

# **Dissipation von Funktionsmaterialien**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Doktorgrades

Dr. rer. nat.

eingereicht an der

Fakultät für Angewandte Informatik der Universität Augsburg

von

**Thomas Kippes**

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 3717 31 106 0 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Erstgutachter: Prof. Dr. Armin Reller

Zweitgutachter: Prof. Dr. Matthias Schmidt

Prüfungskommission:

Prof. Dr. Armin Reller, Prof. Dr. Matthias Schmidt, Prof. Dr. Martin Faulstich

Tag der mündlichen Prüfung: 15.12.2021

## Zusammenfassung

Die letzten Jahrzehnte waren geprägt von einem rasanten Ausbau der Technosphäre mit neuen Materialien, neuen Technologien und neuen Gütern. 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 dem anthropogenen Nutzungssystem und damit einer Funktionalisierung durch den Menschen entfliehen. Die Materialflüsse können in verschiedene Empfangskompartimente, unter anderem in die Umwelt, gelangen. Die entstehenden Stoffkonzentrationen sind in diesen Kompartimenten so gering, dass eine Rückgewinnung zum aktuellen Zeitpunkt unter entsprechenden technologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen nicht möglich ist. Insbesondere die dissipativen Stoffpfade in die Umwelt stellen aufgrund der Bioaktivität und Biotoxizität diverser Stoffgruppen ein erhebliches Risiko dar. Eine umfassende Sichtung der bestehenden Literatur zum Thema Dissipation offenbart, dass ein allgemeingültiges Verständnis dieses Begriffs bisher fehlt, was eine disziplinübergreifende wissenschaftliche Auseinandersetzung erschwert. Auf der Grundlage der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse wird in der Abschlussdiskussion daher eine neue Definition unterbreitet.

Eingangs liefert diese Studie einen umfassenden historischen Überblick und zeigt auf, wie sich die anthropogene Rohstoffnutzung und die Rohstoffmobilisierung im Besonderen über die Jahrhunderte und Jahrtausende hinweg entwickelt haben. Dabei zeigt sich, der Zivilisationsgeschichte entsprechend, ein Übergang von lokal und regional geprägten Rohstoffnutzungsmustern hin zu globalen Mustern. Analog hierzu vollzieht sich auch der Wandel dissipativer Stoffströme, von regionalen hin zu vermehrt globalen Strömen und den damit verbundenen ökologischen Auswirkungen. Mit der Industrialisierung begann auch ein völlig neues Tempo anthropogen bedingter Stoffmobilität über den kompletten Planeten, die in den letzten Jahrzehnten in die sogenannte Great Acceleration mündete und schließlich im aktuell viel diskutierten Menschenzeitalter – dem Anthropozän – gipfelte.

Im Kontext dieser Entwicklungen untersucht die vorliegende Arbeit das Phänomen Dissipation anhand von zwei beispielhaften Rohstoffen, 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 wird eine Materialflussanalyse von Gadolinium durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, 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 wird aufgezeigt, dass die Kontaminationsquellen vielfältig sein können, was Handlungsmöglichkeiten zur Minderung der ökologischen Belastung erschwert.

Das Fallbeispiel Helium offenbart eine weitere Betrachtungsebene von Dissipation aus einem ökologischen Blickwinkel. Es handelt sich zwar um ein reaktionsträges und ökologisch unbedenkliches Edelgas, das aufgrund seiner extremen Flüchtigkeit aber schwer zu handhaben ist. 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 entlang der Prozesskette auftretenden Verluste müssen zur ökonomischen Bedarfsdeckung ausgeglichen werden. Mit dieser dissipativen Dynamik und die mit dem einhergehenden Mehraufwand verbundenen ökologische Auswirkungen werden anhand einer Ökobilanzierung eines MRT-Scans, bei dem Helium als Kühlmittel von essenzieller Bedeutung ist, quantitativ analysiert. Die Ergebnisse zeigen, auf den einzelnen Scan bezogen, äußerst geringe treibhausgasbezogene Mehrbelastungen, 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.

Diese Forschungsarbeit untersucht auf inter- und transdisziplinärer Ebene mittels verschiedener Methoden das breite Spektrum stofflicher Dissipation. Insbesondere am Fallbeispiel Gadolinium wird das Potenzial einer disziplinübergreifenden Analyse, hier bestehend aus einer Kombination aus globaler Materialflussanalyse und regionaler GIS (Geoinformationssystem)-Analyse, aufgezeigt. Daraus können 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 stellen auch für die vorliegenden Untersuchungen immer wieder eine Hürde für tiefergehende Analysen dar.

Abschließend wird diskutiert, inwieweit bestimmte gesellschaftliche und ressourcenspezifische Entwicklungen wie Produktminiaturisierung, Rohstoffdiversifizierung und Lebensstile die Dissipationsraten innerhalb der Anthroposphäre in die Höhe treiben. Dazu werden Optionen eines nachhaltigen Ressourcenmanagements erörtert, die es uns künftig erlauben im Rahmen der planetaren Grenzen zu leben und zu wirtschaften. 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.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>X</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemstellung .....	3
1.2 Fragestellung und Zielsetzung.....	5
1.3 Aufbau der Arbeit .....	6
<b>2 Historischer Kontext der anthropogenen Stoffmobilisierung</b> .....	<b>9</b>
2.1 Von der Steinzeit zur Industrialisierung .....	9
2.2 Great Acceleration und die Grenzen des Wachstums .....	17
2.3 Rezente Entwicklungen .....	21
2.4 Biologischer und industrieller Metabolismus – eine Analogie .....	26
2.5 Zwischenfazit – Unser Umgang mit Ressourcen im Kontext des Systems Erde .....	28
<b>3 Ressourcen und Dissipation – Zum Stand der Forschung</b> .....	<b>31</b>
3.1 Der Begriff Ressource .....	31
3.2 Der Begriff Dissipation .....	34
3.3 Abgeleitete Dissipationsursachen.....	40
3.4 Auswahl der Fallbeispiele .....	43
<b>4 Fallbeispiel Gadolinium</b> .....	<b>45</b>
4.1 Magnetresonanztomographie .....	45
4.2 Die Gruppe der Seltenen Erden und Gadolinium im Besonderen .....	49
4.2.1 Chemische und physikalische Eigenschaften.....	49
4.2.2 Verwendung .....	52
4.2.3 Überblick über Vorkommen, Produktion und Raffination .....	55
4.3 Gadolinium als Kontrastmittel.....	60
4.4 Globale Materialflussanalyse von Gadolinium .....	62

4.4.1	Methodik und Quantifizierung .....	62
4.4.2	Zusammenfassung der MFA-Resultate aus dem Blickwinkel der Dissipation .....	67
4.5	Umwelt- und Gesundheitsrelevanz .....	70
4.5.1	Umweltverhalten und Ökotoxikologie .....	70
4.5.2	Humantoxikologie .....	73
4.6	Räumliche Betrachtung von Gadolinium in sächsischen Oberflächengewässern .....	76
4.6.1	Klassisches methodisches Vorgehen.....	80
4.6.2	Alternativer methodischer Ansatz .....	82
4.6.3	Analyse der Gadolinium-Belastung in sächsischen Oberflächengewässern.....	84
4.6.4	Interpretation und kritische Einordnung der Ergebnisse .....	85
4.7	Erkenntnisse aus der Fallstudie und Ableitung von Handlungsoptionen . .....	89
<b>5</b>	<b>Fallbeispiel Helium .....</b>	<b>95</b>
5.1	Geschichte der Heliumproduktion .....	96
5.2	Globaler Überblick über Produktion und Anwendungen .....	99
5.3	Dissipative Dynamik von Helium.....	101
5.4	Mechanismen des Heliumaustritts aus der Atmosphäre .....	105
5.4.1	Thermischer Austritt .....	105
5.4.2	Nicht-thermischer Austritt.....	106
5.5	Eine Ökobilanz von Helium in der Magnetresonanztherapie .....	108
5.5.1	Kurzeinführung in das Thema Ökobilanz.....	108
5.5.2	Analyse dissipativer Aspekte von Helium mittels einer Ökobilanz ... .....	112
5.5.3	Reflexion der Ökobilanzergebnisse und Erläuterung der Limitierungen.....	122
<b>6</b>	<b>Allgemeine Abschlussdiskussion und Ausblick .....</b>	<b>125</b>
6.1	Nachhaltiges Ressourcenmanagement .....	129
6.2	Leitbahnen einer Kreislaufwirtschaft.....	131



