die Möglichkeit gibt, an der Gestaltung der Zukunft mitzuwirken – und nicht lediglich über Entscheidungen informiert zu werden, die Experten getroffen haben. Das Ziel eines nachhaltigen Design ist somit, ein «defuturing» zu vermeiden, wie es Tony Fry genannt hat. Das 20. Jahrhundert war von einem solchen Design bestimmt, das alternative Möglichkeiten behinderte und die Chancen der Zukunft begrenzte. Nachhaltiges Design ist mit den Worten Manzini «error-friendly» – es besteht aus Entwürfen, die es ermöglichen, für eine alternative Zukunft umgestaltet zu werden“ (Erlhoff et al. 2008, S.288).

Ein grundsätzliches Dilemma besteht, wie bereits eingangs beschrieben, darin, dass Ziele wie Ressourcenschonung und Klimaschutz im professionellen Kontext schlichtweg nicht zum Auftrag von Designer*innen gemacht werden. Selbst wenn sie sich solche Ziele selber zur Agenda machen, sind sie auf Grund der Bedingungen, die Design als Berufspraxis konstituieren, oftmals nicht in der Position die notwendigen systemischen Veränderungen anzuregen. Das Berufsfeld Design ist als Kind der im Zuge der Industrialisierung vollzogenen Arbeitsteilung scheinbar unzertrennlich mit der Welt des Konsumierens und Produzierens verwandt. Doch was geschieht, wenn Designer*innen in der Forschung an Projekten arbeiten, in denen sich Akteurskonstellationen mit neuen Interessengefügen ergeben, die das Thema Nachhaltigkeit als programmatische Standardeinstellung in sich tragen? Dann wird es plötzlich möglich, befreit von bestehenden sozioökonomischen Strukturen an Vorschlägen für ein ressourcenleichteres Leben zu arbeiten. In Anlehnung an den von Uwe Schneidewind geprägten Begriff der ‚Zukunftskunst‘ lassen sich Zukunftsszenarien und konkrete Interventionen entwickeln, die das Thema Nachhaltigkeit nicht allein von der technologischen Innovation, sondern von der kulturellen Revolution ausgehend denken (Schneidewind 2018, S.21). Kulturelle Revolution meint in diesem Zusammenhang die nachhaltige Veränderung von Lebensstilen, bzw. ein Umgestalten gesellschaftlicher Normen und Handlungsmuster.

2.3 Methodik und weiteres Vorgehen

Die Methodik der Forschungsarbeit setzt sich aus einem Mix an Methoden zusammen, wobei drei Methoden besonders zu nennen sind:

- 1) Zeichnen, Skizzieren und Prototyping als Entwurfsmethoden,
- 2) Klassische Literaturrecherche und das Schreiben, sowie
- 3) (Experten-)Interviews.

Geplant sind ca. 12 Interviews mit Designerinnen und Designer, die jeweils 45 bis 60 Minuten umfassen. Zur Durchführung der Experteninterviews wurde ein Leitfaden für die Befragung erstellt, der fortwährend angepasst wird.

2.4 Fragestellung & Zielsetzung

Da es sich um eine kumulative Dissertation handelt, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen ist, sind im Folgenden die geplanten Veröffentlichungen beschrieben, die als referierte Artikel (Paper) in Journals gefasst werden können und als einzelne Bauteile der Promotion die Fragestellungen und Ziele widerspiegeln. Die jeweiligen Journal-Artikel können daher auch als einzelne Kapitel der Dissertation betrachtet werden. Am Ende des Vorhabens wird eine Synopse erstellt, die alle Artikel inhaltlich zusammenführt. Der Zeitplan ist dem kumulativen Vorgehen angepasst und auf das Einreichen der geforderten drei Artikel (laut Promotionsordnung der Folkwang UdK) fokussiert. Der jeweilige Review-Prozess wird direkt für die weitere Forschung als Qualitätssicherung genutzt.

Folgende Veröffentlichungen (Titel | Autor*innen) sind bereits erfolgt, geplant, bzw. in Arbeit:

2.4.1 Learning from Nail Design | Dustin Jessen & Christoph Tochtrop

Die Mehrdeutigkeit des Designbegriffs macht die wissenschaftliche Arbeit im Design nicht leicht. In der Benutzung des Wortes zeigt sich jedoch nicht bloß seine Ambivalenz, sondern auch die Auseinandersetzung um Deutungshoheit. Hier ist es fatal, wenn Designer*innen sich nicht zu Wort melden und Bedeutungen von Externen unreflektiert übernommen und vorgefertigte Rollen angenommen werden. Für das Projekt Nachhaltigkeit muss Design als Prozess verstanden werden, nicht allein als Kategorie, denn als Kategorie ist Design mitunter sehr nicht „entwerfend“ sondern „unterwerfend“ (von Borries 2016). Ob Design in der Lage ist ressourcenschonende Interventionen hervorzubringen, ist davon abhängig, wie das vorherrschende Verständnis und die damit einhergehende strategische Position von Design ist. Die empirische Grundlage für diesen Artikel entstand in einem Seminar an der Folkwang Universität der Künste, bei dem Studierende hunderte Beispiele alltagssprachlichen Gebrauchs des Wortes „Design“ (vorwiegend fotografisch) zusammengetragen haben. Es hat sich gezeigt, dass man vor allem von so vermeintlich problematischen Begriffen wie „Nail Design“ oder „Hair Design“ viel lernen kann, wenn man ihnen vorurteilsfrei begegnet. Der Artikel steht kurz vor der Einreichung bei einem wissenschaftlichen Journal.

2.4.2 Designing Beyond the Common Good – an Evolutionary Process between Speculation and Reality | Dustin Jessen & Simon Meienberg

In dem Artikel wird anhand von zwei Praxisbeispielen die Frage erörtert, inwieweit sich so etwas wie das „Gemeinwohl“ gestalten lässt? Kann man durch Design das Gemeinwohl als Ziel forcieren oder sollte man es als mögliches Ergebnis betrachten? Das Paper wurde auf der Konferenz des Swiss Design Networks „Design as Common Good“ am 25. – 26. März 2021 vorgestellt und in den Proceedings veröffentlicht¹³.

2.4.3 Welcome to the End of the Circle | Dustin Jessen & Christoph Tochtrop

Der Kreis ist eine omnipräsente Metapher in der Nachhaltigkeitsforschung und die Circular Economy entwickelt sich aktuell zum dominierenden wirtschaftspolitischen und auch gestalterischen Konzept. Dabei ist der Kreis auf Grund seines hohen Abstraktionsgrads sehr

¹³ Online verfügbar unter:

https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7749/file/7749_Jessen.pdf

anfällig für Fehlinterpretationen und gleichzeitig so stark idealisiert, dass das Ideal zur Dystopie zu werden droht. In dem Paper „Welcome to the End of the Circle“ werden alternative Formen und Metaphern auf ihr Potenzial hin untersucht, inwieweit sie besser geeignet wären, um die einzelnen Akteur*innen zu konkret umsetzbaren Handlungen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zu befähigen. Das Paper wurde auf der Konferenz „Colloque Albi-Nîmes 2021 Médiations Sémiotiques“ am 7. Juli 2021 vorgestellt und wird im Verlauf des Jahres in den Proceedings veröffentlicht. Darüberhinaus wurde die Arbeit an einer Übersetzung auf Deutsch begonnen und als Abstract zur Jahrestagung 2022 der deutschen Gesellschaft für Designtheorie und -forschung (dgtf) eingereicht.

2.4.4 Designing Futures with Pasts – Rediscovering and transforming abandoned paths of food preservation under today’s paradigm of sustainability | Christoph Tochtrop & Dustin Jessen

In dem Paper werden die Parallelen zwischen Design – im Sinne eines gestalterischen Prozesses – und Geschichtsschreibung beschrieben und die Methode des „Recyclings of Ideas“ erörtert. Vergangene Kulturtechniken und Technologien werden als kreatives Material aufgefasst, über dessen Reaktivierung und Transformation im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung neu verhandelt wird. Dies wird als Methode vorgestellt und am Beispiel des Projekts „Circular by Design“, das auf die Entwicklung eines kreislauffähigen Kühlschranks abzielt, angewandt. Die Methodenentwicklung fußt auf Modellen der Zukunftsforschung, welche insbesondere im Bereich spekulativer Designpraktiken und -theorien Einzug erhalten haben (Dunne 2013). Das Paper befindet sich aktuell im zweiten Review zum Special Call „Moving onward: Methodological explorations“ des Edinburgh Architecture Research Journal (EAR37).

2.4.5 Exaptation – A missing term in design theory | Dustin Jessen

Evolutionstheoretische Ansätze finden sich zuhauf in der Designtheorie wieder. So wünschte sich der italienische Designer Bruno Munari beispielsweise, dass Designer so gestalten würden, wie die Natur Dinge hervorbringt: „A designer tries to make an object as naturally as a tree puts forth a leaf. [...] Each object takes on its own form. But of course this will not be fixed and final because techniques change, new materials are discovered, and with every innovation the problem arises again and the form of the object may change“ (Munari 1971, S.31).

Wolfgang Jonas beschreibt die durch Design angetriebenen Veränderungen als „soziokulturellen Evolutionsprozess“, aber wie können evolutionstheoretische Ansätze zur Erschließung der vom Menschen erzeugten Dingwelt für das Projekt Nachhaltigkeit behilflich sein und wo stoßen diese Theorien auf das Design übertragen an ihre Grenzen. Insbesondere soll das Konzept der „Exaptation“ (Gould et al. 1982), in Abgrenzung zum weitaus bekannteren Konzept der Adaptation, unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit beleuchtet werden, was sich auf die Produktwelt übertragen in Form von *Umnutzung* und *Umdeutung* durch die Nutzenden zeigt. Es soll deutlich gemacht werden, dass die evolutionäre Entwicklung von Artefakten keinesfalls allein durch Designer*innen determiniert wird, sondern im Zusammenspiel von zahlreichen Akteur*innen geschieht. Ein systemischer und evolutionstheoretischer Blick auf Design soll helfen, um die Disziplin als beteiligte Akteurin in dem Umwälzungsprozess von materiellen Ressourcen zu reflektieren.

Der Artikel ist weitestgehend fertig geschrieben und wird im Laufe des Jahres bei einem wissenschaftlichen Journal zum Review vorgelegt.

2.4.6 Design Depends | Dustin Jessen & Prof. Dr. Christa Liedtke

„The introduction of dependency as a defining feature of architectural practice, and in particular the introduction of others into the processes and products of that practice, brings with it political and ethical dimensions. This in turn suggests a reformulation of aspects of practice; a move from the idea of architect as expert problem-solver to that of architect as citizen sense-maker; a move from a reliance on the impulsive imagination of the lone genius to that of the collaborative ethical imagination; from clinging to notions of total control to a relaxed acceptance of letting go” (Till 2013, 151).

Was Till aus architekturtheoretischer Sicht beschreibt, wird in diesem Paper mit Blick auf das Design ausgeführt. Auf welche Weise beeinflussen die am Gestaltungsprozess beteiligten Akteur*innen das zu Gestaltende? Was bei der Betrachtung und Bewertung der Ergebnisse des Designs oft außer Acht gelassen wird, ist das Netzwerk, in dem gestaltet wird. Dieses erschließt sich für Außenstehende in der Regel nicht und oft ist das gestaltete Ergebnis, beispielsweise in Form eines Produktes, der einzige Hinweis auf den Gestaltungsprozess. Rekonstruktionen gestalten sich nicht leicht und es entstehen zahlreiche Missverständnisse (Designer*innen als Genie). Die Designwissenschaft könnte viel gewinnen, wenn die Entscheidungsprozesse nachvollziehbarer, transparenter und bewertbarer gemacht würden – für die Nutzer*innen, für die Wissenschaft und für die Umwelt. Nachhaltigkeit als Paradigma fordert vom Design eine vollständige De- und Rekonstruktion bestehender soziotechnischer Systeme, aber wie sind Designer*innen in der Praxis in der strategischen Position diese Dekonstruktionen vornehmen zu können? Um Advokat*innen für Ressourcenschonung und Klimaschutz werden zu können, werden sich Designer*innen aus den etablierten Abhängigkeitsverhältnissen lösen und neue Komplizenschaften suchen müssen.

Dieser Artikel stellt die Synopse der Promotion dar und soll mit Fertigstellung der Promotion als referierte Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift erscheinen.

2.4.7 Transition Design Guide [English Version] | Prof. Dr. Christa Liedtke et al.

Neben den oben aufgeführten Veröffentlichungen in Fachzeitschriften, bzw. im Rahmen von wissenschaftlichen Konferenzen, findet aktuell eine Überarbeitung des Transition Design Guides (herausgegeben vom Wuppertal Institut und der Folkwang Universität der Künste) statt, welcher nun erstmalig auf Englisch erscheinen wird. Auch Teile der Promotionsarbeit werden in den überarbeiteten neuen Guide einfließen. So ist ein Tool in Arbeit, das dabei helfen soll, die konstituierenden Bedingungen und Abhängigkeiten von Designprozessen visuell aufzuarbeiten und auf diese Weise reflektieren zu können.

2.5 Ergebnisse

Bisher liegen neben den im vorherigen Abschnitt aufgeführten Texten und Veröffentlichungen vor allem Ergebnisse im Bereich der sprachwissenschaftlichen Untersuchung zum Designbegriff vor. Im Rahmen eines Seminars an der Folkwang Universität der Künste wurden hunderte Beispiele alltäglicher Verwendungen des Wortes „Design“ zusammengetragen, die zeigen, dass das Wort in der Vernakularsprache in Bezug auf seine Bedeutung stark verdinglicht wird und nur selten – so wie in der Praxis und Lehre des Designs – auf den Prozess des Gestaltens verweist. Schaut man sich das gesamte Bedeutungsspektrum des Designbegriffs an, ergibt sich ein semantisches Feld, das Gegenständliches und Prozessuales umschließt. Während dieser Umstand oftmals dazu anregt, die Mehrdeutigkeit – und vermeintliche Unbrauchbarkeit – des Wortes Design zu bedauern, ergibt sich daraus das eigentliche Potenzial von Design; nämlich die

Fähigkeit gleichermaßen Dinge konkret gestalten wie eben diese Dinge als kontingent (Kontingenz = Nicht-Notwendigkeit) wahrnehmen zu können.

Sprachwissenschaftlich unterscheidet man bei Substantiven zwischen Abstraktum (auf etwas Abstraktes verweisend, wie Liebe oder Freiheit) und Konkretum (auf etwas Konkretes verweisend, wie Stein oder Stuhl). Als Substantiv ist das Wort Design beides. Diese aus der sprachwissenschaftlichen Betrachtung gewonnene Erkenntnis deckt sich mit den einleitenden Thesen insofern, dass bereits im Begriff angelegt zu sein scheint, dass es beim Design gleichermaßen um die Verdinglichung von Ideen geht wie es um die Entschlüsselung der Dinge in Bezug auf ihre dahinterliegenden Ideen, Bedingungen und Dynamiken geht, was in dieser Arbeit unter dem Begriff der „Design Literacy“ gefasst werden soll; das heißt, die Lese- und Schreibfähigkeit von Design in der Welt. Dieser Gedanke wird im Verlauf der Arbeit noch weiter ausgearbeitet und im Rahmen von Interviews weiter untersucht.

3 Promotionsvorhaben II „Ressourcenbedarf der Energiewende“

Charlotte Joachimsthaler, Technische Universität Dortmund

3.1 Einleitung

Abfall ist kein Abfall, wenn wir diesen hochwertig aufbereiten. Die Circular Economy ist ein Wirtschaftssystem mit geschlossenen Kreisläufen, in dem Rohstoffe, Komponenten und Produkte möglichst lange zirkulieren, so wenig wie möglich an Wert verlieren und das Systemdenken im Mittelpunkt steht (Faulstich 2020). In diesem Zuge birgt die umfassende Kreislaufführung auch für die Energiewirtschaft Potenziale sowie Herausforderungen. Um die Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, sollte die umweltschonende Energie- und Ressourceneffizienz unter gleichzeitiger Dekarbonisierung der Energiewirtschaft im Mittelpunkt stehen. Zur Deckung der Energienachfrage im Sinne der Energiewende ist der Ausbau der erneuerbaren Energie mit hoher Dynamik notwendig. Die zukünftige Stromerzeugung wird in Deutschland wesentlich vom Dargebot von Energieträgern der Leittechnologien Windenergie (WE) und Photovoltaik (PV), beeinflusst (Faulstich et al. 2014). Politische und planerische Entscheidungen müssen beschleunigt werden, um zeitkritische Herausforderungen sowie Restriktionen der Flächenverfügbarkeit zu lösen (Prognos AG et al. 2020; Haller et al. 2016; SRU 2011). Jedoch dürfen globale, europäische sowie nationale Nachhaltigkeitsziele dabei nicht in den Hintergrund treten. Für eine nachhaltige Industriegesellschaft sollten eine gekoppelte Energie- und Ressourcenwende angestrebt werden. Der Transformationsprozess der Stromerzeugung und der damit verbundene infrastrukturelle und technologische Ausbau sollten möglichst ressourcenleicht und in Orientierung der lebenszyklusübergreifenden Kreislaufführung gestaltet werden.

3.1.1 Politische Zielsetzungen der Energie- und Ressourcenwende

Der European Green Deal stellt einen Plan für ein nachhaltiges und wettbewerbsfähiges Europa dar und stellt in diesem Zuge Themen des Klimaschutzes, der Ökologie und Nachhaltigkeit in den Mittelpunkt. In der Wachstumsstrategie ist das Ziel verankert, dass bis 2030 mindestens 55 % der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 reduziert werden sollen und bis 2050 weitestgehend die Treibhausgasneutralität Europas mit null Netto-Treibhausgasemissionen erreicht werden soll (Europäische Kommission 2019, S.2; BMWi 2020a). So verspricht die neue Bundesregierung die nationale sowie internationale Klima-, Energie- und Wirtschaftspolitik auf den 1,5-Grad-Pfad auszurichten und Potenziale auf allen staatlichen Ebenen anzukurbeln und einen verlässlichen wie auch kosteneffizienten Weg zur Klimaneutralität bis spätestens 2045 technologieoffen auszugestalten (Koalitionsvertrag 2021-2025, S.54f.).

Der Dekarbonisierung des Energiesystems wird hierfür eine besondere Rolle zugeschrieben. Es wird nicht nur höchste Energieeffizienz angestrebt, sondern auch der Wandel zu erneuerbaren Energien (EE), die intelligent integriert und vernetzt werden (Europäische Kommission 2019, S.6ff.; BMWi 2020b). Der Ausbau soll beschleunigt und Hürden in Zusammenarbeit mit Bund, Land und Kommunen, z.B. Ausschreibungssysteme, durch langfristige Stromlieferverträge und den europaweiten Handel mit Herkunftsnachweisen beseitigt werden (Koalitionsvertrag 2021-2025, S.56f.). Der Plan REPowerEU der europäischen Kommission sieht vor, dass das europäische Ziel für EE bis 2030 von 40 % auf 45 % angehoben wird. (Europäische Kommission 2022). Aktuell liegt dieser Anteil der EE am Bruttoendenergieverbrauch der EU bei etwa 20 % (eurostat 2021). Für das Hauptziel der Treibhausgasneutralität in Deutschland wird für 2030

angestrebt, 80 % (680-750 TWh) des Bruttostrombedarf durch EE zu generieren (BMWi 2021, S.2). 2020 lag dieser Anteil bei etwa 45 % (UBA 2021a). Diese und weitere Ziele sind in Rechtsnormen und Verträge über die Arbeitsweise der EU verankert (Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), Energieeffizienz-Richtlinie, Strombinnenmarkt-Richtlinie sowie -Verordnung, Verordnung zur Risikovorsorge im Stromsektor usw.) (BMWi 2020a).

Weiterer Gegenstand des Green Deals ist ein Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft mit Ziel und Richtung einer Ressourcenwende. Heutzutage wird als Vision von einer Circular Economy gesprochen, die wörtlich übersetzt zwar Kreislaufwirtschaft heißt, in ihrer Bedeutung jedoch über die Erhöhung von Recyclingraten hinausgeht. Sie umfasst eine ganzheitliche zirkuläre Wirtschaft, die in allen Phasen von der Produktplanung über die Produktion und Nutzung bis hin zur Sammlung, Demontage, Recycling und der Einführung der Recyclingrohstoffe umgesetzt wird (Faulstich 2020, S.6). Nachhaltigen Produkten mit kreislaforientiertem Design mit geringem, aber wiederverwendbarem, langlebigem und reparierbarem Materialien sind zu fördern. Die Wiederverwendung von Werkstoffen wird im Zuge der Abfallvermeidung explizit dem Recycling vorgezogen. Dabei ist die hochwertige Aufbereitung auch technisch zu ermöglichen. Daneben soll die Hersteller*innenverantwortung erweitert werden. Neue Geschäftsmodelle von „Produkten als Dienstleistung“ (Product-as-a-Service) oder die Anmietung und gemeinsame Nutzung von Waren und Dienstleistungen sollen gefördert werden. Als wichtige Voraussetzung gilt es eine zuverlässige Datengrundlage zu Herkunft, Zusammensetzung, Reparatur- und Demontagemöglichkeiten mittels Digitalisierung bereitzustellen (Europäische Kommission 2019, S.9ff.; Europäische Kommission 2020, S.4f.). Von der Bundesregierung geplante Maßnahmen beinhalten beispielsweise digitale Produktpässe, Mehrweg-, Rücknahme- und Pfandsysteme sowie Branchenvereinbarungen, Fondmodelle als Belohnungssystem, Recycling-Labels sowie Rezyklateinsatzquoten sowie erhöhte Recyclingquoten, die in einer gebündelten „Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie“ und EU-einheitliche Standards verankert werden (Koalitionsvertrag 2021-2025, S.42f.).

3.1.2 Die Nachhaltigkeit der Energiewende

Die Transformation, hier als gekoppelte Energie- und Ressourcenwende betrachtet, dient der im Vergleich zum gegenwärtigen Zeitpunkt gestärkten Nachhaltigkeit in Ökologie, Gesellschaft und Wirtschaft.

Trotz der politisch global implementierten Nachhaltigkeitsziele bestehen oftmals Abweichungen, was als nachhaltig bzw. nicht-nachhaltig bewertet werden kann. Dies ist zum einen auf die hohe Komplexität von politischen und strategischen Entscheidungen und die Interessenskonflikte bei notwendiger Verhaltensänderung von Individuen, z.B. im Rahmen von Suffizienz-, Effizienz- oder Konsistenzstrategien, zurückzuführen (Rösch et al. 2020, S.1). Zum anderen ist der Bedeutung der Nachhaltigkeit durch die erforderliche Berücksichtigung von drei Zieldimensionen eine komplexe Zielstruktur zugeschrieben. Konzepte wie die drei Säulen der Nachhaltigkeit, besagen, dass sowohl ökologische, als auch soziale und ökonomische Nachhaltigkeitsziele gleichgewichtig und integrativ zu betrachten sind. Die jeweiligen Zielbeziehungen komplementärer, neutraler oder auch konkurrierender Art führen sehr häufig dazu, dass die Forderung der Gleichbehandlung nicht realisierbar ist, weswegen die Sinnhaftigkeit sowie die Effektivität einzelner Ziele diskutabel werden.

Ähnlich verhält es sich mit den Transformationen der Energie- und Ressourcenwende. Beispielsweise spricht die Energiewende mit sauberer, erschwinglicher und sicherer Energie alle drei Zieldimensionen der Nachhaltigkeit an, sie unterliegt aber auch der erläuterten Zielkomplexität. Wenn zum Beispiel Maßnahmen der Energiewende die Zielerfüllung der Ressourcenwende einschränken, werden die Grenzen der Nachhaltigkeit der einzelnen

Transformationen, in diesem Falle der Energiewende, erreicht. Die Kopplung der jeweiligen Veränderungen und Maßnahmen mit Berücksichtigung von positiven wie auch negativen Wechselwirkungen ist also unerlässlich, um auch kurz- und mittelfristig eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang können nicht nur Negativeffekte zwischen Zielen identifiziert und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden, sondern auch komplementäre Ziele dazu genutzt werden, größere und/oder schnellere Verbesserungen zu generieren. Ansätze der Circular Economy können beispielsweise eine effektive und leicht realisierbare Senkung des Energieverbrauchs und zugehörige Emissionen erwirken (IRENA 2019, S.10). Durch den Ersatz fossiler durch erneuerbare Energieträger können die Treibhausgasemissionen theoretisch auf null gesenkt und der Rohstoffbedarf an konventionellen Energieträger gesenkt werden (UBA 2019a, S.78). Eine vollständige Vermeidung der Primärrohstoffinanspruchnahme ist jedoch aufgrund von Wachstumseffekten, Downcycling und Dissipationsverlusten technologisch und thermodynamisch nicht möglich (Cullen 2017; Mayer et al. 2019). Ein verlustfreies System kann in der Praxis also nicht erreicht werden. Die größtmögliche Reduktion von Verlusten und negativen Auswirkungen gilt es aber anzustreben. Hierzu müssen die Maßnahmen der Ressourcenwende greifen. Bei beiden Neugestaltungen hängt die Zielerreichung stark von der Energie- und Materialeffizienz während der Produktionsphase, der eingesetzten Technik sowie Aspekten der Lebensdauer, der Reparaturfähigkeit und des Beitrags des Recyclings von Produkten ab.

3.2 Stand der Forschung

Ein Überblick zu bestehenden Energie- und Klimaszenarien sollen Erkenntnisse der derzeitigen Kopplung von Energie- und Ressourcenwende erbringen. Auf dieser Basis wird der Forschungs- und Handlungsbedarf für eine nachhaltige Energiewende abgeleitet, um die Problemstellung und Zielsetzung des vorliegenden Forschungsberichts zu verdichten und konkretisieren.

3.2.1 Bestehende Energie- und Klimaszenarien

Um die möglichen zukünftigen Entwicklungen der Energiesituation in Deutschland umfangreich abbilden zu können, werden existierende Studien unterschiedlicher Herangehensweisen, Verfasser, Ziele und Erscheinungsjahre betrachtet. Orientierung baten zwei systemische Meta-Studien des Wuppertal Instituts; Samadi et al. 2018 und Kobiela et al. 2020. Die Kriterien für die Auswahl der betrachteten Studien sind hierbei...

- ... das Ambitionsniveau des Klimaschutzes von mind. 80 % der THG-Reduktionen im Jahr 2050 gegenüber 1990,
- ... eine hohe quantitative Detailtiefe hinsichtlich der Angebots- und Nachfrageseite des Energiesystems,
- ... und die Aktualität der Studien.

So wurden die in der folgenden Tabelle 1 aufgelisteten Studien in die nähere Betrachtung gezogen, um einen aussagekräftigen Auszug aktueller Szenarienarbeiten für ein Literaturscreening in Bezug auf eine Kopplung von Energie- und Ressourcenwende zu gewährleisten.

Tabelle 1: Auszug an Szenarienarbeiten für das Literaturscreening

Studie	Szenario	Jahr	Auftraggeber
Klimaschutzszenario 2050 (Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI 2015)	KS 80 KS 95	2015	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)
Den Weg zu einem treibhausgas- neutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten (UBA 2017)	GreenEe	2017	Umweltbundesamt (UBA)
Klimapfade für Deutschland (Prognos AG 2018)	80%-Pfad 95%-Pfad	2018	Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI)
Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität - RESCUE-Studie (UBA 2019a)	GreenEe1	2019	Umweltbundesamt (UBA)
Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem (Fraunhofer ISE 2020)	Referenz	2020	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Wege für die Energiewende (FZJ 2020)	Szenario 95	2020	Forschungszentrum Jülich (FZJ)

Dabei handelt es sich teils um Studien, in welchen eine konkrete Zielsituation erreicht werden soll (z.B. Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 % ggü. 1990), wobei die dafür erforderlichen Schritte im Szenario ermittelt werden. In anderen Studien werden hingegen aktuell erkennbare und mögliche Trends in die Zukunft extrapoliert und so die Energie- und Emissionssituation in Deutschland für das Jahr 2050 ermittelt (Trend-/Referenzszenarios). Trotz der unterschiedlichen Ansätze werden in den Studien meist die gleichen Klimaschutzstrategien und dadurch auch Stellschrauben betrachtet. Dabei handelt es sich besonders um ...

- ... den Einfluss von Kreislaufwirtschaft sowie Materialeffizienz und -substitution auf den Energiebedarf der Industrie
- ... den Strombedarf durch Elektrifizierung und Sektorenkopplung,
- ... die Energieeinsparung durch erhöhte Raten zur energetischen Sanierung von Gebäuden,
- ... die Verkehrswende durch Mobilitätssysteme,
- ... die Beiträge und Handhabung konventioneller Kraftwerke und Ausbau EE,
- ... und die Flexibilität des Netzwerks und die damit einhergehenden Speichermöglichkeiten.

Genannte Faktoren werden dabei maßgeblich durch die Entwicklung neuer Technologien, die Entwicklung politischer Gesetzgebungen und die Akzeptanz und Anpassung der gesellschaftlichen Verhaltensweisen hinsichtlich einer nachhaltigeren Zukunftsgestaltung beeinflusst.

Das Literaturscreening ergab dabei zwei wesentliche Erkenntnisse, die als Untermauerung der in Kapitel 3.2.2 ausgeführten Verdichtung des Forschungsvorhabens anzusehen sind:

- 1) Grundsätzlich liegt der Fokus der in Tabelle 1 Studien hauptsächlich auf einer kostenoptimalen Energiewende und dem damit verbundenen einfachsten Weg, die Treibhausgasemissionen in Deutschland effektiv zu senken. Dabei werden im Wesentlichen verschiedene Pfade zur Treibhausgasneutralität aufgezeigt, wobei die Ressourcenwende bzw. die Wechselwirkungen der beiden Entwicklungen nur selten in die Szenariotechnik miteinfließt. Nur wenige Studien bewerten konzipierte Szenarien hinsichtlich Zielsetzungen der Ressourcenwende. Dadurch bleibt auch die Frage offen, inwiefern die Energiewende aus Sicht eines Circular Economy Ansatzes nachhaltig ist.

Im weiteren Forschungsvorhaben soll der Schwerpunkt auf jene Studien gelenkt werden, die ressourcenschonende Klimaschutzpfade als konzeptionelle Strategie zum Gegenstand haben. Hervorzuheben sind aus diesem Grund die Studien UBA 2017 und UBA 2019a, die als zwei der wenigen Studien einzelne Aspekte des Ressourcenbedarfs behandeln. Die Studie UBA 2019a beschreibt verschiedene Szenarien für mögliche Entwicklungen der Energiewende bis 2050 und beinhaltet auch ein Materialeffizienz-Szenario (*GreenMe*), basierend auf breitgefächerten Annahmen, die einen möglichen Lösungsraum für eine komplementäre Energie- und Ressourcenwende aufzuspannen. Die Charakteristika der verschiedenen Szenarien im Bereich der Energie sind in der folgenden Tabelle 2 zusammengefasst. Die Studie UBA 2017 beschränkt sich auf das *GreenEe* Szenario und bewertet dieses hinsichtlich des Ressourceneinsatzes.

Tabelle 2: Charakteristika der *Green* Szenarien der UBA RESCUE-Studie im Bereich Energie

	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	Green-Supreme
Ausstieg aus der Kohleverstromung	Vor 2040				Bis 2030
Ausstieg aus der Brennstoff-nutzung von Kohle	Bis 2050				Bis 2040
Ausbau der erneuerbaren Energien	Schnell				Sehr schnell
Heben der Energieeffizienz-potenziale	Sehr hoch	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Vermeidung von Energiebedarfen durch bewusste Verhaltensweise	Hoch	Mittel	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Endenergie-bedarfe über alle Anwendungs-bereiche	Niedrig	Hoch	Niedrig	Sehr niedrig	Sehr niedrig
Materialeffizienz der eingesetzten Techniken	Hoch	Mittel	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch

Quelle: UBA 2019a, S.58f., 80

- 2) Ergebnisse der Szenariotechnik hängen stark von verfolgten Storylines der jeweiligen Strategien der Szenarien und damit verbundenen Annahmen der Ausprägung von Schlüsselfaktoren in der Zukunft ab. Szenarien stellen also keine Vorhersagen dar, sie zeigen lediglich mögliche Entwicklungen auf, deren Eintreffen von vielseitigen und unprognostizierbaren Umständen der tatsächlichen Zukunft abhängt. Ob beispielsweise eine Diskrepanz zwischen dem erhöhten Ressourcenbedarf des Ausbaus der EE im Zuge der Energiewende und der gleichzeitigen Realisierung einer Circular Economy mit geschlossenen Materialkreisläufen, regenerativen industriellen Systemen mit weitgehender Abfallvermeidung besteht, liegt zwar nahe, aufgrund unsicherer Faktoren ist dies jedoch kaum zu beweisen. Als Folge sind konkrete Maßnahmen, wie der Ausbau der EE Hand in Hand mit der Ressourcenwende vonstattengehen kann, nur unzuverlässig abzuleiten. Je kleiner der Untersuchungsrahmen ist, für den mögliche Entwicklungen konzipiert werden sollen, desto enger müssen Abschneidekriterien für externe Einflussfaktoren gesetzt werden, wodurch die Gefahr besteht, elementare Wechselwirkungen außer Acht zu lassen. So bieten aktuelle Szenariostudien keine ausreichende Kleinteiligkeit, um essenzielle und präzise Rückkopplungen des inländischen Ausbaus einzelner EE-Technologien im Kontext der Ressourcenwende zu erfassen.

Ein Literaturscreening möglicher Entwicklungen des Ausbaus und Zubaus der EE-Technologien sowie der Verbreitung verschiedener EE-Technologien der in Tabelle 1 aufgeführten Studien ergibt eine signifikante Variabilität von szenariotechnischen Annahmen und Ergebnissen im Bereich der WE, deren erforderlichen Ausbau und dem damit verbundenen Ressourcenbedarf. Ursachen sind die unsicheren technologischen, politischen und gesellschaftlichen Entwicklungen, wie auch aktuellen Herausforderungen der Planung und Umsetzung der WE zuzusprechen. Eine Ausführung der Ergebnisse des Literaturscreenings folgt in Kapitel 3.5 zur Diskussion der Ergebnisse. Einige der maßgeblichen Einflussfaktoren seien zusammengefasst genannt, um die im folgenden Kapitel verdichtete Problemstellung zu untermauern:

- ▶ Ausbaugrad verschiedener Anlagentypen
- ▶ Akzeptanz des Ausbaus seitens der Bevölkerung
- ▶ Aufwand und Diskrepanz Genehmigung, Umweltverträglichkeitsprüfung und Naturschutz
- ▶ Energiepolitik und Raumplanung, z.B. Flächenfreigaben und Ausschreibungssystem
- ▶ Anreize und Konzepte für Rückbau, Weiterbetrieb und Repowering

3.2.2 Verdichtung der Problemstellung und Zielsetzung

Für die Errichtung von Windenergieanlagen (WEAs) ist ein Vielfaches der mineralischen Rohstoffe nötig, die für fossile Kraftwerke oder Atomkraftwerke mit ähnlicher Energiekapazität erforderlich wären. Da Deutschland als rohstoffarmes Land von Importen abhängig ist, stellt die zeitweise Mehrnachfrage nach mineralischen Primärrohstoffen ohne kreislaufwirtschaftliche Lösungsansätze nicht nur ein marktwirtschaftliches Risiko, sondern auch eine ökologische und sozioethische Herausforderung dar, da der Wertschöpfungsprozess, von der Gewinnung bis zur Verarbeitung und Verwendung von mineralischen Rohstoffen, erhebliche Umweltwirkungen und -schäden zur Folge hat. Die Möglichkeiten der Überwachung und Regulierung zur

Minderung der Umweltschäden sind begrenzt, da diese außerhalb der nationalen Grenzen und somit zum Großteil außerhalb des Einflussbereiches der deutschen Rohstoffpolitik verortet sind.

Im Kontext der Ressourcenknappheit gewinnt, neben der Nachfrage an Primärrohstoffen, auch die Ressource der Fläche der WE an Land an Bedeutung. Erfolgt keine Erweiterung der planungsrechtlichen Festsetzung von Flächen, ist damit zu rechnen, dass der Zubau von WEAs nicht einmal den Rückbau der nicht mehr vergütungsfähigen Anlagen ausgleichen kann (UBA 2019a, S.114). Eine Erweiterung nutzbarer Flächen ist mit baurechtlichen Hürden, wie Abstandsregelungen zu Wohngebieten, verbunden (Deutscher Bundestag 2012). Eine solche Erweiterung ist aus Nachhaltigkeitssicht jedoch ohnehin nur bedingt sinnvoll, da Boden, Fläche und Raum ebenso als endliche Ressourcen anzusehen sind, mit denen Menschen schonend umgehen müssen. Auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland wird bis 2050 ein Flächeneinsatzziel Netto-Null, eine sogenannte Flächenkreislaufwirtschaft, angestrebt (Jungbluth und Michael 2020).

Der vorliegende Forschungsbericht behandelt das geschilderte theoretische Potenzial der Kopplung von Ressourcenwende und Energiewende am Fallbeispiel der WE mit erforderlichen Ressourcen der Rohstoffe und Flächen. In diesem Rahmen sollen die folgenden Kernfragen beantwortet werden.

Kernfragen:

- Was sind mögliche Entwicklungen des Ressourcenbedarfs der WE bis 2050 in Deutschland?
- Für welche Materialien und Komponenten der WEAs bestehen mit aktuellem Status quo Chancen sowie Herausforderungen der Ressourcenschonung? Für welche Rohstoffe ist die angestrebte Ressourcenschonung und Kreislaufrückführung von hoher Relevanz? Für welche Rohstoffe sind geschlossene Stoffkreisläufe einfach zu etablieren? An welchen Stellen besteht Handlungsbedarf?
- Welche Parameter beeinflussen den Ressourcenbedarf der WE in Deutschland besonders? Wie gehen bestehende Szenarioarbeiten mit diesen Parametern um? Für welche dieser Parameter sind Tendenzen bzw. Unsicherheiten festzustellen?
- Welche Maßnahmen tragen zu einem ressourcenschonenden System der WE in Deutschland und somit zu einer nachhaltigen Energiewende bei?

3.3 Vorgehensweise zur Diskussion bestehender Literatur

Zur Erreichung des Forschungsziels wird Literatur gesammelt, selektiert, analysiert sowie diskussionsbasiert ausgewertet. Bereits genannte Literatur zu Energie- und Klimaszenarien, wie auch UBA 2017 und UBA 2019a, wird durch Studien ergänzt, die sich schwerpunktmäßig mit den Ressourcen Fläche und/oder Rohstoffe der WE befassen. Diese schließen beispielsweise Studien zu Life Cycle Assessments (LCA) von WEAs, Kritikalitätsstudien verbauter Materialien und Analysen der Recycling- und Substitutionsfähigkeit der Komponenten und Rohstoffe ein.

Anhand von bestehenden Szenarioarbeiten werden mögliche Entwicklungen des Ressourcenbedarfs aufgezeigt, indem unterschiedliche Pfade der Energiewende aufgegriffen werden, die zur vollständigen Dekarbonisierung des Energiesektors erforderlich sind. Die *Green* Szenarien sind hierfür maßgeblich. Zubau, Rückbau, die Nutzungsdauer ausgewiesene Flächen, platzierbare WEAs, die damit zu generierende Leistung und der spezifische Flächenbedarf stellen dabei zentrale Größen dar, die analysiert werden. (Kapitel 3.4.1) Für die

Betrachtung des Rohstoffbedarfs wird die Studie UBA 2019a mit zwei zentralen Szenarien herangezogen; das ambitionierte *GreenMe* Szenario und das weniger ambitionierte *GreenLate* Szenario. Im Mittelpunkt stehen hierbei Kalkulationen des Einsatzes von Primär- und Recyclingrohstoffen verschiedener Materialkategorien bis 2050. Diese werden in Anwendung auf die Windenergieanlage mit ihren Komponenten und Materialien angewendet, um Potenziale und Grenzen der Ressourcenschonung im Bereich der WE anhand des Status Quo abzuleiten. (Kapitel 3.4.2)

In einer Diskussion bestehender Szenariostudien werden Unsicherheiten aufgrund von Informationslücken, Szenarioannahmen und variablen Entwicklungsmöglichkeiten auf der einen Seite und erkennbare Tendenzen auf der anderen Seite selektiert und verdichtet. Als Ergebnis sind Parameter als mögliche Einflussfaktoren zur Ressourcenschonung im Bereich der WE abzuleiten. (Kapitel 3.5).

Auf dieser Grundlage sollen erste Ansätze für eine gekoppelte Energie- und Ressourcenwende im Rahmen des Ausbaus der EE vorgestellt werden. Als Möglichkeiten der Optimierung werden verschiedene Ansätze der Circular Economy vorgeschlagen. Diese können als Entscheidungsgrundlage für mögliche Maßnahmen der Gewährleistung und des Erhalts eines ressourcenschonenden Windenergiesystems Deutschlands dienen und sprechen in erster Linie Akteur*innen der Politik sowie Industrie an. (Kapitel 3.6)

3.4 Mögliche Entwicklungen des Ressourcenbedarfs für das deutsche Windenergiesystem

In diesem Kapitel werden mögliche Entwicklungen des Ressourcenbedarfs für WEAs beleuchtet und in Bezug auf den Status Quo reflektiert. In diesem Zuge wird der inländische Zubau und spezifische Flächenbedarf der WE bis 2050 sowie der zugehörige Rohstoffbedarf mit Recycling- und Substitutionspotenzialen einzelner Komponenten und Materialien aufgezeigt. Chancen und Herausforderungen werden als Stellhebel zur Ressourcenschonung identifiziert. Die Diskussion der Variablen bestehender Energie- und Klimaszenarien ergänzt die Grundlage zur anschließenden Ableitung von Handlungsoptionen, die einen Beitrag zum ressourcenschonenden Windenergiesystem in Deutschland und schließlich zu einer nachhaltigen Energiewende beitragen können.

3.4.1 Zubau und Flächenbedarf der Windenergie an Land

Im weiteren Verlauf des Kapitels werden Perspektiven des Zubaus, ausgewiesener und freier Flächen sowie flächenbezogene Herausforderungen der Windenergienutzung an Land anhand aktueller Erkenntnisse skizziert.

Der Ausbau der Windenergie an Land in den *Green* Szenarien:

Die Entwicklung des Zubaus und der erforderlichen Fläche der WE an Land ist von vielzähligen Einflussfaktoren u.a. der erforderlichen Stromerzeugung sowie den Rückbauzahlen abhängig. Anhand von Abschätzungen werden in UBA 2019a Empfehlungen als Untergrenze für den durchschnittlichen Bruttozubau der WE an Land zur Umsetzung der *Green* Szenarien ausgesprochen. Unabhängig vom jeweiligen Szenario erfordere der Ausbau mindestens 4 GW WE an Land pro Jahr. Wird dem Pariser Übereinkommen Rechnung getragen und der vollständige Ausstieg aus der Kohleversorgung bis 2030 durchgeführt, wären mindestens 5,5 GW Windenergie pro Jahr zuzubauen. Je nach Charakteristik und Ambition des jeweiligen Szenarios (siehe Tabelle 2) belaufe sich diese Zahl von 2030 bis 2040 zwischen 3,2 und 5,6 GW pro Jahr. In den Jahren von 2040 bis 2050 würde die erforderliche Zubaurate auf 6,1 bis 11,2 GW pro Jahr ansteigen. Mit der WE als Grundstein der künftigen Energieversorgung

müsste die installierte Leistung in den Szenarien *GreenEe*, *GreenMe* und *GreenLife* bereits bis 2030 auf 82 bis 84 GW ausgeweitet werden, im *GreenSupreme* Szenario bereits auf ganze 103 GW (UBA 2019a, S.109ff.).

Potenzial und Grenzen des Zubaus der Windenergie an Land:

Anhand von Daten aus Geoinformationssystemen und Annahmen ist das Potential der WE an Land zu ermitteln (Lütkehus et al. 2013, S.29). Rund 49.400 km² bzw. 13,8 % der Landesfläche der Bundesrepublik Deutschland wären zur Onshore-WE nutzbar. Ausschlusswirkungen der Flächenkategorien ergeben sich insbesondere im Siedlungsbereich mit etwa 252.700 km², aufgrund der Infrastruktur mit 111.100 km² sowie in Schutzgebieten mit 79.800 km². Mit der Annahme von Referenzanlagen und kalibrierten Wetterdaten lässt sich ein Leistungs- und Ertragspotenzial von rund 1.188 GW und etwa 2.898 TWh erschließen (Lütkehus et al. 2013, S.35f.). In diesem Zusammenhang ist von theoretischem Potenzial zu sprechen, da die tatsächliche Nutzung des Flächenpotenzial von weiteren Faktoren abhängt (Rückbau/Weiterbetrieb, Repowering/ersatzlose Stilllegung, Zubau/Nicht-Nutzung von ausgewiesener Fläche). Die aktuell ausgewiesenen Flächen zur Windenergienutzung nehmen mit 3.131 km² im Jahr 2018 nur einen kleinen Teil (ungefähr 6 %) des in Lütkehus et al. 2013 identifizierten Flächenpotenzials ein (UBA 2019c, S.62). Tabelle 3 gibt eine Übersicht der theoretischen Flächen- und Leistungspotenziale mit Berücksichtigung der Bestandsanlagen an.

Tabelle 3: Flächenverfügbarkeit und Zubaupotenzial 2018, 2025 und 2030

	Ausgewiesene Flächen [km ²]	Freie Flächen [km ²]	Anzahl platzierbarer WEAs	Leistung platzierbarer WEAs [MW]	Spezifischer Flächenbedarf [ha/MW]
2018	3.131	1.325	11.262	39.417	3,36
2025	3.131	1.625	13.853	48.486	3,35
2030	3.131	1.902	15.836	55.426	3,43

Quelle: UBA 2019c, S.61-67

Die ausgewiesenen Flächen betragen 3.131 km². Diese berücksichtigen zum einen Bauleitpläne, bei denen es sich um rechtskräftig freigesetzte Flächen handelt, zum anderen in Aufstellung befindliche Entwürfe der Regionalplanung, die sich noch ändern können. Die ausgewiesenen Flächen nehmen bei einer Landesfläche von 357.385 km² 0,9 % ein. Von den ausgewiesenen Flächen sind lediglich 1.325 km² im Jahr 2018, im Jahr 2025 1.625 km² und 1.902 km² im Jahr 2030 nicht bebaut und somit für neue WEAs nutzbar. Als Folge des Rückbaus ist die freie Fläche im Jahr 2030 ungefähr 44 % höher als im Jahr 2018. Von den ausgewiesenen und freien Flächen handelt es sich nur bei etwa 20 % um rechtskräftig festgesetzte Flächen zur Windenergienutzung, während sich über 40 % im Entwurfsstadium befinden, Änderungen also noch möglich sind (UBA 2019c, S.62f.). Zur Ermittlung der Anzahl und Leistung platzierbarer WEAs wird davon ausgegangen, dass die Anlagengeneration, die aktuell kurz vor der Markteinführung steht, einen hohen Anteil am Markt erreicht. So solle die Anlagenleistung mit einer durchschnittlichen Nennleistung von 3,5 MW pro Anlage bis 2030 signifikant ansteigen (UBA 2019c, S.58f.). Der spezifische Bedarf an Bodenfläche beträgt mit Berücksichtigung von Bestandsanlagen im Mittel 3,4 ha/MW (UBA 2019c, S.66). Wird diese Angabe auf den jährlichen Bruttozubau übertragen, der in UBA 2019a für das jeweilige Szenario als Untergrenze definiert ist, ergibt sich der in Tabelle 4 angegebene jährliche durchschnittliche Flächenbedarf.

Tabelle 4: Durchschnittlicher jährlicher Flächenbedarf des Bruttozubaues der *Green* Szenarien (in [km²/a])

Szenarien	2018-2030 [km ² /a]	2030-2040 [km ² /a]	2040-2050 [km ² /a]
GreenEe1	150	197	221
GreenEe2	146	173	241
GreenLife	146	163	252
GreenMe	146	201	207
GreenSupreme	190	190	211
GreenLate	156	109	381

Quelle: Eigene Berechnung; basierend auf UBA 2019a, S.109; UBA 2019c, S.61-67

Werden die Daten des energieeffizienten *GreenEe2* Szenarios mit einem in UBA 2019a abgebildeten Netto-Zubau kombiniert, so ergeben sich Flächenbedarfe abzüglich der rückgebauten Anlagen von etwa 84 km²/a im Zeitraum von 2018 bis 2030, rund 70 km²/a in 2030 bis 2040 und ungefähr 89 km²/a in den Jahren 2040 bis 2050 (UBA 2019a, S.106; Dittrich et al. 2020a).

Da die Grundvergütung nach dem EEG für Anlagen, die vor 20 Jahren oder früher errichtet wurden, seit Anfang des Jahres 2021 ausläuft, ist der Weiterbetrieb in der Regel nicht wirtschaftlich. Bei der kumulierten Leistung der WEAs, die von der wegfallenden Vergütung betroffen sind, wird in den Folgejahren 2022 bis 2024 ein Rückbau von jeweils mehr als 2,5 GW erwartet. Dieser Rückbau könnte das im EEG vorgesehene Brutto-Zubauvolumen der WE an Land von 2,9 MW übersteigen. (BMWi 2016, S.2). Es resultiere ein negativer Netto-Zubau.

Um zu untersuchen, inwiefern sich eine verlängerte Nutzungsdauer der als nicht repoweringfähig definierten WEAs auf die Rückbauzahlen auswirken könnte, hat die Studie UBA 2019c Analysen mit einer ausgeweiteten Nutzungsdauer von 25 und 30 Jahren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Rückbauzahlen gesenkt und die Anzahl in Betrieb befindlicher Anlagen gesteigert werden kann. Mit einer Nutzungsdauer von 25 Jahren kann der Rückbau 2021 um etwa 50 % gesenkt werden. Die Anzahl an Bestandanlagen kann darüber hinaus im Jahr 2025 etwa 45 % und im Jahr 2030 rund 21 % gegenüber einer Nutzungsdauer von 20 Jahren gesteigert werden. Mit 30 Jahren Nutzungsdauer führt dies analog zu einer Steigerung um 65 und 67 %. Wird die Leistung betrachtet, ist dieser Effekt nicht so signifikant, da WEAs, die früher errichtet wurden, weniger Nennleistung besitzen und weitaus geringere Vollaststunden aufweisen. Eine Nutzungsdauer von 25 Jahren führt dennoch zu einem Anstieg der installierten Leistung von etwa 16 % im Jahr 2025 und rund 21 % im Jahr 2030 im Vergleich zu einer Nutzungsdauer von 20 Jahren. Mit 30 Jahren Nutzungsdauer werden 18 % und 39 % generiert. Im Zusammenhang der Abhängigkeit zwischen Bestand, Rückbau und installierter Leistung, die zur Deckung der Stromnachfrage aus WE notwendig ist, kann der Weiterbetrieb der Anlagen also einen wesentlichen Beitrag leisten, um den erforderlichen Netto-Zubau zu senken. Mit unmittelbarem Bezug auf die Flächeninanspruchnahme der WE lässt sich demnach ein nicht zu vernachlässigendes Einsparpotenzial des Flächenbedarfs durch neu zu errichtende Anlagen feststellen (UBA 2019c, S.76ff. (gerundet)).

Neben dem Weiterbetrieb stellt Repowering eine Option dar, die bereits für die WE in Anspruch genommene Fläche weiterzunutzen, indem neue und moderne WEAs auf die genannte Fläche gebaut werden. Auch wenn Standorte älterer WEAs aufgrund der Notwendigkeit größerer Abstandsflächen nicht immer für neue, moderne WEAs geeignet sind, müssen die Zuwächse der

WE an der Stromversorgung somit nicht vollständig über die Inanspruchnahme zusätzlicher Flächen gewährleistet werden. Dem entgegen steht, dass nur ein Drittel der WEAs (1.545 Anlagen mit 1.495 MW), die von der auslaufenden Vergütung betroffen sind, innerhalb der ausgewiesenen Flächen stehen und somit auch aus planungsrechtlicher Sicht repoweringfähig sind (UBA 2019c, S.73ff.).

Selbst bei rechtskräftig zur Windenergienutzung freigesetzten und nicht bebauten Fläche ist nicht garantiert, dass diese für die WE genutzt wird. Ausschlusswirkungen des Flächenpotenzials werden zwar bereits bei Ausweisungsverfahren berücksichtigt, trotzdem wird die Nicht-Nutzung bereits ausgewiesener Flächen am häufigsten auf den Arten- und/oder Naturschutz über das Vorkommen von geschützten Vogelarten und Fledermäusen zurückgeführt. Darauf folgend wird die Flugsicherung und die Windhöflichkeit am häufigsten als Grund genannt. Fast genauso oft sind Ursachen der Nicht-Nutzung im Bereich der Planung, bei Grundeigentümern sowie Radaranlagen angesiedelt (UBA 2019c, S.86; Lütkehus et al. 2013, S.15). Auch bei Konzepten des Repowering, der Reparatur oder sonstiger Lebensdauerverlängerung stellen, neben ökonomischen Nachteilen, ebenso genehmigungs-, privat- und planungsrechtliche Umstände grundlegende Hemmnisse und Hürden für die Planung und Umsetzung dar. Ein passendes Beispiel ist der Effekt auslaufender EEG-Vergütungen auf die Entwicklung der Anzahl ersatzloser Stilllegungen von WEAs, die eigentlich repariert, weiterbetrieben oder deren Flächen repowert werden könnten.

3.4.2 Rohstoffbedarf der Windenergie

Zunächst werden einzelne Komponenten und Materialien von WEAs sowie deren Varianz erläutert. Dominante Rohstoffmassen zur Produktion der WEAs werden hervorgehoben. Für die Darlegung möglicher Entwicklungen des Rohstoffbedarfs werden aus den Studien UBA 2019a und UBA 2017 zwei zentrale Szenarien aufgegriffen; das *GreenMe* Szenario, das eine für die Ressourcenschonung ambitionierte Entwicklung widerspiegelt, und das *GreenLate* Szenario, das eine weniger ambitionierte Entwicklung abbildet. Auf dieser Basis werden Chancen und Herausforderungen für ein optimistisches Szenario des Rohstoffschutzes im Bereich der WE in Anlehnung an den Status quo herausgefiltert.

Komponenten, Materialien und spezifischer Rohstoffbedarf der Windenergieanlage:

Wird von der WE als Leittechnologie der Energiewende gesprochen, so sind zunächst WEAs mit Horizontalachsen-Rotoren in Propellerbauart gemeint, die im Feld der WE voraussichtlich weiterhin den größten Marktanteil ausmachen werden (Hau 2014, S.71). Marktgängige WEAs besitzen die Systemkomponenten Fundament, Turm, Gondel Rotor, Elektronisches System mit Verkabelung und Transmissionssystem. Für eine Übersicht der üblichen Haupt- und Subkomponenten und jeweiligen Materialien bzw. Materialalternativen kann unterschiedliche Literatur kombiniert werden, darunter Sachbilanzdaten von LCAs; Scherhauser et al. 2021, Wang et al. 2019, Martínez et al. 2018, Müller 2018, Hau 2014, Eyerer et al. 2020 und Wuppertal Institut 2014.