6.3	Dissipation aus dem Blickwinkel der planetaren Grenzen.....	133
6.4	Dissipation aus politischer Perspektive .....	136
6.5	Kritische Würdigung der Arbeitsergebnisse.....	139
6.6	Methodische Einschränkungen der Arbeit .....	143
6.7	Ausblick - Aufgaben einer anknüpfenden Forschung und Praxis .....	144
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>147</b>
<b>A.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>175</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Dissertation .....	7
Abbildung 2: Mensch- und Materialtransport im Zuge des Dreieckshandels.....	13
Abbildung 3: Erstes transkontinentales Telegraphenkabel 1858.....	15
Abbildung 4: Roheisen- und Stahlproduktion zwischen 1900 und 1960.....	16
Abbildung 5: Warenexporte nach Kontinenten im Zeitraum 1948–2018 .....	17
Abbildung 6: Produktionsanstieg verschiedener Metalle von 1915–2015, dargestellt als Index (100 = 1915) .....	20
Abbildung 7: Anzahl an Transistoren auf Computerchips.....	21
Abbildung 8: Entwicklung der genutzten Elemente in der IKT.....	23
Abbildung 9: Die Erdsphären und ihre ressourcenspezifischen Charakteristika.	26
Abbildung 10: Ordnung der Seltenerdelemente .....	51
Abbildung 11: Molekülstruktur ausgewählter Kontrastmittel .....	61
Abbildung 12: Globale Materialflussanalyse von Gadolinium für das Jahr 2016.	69
Abbildung 13: Gd-BOPTA Strukturformel mit aromatischer Seitenkette .....	72
Abbildung 14: Gd-Messwerte ( $\geq 1.000$ ng/l) in Oberflächengewässern in Sachsen für das Jahr 2019.....	78
Abbildung 15: Gd-Messwerte ( $< 1.000$ ng/l) in Oberflächengewässern in Sachsen für das Jahr 2019.....	79
Abbildung 16: Relative Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem.....	81
Abbildung 17: Illustration von SEE-Messwerten und den entsprechend normierten Messwerten mit deutlicher Gd-Anomalie (fiktives Beispiel).....	82
Abbildung 18: Normalisierte Messwerte von Gadolinium und Lanthan in OFG im Freistaat Sachsen.....	85
Abbildung 19: Hohe Messwerte (rote Balken) in der Region Dübring, Sachsen; Einordnung in den geographischen Kontext .....	87
Abbildung 20: Helium produzierende Länder, Produktionsmenge als Säulen (in Mio. m <sup>3</sup> ).....	99
Abbildung 21: Anwendungsfelder von Helium.....	100
Abbildung 22: Fusionsprozess von Proton zu Helium-4; sog. Proton-Proton- Kette.....	102
Abbildung 23: Atmosphärenaustritt von Helium durch den Sonnenwind .....	106

Abbildung 24: Phasen einer Ökobilanz .....	111
Abbildung 25: Untersuchungsrahmen und Systemgrenze .....	114
Abbildung 26: Heliumversorgung im Jahr 2018 in Mio. US \$.....	115
Abbildung 27: Treibhauspotential Helium-Null-Verlust-Szenario.....	119
Abbildung 28: Treibhauspotential Helium-Verlust-Szenario.....	119
Abbildung 29: Anteile der Lebenszyklusphasen an den gesamten THG- Emissionen (Verlust-Szenario) .....	120
Abbildung 30: Anstieg der THG-Emissionen in Folge von Dissipation, nach Prozessen .....	121
Abbildung 31: Bimodales Verteilungsmodell nach Skinner (1976).....	127
Abbildung 32: Ziele für nachhaltige Entwicklung .....	136

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definitionen von ressourcenspezifischer Dissipation in der Literatur	38
Tabelle 2: Übersicht über die Darstellungsarten von MRT-Befunden.....	48
Tabelle 3: Überblick über die bedeutendsten Anwendungen der einzelnen SEE (sortiert nach Ordnungszahl).....	54
Tabelle 4: Seltenerdoxid(SEO)-Konzentrationen ausgewählter bedeutender Minen weltweit.....	56
Tabelle 5: Produktion und Reserven Seltener Erden nach Ländern in Tonnen...	57
Tabelle 6: Seltenerd- und Gadolinium-Produktion relevanter Minen (Oxide)....	64
Tabelle 7: Korrelationsanalyse der normierten Gd- und La-Messwerte, nach Pearsons Produkt-Moment-Korrelation.....	85
Tabelle 8: Weltweite Heliumproduktion 2018 u. 2019 in Mio. m <sup>3</sup> .....	100
Tabelle 9: Treibhauspotenzial von MRT-Scans in Deutschland im Jahr 2018...	121
Tabelle A. 1: Berechnungsschritte und Quellen der Materialflussanalyse von Gadolinium.....	175
Tabelle A. 2: Berechnung des Gd-Bedarfs für Kontrastmittel in den OECD- Staaten für das Jahr 2018 .....	176
Tabelle A. 3: SEE-Messwerte aus Oberflächengewässern im Freistaat Sachsen für das Jahr 2019 .....	177
Tabelle A. 4: Vergleichstabelle zu Gadolinium-Messwerten in ausgewählten deutschen Oberflächengewässern.....	193
Tabelle A. 5: Normierung* der Gd und La Messwerte.....	194
Tabelle A. 6: Informationen zu den untersuchten Helium-Anlagen.....	195
Tabelle A. 7: Strommix nach Ländern für das Jahr 2018.....	195
Tabelle A. 8: Materialbedarf zur Heliumproduktion (alle Angaben pro Dewar)	195
Tabelle A. 9: Daten zum lokalen Transport in den Förderländern und im Abneh- merland .....	196
Tabelle A. 10: Daten zum internationalen Transport.....	196
Tabelle A. 11: Daten zum Tomographen.....	197
Tabelle A. 12: Daten zum Untersuchungsraum .....	198
Tabelle A. 13: Wirkungskategorien Ergebnisse Szenario Zero Losses.....	198
Tabelle A. 14: Wirkungskategorien Szenario Losses.....	198

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BLM</b>	Bureau of Land Management
<b>BOM</b>	Bureau of Mines
<b>DOTA</b>	Gadotersäure
<b>DTPA</b>	Diethylentriaminpentaessigsäure
<b>GBCA</b>	Gadolinium-based Contrast Agents (gadoliniumbasierte Kontrastmittel)
<b>Gd</b>	Gadolinium
<b>GOW</b>	Gesundheitlicher Orientierungswert
<b>He</b>	Helium
<b>IAC</b>	Ion-adsorption Clay (Ionenadsorbierende Tone)
<b>IE</b>	Industrial Ecology
<b>IKT</b>	Informations- und Kommunikationstechnologie
<b>LD<sub>50</sub></b>	Mittlere letale Dosis
<b>LSEE</b>	Leichte Seltenerdelemente
<b>MFA</b>	Materialflussanalyse
<b>MRT</b>	Magnetresonanztomograph(ie)
<b>NdFeB</b>	Neodym-Eisen-Bor
<b>NSF</b>	Nephrogene systemische Fibrose
<b>ppm</b>	parts per million
<b>SEE</b>	Seltenerdelemente
<b>SEO</b>	Seltenerdoxide
<b>SmCo</b>	Samarium-Cobalt
<b>SSEE</b>	Schwere Seltenerdelemente
<b>USGS</b>	United States Geological Survey
<b>OFG</b>	Oberflächengewässer
<b>GWK</b>	Grundwasserkörper
<b>LCA</b>	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)



# 1 Einleitung

In den 1970er Jahren veröffentlichte eine Gruppe von Wissenschaftlern um Dennis und Donella Meadows eine Arbeit mit dem Titel *Grenzen des Wachstums* als Bericht an den Club of Rome. Darin beschrieben sie Szenarien darüber, was geschehen würde, wenn sich die Weltwirtschaft und die Weltbevölkerung für 100 Jahre so weiterentwickelte wie zur damaligen Zeit. Sie stellten fest, dass die Menschheit bereits nach 50 Jahren, ohne tiefgreifende Gegenmaßnahmen, auf ernsthafte Umweltprobleme zusteuern würde (Randers 2014, S. 19). Die Ursache begründeten sie primär in der weltweiten Bevölkerungszunahme sowie in unserem Lebensstil, dem steigenden Wohlstandsniveau und dem einhergehenden Rohstoffbedarf (Offerman 2018, S. 1). An diesem Punkt, 50 Jahre später, befinden wir uns heute. In diesem Zeitraum hat sich ein gesteigertes Bewusstsein dafür entwickelt, dass menschliche Aktivitäten einen zunehmenden Einfluss auf die Funktionsweise des Erdsystems haben (Steffen et al. 2004, S. 1). Das außerordentliche Tempo des fortschreitenden Klimawandels und der immense Niedergang der biologischen Artenvielfalt sind die vielleicht verheerendsten ökologischen Auswirkungen menschlichen Handelns. Die Menschheit hat das Erdsystem komplett umgestaltet und ist damit zu einem dominanten geologischen Faktor geworden, mit der Folge, dass vielfach nicht mehr vom geologischen Zeitalter des Holozäns die Rede ist, sondern vom sogenannten Anthropozän (Crutzen 2002; Steffen et al. 2007).

In diesem *Menschenzeitalter* zeichnet sich unter anderem unser ungehemmter Rohstoffhunger und die damit einhergehenden Prozesse als stetiger Treiber vielfältigster ökologischer Auswirkungen ab. Die ökonomisch rentablen Lagerstätten leeren sich zusehends, der materielle und energetische Aufwand zur Rohstoffförderung steigt parallel dazu an. In den letzten Jahrzehnten hat sich, insbesondere im Bereich der metallischen Rohstoffe, eine enorme Entwicklung im Spektrum der verwendeten Elemente vollzogen. Die Diversität geht mittlerweile so weit, dass nahezu alle Metalle des Periodensystems genutzt werden (Exner et al. 2016, S. 3), sei es in Alltagsgegenständen wie Smartphones und Laptops oder in medizinischen oder energietechnischen High-Tech-Anwendungen wie Magnetresonanztomographen oder Photovoltaikanlagen.

Solche anthropogen verursachten Materialflüsse übersteigen die natürlichen Materialflüsse mittlerweile häufig um ein Vielfaches (WBGU 2011, S. 33; Klee und Graedel 2004, S. 85).