Zwar sind erneuerbarer Stromerzeugungstechnologien im Gegensatz zu konventionellen Energietechnologien in ihrem Betrieb rohstoffärmer, die Herstellung selbst ist bei erneuerbaren Energieanlagen hinsichtlich einiger Materialien pro Leistungseinheit dennoch rohstoffintensiver als die von konventionellen Kraftwerken. Für den Bau einer WEA ist der Rohstoffeinsatz an Kupfer fast zehn Mal so hoch, im Fall von Aluminium etwa drei Mal so hoch, bei Eisen etwa 2,5 Mal so hoch und der Bedarf an Zement etwa doppelt so hoch als bei konventionellen Kohlekraftwerken (Vergleich in Tonnen pro Megawatt) (Müller 2018, S.14f.).

Variable Haupt- und Subkomponenten sowie mehrere Optionen für die Wahl des einzusetzenden Materials ergeben sich je nach herstellender Instanz, in Bezug auf den Standort der Errichtung (z.B. Onshore/Offshore) sowie in Bezug auf verschiedene Anlagen- und Komponententypen sowie Funktionsweisen; Art der Erregung des Generators (elektrisch/permanent und getriebelos), Bauart des Generators (synchron/asynchron), Getriebeart und Umdrehungszahl (Direktantrieb (getriebelos)/Schnellläufer/Hybridantrieb/Supraleiter).

Die genauen Massenanteile der Materialien einer Anlage differieren aufgrund dieser Varianz. In WEAs mit Getriebe und asynchronem Generator ist der Massenanteil nicht-metallischer Mineralien am größten, direkt gefolgt von dem des Eisens. Bei synchronen Generatoren mit permanenter Erregung ist der größte Massenanteil der WEAs den Halb- und Edelmetallen zuzuordnen, gefolgt von nicht-metallischen Mineralien und Sondermetallen, die beispielsweise in dem vergleichsweise groß dimensionierten Permanentmagneten zum Einsatz kommen. Betrachtet man WEAs mit synchronem und elektrisch erregtem Generator mit Direktantrieb, so fällt der Massenanteil der nicht-metallischen Mineralien im Vergleich am geringsten aus. Der größte Teil der verbauten Materialmassen fällt auf die Halb- und Edelmetalle, während Eisen einen ähnlichen Anteil einnimmt wie bei den anderen Generator- und Getriebetypen (UBA 2019a, S.105).

Fundament und Turm nehmen, unabhängig der unterschiedlichen Anlagentypen, mit über 80 % den Großteil der Masse der WEAs ein (Wang et al. 2019, S.806). Wird für den Bau des Turms Zement verwendet, macht dies fast 84 % des Gewichts aus. Mit 85 % besitzt der Großteil der WEAs weltweit Stahltürme. Bei WEAs dieser Art nimmt der Stahl 89 % des Gewichts ein, wenn das Fundament vernachlässigt wird. So können in einer WEA bis zu 80 t Stahl eingesetzt werden (Müller 2018, S.17). Aus diesem Grund hat die WE hohe Relevanz für sektorübergreifende Bedarfsabschätzungen im Bereich des Stahls. Für das Fundament und den Turm aus Stahl wird niedriglegierter Stahl mit geringen technischen Anforderungen an die Werkstoffeigenschaft eingesetzt. Hochlegierte Stahlsorten werden beispielsweise in mechanisch stark beanspruchten Teilen der Gondel, Spezialstähle in Generatoren und Transformatoren und hochfeste und rostfreie Stähle im Getriebe verwendet. Für Windturbinen üblich gilt zum Beispiel der Edelstahl X5CrNiMo17-12-2 Stahl mit 17 % Chrom-Anteil (Wuppertal Institut 2014, S.71ff., 74).

Neben Stahl sind weitere Metalle in den restlichen Komponenten zu finden. Mit Stahl, Kupfer und industriellen Metallen werden in einer WEA insgesamt bis zu 200 t Metalle verbaut. Beispielsweise sind pro WEA 8 bis 30 t Kupfer in der Elektronik verbaut, wie auch in den genannten Spulen, die der Erzeugung des Magnetfelds im Generator des Getriebes dienen. Im Maschinenhaus befindet sich die meiste Elektronik, für die bei neuesten WEAs mit Permanentmagnet ebenso Seltene Erden wie Neodym, Dysprosium und in kleinen Mengen Praseodym, Bor sowie Terbium verbaut werden. Die Permanentmagnete der Generatoren besitzen durchschnittlich eine relative Masse von ca. 680 kg/MW Anlagenleistung. Mit durchschnittlich 67 % nimmt das Eisen davon zwar den größten Teil ein, ein Drittel des Gesamtgewichts besteht dabei allerdings aus Seltenen Erden. Tabelle 5 fasst eingesetzte Neodym- und Dysprosiummassen für die Permanentmagnete im Jahr 2014 sowie Prognosen für das Jahr 2025 und 2050 mit Unterscheidung zwischen drei Getriebearten zusammen. Bei WEAs mit Getriebe ist das Gewicht der Permanentmagneten von insgesamt 88 kg/MW mit bis zu 30 kg Seltene Erden pro MW wesentlich geringer (Müller 2018, S.16f.).

Tabelle 5: Eingesetzte Massen von Neodym und Dysprosium in Permanentmagneten der Getriebearbeiten Direktantrieb, Hybridgetriebe und Schnellläufer in dem Jahr 2014 und Prognosen für 2025 und 2050 (in [kg/MW])

Getriebeart	Neodym (2014) [kg/MW]	Dysprosium (2014) [kg/MW]	Neodym (2025) [kg/MW]	Dysprosium (2025) [kg/MW]	Neodym (2050) [kg/MW]	Dysprosium (2050) [kg/MW]
Direktantrieb	202	15	163	12	130	12
Hybridantrieb	50	4	40	3	32	3
Schnellläufer	25	2	20	1	16	1

Quelle: Wuppertal Institut 2014, S.167

Neben genannten Differenzen je Anlagentyp ist immer auch die Anlagengröße zu berücksichtigen, die die Dimensionierung der zur Herstellung nötigen Materialmengen pro WEA bestimmt. So ist der prozentuale Massenanteil der Rotorblätter mit beispielsweise 2 bis 3 % zwar gering (Wang et al. 2019, S.806), die absolute Masse hängt jedoch stark von der Größe der Rotorblätter ab, die in direkter Korrelation zu vorherrschenden Windströmungsbedingungen steht; mitunter also eine Kennzahl der anlagenspezifischen Leistung darstellt.

Entwicklungen des deutschen Rohstoffbedarfs in den *Green Szenarien*:

Laut UBA 2019a werden einzelne Gütergruppen einen erhöhten Rohstoffbedarf für Anlagen und Infrastruktur des Energiesystems erfahren. Vor allem Metalle sowie Legierungen nehmen bei der Umstrukturierung eine Schlüsselrolle ein. Hierzu gehören Eisen und Stahl, Nichteisen-Metalle, wie Kupfer und Aluminium für Stromleitungen, Spulen und erneuerbare Energiesysteme sowie Technologiemetalle für Batterien, elektronische Geräte und Anlagen und in Legierungsmetallen (UBA 2019a, S.356f.).

Der größte Anstieg wird bei Kupfer angenommen. Für Aluminium, Chrom, Eisen, Blei und andere Metalle wird ein Anstieg erwartet, der nur minimal unter dem von Kupfer liegt (World Bang Group 2017, S.12). Die Rohstoffinanspruchnahme von Primärkupfer solle zwischen 2020 und 2050 maximal sein. In diesem Zeitraum würde der Rohstoffbedarf Jahr für Jahr nur langsam sinken. Grund hierfür ist die Annahme, dass vermehrt Recyclingrohstoffe Anwendung finden würden. Erst 2050 falle die Primärrohstoffinanspruchnahme an Kupfer erheblich und ab 2050 oder 2060 wäre ein Recyclingknick in der Nachfrage des Primärkupfers festzustellen. Deutlich wird dies, wenn der angenommene Bedarf an Primärkupfer mit der erwarteten Nachfrage an recyceltem Kupfer abgeglichen wird. Ab diesem Zeitpunkt entstünde ein Zusammenspiel von Ausbau, Repowering und Recycling. So würden auslaufende Anlagen rückgebaut und durch die Verwertung der Materialien Recyclingrohstoffe zur Verfügung gestellt werden. Gleichzeitig steige der Rohstoffbedarf für den weiteren Netto-Ausbau der EE sowie das Repowering bis zum vollständigen Wandel des Energiesystems. Die Ausbaudynamik der verschiedenen Länder und Regionen sind in diesem Zusammenhang maßgebend, um Spitzenwerte im Zuge des Zusammenfalls von Ausbau und Repowering abschätzen zu können (UBA 2019a, S.395-398; UBA 2017, S.54, 56).

Während des Zubaus der EE wird in den Szenarien hauptsächlich auf Primärrohstoffe zurückgegriffen. Wird der Primärrohstoffbedarf aller Anwendungsbereiche und Branchen betrachtet, so sinkt dieser dennoch in jedem der konzipierten Szenarien stetig bis 2050; je nach Ambitionsniveau zwischen 56 und 70 %. Zurückzuführen ist dies auf die Annahme des erhöhten Einsatzes an Recyclingrohstoffen. Mit Hilfe modellexogener Annahmen zukünftiger Recyclingraten und Rezyklatanteile in relevanten Materialströmen, wie z.B. Stahl und Kupfer,

kann das Aufkommen von Recyclingrohstoffen und deren Anteil am Rohstoffbedarf abgeschätzt werden (UBA 2019a, S.361f.). Für die WE relevante Annahmen sind in der folgenden Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Annahmen zukünftiger Recyclingraten und Rezyklatanteile verschiedener Materialgruppen im Jahr 2050 in den *Green* Szenarien

Material	Art des Indikators	GreenEe1/ GreenEe2	GreenLate	GreenMe	GreenLife	Green-Supreme
Eisen	Rezyklatanteil	67 %	50 %	67 %	67 %	67 %
Kupfer, Aluminium, Blei, Zink	Rezyklatanteil	90 %	70 %	90 %	90 %	90 %
Technologie- metalle	Erhöhung Recyclingrate ggü. 2010	+10 %	+5 %	+25 %	+10 %	+25 %
Kunststoffe	Recyclingrate	-	-	75 %	65 %	75 %
Mineralische Abfälle	Ambitions- niveau im Recycling	hoch	niedrig	hoch	hoch	hoch

Quelle: UBA 2019a, S.362f.

Im Zuge angenommener Recyclingraten und Rezyklatanteile wird davon ausgegangen, dass die inländische Nachfrage an Basismetallen, wie Eisen, Kupfer und Aluminium bis 2050 abnehmen wird. Jedoch ist nach aktuellem Kenntnisstand eindeutig, dass Primärrohstoffe dennoch erforderlich sein werden, um den Rohstoffbedarf zu decken, z.B. aufgrund von Wachstumseffekten und funktionalen Verlusten (UBA 2019a, S.361f.; Cullen 2017; Mayer et al. 2019).

Eine ressourcenschonende Entwicklung, wie als *GreenMe* Szenario konzipiert, ist dennoch anzustreben, um existierende Potenziale auszuschöpfen. Denn im Vergleich zu anderen Szenarien wird im *GreenMe* Szenario, neben der Energieeffizienz, auch ein Anstieg der Materialeffizienz über alle Sektoren und Branchen anvisiert (UBA 2019a, S.62f.). Mit diesen Annahmen könne der inländische Einsatz von Primärrohstoffen gegenüber dem Jahr 2010 um etwa 68 % gesenkt werden. Der Verbrauch fossiler Energieträger würde auf null sinken, während auch die Inanspruchnahme von Primärmaterialien der Kategorien Biomasse, Metallerze und nicht-metallische Mineralien stark reduziert werden würde. Der Primärrohstoffbedarf von Metallerzen könne bis zum Jahr 2030 um rund 19 % gegenüber 2010, 2030 bis 2040 um 31 % und 2040 bis 2050 um ganze 44 % verringert werden. Wird das Potenzial der Substitution von Primärrohstoffen betrachtet, so ist der Einsatz stofflicher Recyclingrohstoffe ausschlaggebend. Dieser solle im *GreenMe* Szenario von 2010 bis 2050 für Rohstoffe, die keine Metalle miteinschließen, um das 2,5-Fache ansteigen. Allein in den Jahren 2010 bis 2030 verdopple sich der Einsatz von stofflichen Recyclingrohstoffen ohne Metalle, während 2030 bis 2040 weitere 40 % Anstieg zu verzeichnen wären. 2040 bis 2050 steige dieser Einsatz um restliche 21 %. Der Einsatz von metallischen Recyclingrohstoffen stagniere hingegen zwischen 2010 und 2050. Dass der Primärrohstoffbedarf potenziell um 68 % sinkt, könnte also weniger an der Substitution metallischer Primärrohstoffe liegen, sondern viel mehr an der Substitution nicht-metallischer Rohstoffe. Hinzu kommen Effekte der erhöhten Ressourcenschonung durch Materialeffizienz und Verhaltensweisen der Gesellschaft (UBA 2019a, S.355; S.361; Dittrich et al. 2020a; 2020b; 2020c; 2020d; 2020e).

Werden genannte Entwicklungen versäumt oder gar nicht erst angestrebt, so lässt sich von einem *GreenLate* Szenario ausgehen. Dieses ist, als ein Gegenstück des *GreenMe* Szenarios, durch eine späte Entwicklung charakterisiert; durch eine geringere gesellschaftliche sowie industrielle Überzeugung und Realisierung von Energie- und Materialeffizienz, in diesem Zusammenhang auch durch kleinere Recycling- und Substitutionsquoten (UBA 2019a, S.60f.). Eine Gemeinsamkeit der zwei Szenarien ist jedoch direkt ersichtlich; der Großteil des Rohstoffbedarfs würde über Primärrohstoffe gedeckt werden, im *GreenLate* Szenario dennoch anteilig mehr als im *GreenMe* Szenario. Im *GreenLate* Szenario falle die Reduktion des Primärrohstoffbedarfs mit 56 % zwischen 2010 und 2050 um ganze 12 Prozentpunkte geringer aus als bei dem ambitionierten Szenario *GreenMe*. Dies ist ein branchenübergreifender Unterschied von etwa 1 Mio. t Primärrohstoffen allein in Deutschland. Die Abweichung zwischen den Szenarien würde vor allem die Metallerze betreffen, für die zwischen 2010 und 2050 nur 24 % anstatt 69 % einzubehalten seien. Auch im Bereich der nicht-metallischen Mineralien ist die Entwicklung nicht so signifikant, wie im ambitionierteren Szenario *GreenMe*. Zwischen 2010 und 2050 sinke der Bedarf an nicht-metallischen Mineralien laut UBA 2019a nur um 44 % anstelle von 59 %. Zwar würden in diesem Zeitraum auch in diesem Szenario verstärkt Recyclingrohstoffe nicht-metallischer Mineralien eingesetzt werden, mit der 1,5-fachen Menge von 2010 besteht aber eine wesentliche Differenz zum ambitionierteren Szenario *GreenMe*. Im Bereich der Metalle wird für beide Szenarien die gleiche Entwicklung vorhergesagt; ein gleichbleibender Umfang der Substitution der Metallerze durch metallische Recyclingrohstoffe. Somit ist eine Ursache der Abweichung des Primärrohstoffbedarfs zwischen den Szenarien auf das im Vergleich geringere, absolute sowie prozentuale Substitutionspotenzial im nicht-metallischen Bereich zurück. Weitere Effekte von Faktoren, die über die reine Substitution von Primärrohstoffen hinausgehen, z.B. abweichende Effizienzgrade, sind bei der Interpretation dennoch nicht zu vernachlässigen (UBA 2019a, S.355; S.361; Dittrich et al. 2020a; 2020b; 2020c; 2020d; 2020e).

Aktuelle Chancen und Herausforderungen zur Rohstoffschutz bei Windenergieanlagen:

Inwiefern sich die geschilderten Strategien und damit zusammenhängende Entwicklungen eines sinkenden Bedarfs an Primärrohstoffen bei erhöhtem Einsatz von Recyclingrohstoffen realisieren lassen, hängt davon ab, ob die definierten Annahmen, beispielsweise zukünftige Recycling- sowie Rezyklateinsatzquoten, tatsächlich erreicht werden. Die Kreislauffähigkeit von EE-Technologien hat im Rahmen der Umstrukturierung des Energiesystems direkten Einfluss auf den Bedarf an Primärrohstoffen. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Kreislauffähigkeit einzelner Komponenten der WEA als Fallbeispiel diskutiert, um Szenarien, wie das *GreenMe* oder das *GreenLate* Szenario, einzuordnen.

Wird die Kritikalität in regenerativen Energietechnologien enthaltener mineralischer Rohstoffe in Bezug auf die langfristige Verfügbarkeit, die Versorgungssituation, die Recyclingfähigkeit und Umweltbedingungen für die Förderung der Rohstoffe bewertet, so ist die WEA als relevante Technologie zu nennen, die besonders sensibel auf mögliche Störungen der Rohstoffversorgung reagiert. Sofern die genannten Kriterien herangezogen werden, sind nach einer Grobanalyse des Wuppertal Instituts die folgenden mineralischen Komponenten und verbauten Materialien der WEA als kritisch einzustufen (Wuppertal Institut 2014, S.49ff.):

- Seltene Erden in Permanentmagneten von Generatoren
- Stahl-Legierungen und -elemente
- Glas- und Kohlenstofffasern in Rotorblättern

- Diverse elektronische Bauteile und Elemente (Supraleiter, Stromrichter, Transistoren, Dioden, etc.)

Grundsätzlich bestehen bei Metallen ausreichend ökonomische Anreize für das Recycling. Auch die Effizienz der Rückgewinnungsprozesse kann um die 90 % betragen. Mit einer Recyclingquote von etwa 90 % und einem Materialverlust von 5 bis 10 % ist beispielsweise bei dem niedriglegierten Stahl (Turm und Fundament) ein hohes Recyclingpotenzial zu verzeichnen (Tazi et al. 2019, S.203; Martínez et al. 2018, S.261). Aufgrund der geringen technischen Anforderungen an die Werkstoffeigenschaft, gelten Legierungen mit einer geringen Anzahl an Legierungselementen zudem als leicht durch alternative Werkstoffe zu substituieren, wie z.B. Stahlbeton im Fall eines Betonturms, aber auch durch Rezyklate gleicher Zusammensetzung (Wuppertal Institut 2014, S.74). Auch wenn Turm und Fundament aus Stahlbeton gebaut sind, sind diese mit hohem Recyclingpotenzial verbunden, solange diese fachgerecht rückgebaut und entsorgt werden (Zotz et al. 2019, S.184). Aufgrund ebendieser Beton- und Stahlkomponenten ist bei einer Onshore-WEA beispielsweise eine durchschnittliche Recyclingquote von etwa 81 % erreichbar (Eyerer et al. 2020, S.101). Der reale Gesamtanteil von recyceltem Stahl an der Stahlproduktion ist in der Realität jedoch geringer, als in einigen Studien angenommen, da Stahlschrott oft Jahrzehnte gelagert wird, bevor er schließlich recycelt wird (Davidsson et al. 2012, S. 16). Hinzu kommt, dass ein tatsächliches Recycling nicht zwingend bedeutet, dass die Recyclingrohstoffe wieder im geschlossenen Kreislauf in das Produkt einfließen. Während zum Beispiel die Recyclingquote von Stahl etwa 90 % beträgt, liegt der Anteil des Einsatzes von Recyclingstahl in Produkten bei nur 43 % (BMW 2019). Auch der Altbeton bzw. der rezyklierte Beton wird in der Realität nur in geringem Umfang wieder dem Kreislauf zugeführt, z.B. aufgrund mangelnder Akzeptanz von Recyclingbaustoffen im Zuge fehlender Informationen hinsichtlich Materialeigenschaft und Qualität und damit verbundenen Vorbehalten gegenüber diesen (Zotz et al. 2019, S.184).

Das Kupfer der Generatorspulen ist grundsätzlich kreislauffähig und gehört zu den Massenmetallen, die mit hoch effizienten Recyclingverfahren verwertet werden können. Für die Recyclingquote werden international sehr abweichende Werte angegeben. Auf globaler Ebene liegt die durchschnittliche Recyclingquote von Kupfer bei ungefähr 50 % (UNEP 2011, S.31), während die Zahl in Deutschland im internationalen Vergleich im höheren Bereich von etwa 80 % liegen sollte (End-of-Life Recycling Rate (EOL-RR)). Analog zu den Substitutionsmöglichkeiten des niedriglegierten Stahls, ist Primärkupfer außerdem leicht durch rezykliertes Kupfer substituierbar. Bereits 2010 stammten in Deutschland 43 % des Kupfers aus Recyclingrohstoffen (End-of-Life Recycling Input Rate (EOL-RIR)) (Wilts et al. 2014, S.13f.).

Neodym gilt für Permanentmagneten derzeit als bester Kompromiss zur Erfüllung geforderter Eigenschaften der magnetischen Flussdichte, Temperaturempfindlichkeit und Kosten und wird aus diesem Grund fast ausschließlich eingesetzt (Hau 2014, S.420). Dies schränkt die Kreislauffähigkeit der Permanentmagneten wesentlich ein, da Seltene Erden, wie Neodym, aufgrund der geringen Mengen nicht wirtschaftlich verwertet werden können (Zotz et al. 2019, S.184). Insgesamt werden nur 1 bis 10 % der weltweit eingesetzten Primärrohstoffe durch recyceltes Neodym substituiert (UNEP 2011, S.36). Der Herstellungsprozess ist hochgradig ineffizient; Oakdene Hollins 2011 gibt einen Materialverlust von 50 % an, Cristóbal et al 2020 bezieht sich sogar auf eine Spanne bis 75 %. Ein gesteigerter Einsatz, um verwertbare Massen zu erhöhen, müsste angesichts geringer Rezyklateinsatzquoten über Primärrohstoffe, die fast zu 60 % aus China stammen, gedeckt werden (USGS 2021, S.2). Eine erhöhte Neodym-Nachfrage wäre im Zuge dessen nicht nur mit einer hohen Abhängigkeit des Importes verbunden, sie wäre auch aus ökologischer und sozialer Sicht und für eine nachhaltige Entwicklung nicht sinnvoll (Hau 2014, S.420). Nachfrageaussichten kritischer Metalle bis 2030 und 2050 auf globaler Ebene

zeigen, dass die Nachfrage das aktuelle Produktionsvolumen einiger Metalle übersteigen könnte. Die Nachfrage von Neodym, Dysprosium und Kobalt ist in erster Linie den kohlenstoffarmen Technologien, wie auch erneuerbaren Energietechnologien, zuzuschreiben. So ist mit einer Verschärfung der geschilderten Problematik zu rechnen (Watari et al. 2020, S.6f.).

Eine wesentliche Herausforderung, die geschlossene Kreisläufe und den anvisierten Rohstoffschutz gefährdet, ist auf aktuelle Entwicklungen zurückzuführen, die Downcycling- und Dissipationseffekte zur Folge haben. Beide Phänomene können unterschiedliche Ursachen haben; hierunter thermodynamische Werkstoffeigenschaften, Verdünnung, Kontamination, der reduzierte Bedarf an Recyclingrohstoffen und konstruktionsbedingte Probleme der Trennung und Verwertung. Mittlerweile werden rund 90 von 118 Elementen des Periodensystems, also fast 80 %, technisch genutzt (Faulstich 2020, S.7). Mit der Leistungsverdichtung und Miniaturisierung werden Technologiemetalle mit immer geringeren Konzentrationen für Funktionen eingesetzt, die kaum aus den Bauteilen zu trennen und somit homogen zurückgewonnen werden können (Behrendt 2017, S.24). Eine hohe Bindungsdauer von Metallen und die negative gegenseitige Beeinflussung der Werkstoffeigenschaften einzelner Elemente verstärken die genannten Phänomene (Stahl- und Aluminiumlegierungen; Zinn, Silber, Platin und Kupfer (Reuter et al. 2018, S.70)). Als Konsequenz entstehen hohe Downcycling-Effekte und Dissipationsraten, die wiederum durch die Beigabe von primär geförderten Metallen (Eisen und Aluminium) in das Rezyklat kompensiert werden müssen (Verdünnung).

Im Bereich der WEAs sind beispielsweise Komponenten aus hochlegiertem Stahl oder Technologiemetalle, die in der Elektronik vielfältig, verschachtelt und kaum voneinander trennbar verbaut sind. Um Dissipation und Dowcycling begegnen zu können, ist eine Erhöhung der Trennschärfe innerhalb der End-of-Life Systeme notwendig (Fendel und Kempkes 2014, S.211) sowie eine Optimierung der maschinellen Ungenauigkeit über Analyse- und Sensortechniken. Insbesondere für technologiehaltige Abfälle ist die Erfassung und Sammlung sowie Einleitung in die passende Recyclinglinie mangelhaft. Volatile Preise für jeweilige Metalle verhindern Investitionen in die Recyclinginfrastruktur, weil diese durch verschiedene Preisentwicklungen unwirtschaftlich werden können (Behrendt 2017, S.16ff.).

Auch bei den Rotorblättern der WEA stellt die Rohstoffschonung eine Herausforderung dar. Es gibt zwei zentrale Herausforderungen beim Rotorblattmaterial; zum einen erfordert die Materialvielfalt sowie die Komplexität des Materials für ein effektives, stoffliches Recycling die Trennung der Bestandteile sowie eine materialspezifische Aufbereitung und Verwertung, zum anderen verlieren Glasfasern durch pyrolytische Trennverfahren zur Faser-Matrix-Trennung wesentlich an ihren mechanischen Eigenschaften und ihrer Handhabbarkeit. Weiterhin sind sie ökonomisch nicht konkurrenzfähig zu Neufasern (Eyerer et al. 2020, S.101, 109; Job 2014).

Mit diesem Hintergrund sind nicht nur Optimierungen in jeder Phase des Lebenszyklus der Anlage, Komponenten und Materialien seitens der Industrie umzusetzen, sondern auch ein politischer Rahmen zur Realisierung zu schaffen. Dies erfordert wiederum eine vollständige und zuverlässige Datengrundlage, um transparente und begründete Entscheidungen zu treffen. Für eine Entscheidungsgrundlage politischer Vorgaben sowie Umsetzungskonzepte der Ressourcenschonung sind die aktuell bestehende Informationslücken unabdingbar zu schließen, darunter...

- ... ein Standard, der einheitliche, hinreichende und verpflichtende Anforderungen an den fachgerechten und ressourcenschonenden Rückbau von WEAs stellt (Zotz et al. 2019, S.21).
- ... die quantitative Datengrundlage zu vorhandenen Mengen und Konzentrationen für dissipative Stoffströme (Thomé-Kozmiensky 2015, S.59; Helbig 2019, S.9)

- ... langfristige Prognosen zu hochkritischen Metallen, deren soziale und ökologische Konsequenzen des Verbrauchs sowie Downcycling- und Dissipationeffekte (Watari et al. 2020)

Die Lösungen genannter Herausforderungen stellen ambitionierte Ziele dar und erfordern eine umfangreiche Systemumstellung, die Zeit und Kosten in Anspruch nimmt und beschleunigte Entscheidungen voraussetzt. Werden die Folgewirkungen des Ressourcenbedarfs von WEAs nicht mitbedacht, ist die Nachhaltigkeit des Ausbaus dieser, der einen wesentlichen Anteil des Rohstoffbedarfs der Energiewende ausmacht, angesichts der angestrebten Ressourcenwende anzuzweifeln. In diesem Zuge ist nicht nur der Ausbau bis hin zur vollständigen Dekarbonisierung des Energiesektors 2050 zu hinterfragen, sondern auch wie ein ressourcenschonendes Energiesystem langfristig aufrechterhalten werden kann. Der Reaktion auf wegfallende Ressourcen, z.B. durch Ersatz, Reparatur oder sonstige Ansätze und Geschäftsmodelle der Circular Economy, sollte in diesem Zusammenhang ein besonderer Stellenwert eingestanden werden.

3.5 Diskussion der Variablen

Um eine Aussage über die benötigten Ressourcen zur erfolgreichen Durchführung der Energiewende und Erreichen der Klimaziele treffen zu können, müssen nach aktuellem Stand Annahmen getroffen werden, welche auf den ablesbaren entscheidenden Faktoren und Tendenzen der bereits existierenden Szenarien beruhen. Die unterschiedlichen Entwicklungspfade Deutschlands in der Zukunft werden durch konkrete Annahmen bzw. Strategien der einzelnen Szenarien bestimmt. Diese können allerdings nur auf Basis aktueller Daten und Entwicklungen getroffen werden und sind daher mit großen Unsicherheiten verbunden.

Besonders unterschiedlich fallen die Annahmen hinsichtlich der Entwicklung der Erzeugung von Strom und Wärme aus. Es wird diskutiert, inwiefern ein Import von grünen Energieträgern (synthetische Kraftstoffe), die im (europäischen) Ausland mit Hilfe von EE erzeugt werden, die Energieerzeugungssituation in Deutschland unterstützen bzw. entlasten kann (Prognos AG 2018, S.59). In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, in welchem Umfang solche Maßnahmen umgesetzt werden sollen und können. Die mögliche Diskrepanz der tatsächlichen Realisierung dessen impliziert weitere große Unsicherheitsfaktoren. Abhängig davon, wie viel Strom nachhaltig im eigenen Land produziert werden kann, werden solche Maßnahmen relevant.

Trotz der einheitlichen Ziele der Reduktion der Treibhausgase wird ein unterschiedlich starker Wandel der energieerzeugenden Systeme bzw. dem Anteil der EE an der Stromerzeugung erwogen. Das heißt, es wird jeweils unterschiedlich mit der Situation bzw. Abschaltung konventioneller Kraftwerke wie Braunkohle und Atomkraft umgegangen und über die Einsetzbarkeit von CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, „CCS“) entschieden (Kobiela et al. 2020, S.41ff.). Dementsprechend ist auch die Entwicklung des Ausbaus der EE als Ersatztechnologien konventioneller Kraftwerke zur Deckung der Energienachfrage mit hohen Unsicherheiten belastet. Dabei werden hauptsächlich unterschiedliche Annahmen über die Rate bzw. den Umfang des vorzunehmenden Ausbaus und die Fokussierung auf die Expansion von WEAs oder PVA getroffen. Aufgrund einer Vielzahl gegenwärtiger und zukünftiger Einflussfaktoren ist beispielsweise unklar, ob der Rückbau der einen erneuerbaren Energietechnologie, in diesem Fall der PV, zum verstärkten Ausbau einer anderen erneuerbaren Energietechnologie, wie der WE, führen kann, muss und wird. Entscheidend für Entwicklung der Situation der WE ist die Akzeptanz der Bevölkerung

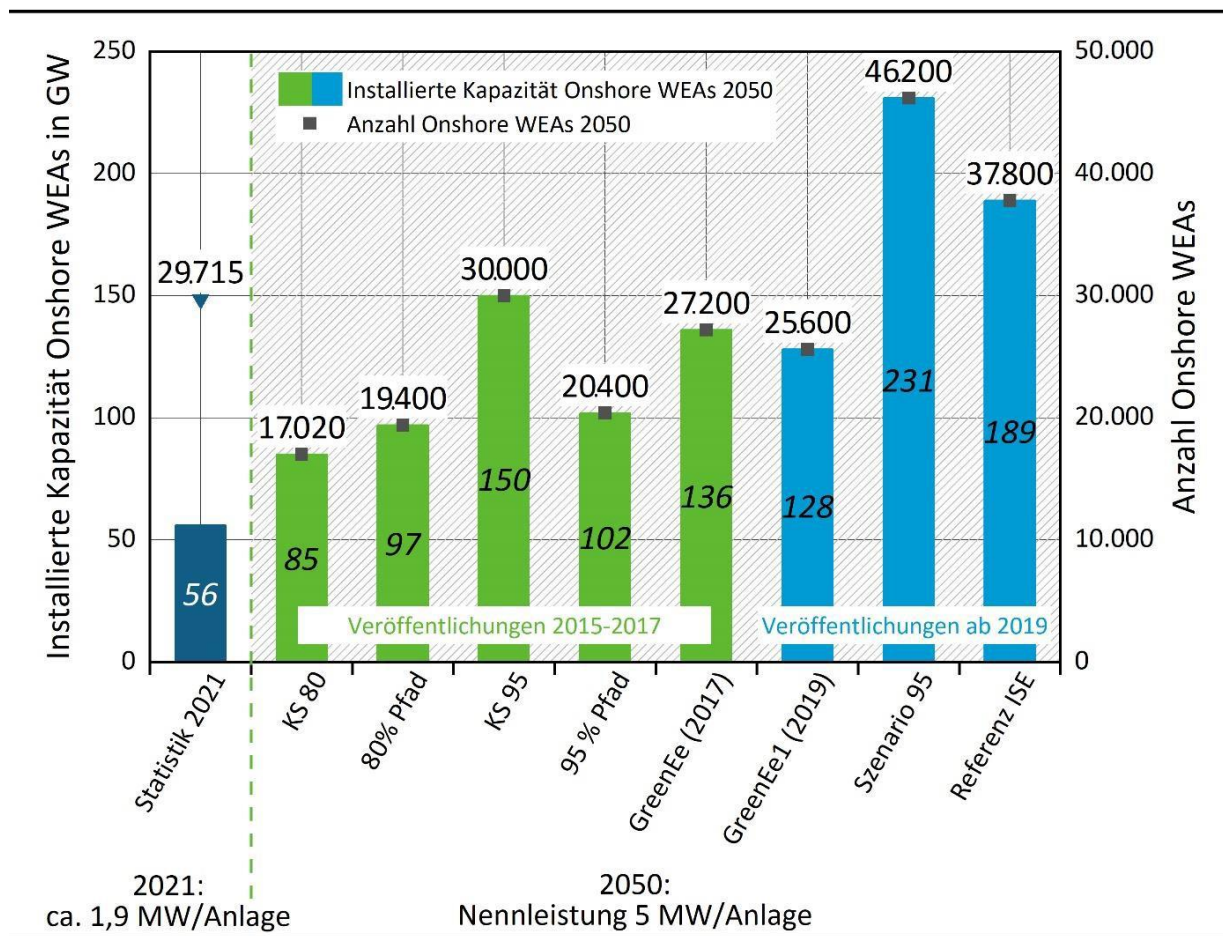
hinsichtlich des Ausbaus der Anlagen und die Entwicklung zu einer nachhaltigen Gesellschaft (Kobiela et al. 2020, S.45). Es sind aber auch die komplexen und langwierigen Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie die Regularien des Bundes und der Länder für den zukünftigen Umfang der Stromerzeugung durch WEAs relevant, wobei besonders die Bestimmungen hinsichtlich des Rückbaus und Repowering alter Anlagen einen großen Einfluss nehmen (UBA 2017, S.62). Durch den seit 2018 eingebrochenen Ausbau der WE (Kobiela et al. 2020, S.41ff) an Land und die begrenzten, freigegebenen Flächen für den Ausbau von Onshore-Anlagen innerhalb des Landes wird eine Stagnation der Quantität der Anlagen in den kommenden Jahren vorhergesagt (Samadi et al. 2018, S.29) bzw. in Abhängigkeit von der Stärke der Zubaurate gegenüber dem intensiven Rückbau veralteter Anlagen sogar mit einem Rückgang der Anlagenzahl gerechnet (UBA 2019a, S.110f.). Eine Steigerung der erzeugten Strommenge kann dann nur durch eine Erhöhung der Nennleistung der einzelnen Anlagen erfolgen, wofür neue und leistungsstärkere Typen benötigt werden, die im Zuge der Herstellung und dem Betrieb mit dem Ressourcenbedarf der WE korrelieren. Zusätzlich kann durch eine Anpassung der Abstandsregelungen zwischen Anlagen und anderweitig genutzten Gebieten und durch eine Flächenfreigabe für neue Parks noch mehr Strom generiert werden. Damit steht auch der Ausbau von Offshore-Parks in Verbindung, welche zwar deutlich höhere Volllaststunden aufweisen, allerdings durch die hohen Netzanschlusskosten „aus einer kostenoptimalen Systemsicht eine weniger attraktive Option [sind]“ (FZJ 2020, S.27). Aktuelle Regularien verknüpfen diese Entwicklung mit großen Hürden hinsichtlich der Freigabe und Zulassung.

Die Unsicherheiten der bestehenden Energie- und Klimaszenarien hinsichtlich der Entwicklung Deutschlands in der Energiewende bis 2050 sind dementsprechend umfangreich. Die oben beschriebenen Faktoren beschreiben dabei hauptsächlich die Veränderung der Energiesituation und die Einflüsse darauf. Versucht man nun aus diesen Aussagen einen Rückschluss auf den Ressourcenbedarf der Energiewende und speziell der WEAs zu ziehen, multiplizieren sich die Unsicherheiten mit noch weiteren Faktoren, die noch nicht entschieden sind und sich erst in der Zukunft festlegen. Allein bei der Betrachtung der WE wirken sich folgende Aspekte auf die unterschiedliche Ausprägung des Bedarfs der Primärrohstoffe und Flächen unter den Unsicherheiten der Energiewende aus:

- ▶ Einfluss der unterschiedlichen Anlagengrößen, -arten und Installationsorte (On-/Offshore)
- ▶ Rate und Umfang des Rückbaus und möglichen Repowering bereits investierter Ressourcen
- ▶ Umfang des Zubaus neuer Anlagen in Abhängigkeit der Fokussierung auf unterschiedliche EE-Technologien (WE oder PV), dem zukünftigen Strom- und Energiebedarf, der Regularien für bestehende WEsA, usw.
- ▶ Entscheidung über den Zukauf von Öko-Strom und grünen Energieträgern (synthetische Kraftstoffe) aus dem (europäischen) Ausland über die zu produzierende Menge im Inland bedingt den notwendigen Anlagenbedarf

Durch den Einbruch des Ausbaus der WE seit 2018, wird sich die Anlagenanzahl der Onshore installierten WEAs in den kommenden Jahren vermutlich nicht weiter steigern bzw. sogar rückläufig sein (Kobiela et al. 2020, S.41; UBA 2019a, S.110f.). Dennoch soll bis 2050 die installierte Kapazität weiter erhöht werden, obwohl auch hier die Anzahl installierter Anlagen je nach Fokussierung der Szenarien stark rückläufig ist oder sogar noch gesteigert werden soll. Dies wird in Abbildung 4 deutlich, in welcher neben der in Deutschland installierten Kapazität von Onshore-WEAs in 2021 bzw. den vorhergesagten Werten für 2050, auch die Anlagenanzahl und die durchschnittliche Nennleistung derer aufgezeigt werden.

Abbildung 4: Installierte Gesamtkapazität und dazugehörige, auf Basis der Nennleistung je Anlage berechnete Anzahl von Onshore-WEAs im Jahr 2050 gegenübergestellt den statistischen Werten aus 2021



Quelle: eigene Darstellung und Berechnung, basierend auf BWE 2021; angegebene Szenarien

Durch neue und stärkere Anlagentypen soll sich diese Nennleistung je Onshore-Anlage von ca. 1,9 MWh auf 5 MWh anheben (BWE 2021). Die Stromerzeugung durch Onshore-WEAs soll sich bis 2050 mindestens verdoppeln. Je nachdem wie stark die Steigerung der Nennleistung einzelner Anlagen und dem Ausbau neuer Parks angenommen wird, soll sich die Bruttostromerzeugung um mehr als das Fünffache steigern. Da der Umfang der gewonnenen Strommenge aus Offshore-WEAs nach heutigem Stand mit nur 27 TWh sehr gering ist, wird bei ambitionierten Szenarien mit einer Steigerung des 5- bis 13-fachen bis 2050 gerechnet, was durch einen vermehrten Ausbau auf See ermöglicht werden soll.

Neben den gemeinsamen Tendenzen zur Entwicklung des Ausbaus der EE und besonders der WEA, überwiegen dennoch die Unsicherheiten. Durch die vielen einflussnehmenden Faktoren von Politik, Gesellschaft und Industrie kann eine konkrete Vorhersage der benötigten Strom- und Energiemenge und dadurch auch der benötigten Anlagenanzahl unterschiedlicher Technologien mit dem einhergehenden Ressourcenbedarf nur schwer erfolgen.

3.6 Ansätze der Reduktion des Ressourcenbedarfs

Die Frage welche Maßnahmen ganzheitlich nachhaltige Lösungen bieten, gemäß Kapitel 3.1.2 alle Dimensionen der Nachhaltigkeit sowie eine intra- und intergenerationelle Nachhaltigkeit gewährleisten, ist aufgrund der Abhängigkeiten der in Kapitel 3.5 erläuterten Faktoren und

ungewissen Entwicklungen nicht zu beantworten. Dennoch konnten im Rahmen des vorliegenden Forschungsberichts mögliche Optimierungsansätze des Ressourcenbedarfs von WEAs als Baustein für Circular Economy Szenarien abgeleitet werden. Im Folgenden wird eine Übersicht dieser unter Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen gegeben. Grün markierte Spiegelstriche stellen die aus Sicht der Autorin kurz- bis mittelfristig prioritären Ansätze dar, während grau markierte Ansätze als langfristige Vision anzusehen sind.

Konstruktion und Technologien zur Ressourcenschonung:

- ▶ *Senkung des Gehalts Seltener Erden in Permanentmagneten durch eine gesteigerte Materialeffizienz in der Konstruktion*
- ▶ *Substitution Seltener Erden durch neue Magnetzusammensetzungen*
- ▶ *Senkung des Bedarfs an Seltenen Erden durch den verstärkten Ausbau von permanentmagnetlosen WEAs*
- ▶ *Vermehrte Substitution von Primärrohstoffen durch Recyclingrohstoffe mittels der Einführung einer Mindestvorgabe der Rezyklateinsatzquote*
- ▶ *Vermehrte Substitution von Primärbaustoffen in Turm und Fundament durch eine umweltfreundliche Beschaffung von rezyklierten Baustoffen mittels Primärbaustoffsteuer*
- ▶ *Verringerung von Downcycling-Effekten durch Materialvielfalt mit Grenzwerten der Legierungselemente*
- ▶ *Erweiterung der Lebensdauer durch die Konstruktion langlebiger und reparierbarer Turbinen*

Materialeffizienz in der Herstellung:

- ▶ *Senkung des Rohstoffbedarfs zur Herstellung von WEAs durch Senkung von prozessbedingten Materialverlusten über Prozessintensivierung, -substitution und -integration*

Betriebsführung zur Langlebigkeit:

- ▶ *Erweiterung der Lebensdauer durch Instandhaltung und Wartung über Geschäftsmodelle der Product-as-a-Service-Systeme*

Wiederverwendung und hochwertige Verwertung:

- ▶ *Einsparung von Flächen neu zu errichtender Anlagen durch die planungsrechtliche Überprüfung des Repoweringpotenzials in Anspruch genommener, jedoch nicht ausgewiesener Flächen*
- ▶ *Gewährleistung eines effizienten und ressourcenschonenden Rückbaus durch behördliche Vorgaben und Überwachung, Realisierungskonzepte und Informationsstandards*
- ▶ *Senkung von Downcycling-Effekten durch mehrkanalige Mehrstufensortierung und innovative Trennverfahren vielfältiger Komponenten*
- ▶ *Senkung des Abfallaufkommens durch Wieder- und Wiederverwendung von Rotorblättern*
- ▶ *Senkung des Bedarfs an Seltenen Erden durch die Wiederverwendung der Permanentmagnete*

► *Finanzielle Förderung von aktuell unwirtschaftlichen Recyclingverfahren*

Prozessübergreifende Zusammenarbeit und Transparenz:

► *Abstimmung von Märkten für Recyclingrohstoffe*

► *Einführung eines „digitalen Zwillings“ für WEAs und Komponenten, Produktpass, Kreislauflabel*

3.7 Fazit

Der Stand der Forschung zeigt, dass eine Vielzahl an Energie- und Klimaszenarien für die Transformation bis 2050 konzipiert wurden, von denen in dieser Arbeit besonders die *Green* Szenarien der UBA RESCUE Studie für die nähere Analyse in den Vordergrund treten (UBA 2019a). Die Ressourcenschonung stellt in der Breite der Szenarienarbeiten zumeist kein fokussiertes Kriterium für die Szenariotechnik dar; Circular Economy Ansätze, die über die Materialeffizienz, das Recycling und die Substitution durch Recyclingrohstoffe hinausgehen, werden weitestgehend außer Acht gelassen. Dennoch werden die ökologischen Folgen des Primärrohstoffeinsatzes für die Produktion der auszubauenden EE-Anlagen durch szenariotechnische Annahmen erhöhter Recycling- und Substitutionsquoten abgeschwächt dargestellt.

In einem materialeffizienten Szenario *GreenMe* würde der inländische Bedarf an Primärrohstoffen gegenüber dem Jahr 2010 um etwa 68 % gesenkt werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Primärrohstoffbedarf von Metallerzen bis zum Jahr 2030 um rund 1 % gegenüber 2010 verringert, 2030 bis 2050 wird eine Einsparung von 62 % erwartet. In einem weniger ambitionierten Szenario mit verspäteter Entwicklung *GreenLate* falle die Reduktion des Primärrohstoffbedarfs mit 56 % zwischen 2010 und 2050 um 12 Prozentpunkte geringer aus, als bei dem ambitionierten Szenario *GreenMe*.

Der spezifische Rohstoffeinsatz der Windenergieanlage hängt von vielerlei Faktoren ab, wie z.B. den Anlagentypen. Unabhängig davon nehmen Fundament und Turm mit über 80 %, den Großteil der Masse der WEAs ein. Der Großteil der bestehenden WEAs verwendet für die Türme Stahl, weswegen dieses Material durchschnittlich den größten Massenanteil einnimmt. Mit Stahl, Kupfer und industriellen Metallen werden in einer WEA insgesamt bis zu 200 t Metalle verbaut. Mit durchschnittlich 67 % nimmt Eisen davon zwar den größten Teil ein, ein Drittel des Gesamtgewichts besteht dabei allerdings aus Seltenen Erden.

Hohe Recyclingquoten für die Verwertung von niedriglegiertem Stahl und Beton, die in Fundament und Turm verbaut sind, versprechen hohes Potenzial. Substitutionsquoten, also der tatsächliche Einsatz der Rezyklate im Wirtschaftssystem, sind vergleichbar gering. Für kohlenstoff- und glasfaserverstärkte Kunststoffe, Seltene Erden und hochlegierte Stähle bestehen größere Herausforderungen, weswegen Komponenten, in denen genannte Rohstoffe verbaut sind, wie Rotorblatt, Getriebe und Permanentmagnet, als besonders relevant einzustufen sind. Speziell Seltene Erden, bei denen Materialverluste in der Rohstoffgewinnung und dem Recycling mit bis zu 75 % hoch sind sowie eine hohe Abhängigkeit der Importe von geopolitisch instabilen Ländern besteht, ist der Mehreinsatz entscheidend. Auch in Hinsicht auf die teure und energieintensive Produktion von Stahl ist die mangelnde Verwertung sowie Wiedereinführung des Rezyklats fatal. Das stoffliche Recycling von kohlenstoff- und glasfaserverstärktem Kunststoff ist mit signifikanten Qualitätsverlusten verbunden und ist aus ökonomischer Sicht nicht mit der Produktion von Neufasern konkurrenzfähig. So werden ganze Rotorblätter nach ihrer Nutzungsdauer in Einzelfällen vergraben, statt sie als Wertstoffe der Abfallwirtschaft zuzuführen (Zotz et al. 2019, S.92). Effiziente Rückgewinnungsprozesse fehlen,

bestehende Verfahren sind mit Downcycling- und Dissipationseffekten verbunden und/oder können nicht wirtschaftlich angewendet werden. So wird ein hohes Maß an Bewusstsein aller Akteur*innen der Wertschöpfungskette, Innovationskraft der Industrie und Forschung, politische Unterstützung und Regeln sowie eine erhöhte Transparenz relevanter Daten erfordert.

Im Bereich der WE nimmt die Ressource der Fläche einen ebenso relevanten Stellenwert ein. Auf Grundlage eines durchschnittlichen leistungsspezifischen Flächenbedarfs von 3,4 ha/MW Windenergieleistung an Land (UBA 2019c, S.66) lässt sich bestimmen, dass für den Netto-Zubau der WEA an Land eine Fläche von etwa 84 km²/a in dem Zeitraum von 2018 bis 2030, rund 70 km²/a in 2030 bis 2040 und ungefähr 89 km²/a in den Jahren 2040 bis 2050 erforderlich wird. Angenommen wird hierbei ein energieeffizientes *GreenEe2* Szenario. Wird die Nutzungsdauer von in Betrieb befindlichen Anlagen ansteigen, so könnte der erforderliche Netto-Zubau durch eine Steigerung der Anzahl von Bestandsanlagen sowie der installierten Leistung gesenkt werden. Mit einer verlängerten Nutzungsdauer von 25 Jahren würde die Zahl in Betrieb befindlicher Bestandsanlagen um rund 45 % im Jahr 2025 und 21 % im Jahr 2030 steigen. Bei einer Nutzungsdauer von 30 Jahren führt dies analog zu einer Steigerung um 65 und 67 %. Zwar ist der entsprechende Effekt auf die installierte Leistung im Vergleich geringer, dennoch ausreichend, um den Netto-Zubau und damit verbundene Ressourcen zu schonen.

Parameter, die den Ressourcenbedarf der WE besonders beeinflussen, ergeben sich mit dem Strombedarf und den Ausgestaltungsmöglichkeiten des Energieangebots. Wichtigste Faktoren sind hierbei Import- und Exportzahlen der Energieträger, die Energieeffizienz, Grad der Sektorenkopplung, der Elektrifizierung und der Flexibilisierung von Speichersystemen. Wie das Energieangebot ausgestaltet ist, hängt von dem Wandel der energieerzeugenden Systeme, der Entwicklung der Erzeugung von Strom und Wärme sowie dem Anteil der EE an der Stromerzeugung, dem Strommix, ab. Ausschlaggebend ist der Umfang des Zubaus neuer Anlagen in Abhängigkeit der Fokussierung auf unterschiedliche EE-Technologien (WE oder PV), der zukünftige Strom- und Energiebedarf und die Regularien für bestehende WEAs, usw. So ist auch zwischen dem Ausbau unterschiedlicher Anlagengrößen und -arten sowie Installationsorten zu differenzieren. Relevant sind in diesem Zusammenhang auch die Bestimmungen zu Rate und Umfang des Rückbaus, des Repowering sowie weiterer Konzepte der Wieder- und Weiterverwendung bereits investierter Ressourcen. Neben den gemeinsamen Tendenzen zur Entwicklung des Ausbaus der EE und besonders der WEA, überwiegen dennoch die Unsicherheiten, die die genannten Parameter betreffen.

Einsparmaßnahmen des kurz- bis langfristigen Ressourcenbedarfs des inländischen Windenergiesystems können Ansätze der Circular Economy Abhilfe schaffen. In Bezug auf die erarbeiteten Chancen und Herausforderungen, sind diese konkret auf die WEA als eigenes System mit Komponenten und Materialien anzuwenden. So konnten 17 Optimierungsoptionen geschlussfolgert werden. Die Optimierungsansätze sind mit der Voraussetzung der internationalen Kooperation verbunden. Dies impliziert einheitliche Vorgaben in allen Lebenszyklusphasen der WEAs, insbesondere aber im Bereich des Recyclings, ohne jedoch spezifische Anforderungen zu vernachlässigen. Für das Bewusstsein sind einheitliche Definitionen von Recycling, Downcycling und Dissipation zu schaffen. Die Effektivität der Maßnahmen, wie der Forschung und Entwicklung, der Innovation und von Anreizsystemen kann nur sichergestellt werden, wenn auch international agiert und kommuniziert wird. Zuverlässige Entscheidungen der Akteur*innen aus Gesellschaft, Industrie und Politik bedingt die Transparenz relevanter Daten.

4 Promotionsvorhaben III „Dissipation von Funktionsmetallen“¹⁴

Thomas Kippes, Universität Augsburg

4.1 Einleitung

Für den gegenwärtig sich ständig beschleunigenden Auf- und Ausbau der Technosphäre werden immer mehr Rohstoffe und insbesondere Metalle benötigt. Wie sich im Verlauf der vorliegenden Forschungsarbeit gezeigt hat, gehen durch die Nutzungsweisen in den modernen Technologien viele dieser Materialien in Folge von Dissipationseffekten verloren. Oft sind sie infolge ihrer potenziellen oder realen Bioaktivität risikobehaftet. Angesichts dieser Trends und Entwicklungen sowie der immer bewusster werdenden Endlichkeit von Ressourcen als auch der mit dem Abbau und ihrer Nutzung verbundenen Beiträge zum Klimawandel und weiteren Umweltdimensionen gilt es, stoffliche Dissipation zukünftig stärker in den wissenschaftlichen Fokus zu rücken, was Gegenstand dieser Arbeit war. In Form des Dissipationskonzeptes trägt die vorliegende Arbeit dazu bei, ein komplexeres Verständnis potenzieller Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge unseres stetig wachsenden Hungers nach Rohstoffen und technologischen Produkten und deren möglichen Umweltfolgen zu etablieren. Denn dissipative Materialströme widersprechen sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Perspektive einem entschlossenen Handeln gegen den Klimawandel als auch einer damit notwendigerweise einhergehenden Ressourcenwende. Ein sorgsamer und zukunftsfähiger Umgang mit diesem Phänomen muss dabei unterschiedlichste Rahmenbedingungen berücksichtigen. Diese Forschungsarbeit soll im Rahmen des Promotionsclusters „Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz“ dabei helfen, ebendiese Rahmenbedingungen durch eine Identifizierung und Bestandsaufnahme gegenwärtiger dissipativer Materialnutzungen aufzuzeigen und einzugrenzen.

4.1.1 Fragestellung & Zielsetzung

Zur Bearbeitung bedurfte es einer Operationalisierung verschiedener Teilaspekte, darunter insbesondere:

Wie lässt sich Dissipation aus historischer Perspektive nachvollziehen und wie wird stoffliche Dissipation aktuell in der Wissenschaft integriert?

Anhand zweier Fallbeispiele, den Elementen Gadolinium und Helium, wurden ganz spezifische Stoffeigenschaften sowie die ökologischen Auswirkungen ihrer Dissipation in die Umwelt aus interdisziplinärer Perspektive analysiert. Auf dieser Grundlage wurden die Erkenntnisse im politischen und wirtschaftlichen Kontext diskutiert und Handlungsoptionen für eine nachhaltigere Nutzung von Rohstoffen aufgezeigt.