Eine zu Teilen unterschätzte Auswirkung dieser Entwicklung ist, dass eine Vielzahl dieser verarbeiteten und mobilisierten Stoffe immer häufiger in der Umwelt vorzufinden ist, sei es als gelöste Stoffe in Oberflächengewässern oder als feinste Partikel in der Luft oder auf Äckern. Dieses als *Dissipation* bezeichnete Phänomen ist Gegenstand dieser Arbeit. Grundlage ist dabei die Erkenntnis, dass materielle Objekte einen intrinsischen Drang haben, „*nämlich den, sich über die Welt zu zerstreuen, sich nach eigenem Plan im Raum zu verteilen, zu dissipieren*“ wie es Soentgen (2014, S. 276–277) philosophisch ausdrückt. Alles Materielle strebt die Ausbreitung, die Verteilung an. Eisenprodukte wie etwa ein Nagel rosten und zersetzen sich mit der Zeit. Aus Rost wird aber auch in noch so langer Zeit niemals ohne menschliches Zutun ein Nagel entstehen. Eine Jeans nutzt sich mit dem Tragen zunehmend ab und die Fasern verteilen sich, bis irgendwo ein Loch entsteht. Diese Fasern werden aber niemals wieder von alleine zusammenfinden und das Loch schließen. Oder wie Soentgen es kurz und prägnant ausdrückt „*Der Pullover flust, aber die Flusen pullovern nicht*“ (Soentgen 2014, S. 282). Er spricht hier von der Neigung der Stoffe zur Verteilung. Aus naturwissenschaftlicher Sicht ist hierbei die Rede vom zweiten Hauptsatz der Thermodynamik. Der Mensch mobilisiert die Stoffe durch sein Eingreifen in die natürlichen Kreisläufe und setzt die Verteilungsprozesse damit in Gang. An allen Stufen der Prozesskette eines Rohstoffs, von der Förderung und Aufbereitung, über den Transport, die Verarbeitung, die Nutzung und das Recycling lassen sich dissipative Ströme verorten, und das auf globaler (z.B. Treibhausgasemissionen) wie auch auf lokaler Ebene (z.B. Gewässerbelastung durch Abwasser). Das trägt essenziell zur ökologischen Krise bei.

Das Wissen über solche dissipativen Stoffströme ist sowohl aus Sicht der Ökologie als auch aus Sicht der Ressourcenschonung von großem Wert. Die vorliegende Arbeit soll helfen, dieses Feinverteilen von Stoffen und dessen Folgen stärker in den Fokus zu rücken und damit einen Beitrag zu einem nachhaltigeren Ressourcenmanagement leisten.



## 1.1 Problemstellung

Für den gegenwärtig sich ständig beschleunigenden Auf- und Ausbau der Technosphäre werden immer mehr Rohstoffe und insbesondere Metalle benötigt (siehe Kapitel 2.3). Wie sich im Laufe der vorliegenden Arbeit zeigen wird, 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 gilt es, stoffliche Dissipation zukünftig stärker in den wissenschaftlichen Fokus zu rücken.

Obwohl Materialverluste aus technischen Prozessketten ebenso wie Materialeinträge in die Umwelt in Kleinstform schon lange bekannt sind (z.B. durch Rachel Carsons Buch *Der stumme Frühling* aus dem Jahr 1963), ist die trans- und interdisziplinäre Betrachtung dieser Erkenntnisse kaum etabliert. Seit jeher konzentriert sich die industrialisierte Produktion auf die Schaffung von Produkten mit bestimmten Funktionen. Alle Prozessschritte werden auf eine möglichst hohe Funktionalität bei gleichzeitig möglichst geringem Input an Material und Energie getrimmt. Diese rein technosphärische Konzeption trägt zu unserem aktuellen Status der industriellen *Nicht-Nachhaltigkeit* bei. In den seltensten Fällen werden vor- und nachgelagerte umwelt- und ressourcenspezifische Aspekte in einen industriellen Prozess miteinbezogen. Auch in der Konzeption werden solche Faktoren bereits externalisiert. Das Streben nach neuen Materialien, die neue Funktionen ermöglichen, ist in Laboren allgegenwärtig. Die Frage nach der Herkunft der benötigten Elemente und Verbindungen, ihrer geologischen und geopolitischen Verfügbarkeit, ihre sozialen und ökologischen Abbaubedingungen wird diesem Streben zumeist untergeordnet. Gleiches gilt für nachgelagerte Prozesse, etwa die Frage nach der Recyclingfähigkeit oder dem Umweltverhalten von Materialien, die ihre technosphärischen Trajektorien verlassen (Gleich 2006, S. 10).

All diese Aspekte in eine umfassendere Betrachtung einfließen zu lassen muss eine nachhaltigere Wissenschaft bieten. 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 Arbeit soll dabei helfen, ebendiese Rahmenbedingungen durch eine Identifizierung und Bestandsaufnahme gegenwärtiger dissipativer Materialnutzungen aufzuzeigen und einzugrenzen.

## 1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des vom Umweltbundesamt geförderten Projekts „Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz“. Daher ist Ziel dieser Arbeit, stoffliche Dissipation in diesem Kontext zu untersuchen.

Zur Bearbeitung bedarf 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?***

Daran ansetzend werden auf der Basis von zwei Fallstudien neue Erkenntnisse zum Thema Dissipation von Funktionsmaterialien dargelegt. Die grundlegenden Fragestellungen bezüglich der Fallstudienanalyse können wie folgt formuliert werden:

***Welche Charakteristika und welche Pfade von Dissipation zeigen sich innerhalb sowie zwischen den Sphären? 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 wird folgende Teilfragestellung diskutiert:

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

Es ist allerdings nicht Anspruch dieser Arbeit, abschließende Antworten auf diese überaus komplexe und weit gefächerte Thematik zu finden. Vielmehr untersucht sie diese Fragestellungen ausschnitthaft mit Blick auf konkrete Fallbeispiele. 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 transdisziplinären Forschungskontext zu fördern.***

### 1.3 Aufbau der Arbeit

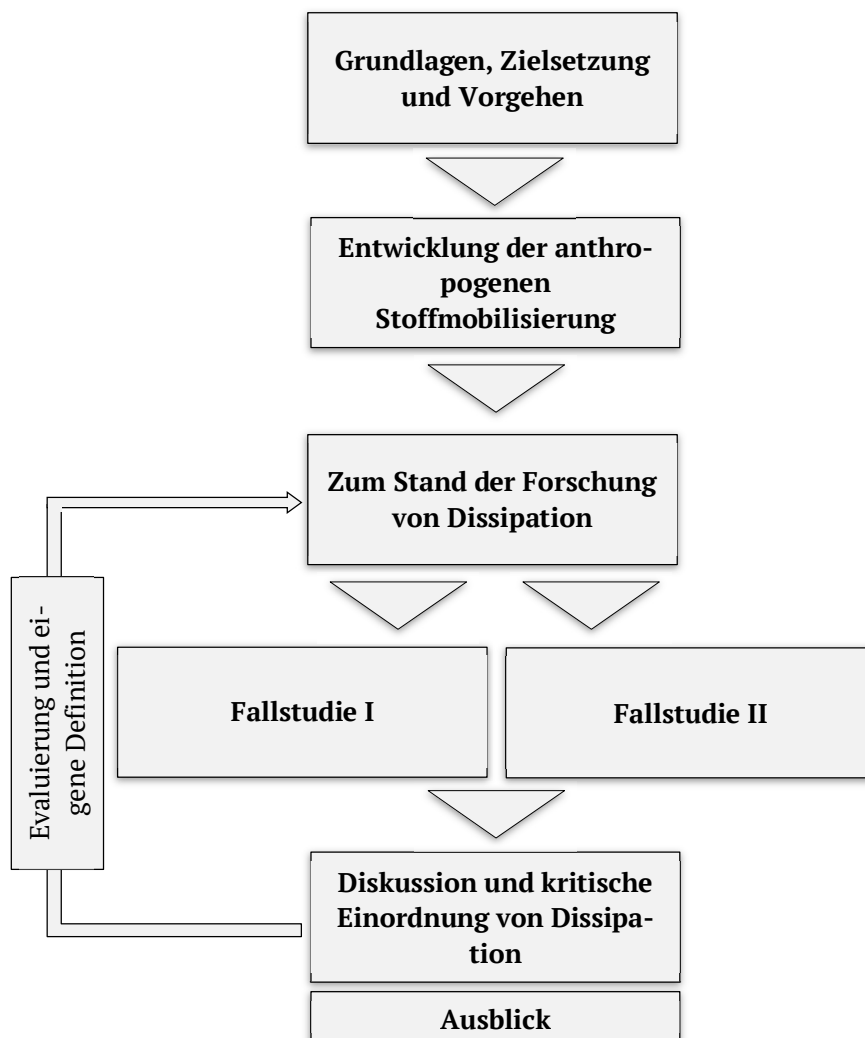
Zu Beginn dieser Arbeit steht die Erarbeitung des thematischen Rahmens. Dabei wird ein Blick auf die historische Entwicklung unseres menschlichen Materialbedarfs geworfen, um dessen rezenten, vorläufigen Höhepunkt als Fundament für die genauere Analyse heutiger Stoffmobilisierung zu legen (Kapitel 2).

Anschließend werden die mit der Bearbeitung in engem Zusammenhang stehenden Begrifflichkeiten erläutert und insbesondere der titelgebende Begriff der Dissipation zur Ermittlung des Forschungsstands einer ausführlichen Literatursichtung unterzogen (Kapitel 3). Zudem wird hier genauer darauf eingegangen, weshalb die vorliegende Arbeit auf Fallbeispielen fußt und wie die hinsichtlich ihrer Dissipation analysierten chemischen Elemente respektive ihrer Funktionen und Anwendungen ausgewählt werden.

Aufbauend auf dieses theoretische Fundament erfolgt die Darstellung und Analyse ebenjener Fallbeispiele (Kapitel 4: Fallbeispiel Gadolinium, Kapitel 5: Fallbeispiel Helium). Diese werden umfassend aus ressourcenstrategischer Perspektive beleuchtet. Die technosphärischen Stoffströme werden nachverfolgt und in spezifischen Anwendungen hinsichtlich ihrer dissipativen Pfade erforscht. Neben einer rein technosphärischen Betrachtung wird aufgezeigt, inwiefern Dissipation beim Übertritt der Grenzen zwischen der Technosphäre und den Umweltsphären ökologische Auswirkungen nach sich zieht. Dabei werden, je nach Beispiel, unterschiedliche methodische Ansätze verfolgt. Hierdurch wird aufgezeigt und verdeutlicht, dass Dissipation ein ausgesprochen komplexes Themenfeld umfasst, das einer trans- und interdisziplinären Herangehensweise bedarf. Es gibt nicht die eine Methode, welche Dissipation in ihrer Gänze erklären und analysieren kann. Abgeleitete Handlungsoptionen zeigen auf, wie eine Reduzierung von Dissipation in den einzelnen, beispielhaften Anwendungsfeldern erreicht werden kann.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine umfassende Schlussdiskussion (Kapitel 6). In dieser wird das Thema Dissipation in einem größeren Rahmen unter dem Eindruck gegenwärtiger ressourcenstrategischer Entwicklungen eingeordnet und diskutiert. Anschließend werden die erarbeiteten Ergebnisse und Erfahrungen mit Bezug auf die in Kapitel 1.2 erstellten Fragestellungen und Zielsetzungen und insbesondere hinsichtlich der Frage,

welchen Einfluss stoffliche Dissipation auf die Erreichung der gesamtgesellschaftlichen Ziele einer nachhaltigen Ressourcennutzung und des Klimaschutzes haben kann, reflektiert. Diese kritische Würdigung des methodischen Vorgehens und der gewonnenen Erkenntnisse mündet in eine erweiterte Neudefinition von stofflicher Dissipation, da sich gezeigt hat, dass in vielen Fällen ein unterschiedliches Verständnis von stofflicher Dissipation besteht, was eine disziplinübergreifende wissenschaftliche Auseinandersetzung damit erschwert. Aspekte einer umweltgerechten Ressourcennutzung sind bisher stark auf isolierte Disziplinen beschränkt, was einem so komplexen System nicht gerecht wird und eine interdisziplinäre Betrachtung über natürliche, soziale und technologische Systeme hinweg erforderlich macht. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau der Arbeit.



**Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Dissertation**



## 2 Historischer Kontext der anthropogenen Stoffmobilisierung

Metalle haben seit der erstmaligen Nutzung durch den Menschen vor vermutlich 7.000 bis 9.000 Jahren stetig an Bedeutung gewonnen. Allein Eisen und Stahl wurden im Jahr 2019 in einer Größenordnung von etwa 3,2 Milliarden Tonnen produziert. Dieses einführende Kapitel beleuchtet die Entwicklungsgeschichte der anthropogenen Metallnutzung von der Steinzeit über wichtige Stationen wie die griechische und römische Antike, über die Industrialisierung bis hin zur neuzeitlichen, massenhaften Funktionalisierung aller Metalle des Periodensystems (Held und Schindler 2017, S. 306). Das narrative Hauptaugenmerk liegt dabei auf der zunehmenden Verteilung und Mobilisierung – und damit der Dissipation – von Metallen durch den Menschen und legt die historische Basis für diese Arbeit.

### 2.1 Von der Kupfersteinzeit zur Industrialisierung

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). Global betrachtet fallen die genannten Perioden auf unterschiedliche Zeiträume und können somit zeitlich nur schwer festgelegt werden. Vielmehr werden die chronologischen Begriffe auf ein breites Mosaik an kulturellen Entitäten angewendet, die in verschiedenen Weltregionen angesiedelt waren und ein Spektrum gemeinsamer Merkmale aufwiesen. Um den aufkeimenden, gezielten Abbau von Erzen und die ersten Fortschritte im Bereich der Metallurgie hervorzuheben, wird inzwischen die Kupfersteinzeit in dieses System mit aufgenommen (Ottaway und Roberts 2008, S. 195). Die Steinverarbeitung war aber auch in dieser Zeit noch vorherrschend. Die Anfänge der Metallnutzung durch den Menschen mit Erzen und elementaren Metallen wie Gold und Silber fallen auf den Zeitraum von etwa 7.000–5.000 Jahre vor der Zeitenwende. Farbe und Glanz müssen einen besonderen Einfluss auf die Menschen gehabt haben, was Funde von Schmuckstücken aus prähistorischer Zeit belegen (Held 2018, S. 15). Doch wie der genaue Entwicklungsprozess vonstattenging, Erzlagerstätten zu erschließen,

abzubauen, aufzubereiten und mittels weiterer notwendiger Betriebsmittel wie Holzkohle bei hohen Temperaturen zu schmelzen, sowie Metallgemische in Form von Legierungen herzustellen, ist bis heute nicht genau geklärt. Es ist lediglich nachgewiesen, dass sich diese Entwicklung zeitgleich in zwei völlig verschiedenen Weltregionen abspielte, in Anatolien / Mittlerer Osten sowie in den südamerikanischen Anden (Held 2018, S. 15). Zudem ist bekannt, dass die sogenannten sieben Metalle des Altertums verwendet wurden (Gold, Kupfer, Silber, Blei, Zinn, Eisen, Quecksilber).

Die damalige Rohstoffnutzung von größtenteils organischen Materialien wie Holz 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 beispielsweise das Kupferbeil der kupfersteinzeitlichen Mumie *Ötzi* oder auch die Himmelscheibe von Nebra von deutlich ausgeprägten überregionalen, teils kontinentalen Herstellungs- und Nutzungspfaden. Bei ersterem ist mittlerweile nachgewiesen, dass das verarbeitete Kupfer aus der südlichen Toskana stammte, obwohl zeitgleich auch Kupferabbau in den Alpen erfolgte (Artioli et al. 2017, S. 7). Aus einem dieser alpinen Fördergebiete, der Region Mitterberg im Salzburger Land, stammte das in der Himmelscheibe enthaltene Kupfer. Diese wurde letztlich in Nebra, Sachsen-Anhalt, als Grabbeigabe verwendet (Meller und Michel 2018, S. 7–9). Diese zwei Beispiele zeugen davon, dass die Verarbeitung und Nutzung von Metallen auch in anderen Bereichen große Auswirkungen nach sich zogen. Von regionalen, kleinräumigen und voneinander größtenteils isolierten, tribal geprägten Strukturen der Rohstoffnutzung ging durch den Übergang in die *Metallzeit* eine Vernetzung vonstatten, die im Laufe der daran ansetzenden Jahrhunderte und Jahrtausende stetig zunahm.

Nach Baccini & Brunner (2012, S. 1–4) waren die Einflussmöglichkeiten der wenige hundert bis tausend Menschen umfassenden tribalen Strukturen auf die Biosphäre noch sehr gering. Das änderte sich mit der Entwicklung der ersten urbanen Zentren an den großen Flusssystemen wie etwa Euphrat, Tigris, Nil und Gelber Fluss vor circa 4.000–5.000 Jahren.

Die Domestizierung von Tieren und Pflanzen sowie ingenieurwissenschaftliche Errungenschaften wie Bewässerungssysteme führten erstmals zu großen anthropogen verursachten biosphärischen Umwälzungen. Auch diese waren allerdings noch stark



regional geprägt. Es entwickelten sich also kleinräumige Anthroposphären, vom Menschen gestaltete und beeinflusste Lebensräume, ohne große Vernetzung. Erst mit der Einrichtung von Handels- und Transportnetzen in den weiteren Jahrhunderten nahm die Mobilisierung von Rohstoffen und Gütern zwischen diesen einzelnen Anthroposphären zu. Diese Entwicklungen führten dazu, dass die menschenbeeinflusste Oberfläche nicht länger einem Flickenteppich glich, sondern eine weitreichende, beinahe globale Anthroposphäre bildet. Doch diese erste Hochphase der Metallverarbeitung und dessen überregionaler Materialverteilung kam zu einem plötzlichen Ende. Mit dem Beginn der Eisenzeit im Nahen Osten (etwa 1.200 v. Chr.) kollabierten die dortigen Hochkulturen wie das Hethiter Reich und die Reiche der Mykener sowie Ägypter. Die genauen Gründe sind bis heute umstritten (Neukirchen 2016, S. 65). Klar ist nur, dass mit dem Kollabieren der Kulturen die Metallproduktion und damit einhergehend der Fernhandel einbrachen. Es dauerte 500 Jahre, bis sich die Region von diesem Niedergang erholte. Mögliche Erklärungen für diese kulturelle und materielle Regression sind Dürreperioden, Klimaveränderungen oder Umweltdegradation wie Entwaldung durch die holzintensive Bronzezeitproduktion (Neukirchen 2016, S. 66). Vermutlich wirkten alle genannten Gründe zusammen. Kaniewski et al. (2013) untersuchten in einem zyprischen Salzsee enthaltene fossile Pollen von vor und nach diesem bronzezeitlichen Niedergang. So konnten sie die Vegetationsveränderung zu dieser Zeit nachvollziehen und damit auch Rückschlüsse auf die Klimaveränderung ziehen. Die Daten ergaben, dass die kulturellen Veränderungen tatsächlich mit einer 300 Jahre dauernden Dürreperiode zusammenfielen. Der Niederschlag ging stark zurück und ebenso die Pegelstände wichtiger Lebensadern wie Euphrat, Tigris und Nil (Kaniewski et al. 2013, S. 6).