Die grundlegenden Fragestellungen bezüglich der Fallstudienanalyse können wie folgt formuliert werden:

¹⁴ Dieser Text zum Promotionsvorhaben III basiert auf der Dissertation von Thomas Kippe an der Universität Augsburg mit dem Titel „Dissipation von Funktionsmaterialien“ und einzelne Textabschnitte wurden teilweise direkt übernommen (Dissertation verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-915587>). Weitere Textabschnitte stammen aus der Veröffentlichung: Thomas Kippe und Armin Reller. "Die Geschichte der anthropogenen Metallmobilisierung: Von der Kupferzeit bis zur Metallzeit der Gegenwart." *Chemie in unserer Zeit* (2022) (<https://doi.org/10.1002/ciuz.202100004>).

Welche Charakteristika und welche Pfade von Dissipation zeigen sich innerhalb sowie zwischen den Erdsphären (Technosphäre, Geosphäre)? Wie können diese quantitativ als auch qualitativ nachvollzogen werden? D.h. welche unterschiedlichen Methoden können für eine ökologisch orientierte, inter- und transdisziplinäre Analyse von Dissipation empfohlen werden?

Die generierten Erkenntnisse sollen dabei helfen, den mit der Dissipation von Stoffen einhergehenden Problemen und Herausforderungen im Kontext eines klimaverträglichen und schonenden Umgangs mit Ressourcen entgegenzutreten. Daher wurde folgende Teilfragestellung diskutiert:

Welche Handlungsoptionen zur Vermeidung beziehungsweise Verminderung von Dissipation können aufgezeigt werden?

Es war allerdings nicht Anspruch dieser Arbeit, abschließende Antworten auf diese überaus komplexe und weit gefächerte Thematik zu finden. Vielmehr werden diese Fragestellungen ausschnitthaft mit Blick auf die konkreten Fallbeispiele behandelt. Die Ergebnisse sollen daher als Input für eine künftig breitere Debatte dienen. Als übergeordnetes Ziel dieser Arbeit kann daher angesehen werden, ***einen Beitrag zur ausgesprochen jungen Thematik der stofflichen Dissipation in der Wissenschaft zu leisten und die Diskussion darüber in einem inter- und transdisziplinären¹⁵ Forschungskontext zu fördern.***

4.1.2 Historischer Kontext der anthropogenen Stoffmobilisierung

Den inhaltlichen Einstieg in die Arbeit bildet ein Kapitel, das einen Blick auf die historische Entwicklung unseres anthropogenen Materialbedarfs wirft, um dessen rezenten, vorläufigen Höhepunkt als Fundament für die genauere Analyse heutiger Stoffmobilisierung zu legen. In diesem Abschlussbericht wird auf die wichtigsten Entwicklungen aus diesem über 7.000jährigem Zeitraum eingegangen.

Die Geschichte der menschlichen Rohstoff- respektive der Metallnutzung ergibt sich insbesondere in ihrer Urzeit aus einzelnen archäologischen Funden. Der dänische Archäologe Christian Jürgensen Thomsen hat in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts charakteristische Materialien zur Werkzeug-, Waffen- und Schmuckherstellung in die drei Perioden Steinzeit, Bronzezeit und Eisenzeit für den europäischen Raum eingeteilt. Diese Einteilung ist bis heute als das Dreiperiodensystem bekannt (Hansen 2001, S. 11), wobei die genannten Perioden global betrachtet auf unterschiedliche Zeiträume fallen und somit zeitlich nur schwer festgelegt werden können. Vermutlich begann die Metallnutzung durch den Menschen etwa 7.000-5.000 Jahre vor der Zeitenwende (Held 2018, S. 15).

Anfangs begrenzte sich die Metallnutzung vermutlich auf gediegen vorkommende Metalle, insbesondere Gold und Silber sowie ein wenig Kupfer. Aber erst die bewusste metallurgische Verarbeitung von metallhaltigen Erzen bildet den Beginn der jeweiligen Metallzeiten (Pernicka 2016, S. 62). Einen weiteren technologischen Höhepunkt stellt die Legierung von Metallen dar – also das Zusammenschmelzen unterschiedlicher Metalle, was in neuen Eigenschaften resultiert. Insgesamt begrenzte sich die anthropogene Metallnutzung in den frühen Jahrtausenden seit der erstmaligen Nutzung auf die sogenannten 7 Metalle des Altertums (Gold, Kupfer, Silber, Blei,

¹⁵ Hierzu existieren unterschiedliche Definitionen. Für diese Arbeit lässt sich Folgendes festhalten: Interdisziplinarität beschreibt die Zusammenarbeit verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen, um durch Synergien neue Erkenntnisse zu gewinnen. Transdisziplinarität lässt unter Einbezug unterschiedlichster Akteure die Disziplingrenzen so weit verschwimmen, dass neue Methoden und Konzepte durch gegenseitige Kritik und Reflexion einen Mehrwert generieren.

Zinn, Eisen, Quecksilber). Die hauptsächlich von organischen Materialien wie Holz geprägte frühgeschichtliche Rohstoffnutzung wies eine sehr regional geprägte Gewinnungs- und Nutzungsstruktur auf. Dies änderte sich durch die hohe Beständigkeit und insbesondere durch die Wiederverwendbarkeit von Metallen durch Einschmelzen. So zeugen das Kupferbeil der kupferzeitlichen Mumie „Ötzi“ oder auch die Himmelsscheibe von Nebra von deutlich ausgeprägten überregionalen, teils kontinentalen Herstellungspfaden (Artioli et al. 2017, S. 7; Meller und Michel 2018, S. 7–9). Von regionalen, kleinräumigen und voneinander größtenteils isolierten, tribal geprägten Strukturen der Rohstoffnutzung ging durch den Übergang in die „Metallzeit“ aufgrund der regional unterschiedlichen Verfügbarkeit einzelner Metalle eine Vernetzung vorstatten, die im Laufe der daran ansetzenden Jahrhunderte und Jahrtausende stetig zunahm.

Einen vorläufigen Höhepunkt erfuhr die Metallproduktion in der römischen und griechischen Antike. Neben dem Metallbedarf für Waffen und Rüstungen entfiel ein Großteil des Metalls auf die Herstellung von Münzen, die erst seit wenigen Jahrhunderten als Tauschmittel eingesetzt wurden. Sie bestanden primär aus Gold, Silber, Elektrum (Legierung aus Gold und Silber) sowie Kupfer. Neben dem steigenden Bedarf sorgte auch die großangelegte Sklavenarbeit für eine enorme Ausweitung der Metallproduktion. Die Gewinnung vieler Metalle wie Kupfer, Gold, Silber, Blei und Quecksilber befand sich zur Zeit des Römischen Imperiums auf ihrem vorläufigen Höhepunkt. Beispielsweise lag die jährliche weltweite Kupferproduktion um die Zeitenwende bei etwa 15.000 t pro Jahr, was primär auf das Römische Reich zurückzuführen ist. Nach dessen Zusammenbruch sollte dieses Produktionsniveau erst während der industriellen Revolution wieder erreicht werden (Hong et al. 1996, S. 247).

Mit dem Niedergang des Römischen Reiches setzte auch ein vorübergehender Einbruch der Metallproduktion in Europa ein. Erst im Hochmittelalter kam es zu einer neuerlichen Blüte, die schließlich in der frühen Neuzeit in den Metallimporten aus der „Neuen Welt“ Amerika gipfelte. Hier wurden insbesondere Gold und Silber von den Spaniern in Südamerika gefördert und in die Alte Welt verschifft. Bis zum 17. Jahrhundert erfasste der Handel alle besiedelten Kontinente bis auf Australien, das erst später im Sinne der westlichen Zivilisationen ‚entdeckt‘ und in das globale Handelssystem aufgenommen wurde (Buckman 2013, S. 3).

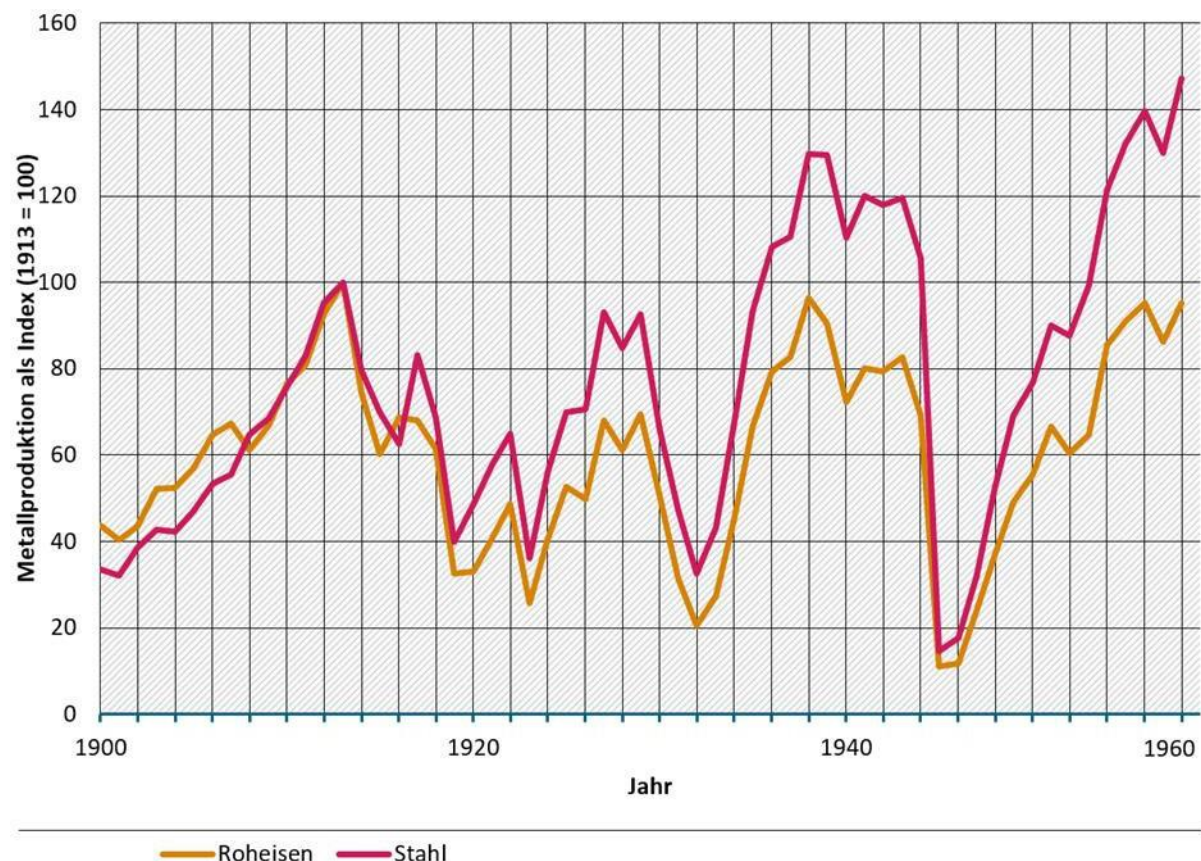
Doch immer noch basierte die vollbrachte Arbeit, beispielsweise zur Förderung und Verarbeitung von Metallen, auf einem geringen energetischen Niveau, hauptsächlich bereitgestellt durch menschliche und tierische Arbeit sowie durch natürliche Energieträger wie Wind- und Wasserkraft (Steffen et al. 2011, S. 848). Dies änderte sich grundlegend im nun folgenden Verlauf der Geschichte, als im Zuge der Industrialisierung durch neu entdeckte, fossile Energieressourcen ein völlig neues energetisches Niveau erreicht wurde. Die Industrialisierung markiert einen Wandel des menschlichen Handelns in politischen, sozialgesellschaftlichen, geistig-kulturellen als natürlich auch materiellen Aspekten. Mitte des 18. Jahrhunderts führten neue Technologien und Arbeitsweisen zu Produktionsraten bisher gänzlich ungekannten Ausmaßes. Transport- und Kommunikationskosten sanken drastisch und die Ausweitung der Handels-, Personen-, Kapital- und Technologieflüsse initiierte den ersten Akt der Globalisierung. Den Anfang dieser Epoche machte die Erfindung der Dampfmaschine durch Thomas Newcomen. Hierdurch konnte das Grundwasser in Bergwerken abgepumpt und die Minenschächte in tiefere Lagen als je zuvor getrieben werden (Schivelbusch 2014, S. 2). Das Fortschreiten der Industrialisierung und die steigende Metallnutzung beeinflussten sich gegenseitig. Neue Maschinen und Verfahrensweisen ermöglichten eine enorme Ausdehnung der Fördermengen. Gleichzeitig benötigten die Maschinen, Technologien und deren Infrastruktur große Mengen dieser Rohstoffe. Dies gilt etwa für die Bereiche Maschinenbau, Gleise für den Ausbau des Eisenbahnnetzes oder Kupferkabel zur Übertragung von Elektrizität. Diese Entwicklung setzte

sich in den darauffolgenden Jahrzehnten bis hinein ins 20. Jahrhundert fort und nahm dabei an Geschwindigkeit stetig zu.

Abbildung 5 zeigt den Produktionsverlauf von Roheisen und Stahl zwischen 1900 und 1960. Bei Stahl handelt es sich um einen Werkstoff aus Eisen, der durch einen geringen Kohlenstoffanteil von unter 2 % hergestellt wird. Vor allem in Kombination mit weiteren Legierungsmetallen wie Chrom, Kupfer oder Nickel erreicht Stahl ein breites Anwendungsspektrum mit hoher Qualität in Bezug auf bestimmte Eigenschaften wie Festigkeit oder Formbarkeit. Im Zeitverlauf fallen insbesondere der Produktionseinbruch während der Weltwirtschaftskrise 1929 sowie der rasch daran ansetzende Produktionsanstieg mit seinem Höhepunkt während des 2. Weltkriegs auf. Die Nachkriegszeit läutete schließlich den bisherigen Höhepunkt der hier gezeigten Produktion, aber auch der gesamten Globalisierungsprozesse ein. Dieser unübertroffen rasante Anstieg an Globalisierungsprozessen seit den 1950er Jahren ist heute als „Great Acceleration“, die Große Beschleunigung, bekannt.

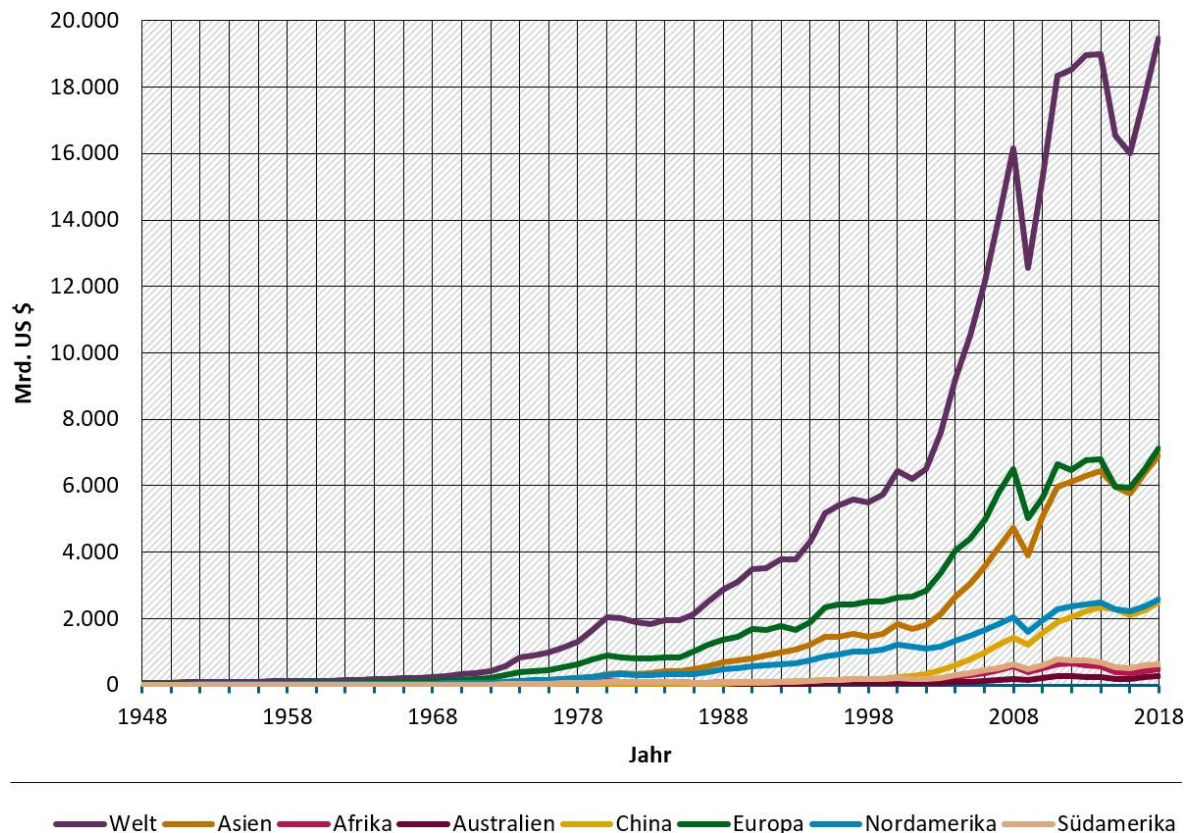
Abbildung 6 kann sinnbildlich für diesen Prozess stehen. Sie zeigt die Entwicklung der weltweiten Warentransporte zwischen 1948 und 2018 – und damit indirekt die weltweite Verteilung von Rohstoffen und Produkten. Der rasante, teils exponentielle Anstieg ist deutlich zu erkennen.

Abbildung 5: Roheisen- und Stahlproduktion zwischen 1900 und 1960



Quelle: eigene Darstellung, Daten von Hoffmann 2007, S. 352–354

Abbildung 6: Warenexporte nach Kontinenten im Zeitraum 1948 – 2018

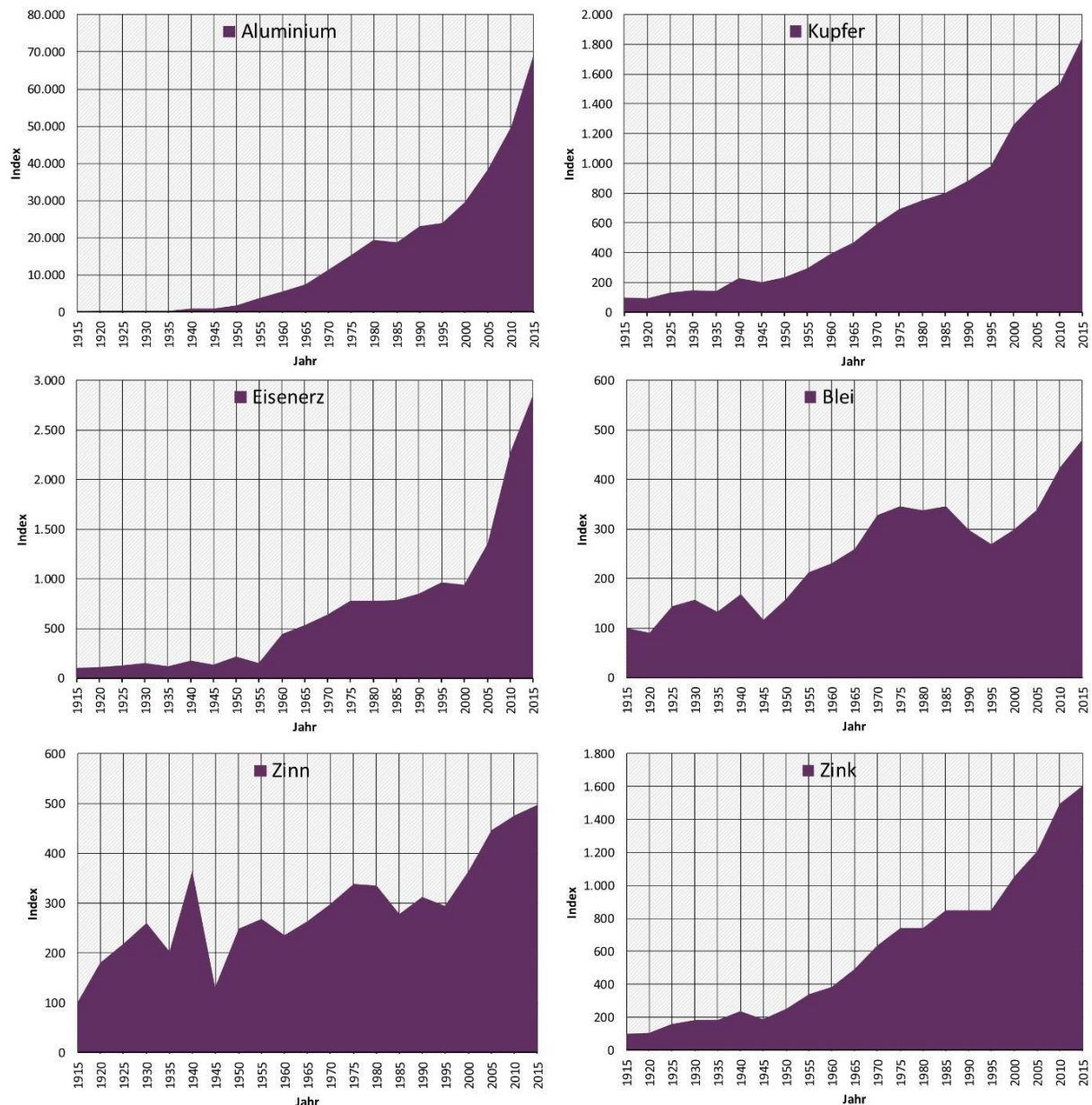


Quelle: eigene Darstellung, Daten von WTO 2001

Die ursprünglich 2004 von Steffen et al. veröffentlichten Grafiken zu Great Acceleration, die sozioökonomische und Erdsystem-Trends von 1750 bis 2000 zeigen, finden bis heute große Beachtung. Sie zeigen einen postindustriellen Anstieg und einen noch stärkeren Anstieg ab 1950, bezogen auf verschiedene Indikatoren wie Weltbevölkerung, globales Bruttoinlandsprodukt (BIP) oder atmosphärische Kohlendioxidkonzentration. So stieg etwa die Weltbevölkerung zwischen 1950 und 2000 von 2,5 auf 6 Milliarden Menschen (Steffen et al. 2007, S. 617). Neben dem exponentiellen Bevölkerungswachstum ist der steigende Ressourcenverbrauch die treibende Kraft für die folgenreichen Veränderungen unserer Zeit. Weitere sozioökonomische Bereiche, die untersucht und in denen exponentielle Trends beobachtet wurden, sind beispielsweise die weltweite Stickstoffdünger- sowie Wassernutzung, die Anzahl an Staudämmen und die Menge an motorisierten Fahrzeugen (Steffen et al. 2007, S. 617). Dementsprechend werden aber auch die ökologischen Auswirkungen dieser Entwicklung immer deutlicher, sei es der Anstieg des CO₂-Gehalts in der Atmosphäre, der Niedergang der globalen Biodiversität oder drastische Verluste tropischer Regenwälder (Steffen et al. 2004, S. 17).

Die von Steffen (2004, S. 16–17) aufgezeigten Entwicklungen können auch auf einzelne Rohstoffe übertragen werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde die historische Rohstoffgewinnung anhand von sechs Metallen aufgearbeitet. Abbildung 7 zeigt die relativen Fördermengen (dargestellt als Index mit Basisjahr 1915) von Aluminium, Kupfer, Eisenerz, Blei, Zinn und Zink zwischen 1915 und 2015. Auch hier ist die ansteigende Verlaufskurve der geförderten Mengen zu erkennen.

Abbildung 7: Produktionsanstieg verschiedener Metalle von 1915 – 2015
(dargestellt als Index (100 = 1915))



Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage: BGS 1913–1947, 1942–1971, 1970–2002, 2000–2015

Neben die offenkundige quantitative Förderzunahme vieler Rohstoffe traten in den letzten Jahrzehnten noch weitere Trends, die für steigende Herausforderungen im anthropogenen Umgang mit Rohstoffen und ihren ökologischen sowie sozialen Auswirkungen sorgen. Dazu zählen beispielsweise die Miniaturisierung von Produkten, Rebound-Effekte in Folge von Effizienzsteigerungen sowie die Nutzung von immer mehr Elementen innerhalb eines Produktes. Am Beispiel der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) lässt sich der Wandel der Rohstoffnutzung gut aufzeigen. Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der genutzten Elemente in der IKT, farblich kategorisiert im Zeitraum zwischen den 1980er Jahren und heute. Von einem knappen Dutzend verschiedener Elemente in den 80ern ging die Entwicklung so weit, dass heute nahezu alle stabilen Elemente in einem Produkt vorkommen können, da jedes dieser Elemente ganz spezifische Funktionen ermöglicht.

Abbildung 8: Entwicklung der genutzten Elemente in Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT)

Wasserstoff 1 H 1.0079																		Helium 2 He 4.0026						
Lithium 3 Li 6.941	Beryllium 4 Be 9.0122																	Bor 5 B 10.811	Kohlenstoff 6 C 12.011	Sickstoff 7 N 14.007	Sauerstoff 8 O 15.999	Fluor 9 F 18.998	Neon 10 Ne 20.180	
Natrium 11 Na 22.990	Magnesium 12 Mg 24.305																	Aluminium 13 Al 26.982	Silizium 14 Si 28.086	Phosphor 15 P 30.974	Schwefel 16 S 32.065	Chlor 17 Cl 35.453	Argon 18 Ar 39.948	
Kalium 19 K 39.098	Calcium 20 Ca 40.078	Scandium 21 Sc 44.956	Titan 22 Ti 47.867	Vanadium 23 V 50.942	Chrom 24 Cr 51.996	Mangan 25 Mn 54.938	Eisen 26 Fe 55.845	Kobalt 27 Co 58.933	Nickel 28 Ni 58.693	Kupfer 29 Cu 63.546	Zink 30 Zn 65.38	Gallium 31 Ga 69.723	Germanium 32 Ge 72.64	Arsen 33 As 74.922	Selen 34 Se 78.96	Brom 35 Br 79.904	Krypton 36 Kr 83.796							
Rubidium 37 Rb 85.468	Strontium 38 Sr 87.62	Yttrium 39 Y 88.906	Zirkon 40 Zr 91.224	Niob 41 Nb 92.906	Molybdän 42 Mo 95.96	Technetium 43 Tc [98]	Ruthenium 44 Ru 101.07	Rhodium 45 Rh 102.91	Palladium 46 Pd 106.42	Silber 47 Ag 107.87	Kadmium 48 Cd 112.41	Indium 49 In 114.82	Zinn 50 Sn 118.71	Antimon 51 Sb 121.76	Tellur 52 Te 127.60	Iod 53 I 126.90	Xenon 54 Xe 131.29							
Cäsium 55 Cs 132.91	Barium 56 Ba 137.33																	Quecksilber 80 Hg 200.59	Thallium 81 Tl 204.38	Blei 82 Pb 207.2	Bismut 83 Bi 208.98	Polonium 84 Po [209]	Astat 85 At [210]	Radon 86 Rn [222]
Francium 87 Fr [223]	Radium 88 Ra [226]	Rutherfordium 104 Rf [261]	Dubnium 105 Db [262]	Seaborgium 106 Sg [266]	Bohrium 107 Bh [264]	Hassium 108 Hs [277]	Mitrium 109 Mt [268]	Darmstadtium 110 Ds [271]	Röntgenium 111 Rg [272]															

1980er

1990er

2000er

Lanthan 57 La 138.91	Cer 58 Ce 140.12	Praseodym 59 Pr 140.91	Neyodym 60 Nd 144.24	Promethium 61 Pm [145]	Samarium 62 Sm 150.36	Europium 63 Eu 151.96	Gadolinium 64 Gd 157.25	Terbium 65 Tb 158.93	Dysprosium 66 Dy 162.50	Hoium 67 Ho 164.93	Erbium 68 Er 167.26	Thulium 69 Tm 168.93	Ytterbium 70 Yb 173.05	Lutetium 71 Lu 174.97
Actinium 89 Ac [227]	Thorium 90 Th 232.04	Protactinium 91 Pa 231.04	Uran 92 U 238.03	Neptunium 93 Np [237]	Plutonium 94 Pu [244]	Americium 95 Am [243]	Curium 96 Cm [247]	Berkelium 97 Bk [247]	Californium 98 Cf [251]	Einsteinium 99 Es [252]	Fermium 100 Fm [257]	Mendelevium 101 Md [258]	Noelium 102 No [259]	Lawrencium 103 Lr [262]

Quelle: eigene Darstellung nach National Museums of Scotland (o.J.); Theis (2007)

Auch über die IKT hinaus nimmt die Funktionalisierung des Periodensystems der Elemente stetig zu. Insbesondere im Hinblick auf die angestrebte Erreichung der Ziele einer nachhaltigen Entwicklung und des Pariser Abkommens werden in Hightech-Anwendungen immer mehr ganz spezielle Funktionsmetalle wie Indium, Germanium, Gallium oder die Seltenerdelemente benötigt. Diese funktionell unverzichtbaren Metalle werden oft in sehr kleinen, teilweise nanoskopischen Mengen und Formen eingesetzt. Eine effiziente Trennung der Sekundärressourcen zum Lebensende der jeweiligen Produkte aus dem immer komplexer werdenden Materialmix ist technisch anspruchsvoll und wirtschaftlich oft zu teuer (Reuter 2013, S. 53).

All diese Trends und Entwicklungen führen dazu, dass der Mensch seine natürliche Umgebung immer stärker verändert. Rohstoffe werden aufwändig gefördert, Fabriken gebaut, Städte errichtet, Energie zur Verfügung gestellt und Nahrungsmittel für über 7 Milliarden Menschen produziert (Zalasiewicz et al. 2016, S. 2). Doch mehr als die Hälfte der Metalle in der Erdkruste haben keine biologische Funktion und werden primär durch uns Menschen mobilisiert (Reller et al. 2013, S. 213). Das Ausmaß dieser anthropogen induzierten Mobilisierung übersteigt mittlerweile zahlreiche natürliche Stoffströme (WBGU 2011, S. 33). Natürliche, biogeochemische Stoffkreisläufe stehen damit nicht mehr für sich gesondert, sondern werden zunehmend von technosphärischen, anthropogenen Stoffbahnen beeinflusst. Die ursprünglich und für lange Zeit konstante evolutionäre Trajektorie, die uns von anderen Säugetieren nicht differenzierte, hat mittlerweile völlig neue Bahnen erreicht. In diesem Kontext wird heutzutage vermehrt vom Anthropozän als neuer geochronologischen Epoche gesprochen (Steffen 2015, S. 82).

Immer häufiger stellen wissenschaftliche Arbeiten den aus den Fugen geratenen Mensch-Umwelt-Nexus heraus, sei es durch das beschriebene Konzept des Anthropozäns oder durch weitere bekannte, global relevante Konzepte und Publikationen wie die Planetaren Grenzen oder die IPCC-Berichte zum Klimawandel. Die beträchtlichen Fortschritte menschlicher Zivilisation werden durch teils drastische ökologische Auswirkungen teuer erkauft. Dissipation,

das titelgebende Phänomen der Forschungsarbeit, spiegelt in diesem Kontext einen nicht unerheblichen Anteil an den einflussreichen anthropogen bedingten Veränderungen im Mensch-Umwelt-Gefüge wider.

4.2 Stand der Forschung & Begriffe

Anhand einer umfassenden Literaturanalyse wurde der aktuelle Forschungsstand zum Thema Dissipation beleuchtet. Die wichtigsten Erkenntnisse werden in aller Kürze dargelegt.

4.2.1 Der Begriff Dissipation

Prinzipiell werden Metalle im anthropogenen Kontext im wörtlichen Sinne genutzt. Nach dieser Nutzung können sie theoretisch nahezu beliebig, natürlich mit thermodynamischen Einschränkungen, durch Recycling und Einschmelzen wiederverwendet werden. Dissipation jedoch entzieht die Metalle den nutzbaren Stoffkreisläufen und stellt somit den eigentlichen Metallverbrauch dar. Aber auch Nichtmetalle können feinverteilt werden, so etwa die Verteilung von Phosphor und Stickstoff in Form von Düngemitteln, das Edelgas Helium, das in der Arbeit eingehender analysiert wurde, oder auch das mittlerweile weithin bekannte Mikroplastik.

Das Phänomen „Dissipation“ leitet sich vom lateinischen Verb dissipare ab, was so viel wie auseinanderstreuen oder verteilen bedeutet. Bekannt ist Dissipation ursprünglich aus der Physik, respektive der Thermodynamik. Dabei beschreibt es den destruktiven Vorgang in einem dynamischen System, bei dem (nutzbare) Energie makroskopischer Körper in eine nicht mehr nutzbare Energieform mit ungeordneter Molekülbewegung übergeht. Dieser Umwandlungsprozess bringt eine Entropiezunahme mit sich und ist damit irreversibel. Ein typisches Beispiel aus der Thermodynamik ist die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärmeenergie aufgrund von Reibungsvorgängen (Rifkin 1982, S. 46–47).

Analog zur energetischen Dissipation kann auch von stofflicher Dissipation gesprochen werden. Aus einer umwelt- und ressourcenspezifischen Sicht existieren hierzu bisher allerdings nur wenige Definitionsansätze. Ein tiefgründiges Literaturscreening lieferte Informationen zu einigen wenigen wissenschaftlichen Abhandlungen seit den 1990er Jahren, so etwa von Ayres (1994), Zimmermann und Gößling-Reisemann (2013) und Beylot et al. (2020).

4.2.2 Abgeleitete Dissipationsursachen

Zusammenfassend konnten anhand des Literaturscreenings gewisse Gemeinsamkeiten ausgemacht werden. Zum einen ergeben sich unterschiedliche Gründe für stoffliche Dissipation. Diese lassen sich systemisch entlang einer klassischen Prozesskette verorten:

- ▶ Ineffiziente Rohstoffverarbeitung
- ▶ Geringe Stoffkonzentration eines Materials im Produkt relativ zu den anderen Materialien
- ▶ Dissipative Anwendungen (Nutzungsphase)
- ▶ Ineffiziente Recycling-/Sammelsysteme

Die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse flossen, zusammen mit den neu generierten Forschungsergebnissen, zum Ende der Arbeit in eine umfassende Neudefinition von stofflicher Dissipation, die an dieser Stelle vorweggenommen wird:

Dissipation bezeichnet Materialflüsse, durch die Rohstoffe dem anthropogenen Nutzungssystem und damit einer Funktionalisierung durch den Menschen entfliehen.

Die Materialflüsse können in verschiedene Empfangskompartimente gelangen. Diese sind die natürliche Umwelt, andere Materialströme in der Technosphäre, sowie Deponien, die als Grenzbereich zwischen Umwelt und Technosphäre gesehen werden. Die entstehenden Stoffkonzentrationen sind in diesen Kompartimenten so gering, dass eine Rückgewinnung zu einem bestimmten Zeitpunkt unter entsprechenden technologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen nicht möglich ist. Für wenige Stoffe ist auch ein dissipativer Austritt aus dem Erdsystem möglich.

4.3 Auswahl von Fallbeispielen

Angesichts der anhand des Literaturscreenings aufgezeigten, teils äußerst unterschiedlichen Formen und Ausprägungen von Dissipation, erschien es für diese Arbeit kaum möglich, das breite Spektrum in seiner Gänze aufzuzeigen. Dissipation kann aus unterschiedlichsten Gründen stattfinden, sie kann beabsichtigt oder unbeabsichtigt sein. Ebenso kann sie an allen Stellen entlang der Wertschöpfungskette auftreten, von der Primärförderung über die Nutzung bis hin zu dissipativen End-of-Life Szenarien. Die Pfade verteilen sich auf alle Aggregatzustände, was wiederum zu sehr unterschiedlichen räumlichen Verteilungsmustern führt.

Aus diesen Gründen wurde die Untersuchung von zwei konkreten Fallbeispielen als übergeordnete Methode gewählt, anhand derer charakteristische Sachverhalte von Dissipation herausgearbeitet werden sollten. Ausgewählt wurden die Fallbeispiele anhand bereits bestehender Kenntnisse, die eine Relevanz für die Forschungsfragen ergaben. Beide Stoffe sind von Relevanz im Gesundheitswesen.

Bei Fallbeispiel 1 handelt es sich um **Gadolinium**, einem Element aus der Gruppe der Seltenen Erden, das in der MRT als Kontrastmittel dient.

Fallbeispiel 2 behandelt **Helium**, ein Gas, das auf der Erde selten ist und immer elementar vorkommt. Es ist insbesondere im High-Tech-Bereich von großer Bedeutung. So wird dieses Gas etwa in Magnetresonanztomographen (MRTs) zur Kühlung der starken Magneten im Inneren der Tomographen genutzt.

4.4 Fallbeispiel Gadolinium – Zusammenfassung

Dieses Kapitel liefert einen zusammenfassenden Überblick über das Fallbeispiel Gadolinium (Gd). Das Element aus der Gruppe der Seltenen Erden ist als Bestandteil von Kontrastmitteln ein essenzielles Element für Kernspintomographen und wird häufig zur besseren visuellen Darstellung genutzt.

4.4.1 Die Gruppe der Seltenen Erden und Gadolinium im Besonderen

Gadolinium ist ein Element aus der Gruppe der Seltenerd-elemente (SEE). Aufgrund ihrer teilweise hochinteressanten physikalischen Eigenschaften wie z.B. den magnetischen Eigenschaften von Neodym und anderen waren diese f-Shell-Metalle bereits Gegenstand verschiedener Materialflussanalysen (Guyonnet et al. 2013; Guyonnet et al. 2015; Alonso et al. 2012; Sprecher, Kleijn, & Kramer, 2014; Du & Graedel, 2011). Gadolinium eignet sich aufgrund seiner speziellen Anwendung im Bereich der Medizintechnik, nämlich als spezifische Substanz, die als Kontrastmittel in der MRT fungiert, besonders gut für die Erforschung des Themas Dissipation.

Diese nicht-invasive Diagnosetechnik dient der Visualisierung innerer Strukturen und Organe. Der Grund für die Verwendung von Gd liegt in seiner elektronischen Struktur, d.h. die 7 ungepaarten 4f-Elektronen machen Gd zu einem sehr starken Paramagneten (Caravan, Ellison,

McMurry, & Lauffer, 1999). Das natürlich vorkommende Gd(III)-Ion ist jedoch aufgrund seines ähnlichen Radius wie Ca^{2+} hochtoxisch, was zum so genannten Ca-Antagonismus führen kann, einem Konkurrenzverhalten bei biologischen Prozessen, die Ca^{2+} erfordern. Daher werden die Gd^{3+} -Ionen durch Polyaminocarbonsäurechelate komplexiert, wodurch die Kontrastmittel eine hohe chemische Stabilität erlangen sollen. Der Körper scheidet das Mittel nach der Anwendung schnell wieder aus, mit einer durchschnittlichen Halbwertszeit von 1-2 Stunden (Zhou & Lu 2013, S. 3).

Genaue Zahlen zur Gd-Produktion und -Nachfrage sind kaum verfügbar. Eine detaillierte Betrachtung einzelner Erzvorkommen und ihrer jeweiligen elementaren Zusammensetzung und der jeweiligen Produktionszahlen führte zu einer Jahresproduktion von 2.696 t.

Untersuchungen zum Thema Gd in der Umwelt erregten erstmals im Jahr 1996 Aufmerksamkeit, als in städtischen Flüssen in Deutschland anomal hohe Konzentrationen im Vergleich zu den geogenen Konzentrationen gemessen wurden, die erstmals von Bau und Dulski (1996) beschrieben wurden. Seitdem existieren Nachweise von Kontaminationen von Flüssen, Grundwasser und sogar Leitungswasser aus städtischen Ballungsräumen in der ganzen Welt, z. B. aus Japan, Australien und den USA (Lawrence et al. 2009; Hatje et al. 2016). Die höchsten Gd-Anomalien konnten in den am stärksten industrialisierten und dicht besiedelten Gebieten gefunden werden, in denen sich auch die meisten medizinischen Einrichtungen befinden. Diese Ergebnisse deuten bereits darauf hin, dass eine Abtrennung der Stoffe aus dem Abwasser in Kläranlagen kaum stattfindet (Trapasso et al. 2021, S. 13).

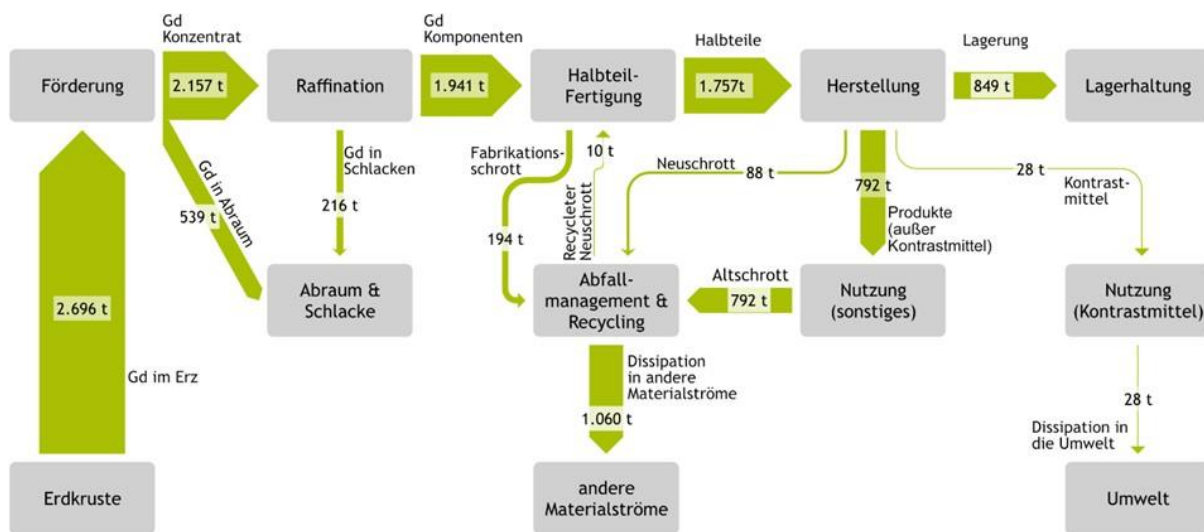
Ökologische Auswirkungen

In den letzten Jahren wurden mehrere Studien durchgeführt, welche die Bioakkumulation in der Flora und Fauna belegen (Ebrahimi und Barbieri 2019; Lingott et al. 2016; Jakubowski et al. 2013). Der Weg in die menschliche Nahrungskette ist damit geebnet. Zu den beobachteten biologischen Auswirkungen gehören Veränderungen der Genausprägung, der zellulären Homöostase, der Schalenbildung wirbelloser Wassertiere sowie die Verringerung der Stoffwechselaktivitäten (Trapasso et al. 2021, S. 13). Und auch wenn die Bioakkumulation von bestimmten Substanzen, wie auch hier im Falle von Gadolinium, in Organismen auf einem subletalen Niveau liegt, können potenzielle Auswirkungen wie eine verringerte Fertilität oder permanente Schäden am Genmaterial schwerwiegende Folgen für Ökosysteme haben.

4.4.2 Materialflussanalyse von Gd

Im Zuge der Arbeit wurde eine Materialflussanalyse (MFA) mit dem Ziel durchgeführt, die Stoffflüsse eines einzelnen Seltenerdelements durch das technosphärische System mit einem besonderen Blick auf die dissipativen Verlustwege zu veranschaulichen.

Abbildung 9: Globale Materialflussanalyse (MFA) von Gadolinium für das Jahr 2016



Quelle: eigene Darstellung nach S&P Global Market Intelligence (2019a); S&P Global Market Intelligence (2019b); Yang et al. (2013); Du und Graedel (2011); Lynas Corp. Ltd. (2010)

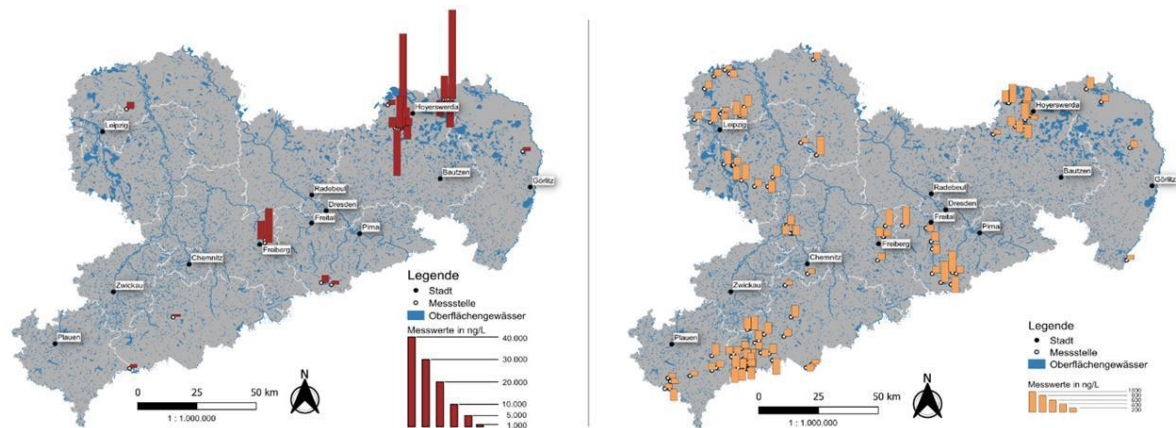
Mit Blick auf die Ergebnisse der MFA, dargestellt in Abbildung 9, ergeben sich insgesamt drei Dissipationspfade für Gadolinium. Die ersten Verluste treten während der Anfangsphase der Stoffkette auf. Erhebliche Mengen gehen während der Gewinnungs- und Aufbereitungsphase in Form von Erzabfällen und Schlacken aus dem Raffinationsprozess verloren. Zweitens landen beträchtliche Mengen in anderen Stoffströmen, die aus einer unzureichenden (Produktions-)Abfallbehandlung und einem nicht vorhandenen Recycling resultieren, was zu weiteren Herausforderungen wie dem Downcycling anderer Materialien führt. Drittens gelangt Gd über die Nutzungsphase direkt in die Umwelt, wie das Beispiel der Kontrastmittel zeigt. Zwar handelt es sich dabei um verhältnismäßig geringe Mengen. Im Zuge der Arbeit fanden sich jedoch diverse Studien, die ökologische Risiken offenbarten. Dadurch wurde deutlich, dass diese Stoffströme nicht zu vernachlässigen sind.

Zusammengefasst gelangen von der hundertprozentigen Dissipation 41 % in Schlacken und Deponien, 57 % in andere Stoffströme und 2 % direkt in die Umwelt. Wie bereits herausgestellt können im Laufe der Zeit aber weitere Stoffmengen aus den beiden erstgenannten Kompartimenten in die Umwelt gelangen.

4.4.3 Räumliche Betrachtung von Gadolinium in sächsischen Oberflächengewässern

Für eine umfassende Untersuchung dieses Fallbeispiels galt es nach der Betrachtung der globalen Stoffflüsse auf einer Makroebene auch eine lokale Untersuchung anzugliedern, um entsprechende Besonderheiten auf Mikroebene beispielhaft berücksichtigen zu können. Hierzu wurden Gd-Messwerte von sächsischen Oberflächengewässern (OFG) eingehend analysiert (Abbildung 10). Dabei handelt es sich um die deutschlandweit aktuell einzigen frei zugänglichen Daten zur Gd-Belastung von Oberflächengewässern (LfU SN 2020).

Abbildung 10: Gd-Messwerte in sächsischen Oberflächengewässern für das Jahr 2019
(links: Gd > 1.000 ng/l; rechts: Gd < 1.000 ng/l (rechts))



Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage: LfU SN 2020; LfU SN 2021

Insbesondere die beobachteten Werte von über 1.000 ng/l stellen im deutschlandweiten Vergleich außergewöhnlich hohe Ausreißer dar, die es zu erklären und einzuordnen galt.

Auffällig war die Ballung hoher Gd-Messwerte im Bereich des Lausitzer Tagebaureviers rund um Hoyerswerda, sowie die Werte im Erzgebirge in der Region Freiberg. Die gemessenen 42.000 ng/l übersteigen nahezu alle per Literatur-Screening gefundenen Messwerte von urbanen Gewässern. So liegt dieser Wert beispielsweise fast doppelt so hoch wie der in ungereinigten Krankenhausabwässern gemessene Maximalwert des Klinikums Münster (Künnemeyer et al. 2009).

Allerdings fiel es schwer, diese Ergebnisse hinsichtlich ihres anthropogenen Ursprungs zu interpretieren, ohne den natürlichen Hintergrund zu kennen. Dieser bildet die geogene stellt die natürlich vorhandene Grundbelastung ohne einen potentiellen Eintrag durch den Menschen dar. Die geogene Konzentration kann durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden, etwa durch die Geologie, also den Aufbau und der Zusammensetzung der Erdkruste in dieser Region.

Aufgrund der nicht ausreichenden Datenlage konnte das übliche Vorgehen zur Berechnung der geogenen Konzentration nicht angewendet werden. Allerdings war es im Zuge der Arbeit möglich ein neues Verfahren zu entwickeln, das zumindest näherungsweise eine Aussage über den anthropogenen Einfluss an einzelnen Messwerten ermöglicht.

Insgesamt zeigte sich anhand dieser Untersuchungen, dass es in sächsischen OFG vereinzelt außergewöhnlich hohe Gd-Werte gibt. Diese können, insbesondere im Vergleich mit Messwerten aus anderen Regionen, nicht allein durch den Eintrag von Kontrastmitteln erklärt werden. Letztlich lag eine Verbindung der erhöhten Messwerte zu den Bergbautätigkeiten in der Region nahe, was sich mit der Vielzahl an Studien und Berichten über erhöhte Schwermetallbelastungen von sächsischen Gewässern, bedingt durch die Bergbau-Historie, deckt (Schräber et al. 1990; Hoyer 2016; Sundermann et al. 2018).

4.4.4 Fazit zum Fallbeispiel Gadolinium

Rückblickend zeigte sich das Element Gadolinium als passendes Fallbeispiel zur Erörterung einer anthropogen induzierten stofflichen Dissipation. Dieses Element steht dabei beispielhaft für die Vielfalt an Materialien mit spezifischen physikalisch-chemischen Eigenschaften, die in den letzten Jahrzehnten verstärkt Einzug in Produkte und Prozesse hielten. Die Fallstudie zeigt, dass eine Betrachtung der Dissipationspotentiale von Rohstoffen auf Makroebene, etwa in Form

der gezeigten Materialflussanalyse zwar durchaus hilfreich, aber bei weitem nicht ausreichend ist. Materialflussanalysen geben zwar die quantitativen Mengen eines Materials an, das die Systemgrenze zwischen Anthroposphäre und Umwelt überschreitet. Der anschließende Transport und Verbleib sowie mögliche Folgeprozesse, etwa Akkumulation in der Umwelt, werden dagegen oft nur unzureichend untersucht (Nuss & Blengini 2018, S. 570). Zudem müssen die Funktionsformen von Stoffen und nicht ihre elementare Form untersucht werden, um die potenziellen Auswirkungen nachvollziehen zu können. Denn industrielle Prozesse nutzen kaum reine Elemente, sondern ihre verschiedenen chemischen Formen und Verbindungen. Und nur so können konkrete Handlungsoptionen abgeleitet werden, wie das Fallbeispiel Kontrastmittel gezeigt hat. Auf Grundlage einer globalen Betrachtung von elementaren Stoffströmen kann kaum eine valide Aussage darüber getroffen werden, welche konkreten Implikationen mit bestimmten Nutzungsformen auf lokaler Ebene einhergehen.

4.5 Fallbeispiel Helium - Zusammenfassung

Im Folgenden werden die Grundzüge des Fallbeispiels Helium aufgezeigt. Neben den theoretischen Grundlagen und dem Aufzeigen der dissipativen Relevanz bestand die empirische Arbeit im Aufstellen einer Ökobilanz. Ziel dieser war es, die mit der Dissipation von Helium verbundenen Umweltauswirkungen aus einer umfassenden Systemperspektive auf globaler Ebene zu untersuchen. Denn Stoffverluste aus der Wertschöpfungskette müssen durch eine erhöhte Primärförderung ausgeglichen werden, was die Umweltauswirkungen erhöht.

Helium wird in seiner flüssigen Form als Kühlmittel für die supraleitenden Magneten in MRT-Geräten verwendet, um mit einer Temperatur von unter -296 °C die erforderliche Leitfähigkeit zu gewährleisten. Derzeit gibt es keine Alternative zu Helium in diesem Anwendungsfeld. Neuere MRT-Geräte sind so konzipiert, dass sie nur einen minimalen Heliumverlust aufweisen (Notardonato et al. 2017, S. 1).

4.5.1 Theoretische Grundlagen zur Dissipation von Helium

Obwohl Helium (He) nach Wasserstoff das zweithäufigste Element im Universum ist, ist es auf der Erde selten und endlich (Bradshaw & Hamacher 2013). Es entsteht durch den Zerfall der radioaktiven Elemente Uran (^{238}U) und Thorium (^{234}Th) in der Erdkruste (Grynia & Griffin 2016). Aufgrund dieser Genese können die höchsten Heliumkonzentrationen in Bereichen mit uran- und thorium-reichem Untergrundgestein in der Erdkruste erwartet werden, etwa bei Granit. Ein Großteil der Heliumatome gas aus dem porösen Gestein aus und gelangt schließlich in die Atmosphäre. Ein deutlich geringerer Teil wird durch impermeable Gesteinsschichten am Austritt gehindert. Diese Schichten bilden sogenannte Fallenstrukturen, unter welchen sich verschiedene Gase ansammeln und infolgedessen Erdgaslagerstätten bilden. Bradshaw und Hamacher (2013, S. 2695) zufolge liegt das Verhältnis von akkumuliertem Helium zur Gesamtmenge im Laufe der Erdgeschichte bei lediglich 10^{-7} (0,00001 %). Gewöhnlich sammelt sich Helium also in denselben geologischen Formationen an, die auch Erdgasvorkommen beherbergen, mit einer Mischung aus Kohlenwasserstoffen, hauptsächlich Methan und Ethan, und anderen atmosphärischen Gasen wie Stickstoff und Kohlendioxid (National Academy of Sciences 2010).