Zwar setzt zu dieser Zeit in unserer chronologischen Nomenklatur die frühe Eisenzeit ein. Archäologisch sind aus dieser Epoche allerdings nur wenige Eisenfunde belegt. Neben der erst langsam einsetzenden Verarbeitung dieses Metalls ist wohl vor allem die Eigenschaft des Rostens dafür verantwortlich. Das damals noch einfach verarbeitete Metall rostete leicht, viele dieser Relikte haben sich im Erdreich vermutlich vollständig aufgelöst (Neukirchen 2016, S. 66). Bereits während der Nutzung stellte das sicher ein

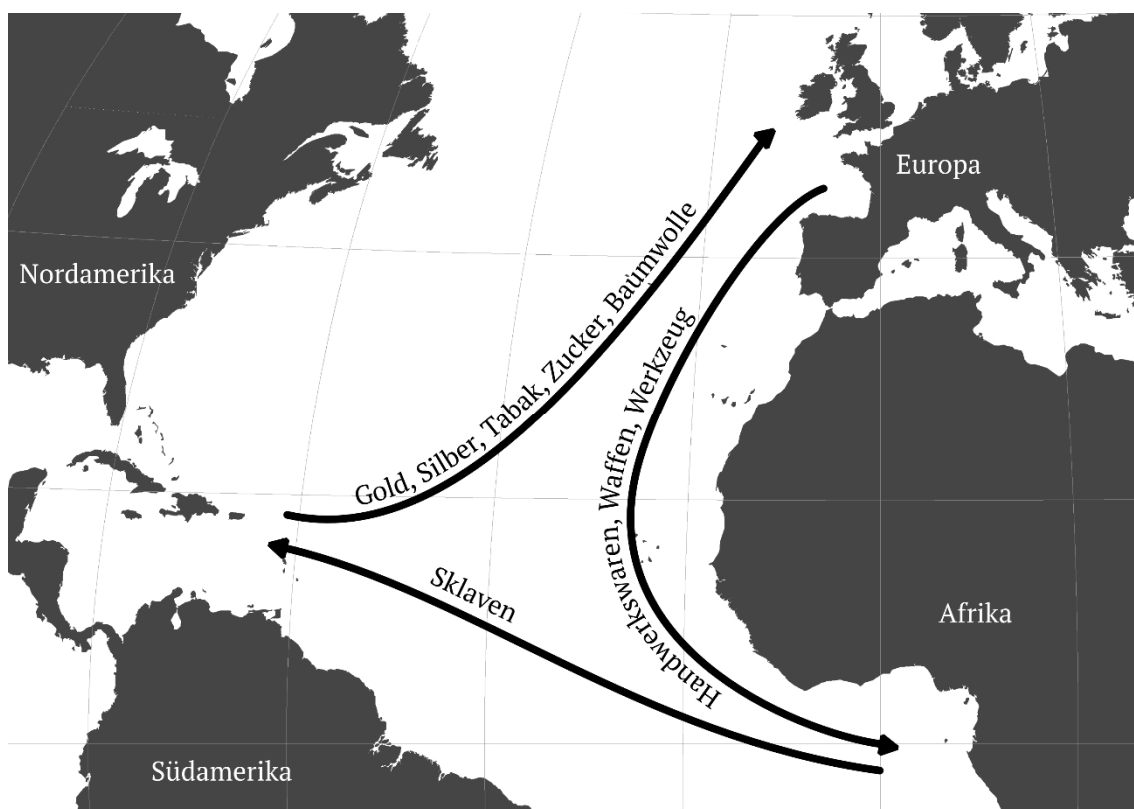
großes Problem dar und muss zu häufigem Einschmelzen des Werkstoffes geführt haben. Dies ist ein gutes Beispiel der für diese Arbeit titelgebenden stofflichen Dissipation und sollte für die restliche Arbeit im Hinterkopf behalten werden.

Einen starken Anstieg erfuhr die Metallproduktion in Europa in der römischen und griechischen Antike. Neben Waffen, Rüstungen und Werkzeugen entfiel ein Großteil des Metalls auf die Herstellung von Münzen. Diese wurden erst seit wenigen Jahrhunderten als Tauschmittel eingesetzt, etwa für Waren, Dienstleistungen aber auch für Sklaven. 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. Insbesondere für die Versorgung der Legionäre gewann Eisen, beziehungsweise Stahl, stetig an Bedeutung. Die Eisenzeit, in Europa nach einem österreichischen Gräberfeld auch Hallstatt-Zeit genannt, begann etwa um 800 v. Chr. (Reller und Holdinghausen 2014, S. 184). Die Produktion vieler Metalle wie Kupfer, Gold, Silber, Blei und Quecksilber befand sich zur Zeit des Römischen Imperiums auf ihrem vorläufigen Höhepunkt, die erst während der industriellen Revolution wieder erreicht werden sollte. Erstmals offensichtlich wurden hier jedoch die ökologischen Auswirkungen und Begleiterscheinungen der Metallproduktion im großen Maßstab. Durch das enorme Ausmaß sowie die auf Rohstoffimport gegen Münzzahlung ausgelegte Wirtschaftsstruktur des Römischen Reiches entwickelten sich auch neue Handelswege. Das im Reich geförderte Metall gelangte in Form von Münzen in, für die damalige Zeit, entlegenste Weltregionen wie Ost- und Südasiens, Arabien und Nordafrika. Auch hier zeigen sich erste dissipative Verteilungsstrukturen von metallischen Rohstoffen in großen Teilen der Erde.

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 den Metallimporten aus der *Neuen Welt* Südamerika gipfelte. Hier wurde insbesondere Gold und Silber von den Spaniern gefördert und in die Alte Welt verschifft. So entstand beispielsweise das auf über 4.000 Meter ü. NN. in Peru gelegene Potosí, eine Stadt die innerhalb weniger Jahre 120.000 Einwohner zählte und in der zeitweise über 50% des weltweiten Silbers gefördert wurde (Hahn 2009, S. 25). Aus einer einzigen Stadt kam also ein großer Teil des Metalls, das die politische und wirtschaftliche Macht Spaniens im Mittelalter sicherstellte und das in diesem Reich weit

verteilt wurde. 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. 69). Bis zum Beginn der industriellen Revolution war der Welthandel vom sogenannten Dreieckshandel geprägt (siehe Abbildung 2). Aus den kolonialen Überseegebieten Nord- und Südamerikas gelangten Gold und Silber sowie Agrarprodukte wie Tabak, Zucker und Baumwolle nach Europa. Von hier wurden verarbeitete Metalle in Form von Handwerkswaren sowie Waffen nach Westafrika verfrachtet, um den Sklavenhandel zwischen Westafrika und den amerikanischen Kolonien zu gewährleisten (Hahn 2009, S. 29–30).

Doch immer noch basierte die vollbrachte Arbeit auf einem geringen energetischen Niveau, hauptsächlich bereitgestellt durch menschliche und tierische Arbeit sowie die natürlichen 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 neuentdeckte, fossile Energieressourcen ein völlig neues energetisches Niveau erreicht wurde.



**Abbildung 2: Mensch- und Materialtransport im Zuge des Dreieckshandels**  
Quelle: eigene Darstellung

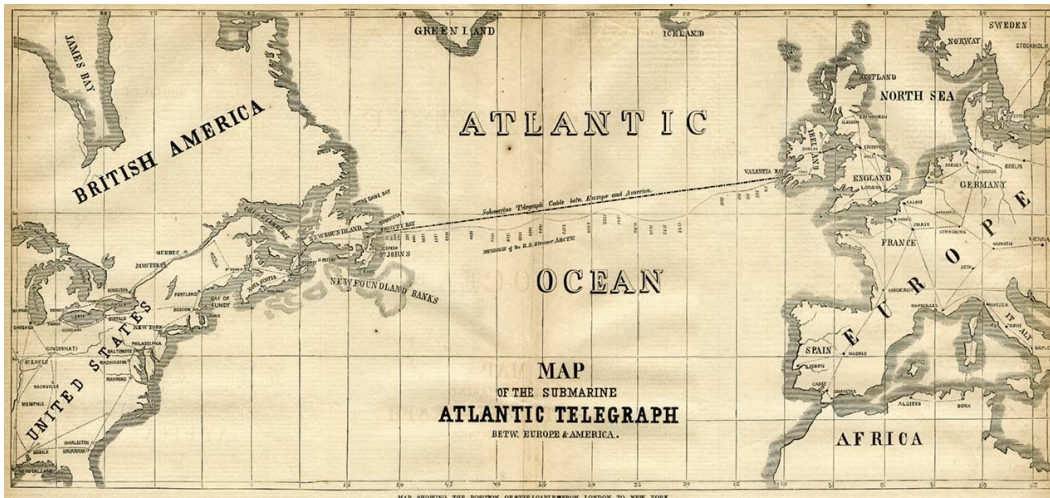
Die Industrialisierung markiert einen Wandel des menschlichen Handelns in politischen, sozialgesellschaftlichen, geistig-kulturellen als auch materiellen Aspekten. Mitte des 18. Jahrhunderts führten neue Technologien und Arbeitsweisen zu Produktionsraten bisher gänzlich ungekannten Ausmaßes. Transport- und Kommunikationskosten sanken drastisch und die Ausweitung der Handels-, Personen-, Kapital- und Technologieströme startete den ersten Akt der Globalisierung. Im folgenden Abschnitt wird sich primär auf die materiellen und technologischen Neuerungen berufen. Allerdings erfasste dieser Umbruch viele Bereiche des anthropogenen Handelns und Denkens in Form von veränderten Mentalitäten, Wirtschaftsweisen oder der Einstellung zur natürlichen Umwelt. Insofern wird heutzutage der Begriff *Industrielle Revolution* als zu kurz gegriffen erachtet. Vielmehr handelt es sich um eine *Große Transformation* – ein Ausdruck der auch im Kontext der aktuellen Situation von Klimawandel und des angestrebten Wandels hin zu einer klimaverträglichen Gesellschaft ohne Nutzung fossiler Brennstoffe vermehrt fällt (siehe hierzu beispielsweise WBGU 2011).