Bereits in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts war dieser Entstehungsprozess von Helium auf der Erde bekannt. Es wurde allerdings eine Logiklücke offensichtlich. Die bekannten Mengen von Uran und Thorium in der Erdkruste ($\approx 1 \times 10^{14}$ t und 5×10^{14} t) und deren Halbwertszeiten müssen zu einer Heliumproduktion in Höhe von 3×10^3 t pro Jahr führen. Wie bereits ausgeführt werden relativ zur Gesamtmenge nur sehr geringe Mengen durch geologische Fallenstrukturen in der Erdkruste zurückgehalten; der Großteil entgast über einen längeren

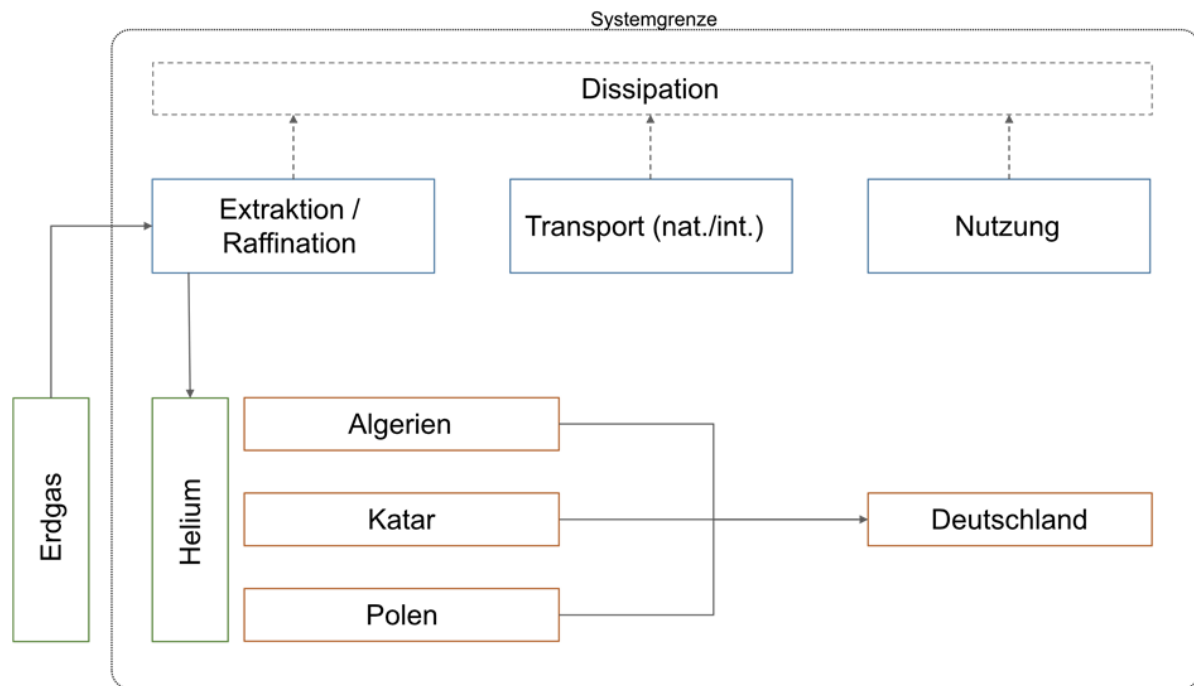
Zeitraum hinweg schließlich in die Atmosphäre. Seit der Entstehung der Erde müssten dementsprechend etwa 1×10^{14} t in die Atmosphäre gelangt sein. Die aktuelle Konzentration liegt jedoch bei lediglich 5,2 ppm, was $3,5 \times 10^9$ t entspricht (Bradshaw & Hamacher 2013, S. 2695). Zwangsläufig muss also die Frage gestellt werden, wo die enormen Mengen des restlichen Heliums verblieben sind. Hier wird offensichtlich, dass Helium in der Lage sein muss die Atmosphäre zu verlassen und in den Weltraum zu entgasen.

Mit Blick auf die gängigen Definitionsansätze zu Dissipation (z.B. Zimmermann & Gößling-Reisemann 2013) tendieren diese dazu, das Aufnahmemedium, etwa die Umwelt, Deponien oder andere Stoffströme, in den Vordergrund zu stellen. Lifset et al. (2012) beschreiben Dissipation als einen absichtlichen oder unbeabsichtigten Verlust von Material, der zu so niedrigen Konzentrationen im Aufnahmemedium führt, dass eine Verwertung technisch oder wirtschaftlich nicht möglich ist. Helium zeigt hier also eine völlig neue Qualität der Dissipation. Diese Art der Dissipation galt es in die bisherige Betrachtungsweise mitaufzunehmen. Zwar unterscheidet sich dieser Fall insbesondere hinsichtlich der potenziellen ökologischen Implikationen von anderen Stoffen (siehe Gadolinium). Denn Helium ist ein besonders inertes Gas, das per se keine gesundheitsschädlichen oder ökologisch belastenden Eigenschaften aufweist (abgesehen von der Tatsache, dass es ein Produkt der fossilen Brennstoff-Industrie ist). Vielmehr ergibt sich durch den dauerhaften, nicht umkehrbaren Verlust aus dem Erdsystem ein ganz eigener versorgungskritischer Aspekt eines endlichen Rohstoffs. Diesen gilt es stärker in den Fokus zu rücken, insbesondere mit Blick auf die einzigartigen Verwendungsfelder von Helium. Zudem zeigte sich das Management von Helium entlang der Wertschöpfungskette aufgrund der Flüchtigkeit als besonders schwierig – es wird eine ausgeprägte „Nicht-Nachhaltigkeit“ deutlich. Die damit einhergehenden Verluste müssen durch eine erhöhte Primärförderung kompensiert werden.

4.5.2 Ökobilanz von Helium in der MRT-Anwendung

Das Ziel war es, alle Prozessschritte von der Heliumgewinnung bis einschließlich der Nutzung im MRT zu identifizieren und zu quantifizieren. Somit konnten die ökologischen Auswirkungen eines MRT-Scans berechnet werden. Diese Berechnung war allerdings nur von indirekter Bedeutung. Vielmehr sollte dieses Vorgehen als Grundlage dafür dienen, die mit den dissipativen Verlusten entlang der Prozesskette von Helium einhergehenden ökologischen Auswirkungen zu bemessen. Dazu wurde anfangs ein idealisiertes Basisszenario ohne jeden Heliumverlust berechnet. Ausschlaggebend für die ökologischen Auswirkungen waren hier Faktoren wie die Heliumgewinnung, der Transport oder auch der Energieverbrauch im Betrieb. Daran anknüpfend konnten innerhalb dieses Modells die Stellschrauben der dissipativen Heliumverluste beliebig gedreht werden. So war es möglich entlang der Prozesskette verschiedene Verlustmengen zu integrieren, die zu einem absoluten Mehrbedarf an Helium führen. Dieser Mehrbedarf konnte mittels der Differenz aus Verlustszenario und Basisszenario berechnet werden.

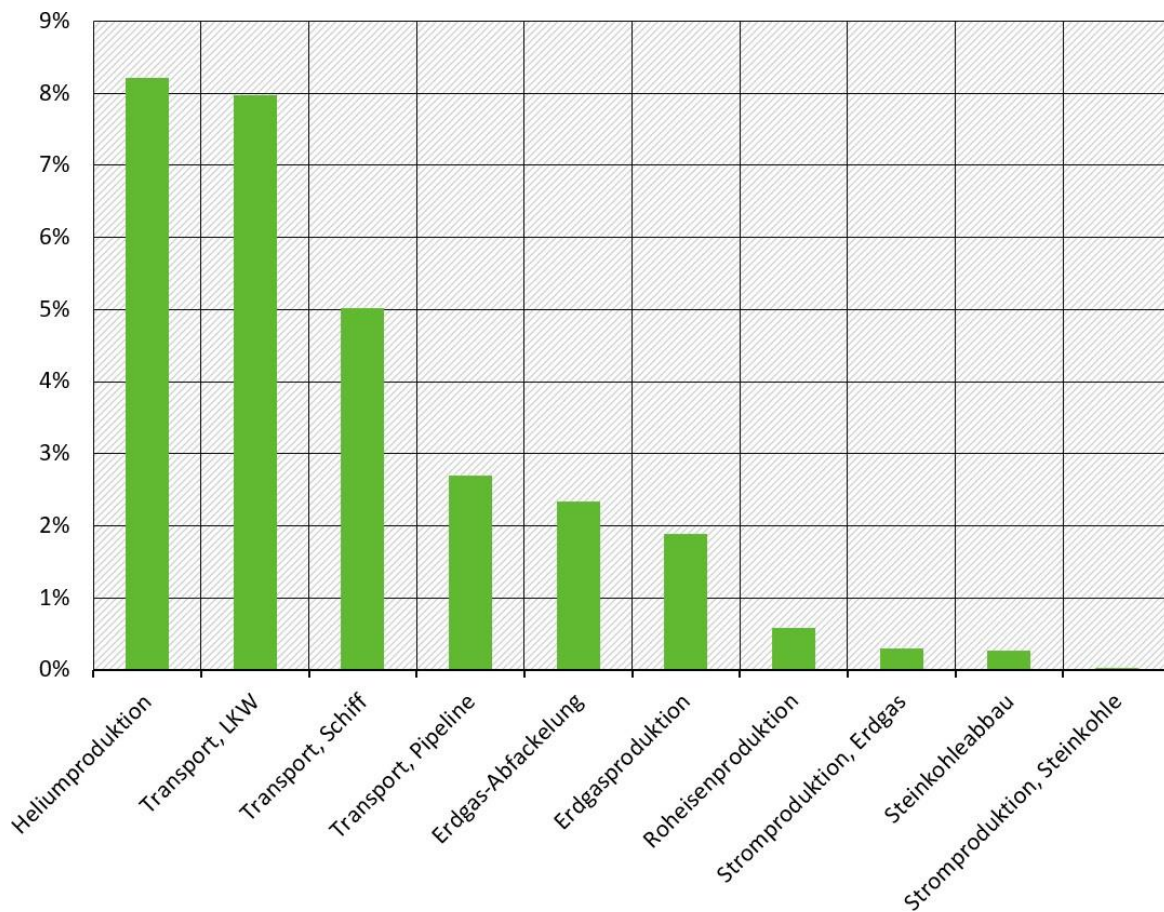
Abbildung 11: Untersuchungsrahmen und Systemgrenze der Ökobilanz



Quelle: eigene Darstellung

Über drei Viertel der weltweiten Heliumversorgung werden von nur zwei Ländern bereitgestellt, den Vereinigten Staaten und Katar. Und insgesamt verteilt sich die globale Förderung auf vermutlich nicht mehr als acht Länder (USGS 2020). Der Weg des Heliums von den Erdgasfeldern zum Endverbraucher ist ein mehrstufiger Prozess. Das analysierte Szenario bezog sich auf die Nutzung von Helium in einem Tomographen in Berlin, Deutschland. Dementsprechend sehen die Betrachtungsgrenzen für das Jahr 2018 wie folgt aus (Abbildung 11 zeigt den Untersuchungsrahmen): Importiert wurde aus den Produktionsländern Algerien, Polen und Katar. In diesen Ländern erfolgte die Förderung von Erdgas sowie die Abtrennung des Heliums in Raffinerien. Der Transport zu internationalen Häfen erfolgte per LKW. Über den Hamburger Hafen gelangt das Helium in das Zielland. Von hier erfolgt der Weitertransport per LKW zu regionalen Verteilzentren, wo das Helium in kleinere 500-Liter-Gefäße, sogenannte Deware, umgefüllt wird. Als Endpunkt wurde ein fiktives Krankenhaus im Zentrum der größten Stadt des Landes, also Berlin, gewählt.

Abbildung 12: Anstieg der THG-Emissionen in Folge von Dissipation, nach Prozessen



Quelle: eigene Darstellung

Anhand dieses Szenarios und den dafür relevanten Daten war es möglich ein idealisiertes Null-Verlust-Szenario sowie ein realistisches Szenario mit Heliumverlusten aus der Prozesskette zu erstellen. Aus der Differenz dieser beiden ergeben sich die klimawandelspezifischen Auswirkungen der Dissipation von Helium in diesem Prozess. Abbildung 12 zeigt die zehn Prozesse mit dem größten prozentualen Anstieg an THG-Emissionen im Vergleich zum Null-Verlust-Szenario. Diverse Prozesse, wie der MRT- Stromverbrauch oder der Flächenverbrauch werden durch die Verluste nicht oder nur indirekt beeinflusst. Umso deutlicher zeigen sich die direkt mit der Dissipation verbundenen Emissionen insbesondere zu Beginn der Prozesskette, so etwa die erhöhte Heliumproduktion und der Transport per Pipeline, Schiff und LKW.

Insgesamt wurde aber auch deutlich, dass der deutsche Strommix an den absoluten THG-Emissionen eines MRT-Scans mit 96 % den weitaus größten Anteil trägt (vgl. Abbildung 13).

Dadurch haben die Emissionen entlang der Prozesskette außerhalb Deutschlands, also insbesondere der Transport oder die Heliumproduktion, kaum Einfluss auf die Gesamtbilanz.

Abbildung 13: Anteil der Lebenszyklusphasen an den gesamten THG-Emissionen, Verlust-Szenario (Vergrößerung der kleinen Werte im rechten Diagramm)

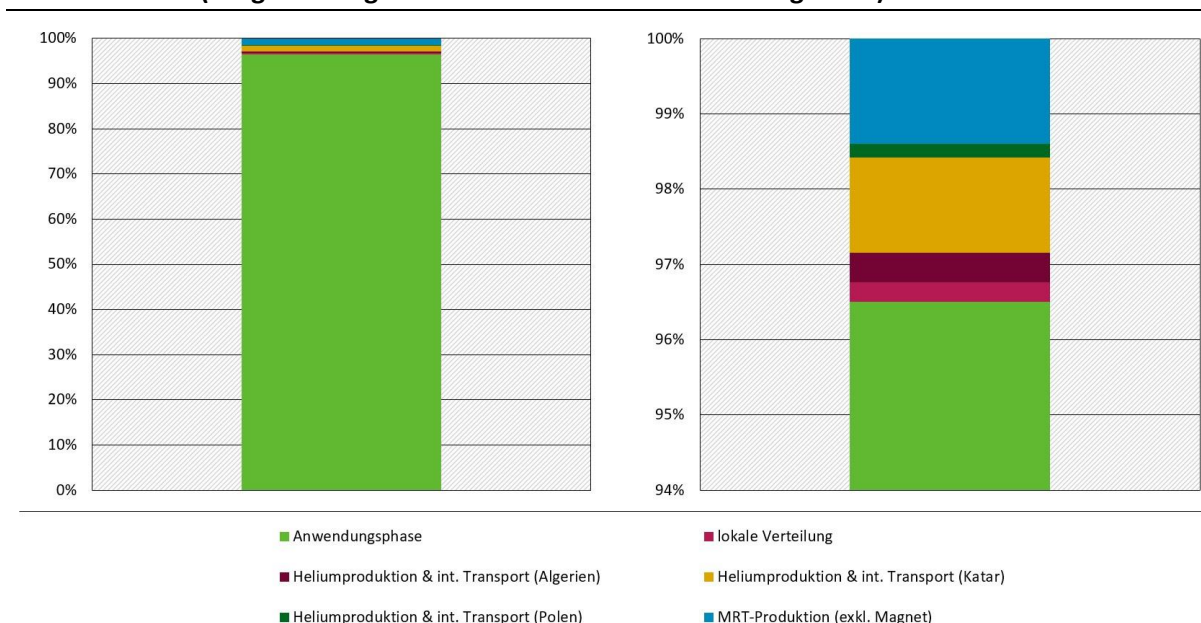


Tabelle 7 zeigt die gesamten THG-Emissionen, die mit allen in Deutschland durchgeführten MRT-Untersuchungen verbunden sind, sowie die mit der Dissipation von Helium verbundenen Mehremissionen für das Jahr 2018. Die Gesamtemissionen liegen bei knapp 107.000 t CO₂ eq. Das entspricht in etwa dem Ausstoß eines durchschnittlichen PKW, der mehr als 18.000-mal die Erde umrundet, oder auch den mit dem Stromverbrauch direkt verbundenen Emissionen von etwa 65.000 Haushalten in Deutschland bei gängigem Strommix. Die mit der Dissipation verbundenen CO₂-Emissionen liegen in einer Höhe von circa 170 t.

Tabelle 7: Treibhauspotenzial von MRT-Scans in Deutschland im Jahr 2018

Kategorie	Wert	Quelle
Bevölkerung	82.792.351	Eurostat 2021
MRT Untersuchungen pro 1.000 Einwohner	149	OECD 2020, S. 221
Treibhauspotenzial (kg CO ₂ eq.) bedingt durch Dissipation	170.641	
Treibhauspotenzial (kg CO ₂ eq.) aller deutschen MRT-Untersuchungen	106.870.779	

4.5.3 Zwischenfazit zum Fallbeispiel Helium

Das Fallbeispiel Helium ermöglichte es, eine weitere Betrachtungsebene von Dissipation aus einem ökologischen Blickwinkel aufzuzeigen. Die mit der dissipativen Dynamik verbundenen ökologischen Auswirkungen konnten anhand der vorgestellten Ökobilanzierung eines MRT-Scans an einem konkreten Anwendungsbeispiel quantitativ aufgezeigt werden. Zudem zeigt die erstellte Ökobilanz eine neue Tiefe in der ökologischen Betrachtung von MRT-Tomographen. Zwar existieren ökobilanzielle Untersuchungen zum Betrieb der Geräte. Der Einbezug der vorgelagerten Prozesskette mit Produktion und Transport von Helium über mehrere Länder stellt aber einen neuen Detailgrad dar.

Allerdings ist die angewandte Methodik auch mit einigen Einschränkungen verbunden. Denn das hier gewählte Vorgehen zur Analyse von Dissipation mittels einer Ökobilanz ist nicht allgemeingültig und in dieser Form auch nicht zwangsläufig auf andere Produkte oder Stoffe übertragbar. Im Falle von Helium ergibt sich eine vereinfachte Analysestruktur, denn der Dissipation von Helium folgen keine direkten Umweltauswirkungen, da dieses Edelgas weder toxisch noch reaktiv wirkt. Auch findet Dissipation hier nur in ein Kompartiment statt, in die Umwelt. Es gibt keine weiteren Dissipationsempfänger, etwa andere Materialströme oder Deponien, für die andernfalls weitere Stoffströme und Wirkkategorien zugeordnet werden müssten.

Nichtsdestotrotz können die Ergebnisse auch als Anreiz für Handlungsansätze dienen, sowohl zur Verringerung dissipativer Verluste als auch zur grundsätzlichen Reduzierung gewisser ökologischer Auswirkungen die mit einem MRT-Scan einhergehen. Die ökobilanziellen Auswirkungen können offensichtlich vor allem durch einen grüneren Strommix verbessert werden.

4.6 Schlussfolgerungen

Diese Arbeit zeigte als Grundlage für das weitere Vorgehen den bisher unaufhörlich zunehmenden anthropogenen Rohstoffverbrauch auf. Dieser Rohstoffhunger reicht von Massenrohstoffen wie Eisen und Stahl bis hin zu ganz speziellen, in deutlich geringeren Mengen geförderten Stoffen wie den Seltenen Erden oder auch Gasen wie Helium. Gerade diese speziellen Funktionsstoffe sind für diverse Zukunftstechnologien von großer Bedeutung. Das gilt umso mehr für einen importabhängigen High-Tech Standort wie Deutschland. In Anbetracht dessen wird die wachsende Versorgungabhängigkeit zunehmend mittels kritischer Studien untersucht, welche die ökonomisch-technologische Bedeutung und die Versorgungsrisiken verschiedener Materialien für unterschiedliche rohstoffverbrauchende Systeme wie Volkswirtschaften oder Unternehmen bewerten (sog. Kritikalitätsstudien). Doch der in dieser Arbeit aufgezeigte endgültige Rohstoffverbrauch in Form von Dissipation wird bisher kaum berücksichtigt. Es wurde verdeutlicht, dass insbesondere Metalle in ihrer atomaren Form grundsätzlich nicht verbraucht oder zerstört, sondern nur genutzt werden. Sie werden immer bestehen, die Frage ist nur in welcher Form und ob diese eine anthropogene Nutzung möglich macht (Gleich 2006, S. 17). Auch der aufgezeigte Austritt von Helium aus der Atmosphäre führt zu einem irreversiblen Verbrauch.

Die Forschungsarbeit untersuchte zusammenfassend auf inter- und transdisziplinärer Ebene mittels verschiedener Methoden das breite Spektrum dieser dissipativen Verluste. Insbesondere am Fallbeispiel Gadolinium wurde das Potenzial einer disziplinübergreifenden Analyse, hier bestehend aus einer Kombination aus globaler Materialflussanalyse und regionaler GIS (Geoinformationssystem)-Analyse, aufgezeigt. Daraus konnten wertvolle Informationen über die Quellen und räumlichen Verteilungspfade von Rohstoffen gewonnen werden. Allerdings zeigt die Arbeit auch, dass die Komplexität des Themas nur exemplarische Untersuchungen ermöglicht, die wiederum auf eine umfassende Datenverfügbarkeit zu diesen diversen Themenfeldern voraussetzen. Fehlende Daten stellten auch für diese Untersuchungen immer wieder eine Hürde für tiefergehende Analysen dar.

Abschließend bleibt die Frage zu beantworten, wie die zu Beginn erläuterten gesellschaftlichen und ressourcenspezifischen Entwicklungen der letzten Jahrzehnte, etwa Aspekte wie Produktminiaturisierung, Rohstoffdiversifizierung und unterschiedliche Lebensstile, die Dissipationsraten innerhalb der Anthroposphäre in die Höhe treiben.

Verschiedene Optionen eines nachhaltigen Ressourcenmanagements sollten genauer auf ihre Kompatibilität mit dem Thema Dissipation eruiert werden, um uns auch künftig ein Leben und Wirtschaften im Rahmen der planetaren Grenzen zu ermöglichen. Besonders das Konzept der Kreislaufwirtschaft stellt sich dabei als vielversprechender Orientierungspunkt für eine dissipationsarme Ressourcennutzung heraus. Weiterführende Forschungsarbeiten können helfen, das Verständnis für dissipative Stoffströme in Zeit und Raum weiter zu vertiefen und Handlungsoptionen für die Minderung stofflicher Dissipation zu liefern.

5 Quellenverzeichnis

- Alonso, E.; Sherman, A. M.; Wallington, T. J.; Everson, M. P.; Field, F. R.; Roth, R.; Kirchain, R. E. (2012): Evaluating rare earth element availability. A case with revolutionary demand from clean technologies. In: *Environmental science & technology* 46 (6), S. 3406–3414.
- Artioli, G.; Angelini, I.; Kaufmann, G.; Canovaro, C.; Dal Sasso, G.; Villa, I. M. (2017): Long-distance connections in the Copper Age: New evidence from the Alpine Iceman’s copper axe. In: *PLoS ONE* 12 (7), e0179263.
- Ayres, R. U. (1994): Industrial metabolism: Theory and policy. In: Allenby, B. R. und Richards, D. J. [Hrsg.]: *The greening of industrial ecosystems*. Washington D.C.: National Academy Press, S. 23–37.
- Bau, M.; Dulski, P. (1996): Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters. In: *Earth and Planetary Science Letters* 143 (1-4), S. 245–255.
- Behrendt, S. (2017): Recycling von Technologiemetallen. Transformationsfeldanalyse im Rahmen des Projekts Evolution2Green – Transformationspfade zu einer Green Economy.
- Beylot, A.; Ardente, F.; Sala, S.; Zampori, L. (2020): Accounting for the dissipation of abiotic resources in LCA: Status, key challenges and potential way forward. In: *Resources, Conservation and Recycling* 157, 104748.
- BGH (2013): Urteil vom 24. Januar 2013 – III ZR 98/12. LG Koblenz, AG Montabaur.
- Blühdorn, I. (2017): Post-capitalism, post-growth, post-consumerism? Eco-political hopes beyond sustainability. In: *Global Discourse*, Vol. 7, Nr. 1, S.42–61.
- BMWi (2016): EEG 2016: Ausschreibungsvolumen für Wind an Land. Eckpunktepapier. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/eeg-2016-ausschreibungsvolumen-wind-land-eckpunktepapier.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- BMWi (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=4.
- BMWi (2020a): Europäische Energiepolitik. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/europaeische-energiepolitik.html>.
- BMWi (2020b): Bericht der Präsidentschaft. Energiesystemintegration - Weichenstellung für ein klimaneutrales Europa. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bericht-der-praesidentschaft-energiesystemintegration.pdf?__blob=publicationFile&v=6.
- BMWi (2021): Gesetzesentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien- Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesetzesentwurf-aenderung-erneuerbare-energien-gesetzes-und-weiterer-energierechtlicher-vorschriften.pdf?__blob=publicationFile.
- Böhme, G. (2016): *Ästhetischer Kapitalismus*. 1. Auflage, Suhrkamp, Berlin.
- Bonsiepe, G. (2009): *Entwurfskultur und Gesellschaft – Gestaltung zwischen Zentrum und Peripherie*. Schriften zur Gestaltung, Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- Bradshaw, A. M.; Hamacher, T. (2013): Nuclear fusion and the helium supply problem. In: *Fusion Engineering and Design* 88 (9-10), S. 2694–2697.
- Brandes, U.; Stich, S.; Wender, M. (2009): *Design by Use: The Everyday Metamorphosis of Things*. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin.
- Braun-Feldweg, W. (1966): *Industrial Design heute: Umwelt aus der Fabrik*. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg.

Buchanan, R.: Declaration by Design: Rhetoric, Argument, and Demonstration in Design Practice. In: Design Issues, 1985, Vol. 2, Nr. 1, S.4-22.

Buckman, G. (2013): Global trade. Past mistakes, future choices. 1st ed., London: Zed Books (Global Issues).

BWE (2021): Windenergie in Deutschland: Zahlen und Fakten. Online verfügbar unter <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/deutschland/>.

Caravan, P.; Ellison, J. J.; McMurry, T. J.; Lauffer, R. B. (1999): Gadolinium(III) chelates as MRI contrast agents. Structure, dynamics, and applications. In: Chem. Rev. 99 (9), S. 2293–2352.

Chapman, J. (2015): Emotionally Durable Design: Objects, Experiences and Empathy. 2. Auflage. Routledge, London, New York.

Colomina, B.; Wigley, M. (2016): are we human? notes on an archaeology of design. Lars Müller Publishers, Zürich.

Cristóbal, J.; Jubayed, M.; Wulff, N.; Schebek, L. (2020): Life cycle losses of critical raw materials from solar and wind energy technologies and their role in the future material availability. In: Resources, Conservation and Recycling 161, S. 1–17.

Crutzen, P; Stoermer, E.: The “Anthropocene”. In: IGBP Global Change Newsletter, 41, Mai 2000, S.17-18.

Cullen, J. M. (2017): Circular Economy: Theoretical Benchmark or Perpetual Motion Machine? In: Journal of Industrial Ecology 21 (3), S. 483–486. DOI: 10.1111/jiec.12599.

David, P. (1985): Clio and the Economics of QWERTY. In: The American Economic Review, Vol. 75, Nr. 2, S.332-337.

Davidsson, S.; Höök, M.; Wall, G. (2012): A review of life cycle assessments on wind energy systems. In: Int J Life Cycle Assess 17 (6), S. 729–742. DOI: 10.1007/s11367-012-0397-8.

Deutscher Bundestag (2012): Ausarbeitung. Abstandsflächenregelungen für Windenergieanlagen (Wissenschaftliche Dienste). Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/407680/9d7c070467d369227429c2c152b37cec/WD-7-264-12-pdf-data.pdf>.

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; Von Oehsen, A.; Vogt, R.; Biemann, K. et al. (2020a): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenEe. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg (CLIMATE CHANGE 01/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_01-2020_endbericht_greenee.pdf.

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; Von Oehsen, A.; Vogt, R.; Biemann, K. et al. (2020b): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenLate. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg (CLIMATE CHANGE 02/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_02-2020_endbericht_greenlate.pdf.

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; Von Oehsen, A.; Vogt, R.; Biemann, K. et al. (2020c): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenLife. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg (CLIMATE CHANGE 04/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_04-2020_endbericht_greenlife.pdf.

- Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; Von Oehsen, A.; Vogt, R.; Biemann, K. et al. (2020d): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenMe. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg (CLIMATE CHANGE 03/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_03-2020_endbericht_greenme.pdf.
- Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Köppen, S.; Von Oehsen, A.; Vogt, R.; Biemann, K. et al. (2020e): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenSupreme. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg (CLIMATE CHANGE 05/2020). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_28_cc_05-2020_endbericht_greensupreme.pdf.
- Dorschel, A (2003): Gestaltung: zur Ästhetik des Brauchbaren. 2. Auflage, Winter, Heidelberg.
- Du, X.; Graedel, T. E. (2011): Uncovering the global life cycles of the rare earth elements. In: Scientific reports 1, S. 145.
- Dunne, A.; Raby, F. (2013): Speculative everything: design, fiction, and social dreaming. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London.
- Ebrahimi, P.; Barbieri, M. (2019): Gadolinium as an emerging microcontaminant in water resources: threats and opportunities. In: Geosciences 9 (2), S. 93.
- Erlhoff, M.; Marshall, T. (2008): Wörterbuch Design: begriffliche Perspektiven des Design. Birkhäuser, Basel.
- Europäische Kommission (2019): Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. Der europäische Grüne Deal. Brüssel. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0021.02/DOC_1&format=PDF.
- Europäische Kommission (2020): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein sauberes und wettbewerbsfähigeres Europa. Luxemburg. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/45cc30f6-cd57-11ea-adf7-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-170854112>.
- Europäische Kommission (2022): REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.
- eurostat (2021): Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/T2020_31_custom_425303/default/table?lang=de.
- Eyerer, Peter; Schüle, Helmut; Elsner, Peter (2020): Polymer Engineering 3. Werkstoff- und Bauteilprüfung, Recycling, Entwicklung. 2nd ed. 2020. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Vieweg.
- Faulstich, M. (2020): Circular Economy. In: Nachhaltige Industrie (1).
- Faulstich, M.; Baron, M.; Kruse, A. (2014): Energie- und Ressourcenwende - Wie weit müssen wir noch gehen? In: Neues aus Forschung und Praxis. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie, S. 23–41.
- Fendel, A.; Kempkes, P. (2014): Die veränderte Welt des Metallrecyclings – Steigende Vielfalt der Funktionswerkstoffe – Entropie und Dissipation in Schrotten. In: uwf 22 (2-3), S. 207–212. DOI: 10.1007/s00550-014-0329-0.
- Fichter, K.; Clausen J. (2018): Pfadabhängigkeiten und ihre Bedeutung für die Transformation zu einer Green Economy.

- Flusser, V. (2016): Vom Stand der Dinge. Eine kleine Philosophie des Design. Steidl, Göttingen.
- Fraunhofer ISE (2020): Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Online verfügbar unter <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Studie-Wege-zu-einem-klimaneutralen-Energiesystem.pdf>.
- FZJ (2020): Wege für die Energiewende. Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag (Schriften des Forschungszentrums Jülich : [...], Reihe Energie & Umwelt, Band 499).
- Frayling, C.: Research in Art and Design. In: Royal College of Art Research Papers, 1993/4, Vol. 1, Nr. 1, S.1-5.
- Fuller, R. B. (1981): Critical Path. St. Martin's Press, New York.
- Fuller, R. B.; Snyder, J. (2013): Operating Manual for Spaceship Earth. Neuauflage, Lars Müller Publishers, Baden.
- Geiger, A. (2018): Andersmöglichsein: zur Ästhetik des Designs. Transcript Verlag, Bielefeld.
- Gibson, J. J. (1979): The Ecological Approach to Visual Perception. Houghton Mifflin, Boston.
- Giddens, A. (1984): The Constitution of Society: Outline of the Theory of Structuration. Polity Press, Cambridge.
- Glanville, R.: Try again. Fail again. Fail better: the cybernetics in design and the design in cybernetics. In: Kybernetes, 2007, Vol. 36, Nr. 9/10, S.1173-1206.
- Gleich, A. von (2006): Outlines of a sustainable metals industry. In: Gleich, A., Ayres, R. U. und Gößling-Reisemann, S. [Hrsg.]: Sustainable metals management. Securing our future - steps towards a closed loop economy (19), S. 1–39.
- Gould, S. J.; Vrba, E. S.: Exaptation – A Missing Term in the Science of Form. In: Paleobiology. 1982, Vol. 8, Nr. 1, S.4-15.
- Grynja, E.; Griffin, P. J. (2016): Helium in natural gas - occurrence and production. In: Journal of Natural Gas Engineering 1 (2), S. 163–215.
- Guyonnet, D.; Dubois, D.; Escalon, V.; Fargier, H.; Rollat, A.; Schuster, R.; Si-Ahmed, S.; Tuduri, J.; Zylberman, W. (2013): Material flow analysis for identifying rare earth element recycling potentials in the EU-27.
- Guyonnet, D.; Planchon, M.; Rollat, A.; Escalon, V.; Tuduri, J.; Charles, N.; Vaxelaire, S.; Dubois, D.; Fargier, H. (2015): Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. In: Journal of Cleaner Production 107, S. 215–228.
- Haller, M.; Repenning, J.; Vogel, M.; Schlomann, B.; Reuter, M.; Jochem, E. et al. (2016): Überblick über vorliegende Szenarienarbeiten für den Klimaschutz in Deutschland bis 2050. Arbeitspaket 1.1 im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Wissenschaftliche Unterstützung „Erstellung und Begleitung des Klimaschutzplans 2050“ für das FKZ UM 15 41 1860. Überarbeitete Fassung. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; IREES GmbH; Öko-Institut e.V. Berlin.
- Hansen, S. (2001): Von den Anfängen der prähistorischen Archäologie Christian Jörgensen Thomsen und das Dreiperiodensystem. In: Praehistorische Zeitschrift (76), S. 10–23.
- Haraway, D: Anthropocene, Capitalocene, Plantationocene, Chthulucene: Making Kin. In: Environmental Humanities, 2015, Vol. 6, Nr. 1, S.159-65.
- Hatje, V.; Bruland, K. W.; Flegal, A. R. (2016): Increases in anthropogenic gadolinium anomalies and rare earth element concentrations in San Francisco Bay over a 20 year record. In: Environmental science & technology 50 (8), S. 4159–4168.

- Hau, E. (2014): Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 5., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.
- Hauff, V. (Hrsg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft – der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. 1. Auflage, Eggenkamp, Greven.
- Helbig, C. (2019): Metalle im Spannungsfeld technoökonomischen Handelns: Eine Bewertung der Versorgungsrisiken und der dissipativen Verluste mit Methoden der Industrial Ecology.
- Held, M. (2018): Metallzeiten. Von der Kupferzeit zum All Metals Age. In: Held, M., Jenny, R. D. und Hempel, M. [Hrsg.]: Metalle auf der Bühne der Menschheit. Von Ötzi's Kupferbeil zum Smartphone im All Metals Age. München: oekom verlag (DBU, 11), S. 11–26.
- Heller, S. (2004): Design Literacy: Understanding Graphic Design. 2. Auflage, Allworth Press, New York City.
- Hong, S.; Candelone, J.-P.; Patterson, C. C.; Boutron, C. F. (1996): History of Ancient Copper Smelting Pollution During Roman and Medieval Times Recorded in Greenland Ice. In: Science 272 (5259), S. 246–249.
- Hoyer, K.; Freistaat Sachsen [Hrsg.] (2016): Emissionsbericht Abwasser 2013/2014. Sechste Bestandsaufnahme der Abwasseremissionen im Freistaat Sachsen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfU SN).
- IRENA (2019): Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition). Hg. v. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. Online verfügbar unter <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition>.
- Irwin, T. (2015): Transition Design: A Proposal for a New Area of Design Practice, Study, and Research. In: Design and Culture, Vol. 7, Nr. 2, S.229-46.
- Jakubowski, N.; Lindner, U.; Lingott, J.; Panne, U. (2013): Der Nachweis von Gadolinium. Kontrastmittel in Oberflächengewässern und Pflanzen. Git-Labor. <https://www.git-labor.de/forschung/umwelt/der-nachweis-von-gadolinium>, zuletzt geprüft am 26.05.2021.
- Jessen, D.; Meienberg, S. (2021): Designing Beyond the Common Good – an Evolutionary Process between Speculation and Reality. In Botta, M.; Junginger, S. (Hrsg.): Design as Common Good / Framing Design through Pluralism and Social Values. Swiss Design Network Symposium 2021 Conference Proceedings, University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland, Manno, S.157-73.
- Job, S. (2014): Recycling composites commercially. In: Reinforced Plastics 58 (5), S. 32–38. DOI: 10.1016/S0034-3617(14)70213-9.
- Jonas, W. (2007): Design Research and Its Meaning to the Methodological Development of a Discipline. In: Design Research Now: Essays and Selected Projects. Birkhäuser, Basel, S.254.
- Jonas, W.: Designwissenschaft als Netz von Theorien und Akteuren – 10 Anmerkungen. In Romero-Tejedor, F.; Jonas, W. (2010): Positionen zur Designwissenschaft. Kassel University Press, Kassel, S.79–85.
- Jonas, W.; Zerwas, S.; von Anshelm, K. (2016): Transformation Design: Perspectives on a New Design Attitude. Birkhäuser, Basel.
- Jonas, W. (2018a): Prolog. In: Un/certain futures: Rollen des Designs in gesellschaftlichen Transformationsprozessen. Transcript, Bielefeld, S.16-24.
- Jonas, W. (2018b): Systems Design Thinking: Theoretical, Methodological, and Methodical Considerations. A German Narrative. In: Jones, P.; Kijima, K. [Hrsg.] (2018): Systemic Design – Theory, Methods, and Practice. Translational Systems Sciences. Springer Japan, Tokyo, S.89-117.

Jungbluth; M. (2020): Erneuerbare Energie und der Flächenverbrauch. ee mag - Das Magazin der Europäischen Energiewende. Online verfügbar unter https://energiewende.eu/erneuerbare-energie-und-der-flaechenverbrauch/#Angemessener_Flaechenverbrauch_fur_erneuerbare_Energie.

Kippes, Thomas (2022): Dissipation von Funktionsmaterialien. Augsburg. Online verfügbar unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-915587>.

Kippes, Thomas; Reller, Armin (2022): Die Geschichte der anthropogenen Metallmobilisierung. Von der Kupferzeit bis zur Metallzeit der Gegenwart. In: Chemie in unserer Zeit. DOI: <https://doi.org/10.1002/ciuz.202100004>.

von Kleist, H.; Müller-Seidel W. (2004): Sämtliche Erzählungen und andere Prosa. Nachdruck, Reclam, Stuttgart.

Koalitionsvertrag 2021-2025: Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP.

Kobiela, G.; Samadi, S.; Kurwan, J.; Tönjes, A.; Fishedick, M.; Koska, T. et al. (2020): CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. Diskussionsbeitrag für Fridays for Future Deutschland mit finanzieller Unterstützung durch die GLS Bank (2. korrigierte Auflage). Bericht. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. Wuppertal. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7606/file/7606_CO2-neutral_2035.pdf.

Komar, R. (2008): Grünes Bauhaus: Wir brauchen völlig neue Formen – Dokumente eines Diskurses. 1. Auflage Deutscher Buchverlag (dbv), Oldenburg.

Kristof, K. (2010): Wege zum Wandel: Wie wir gesellschaftliche Veränderungen erfolgreicher gestalten können. Oekom Verlag, München.

Künnemeyer, J.; Terborg, L.; Meermann, B.; Brauckmann, C.; Möller, I.; Scheffer, A.; Karst, U. (2009): Speciation analysis of gadolinium chelates in hospital effluents and wastewater treatment plant sewage by a novel HILIC/ICP-MS method. In: Environmental science & technology 43 (8), S. 2884–2890.

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfU SN) [Hrsg.] (2020): Interdisziplinäre Daten und Auswertungen (iDA). Online verfügbar unter <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/46037.htm> (16.11.2020).

Latour, B.; Roßler, G. (2015): Wir sind nie modern gewesen: Versuch einer symmetrischen Anthropologie. 5. Auflage, Suhrkamp, Frankfurt am Main.

Latour, B.; Roßler, G. (2016): Der Berliner Schlüssel. 3. Auflage, Botopress, Berlin.

Lawrence, M. G.; Ort, C.; Keller, J. (2009): Detection of anthropogenic gadolinium in treated wastewater in South East Queensland, Australia. In: Water research 43 (14), S. 3534–3540.

Liedtke, C.; Buhl, J.; Borgmann, A. (2015): Nachhaltiges Design und Suffizienz – Ressourcenleicht durchs Leben. In: UmweltWirtschaftsForum (uwf, Vol. 23, Nr. 1, S.11-14.

Liedtke, C.; Kühler, M.; Huber, K.; Baedeker, C. (2020): Transition Design Guide – Gestalten für das Heute und Morgen; ein Guide für Gestaltung und Entwicklung in Unternehmen, Städten und Quartieren, Forschung und Lehre. Band 55, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal.

Lifset, R. J.; Eckelman, M. J.; Harper, E. M.; Hausfather, Z.; Urbina, G. (2012): Metal lost and found: dissipative uses and releases of copper in the United States 1975-2000. In: The Science of the total environment 417-418, S. 138–147.

Lingott, J.; Lindner, U.; Telgmann, L.; Esteban-Fernández, D.; Jakubowski, N.; Panne, U. (2016): Gadolinium-uptake by aquatic and terrestrial organisms-distribution determined by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. In: Environmental science. Processes & impacts 18 (2), S. 200–207.

- Lütkehus, I.; Salecker, H.; Adlunger, K. (2013): Potenzial der Windenergie an Land. Studie zur Ermittlung des bundesweiten Flächen- und Leistungspotenzials der Windenergienutzung an Land. Hg. v. UBA. Dessau-Roßlau.
- Lynas Corp. Ltd. [Hrsg.] (2010): ASX Mid Caps Conference presentation. ASX Mid Caps Conference. New York, March 2010. https://www.asx.com.au/smalltomidcaps/london/2010/presentation_lynas.pdf (13.05.2021).
- Manzini, E. (2015): Design, When Everybody Designs: An Introduction to Design for Social Innovation. MIT Press, Cambridge, Mass. [u.a.].
- Martínez, E.; Latorre-Biel, J. I.; Jiménez, E.; Sanz, F.; Blanco, J. (2018): Life cycle assessment of a wind farm repowering process. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 93, S. 260–271. DOI: 10.1016/j.rser.2018.05.044.
- Maus, I. G.: Developing Design Literacy for Sustainability – Lower Secondary Students’ Life Cycle Thinking on Their Craft-Based Design Products. In: FormAkademisk - Forskningstidsskrift for Design Og Designdidaktik. 2019, Vol. 12, Nr. 1.
- Mayer, A.; Haas, W.; Wiedenhofer, D.; Krausmann, F.; Nuss, P.; Blengini, G. A. (2019): Measuring Progress towards a Circular Economy: A Monitoring Framework for Economy-wide Material Loop Closing in the EU28. In: Journal of Industrial Ecology 23 (1), S. 62–76. DOI: 10.1111/jiec.12809.
- Meadows, D. H.; Meadows, D. L.; Randers, J.; Behrens W. [Hrsg.] (1972): The Limits to Growth: A Report for the CLUB OF ROME’S Project on the Predicament of Mankind. Universe Books, New York.
- Meller, H.; Michel, K. (2018): Die Himmelsscheibe von Nebra. Der Schlüssel zu einer untergegangenen Kultur im Herzen Europas. 5. Auflage, Berlin: Propyläen.
- Müller, A. (2018): Rohstoffe für die Energiewende. Menschenrechtliche und ökologische Verantwortung in einem Zukunftsmarkt. Hg. v. Bischöfliches Hilfswerk MISEREOR e.V. Online verfügbar unter <https://www.misereor.de/fileadmin/publikationen/studie-rohstoffe-fuer-die-energiewende.pdf>.
- Munari, B. (1971): Design as Art. Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex.
- National Academy of Sciences (NAS) (2010): Selling the Nation's Helium Reserve, Washington, D.C.: National Academies Press.
- Nielsen, L. M.; Lutnæs, E.; Porko-Hudd, M.; Bravo, Ú.; Cortés, C.; Almendra, R. A.; Bohemia, E.: Track 6.b Introduction: Design Literacy Enabling Critical Innovation Practices. In: Conference Proceedings of the Academy for Design Innovation Management. 2019, Vol. 2, Nr. 1, S.1291-1294.
- Notardonato, W. U.; Swanger, A. M.; Fesmire, J. E.; Jumper, K. M.; Johnson, W. L.; Tomsik, T. M. (2017): Zero boil-off methods for large-scale liquid hydrogen tanks using integrated refrigeration and storage. In: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 278, S. 12012.
- Nuss, P.; Blengini, G. A. (2018): Towards better monitoring of technology critical elements in Europe. Coupling of natural and anthropogenic cycles. In: The Science of the total environment 613-614, S. 569–578.
- Oakdene Hollins Ltd (2011): Study into the feasibility of protecting and recovering raw materials through infrastructure development in the south east of England. Final report. Online verfügbar unter <https://www.mmta.co.uk/wp-content/uploads/2015/01/Recycling-and-critical-metals-Oakdene-2011.pdf>.
- Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050 - Zusammenfassung des 2. Endberichts. Hg. v. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB). Berlin.
- Otter, C. (2017): The technosphere a new concept for urban studies. In: Urban History (44, 1).
- Pacione, C.: Evolution of the Mind: A Case for Design Literacy. In: Interactions. 2010, Vol. 17, Nr. 2, S.6-11.
- Papanek, V. [1971] (2009): Design für die reale Welt: Anleitungen für eine humane Ökologie und sozialen Wandel. 2. Auflage, Springer, Wien [u.a.].

Pernicka, E. (2016): Von Baden bis Troia. Ressourcennutzung, Metallurgie und Wissenstransfer: eine Jubiläumsschrift für Ernst Pernicka. Hg. v. Martin Bartelheim, Barbara Horejs und Raiko Krauss, Rahden/Westf.: Verlag Marie Leidorf GmbH (Oriental and European archaeology, volume 3).

Popper, K. R. (1994): Logik der Forschung. 10. Auflage, Mohr Siebeck, Tübingen.

Prognos AG (2018): Klimapfade für Deutschland. Hg. v. Bundesverband der Deutschen Industrie. Online verfügbar unter • <https://www.prognos.com/de/projekt/klimapfade-fuer-deutschland>.

Prognos AG; Öko-Institut e. V.; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH (2020): Klimaneutrales Deutschland. In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Zusammenfassung. Hg. v. Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Online verfügbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2020/2020_10_KNDE/A-EW_192_KNDE_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf.

Reller, A.; Meißner, S.; Schmidt, C.; Marshall, L. (2013): Ressourcenstrategien. Eine Einführung in den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen: WBG.

Reuter, M. (2013): Metal recycling. Opportunities, limits, infrastructure: this is report 2b of the Global Metal Flows Working Group of the International Resource Panel of UNEP, Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme.

Rifkin, J. (1982): Entropie. Ein neues Weltbild. Hamburg: Hoffmann und Campe.

Rösch, C.; Göpel, J.; Schaldach, R. (2020): Bioökonomie im Selbststudium: Nachhaltigkeit und ökologische Bewertung. 1. Auflage 2020. Berlin: Springer Berlin; Springer Spektrum (Zertifikatskurs Bioökonomie).

Samadi, S.; Kobiela, G.; Lechtenböhmer, S.; Wilts, H. (2018): Strategien für eine naturverträgliche Energiewende. Analyse von Strategien zur Umsetzung von ambitioniertem Klimaschutz unter Gewährleistung eines hohen Naturschutzniveaus. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH und NABU – Naturschutzbund Deutschland e.V. Online verfügbar unter https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/190514_strategien_energiewende_nabu.pdf.

Scherhaufer, S.; Part, F.; Beigl, P. (2021): Das Sekundärressourcenpotenzial aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen. In: Österr Wasser- und Abfallw 73 (1-2), S. 36–48.

Schivelbusch, W. (2014): The railway journey. The industrialization of time and space in the nineteenth century: with a new preface. Updated edition, Oakland, California: University of California Press.

Schmidt-Bleek, F.; Tischner, U. (1995): Produktentwicklung: Nutzen gestalten – Natur schonen. Schriftenreihe des Wirtschaftsförderungsinstituts. WIFI Österreich, Wien.

Schneidewind, U. (2018): Die große Transformation: Eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels. 1. Auflage, Fischer Taschenbuch, Frankfurt am Main.

Schräber, D.; Wald, S.; Arnold, K. (1990): Analyse des gegenwärtigen Zustandes des Landkreises Freiberg. In: Freiburger Umweltbrief (6).

Selle, G (1997): Geschichte des Design in Deutschland. Campus Verlag, Frankfurt am Main.

Sennett, R. (2009): Handwerk. Berliner Taschenbuch Verlag, Berlin.

Simon, H. A. (1981): The Sciences of the Artificial. 2. Auflage, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

S&P Global Market Intelligence (2019a): Bayan Obo Property Profile, zuletzt geprüft am 21.08.2019.

S&P Global Market Intelligence (2019b): Mount Weld Property Profile, zuletzt geprüft am 21.08.2019.

Sprecher, B.; Kleijn, R.; Kramer, G. J. (2014): Recycling potential of neodymium: the case of computer hard disk drives. In: *Environmental science & technology* 48 (16), S. 9506–9513.

SRU (2011): Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung. Sondergutachten, Januar 2011. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Steffen, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C. (2015): The trajectory of the Anthropocene. The Great Acceleration. In: *The Anthropocene Review* 2 (1), S. 81–98.

Steffen, W.; Grinevald, J.; Crutzen, P.; McNeill, J. (2011): The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. In: *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences* 369 (1938), S. 842–867.

Steffen, W.; Sanderson, A.; Tyson, P.; Jäger, J.; Matson, P.; Moore, B.; Oldfield, F.; Richardson, K.; Schellnhuber, H.; Turner, B.; Wasson, R. (2004): *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.

Sundermann, A.; Babitsch, D.; Halle, M.; Müller, A.; Duis, K.; Coors, A. (2018): Arsen in Fließgewässern. Auswirkung von Arsenbelastungen auf den ökologischen Zustand/Potential und Abgleich der Ergebnisse mit derzeitigen Umweltqualitätsnormen. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfU SN).

Sydow, J.; Schreyögg, G.; Koch, J.: Organizational Path Dependence: Opening the Black Box. In: *Academy of Management Review*, 2009, Vol. 34, Nr. 4, S.689-709.

Tazi, N.; Kim, J.; Bouzidi, Y.; Chatelet, E.; Liu, G. (2019): Waste and material flow analysis in the end-of-life wind energy system. In: *Resources, Conservation and Recycling* 145, S. 199–207. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.02.039.

Thomé-Kozmiensky, K. J. (2015): *Recycling und Rohstoffe*. Neuruppin: TK-Verl.

Till, J. (2013): *Architecture Depends*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Tischner, U.; Schmincke, E.; Rubik, F.; Prösler, M. (2000): *Was ist EcoDesign? Ein Handbuch für ökologische und ökonomische Gestaltung*. Verlag form, Frankfurt am Mai.

Trapasso, G.; Chiesa, S.; Freitas, R.; Pereira, E. (2021): What do we know about the ecotoxicological implications of the rare earth element gadolinium in aquatic ecosystems? In: *The Science of the total environment* 781, 146273.

UBA (2017): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcen-schonend gestalten.

UBA (2019a): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE - Studie. Hg. v. Umweltbundesamt. ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg (CLIMATE CHANGE 36/2019). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf.

UBA (2019b): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rt_d_bf.pdf.

UBA (2019c): Analyse der kurz- und mittelfristigen Verfügbarkeit von Flächen für die Windenergienutzung an Land. Flächenanalyse Windenergie an Land Abschlussbericht (CLIMATE CHANGE 38/2019). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_38_2019_flaechenanalyse_windenergie_an_land.pdf.

- UBA (2021a): Indikator: Erneuerbare Energien. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-erneuerbare-energien>.
- UNEP (2011): Recycling Rates of Metals - A Status Report. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.
- United States Geological Survey (USGS) (2020): Mineral Commodity Summaries 2020.
- USGS (2021): Rare Earths Statistics and Information. Rare Earths. Online verfügbar unter <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-rare-earths.pdf>.
- Vester, F. (1986): Neuland des Denkens: Vom technokratischen zum kybernetischen Zeitalter. 4. Auflage, Sachbuch 10220, Deutscher Taschenbuch Verlag (dtv), München.
- von Borries, F. (2016): Weltentwerfen: Eine politische Designtheorie. 1. Auflage, Suhrkamp, Berlin.
- Walker, J. A. (1992): Designgeschichte – Perspektiven einer wissenschaftlichen Disziplin. scaneg, München.
- Wang, S.; Wang, S.; Liu, J. (2019): Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. In: Journal of Cleaner Production 210, S. 804–810. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.031.
- Watari, T.; Nansai, K.; Nakajima, K. (2020): Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. In: Resources, Conservation and Recycling 155 (155), S. 104669.
- WBGU (2011): Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation. Hauptgutachten, 2. Auflage, Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltfragen, Berlin.
- Wilts, H.; Lucas, R.; Von Gries, N.; Zirngiebl, M. (2014): Recycling in Deutschland - Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze. Studie im Auftrag der KfW Bankengruppe. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH. Online verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/5746/file/5746_Recycling.pdf.
- Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2011): Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. 2., veränd. Aufl., Berlin.
- World Bank Group (2017): The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. Online verfügbar unter <https://documents1.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/pdf/117581-WP-P159838-PUBLIC-ClimateSmartMiningJuly.pdf>.
- World Commission on Environment and Development [Hrsg.] (1987): Our common future. Oxford University Press, Oxford, New York.
- Wuppertal Institut (2014): KRESSE - Kritische mineralische Ressourcen und Stoffstroeme bei der Transformation des deutschen Energieversorgungssystems. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter Mitarbeit von Karinthoff, Sascha Samadi, Ole Soukup, Jens Teubler, Peter Viebahn, Klaus Wiesen. Hg. v. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. Wuppertal. Online verfügbar unter <http://wupperinst.org/de/projekte/details/wi/p/s/pd/38/>.
- Yang, X. J.; Lin, A.; Li, X.-L.; Wu, Y.; Zhou, W.; Chen, Z. (2013): China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. In: Environmental Development 8, S. 131–136.
- Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Waters, C. N.; Barnosky, A. D.; Palmesino, J.; Ronnskog, A.-S.; Edgeworth, M.; Neal, C.; Cearreta, A.; Ellis, E. C.; Grinevald, J.; Haff, P.; Ivar do Sul, J. A.; Jeandel, C.; Leinfelder, R.; McNeill, J. R.; Odada, E.; Oreskes, N.; Price, S. J.; Revkin, A.; Steffen, W.; Summerhayes, C.; Vidas, D.; Wing, S.; Wolfe, A. P. (2016): Scale and diversity of the physical technosphere. A geological perspective. In: The Anthropocene Review (4, 1), S. 1–14.
- Zhou, Z.; Lu, Z.-R. (2013): Gadolinium-based contrast agents for magnetic resonance cancer imaging. In: Wiley interdisciplinary reviews. Nanomedicine and nanobiotechnology 5 (1), S. 1–18.

Ziemer, G. (2013): Komplizenschaft – neue Perspektiven auf Kollektivität. X-Texte, Transcript Verlag, Bielefeld.

Zimmermann, T.; Gößling-Reisemann, S. (2013): Critical materials and dissipative losses: a screening study. In: The Science of the total environment 461-462, S. 774–780.

Zotz, Ferdinand; Kling, Maximilian; Langner, Florian; Hohrath, Philipp; Born, Hartmut; Feil, Alexander (2019): Entwicklung eines Konzepts und Maßnahmen für einen ressourcensichernden Rückbau von Windenergieanlagen. Abschlussbericht. Forschungskennzahl 3717 31 330 0. Hg. v. Umweltbundesamt. Ramboll; RWTH Aachen (TEXTE 117/2019). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019_10_09_texte_117-2019_uba_weacycle_mit_summary_and_abstract_170719_final_v4_pdfua_0.pdf.