Den Anfang dieser Epoche machte bekanntermaßen die Erfindung der Dampfmaschine durch Thomas Newcomen. Hierdurch konnte das Grundwasser in Bergwerken abgepumpt werden und die Minenschächte in tiefere Lagen als je zuvor getrieben werden (Schivelbusch 2014, S. 2). Die ersten Eisenbahnen beförderten zunächst den regionalen und nationalen, später auch den internationalen Warenverkehr. Gleiches gilt für Dampfschiffe, die etwa zeitgleich mit der Eisenbahn aufkamen. Zudem führten neue Bautechniken unter Einsatz der neuen Technologien zum Bau von Suez- und Panamakanal, was die globalen Handelsstrecken teils enorm verkürzte (Hahn 2009, S. 31).

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.

So steht das erste transatlantische Telegraphenkabel von 1858 (Abbildung 3) sinnbildlich für die enormen Möglichkeiten aber auch Herausforderungen, die der Fortschritt mit sich brachte. Das Verlegen eines 4.500 km langen Kupferkabels auf dem

unterseeischen Meeresboden sprengte die bis dahin geltenden Grenzen von Material und Ingenieurskunst.



**Abbildung 3: Erstes transkontinentales Telegraphenkabel 1858**

Quelle: Blanton 2006; Original in Frank Leslie's Illustrated Newspaper, 21. August 1858

Ein weiteres eindrückliches Beispiel von zunehmender Metallnutzung und -verteilung ist die bis heute genutzte Blechdose. Napoleon Bonaparte schrieb 1795 einen Preis für die Erfindung einer Methode zur Haltbarmachung von Nahrungsmitteln für seine Armee aus. Zu Beginn überzeugte die Erhitzung der Nahrungsmittel sowie die Sterilisation von Glasbehältern. 15 Jahre später setzte sich schließlich die Blechdose durch und eroberte schlagartig die entlegensten Regionen der Erde (Neukirchen 2016, S. 121). So hatte etwa die berühmte, gescheiterte Franklin-Expedition zur Durchquerung der Nordwestpassage im Jahr 1845 mit ihren zwei Schiffen HMS Terror und Erebus über 14.000 kg Pökelfleisch in Dosen als Proviant geladen (Solly 2018). Die Metallverteilung erreichte erstmals auch bisher unberührte arktische Regionen.

Die zweite Hälfte des 19. sowie der Beginn des 20. Jahrhunderts waren geprägt von Verbesserungen der nun bekannten Fertigungsverfahren. So etablierten sich etwa die Weltausstellungen, auf denen die neuesten technischen Errungenschaften und Leistungsfortschritte international ausgestellt wurden. Allein das Gebäude der ersten Weltausstellung in London 1851, der sogenannte Crystal Palace, ein 600m langer Kristallpalast aus Glas und Eisen, war ein Meisterwerk der Metallverarbeitung und Ingenieurskunst per se (Osterhammel 2010, S. 41).

Abbildung 4 zeigt den Produktionsverlauf von Roheisen und Stahl zwischen 1900 und 1960. Insbesondere der Produktionseinbruch während der Weltwirtschaftskrise 1929

sowie der rasch daran ansetzende Produktionsanstieg mit seinem Höhepunkt während des Zweiten Weltkriegs fallen auf. Die Nachkriegszeit läutete schließlich den bisherigen Höhepunkt der hier gezeigten Produktion, aber auch der gesamten Globalisierungsprozesse ein. Dabei beschränkt sich Globalisierung nicht nur auf den weltweiten Warenhandel, sondern umfasst auch die zunehmenden internationalen Verflechtungen in den Bereichen Kultur, Personenverkehr, Dienstleistungen, Kapitalverkehr, sowie Technologieaustausch. Hier soll der Fokus allerdings weiter auf der globalen Waren- und damit auf der Rohstoffverteilung liegen.

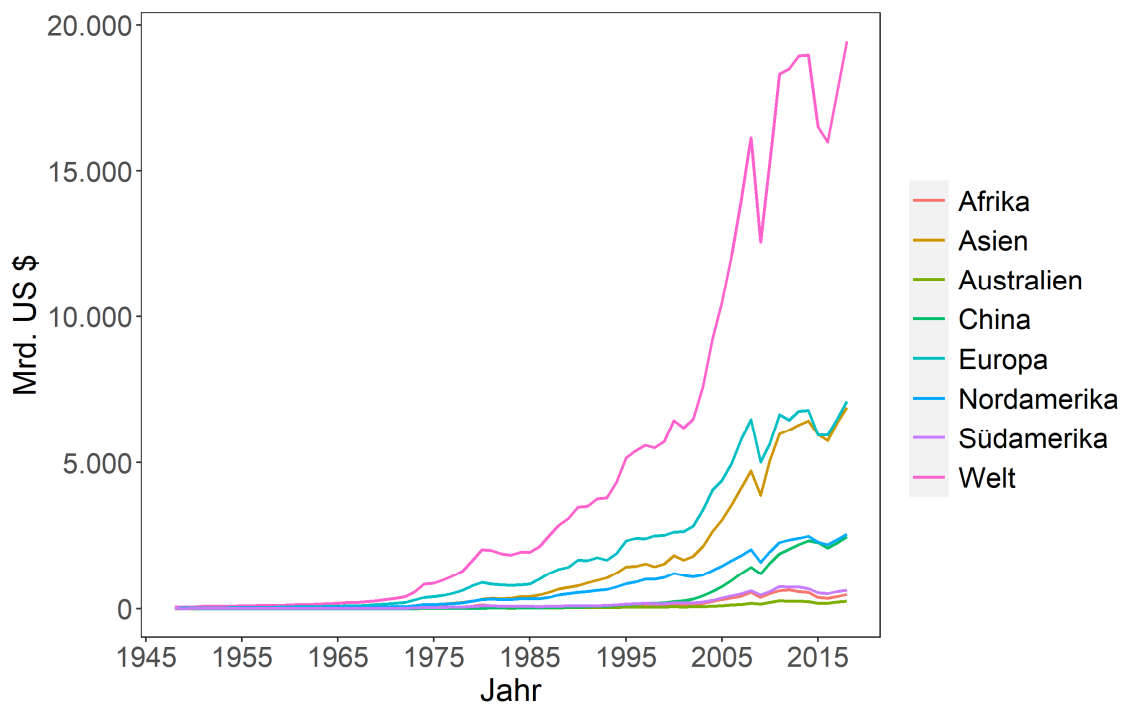


**Abbildung 4: Roheisen- und Stahlproduktion zwischen 1900 und 1960**

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

## 2.2 Great Acceleration und die Grenzen des Wachstums

Dieser unübertroffenen rasante Anstieg an Globalisierungsprozessen seit den 1950er Jahren ist heute als *Great Acceleration*, die Große Beschleunigung, bekannt. Abbildung 5 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, größtenteils exponentielle Anstieg ist deutlich zu erkennen.



**Abbildung 5: Warenexporte nach Kontinenten im Zeitraum 1948–2018**

Quelle: eigene Darstellung, Daten von WTO 2021

Nach Brunner et al. (2002, S. 55) ist der Materialumsatz eines modernen Menschen 10–20mal höher als in prähistorischer Zeit. Die Zunahme der Materialströme ist aufgrund unseres auf Wachstum basierenden kapitalistischen Wirtschaftsmodells stark mit dem Wirtschaftswachstum verknüpft. Die Entkopplung dieser Faktoren war bisher nur in einigen wenigen Sektoren erfolgreich, wie wir im zirkulären ökonomischen Diskurs immer wieder beobachten (Ellen MacArthur Foundation 2013, S. 14).

Demgemäß steigt die ökologische Belastung mit der Zunahme an Materialströmen (Schmidt-Bleek und Klüting 1994, S. 16–18). Folglich könnte also eine Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch und dementsprechend eine Dematerialisierung auch zu geringeren ökologischen Belastungen führen. Robert Ayres (2004,

S. 57) argumentiert, dass diese Schlussfolgerung nichtzutreffend ist. Auch die vorliegende Arbeit wird Beispiele aufzeigen, bei denen schon sehr geringe Massenströme zu ungewollten Implikationen führen können oder die Dematerialisierung einer Funktion oder Technologie aufgrund des Rebound-Effekts (siehe Kapitel 2.3) zu einem Anstieg der Gesamtstoffströme führen kann. Die Allgemeinaussage ‚weniger Materialumsatz bedeutet weniger Umweltbelastung‘ mag zwar in vielen Fällen zutreffen, muss aber mit großer Vorsicht betrachtet werden und bedarf einer Einzelfallbetrachtung (Ayres et al. 2004, S. 57).

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 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). Diese Beobachtungen haben einen großen Einfluss auf die laufende Anthropozän-Debatte.

Der Hauptautor dieser Studie schreibt dazu:

*“One feature stands out as remarkable. The second half of the twentieth century is unique in the entire history of human existence on Earth. Many human activities reached take-off points sometime in the twentieth century and have accelerated sharply towards the end of the century. The last 50 years have without doubt seen the most rapid transformation of the human relationship with the natural world in the history of humankind.”* (Steffen 2004, S. 131)

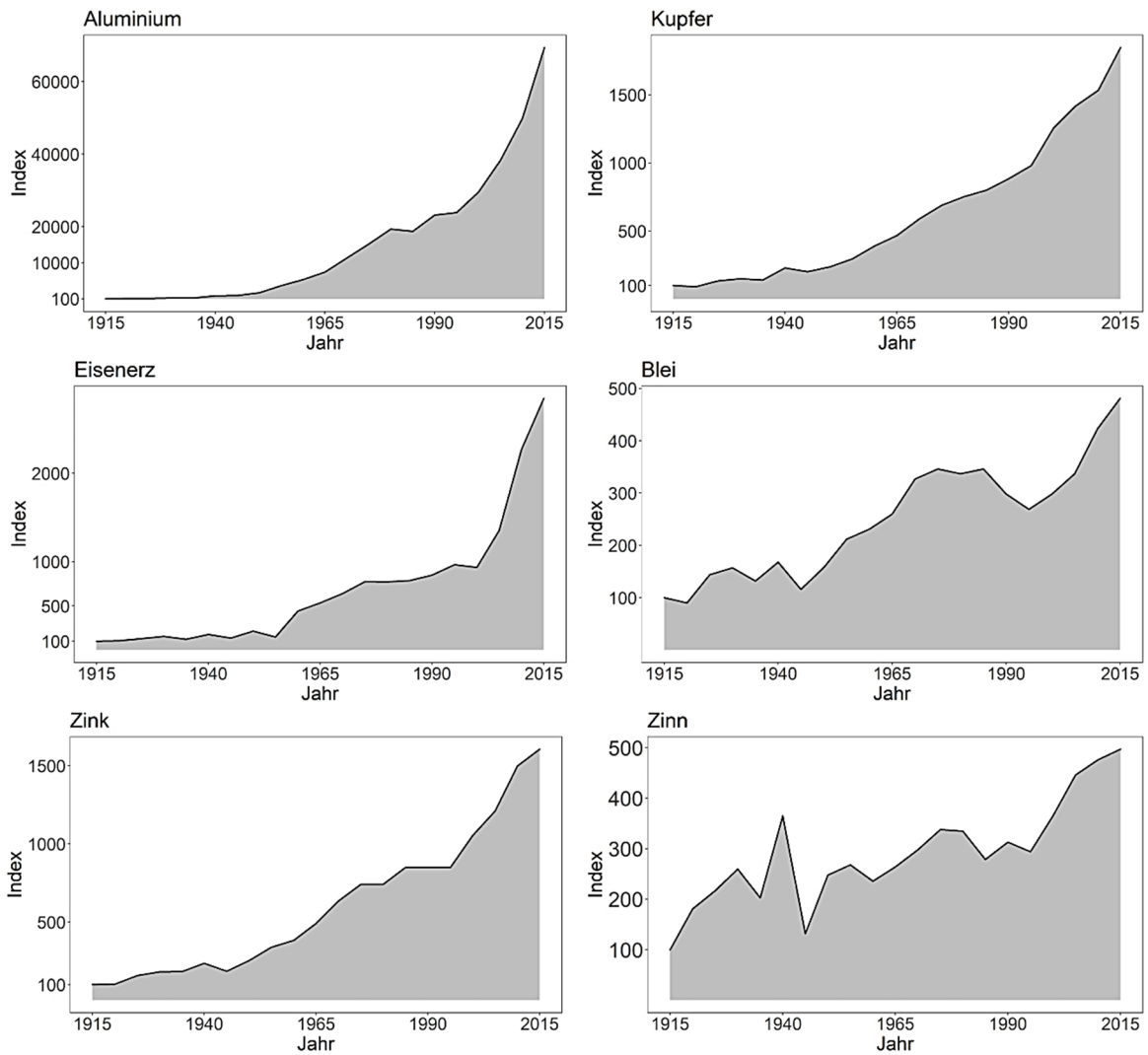
Neben dem exponentiellen Bevölkerungswachstum ist der steigende Ressourcenverbrauch die treibende Kraft für die folgenreichen Veränderungen unserer Zeit. Dabei stieg der Ressourcenverbrauch in den letzten Jahrzehnten stärker als das Bevölkerungswachstum, was in einigen Weltregionen zu einem Anstieg des Lebensstandards führte (Meadows et al. 2009, S. 5). 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 CO<sub>2</sub>-Gehalts in der Atmosphäre, der Niedergang der globalen Biodiversität oder drastische Verluste tropischer Regenwälder (Steffen et al., S. 17).

Mit diesen Auswirkungen des wirtschaftlichen Wachstums beschäftigte sich erstmals umfassend eine Forschergruppe des Massachusetts Institute for Technology (MIT) um Dennis L. Meadows im Auftrag des Club of Rome, was im Jahr 1972 zur Publikation der bekannten Studie *Grenzen des Wachstums* führte (Meadows 1972). Hier wurde den bisherigen Erkenntnissen der exponentiellen Wachstumstendenzen die Tatsache gegenübergestellt, dass die Erde endlich ist und somit die Frage der Grenzen des Wachstums zwangsläufig aufkommen muss (Meadows et al. 2009, S. 17). Erkenntnisse waren unter anderem eine beschleunigte Umweltzerstörung und zunehmende Erschöpfung der wichtigsten Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Eisenerz in den folgenden Jahrzehnten, falls die Wachstumsprozesse nicht gestoppt werden. Die fortschreitende Verknappung führe zwangsläufig zu einer Erhöhung der Förderkosten und die globale Anhäufung von Abfällen treibe die Kosten im Kampf gegen die Umweltverschmutzung in die Höhe – diese Kombination führe, den Autoren zufolge, zwangsläufig zu einem Erreichen der Grenzen des Wachstums (Bardi 2014, S. 14–15).

Die von Steffen 2004 aufgezeigten Entwicklungen können auch auf einzelne Rohstoffe übertragen werden. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die relativen Fördermengen (dargestellt als Index mit Basisjahr 1915) von Eisenerz, Aluminium, Kupfer, Blei, Zinn und Zink zwischen 1915 und 2015. Auch hier ist die stark ansteigende Verlaufskurve der gefördert Menge zu erkennen.



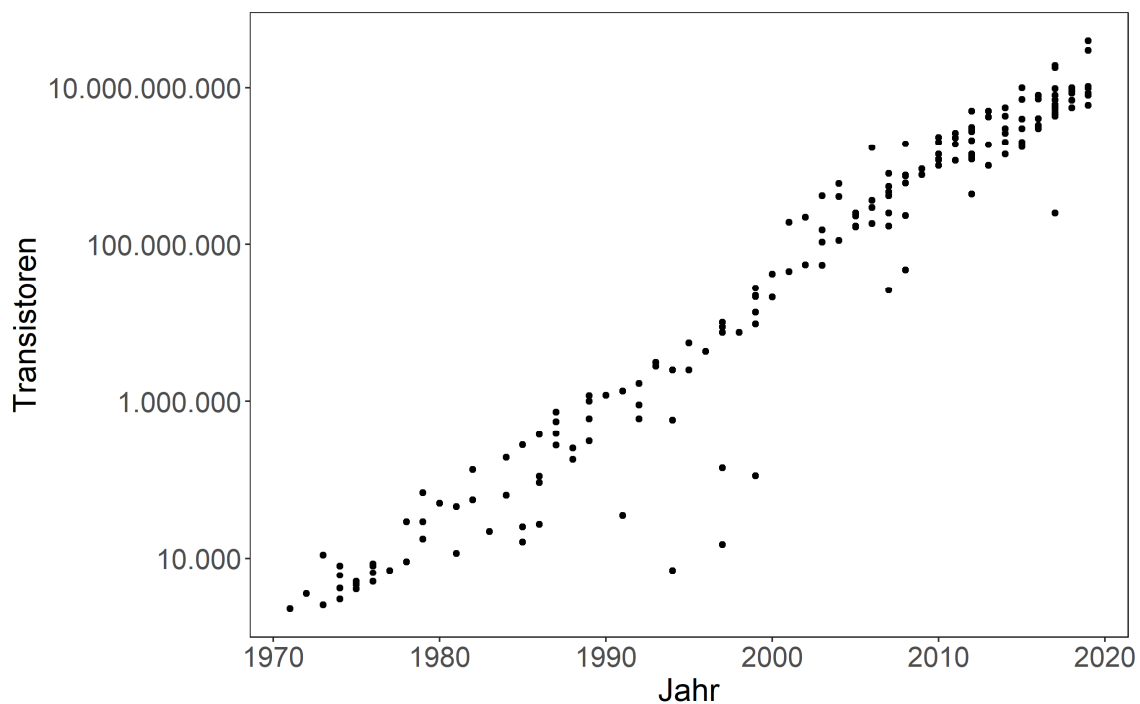
**Abbildung 6: Produktionsanstieg verschiedener Metalle von 1915–2015, dargestellt als Index (100 = 1915)**

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

## 2.3 Rezente Entwicklungen

Neben die aufgezeigte Förderzunahme vieler Rohstoffe traten in den letzten Jahrzehnten noch weitere Trends, die für steigende Herausforderungen im anthropogenen Umgang mit Rohstoffen und ihren ökologischen Auswirkungen sorgen.

Zur Veranschaulichung kann hierfür das Moorsche Gesetz herangezogen werden. Diese von Gordon Moore in den 1960er Jahren prophezeite Entwicklungstheorie besagt, dass sich die Anzahl an Transistoren auf Prozessorchips und somit indirekt die Rechenleistung innerhalb eines Zeitraums von etwa 2 Jahren regelmäßig verdoppeln (Waldrop 2016, S. 145). Abbildung 7 zeigt diesen tatsächlich eingetretenen exponentiell verlaufenden Anstieg an Transistoren zwischen 1971 und 2019.



**Abbildung 7: Anzahl an Transistoren auf Computerchips**

Quelle: eigene Darstellung, Daten von Wikipedia 2020, CC BY-SA

Dieser rasante Prozess verdeutlicht mehrere Entwicklungen die damit einhergehen. Zum einen kann er grundsätzlich zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz beitragen, da die gleiche Rechenkraft mit einem stetig geringer werdenden Materialeinsatz erzielt werden kann. Allerdings geht die Entwicklung in die konträre Richtung, denn Computer bzw. Computerchips werden immer leistungsfähiger. Zudem steigt die Zahl der prozessorgesteuerten Produkte immer weiter. Hier wird vom Rebound-Effekt gesprochen. Potenzielle Material- und Energieeinsparungen durch eine Steigerung der Effizienz

werden durch eine Erhöhung der Produktion ins Gegenteil verkehrt. So sind einer Studie von Newzoo (2019, S. 25) zufolge aktuell 3,2 Milliarden Menschen aktive Smartphone-Nutzer, die insgesamt 3,8 Milliarden Smartphones nutzen. Die große Zahl inaktiver Smartphones ist dabei noch nicht mal einberechnet. Der Gesamtbedarf an Prozessoren und an eingesetzten Rohstoffen steigt also stark an.

Gleichzeitig führen die kurzen Intervalle des technologischen Fortschritts zu kurzlebigen Produkten. Design und Marketing tragen ihr Übriges dazu bei, das Bedürfnis des Konsumenten nach neuen Produkten stetig aufrecht zu erhalten.

Und nicht zuletzt gehen die technologischen Entwicklungen auch mit neuen Geräten einher, die neue Materialien und Rohstoffe erfordern. Auch das lässt sich am oben genannten Beispiel der Prozessoren zeigen. Noch die ersten Jahrzehnte des 20. Jahrhunderts war die Lochkarte als Basis der elektromechanischen Datenverarbeitung vorherrschend. Im Laufe des Jahrhunderts ging die Entwicklung über Relais und Elektronenröhren hin zu den heutigen siliziumbasierten Transistoren in Mikroprozessoren (Feynman et al. 1989, 14-11). Auch beim Blick auf das bereits erwähnte Smartphone, respektive Telefon, lässt sich der Wandel der Rohstoffnutzung gut aufzeigen.

Hier hat sich das Spektrum der verwendeten Elemente in den letzten Jahrzehnten eindrucksvoll entwickelt. Die Stoffvielfalt in Kommunikationstechnologien wie dem Smartphone ist inzwischen so groß, dass fast alle stabilen Elemente des Periodensystems genutzt werden (Exner et al. 2016, S. 3). Mit Bezug auf das erläuterte Dreiperiodensystem, bestehend aus Stein-/Kupferstein-, Bronze- und Eisenzeit sprechen Held und Schindler (2017, S. 306) davon, dass die Menschheit mittlerweile ein neues Metallzeitalter betreten hat – das All Metals Age. Abbildung 8 zeigt die Entwicklung der genutzten Elemente in der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT), farblich untergliedert in den 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 ermöglichen kann.

Auch über die IKT hinaus nimmt die Funktionalisierung des Periodensystems der Elemente stetig zu. Insbesondere im Hinblick auf die angestrebte Erreichung der Ziele der

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. Der Rebound-Effekt entsteht offensichtlich als Folge der beabsichtigten Miniaturisierung. Eine effiziente Trennung der Sekundärressourcen aus dem immer komplexer werdenden Materialmix ist technisch anspruchsvoll und wirtschaftlich oft zu teuer (Reuter 2013, S. 53).

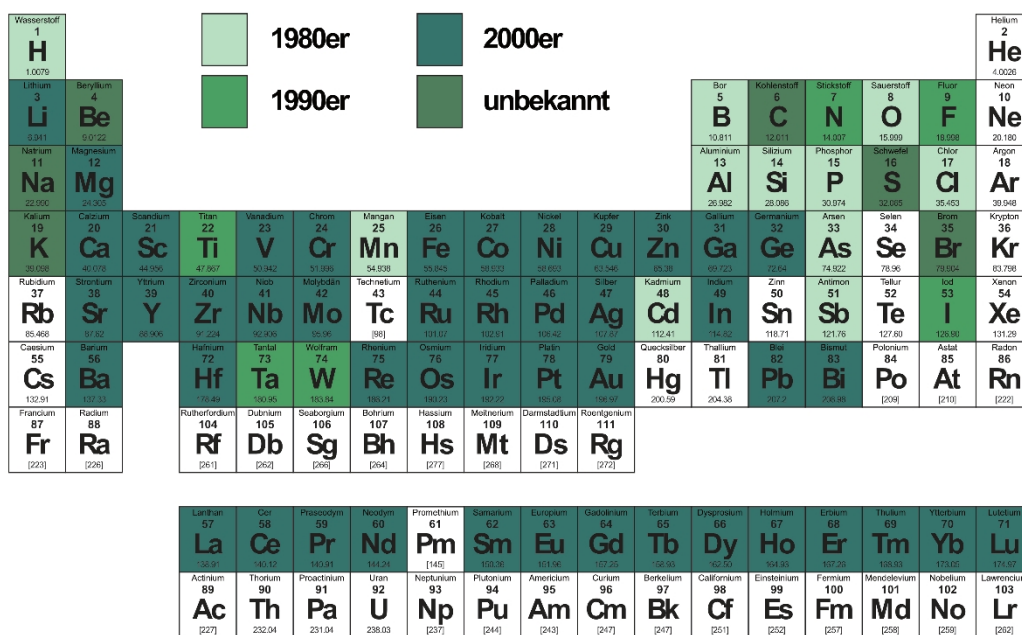


Abbildung 8: Entwicklung der genutzten Elemente in der IKT

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

All das führt dazu, dass der Mensch seine natürliche Umgebung mehr und mehr verändert, indem er Ressourcen extrahiert, Fabriken baut, Städte errichtet, Energie zur Verfügung stellt, Nahrungsmittel für 7 Milliarden Menschen produziert und so weiter (Zalasiewicz et al. 2016, S. 2). Aber mehr als die Hälfte der Metalle in der Erdkruste haben keine biologische Funktion und wurden nur vom Menschen mobilisiert (Reller et al. 2013, S. 213). Das Ausmaß der anthropogen induzierten Gewinnung, Funktionalisierung und Mobilisierung von Ressourcen übersteigt nun deutlich zahlreiche natürliche Stoffströme (WBGU 2011, S. 33). Dadurch stehen natürliche, biogeochemische Stoffkreisläufe nicht mehr allein, 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 Konzept der Technosphäre gesprochen (Otter 2017; Haff 2014; Karlsson 1999).

Diese gliedert sich in das System der Erdsphären ein. Dabei handelt es sich um ein Konzept, welches das komplexe Erdsystem mittels eines schalenförmigen Aufbaus modellhaft für eine systemische Betrachtung vereinfacht. Üblicherweise wird dabei von Atmosphäre, Lithosphäre, Biosphäre und Hydrosphäre gesprochen, für die bestimmte Prozesse als auch Erscheinungsformen von Materie charakteristisch sind. Zusätzlich soll die Technosphäre den zunehmenden anthropogenen Einfluss auf das System Erde hervorheben. Häufig wird dabei auch von der Anthroposphäre gesprochen. Die Unterschiede in der Nomenklatur sind marginal. Anthroposphäre soll die Rolle des Menschen als eigentlichen Verursacher der aktuellen tellurischen Umwälzungen hervorheben. Technosphäre vermittelt eine distanziertere Sichtweise, in der die Auswirkungen menschlichen Handelns auf natürliche, geologische Prozesse einwirkt und ihre Dynamik verändert (Haff 2014, S. 302). Die Untergliederung des Planeten Erde in modellhafte Subsysteme weist diese zwar als einzelne Schalen aus. Es ist jedoch wichtig die Wechselwirkungen zwischen den Sphären zu bedenken. Manche Sphären überschneiden und durchdringen sich. Es handelt sich nicht um separate und voneinander unabhängige Sphären unseres Planeten, sondern ständig interagierende Subsysteme des Gesamtsystems Erde (Blij und Muller 1993, S. 13–14).

Der rasante Anstieg der Technosphäre mit neuen Materialien, neuen Technologien und neuen Gütern bestimmt also die anderen Erdsystemsphären. Abbildung 9 zeigt das Sphärensystem, bestehend aus Atmo-, Bio-, Hydro- und Lithosphäre sowie der nun eingegliederten Technosphäre. An dieser Stelle sei erwähnt, dass es sich hierbei lediglich um die für diese Arbeit als relevant erachteten Sphären handelt. In eine ganzheitliche geowissenschaftliche Betrachtung fallen beispielsweise noch die Kryosphäre oder die Pedosphäre. Ausführlichere Informationen hierzu finden sich beispielsweise bei Blij und Muller (1993) und bei O'Hara (2014).

Die Lithosphäre ist die Durchdringungszone im Bereich über und unter der Erdoberfläche und steht hier für den Gewinnungsraum von Rohstoffen und bildet damit die materielle Grundlage für die Technosphäre. In der Technosphäre finden Mobilisierungs- und Funktionalisierungsprozesse statt. Die damit verbundenen Auswirkungen

können als Emissionen in Atmosphäre und Hydrosphäre gesehen werden. Mit der potenziellen Zwischenstation Biosphäre enden die Stoffströme wieder in der Lithosphäre. Die verschiedenen Teilbereiche stehen also durch Stoff- und Energiekreisläufe miteinander in Verbindung (O'Hara 2014, S. 54).

Beispielhaft für dieses stark vereinfachende Konzept kann die Verbrennung von Erdöl stehen. Das Erdöl wird aus der Geosphäre gefördert und innerhalb der Technosphäre vom Mensch zu Benzin verarbeitet und in Autos verbrannt, wodurch gasförmige Emissionen in die Atmosphäre gelangen. Diese Reststoffe werden womöglich durch Regen aus der Luft ausgewaschen und gelangen somit in die Gewässer der Hydrosphäre. Entweder setzen sich die Partikel hier im Laufe der Zeit im Sediment ab oder nehmen den Umweg über die Biosphäre, etwa durch freiwillige oder unfreiwillige Aufnahme durch Fische. Durch die fortschreitende Einlagerung in Sedimenten werden die Stoffe letztlich wieder Teil der Geosphäre und der konzeptionelle Stoffkreislauf ist geschlossen (McNeill 2003, S. 33–34). Die Bedeutung von Stoffkreisläufen wird in einem Exkurs (S. 39) nochmal aufgegriffen und vertieft. Weiterführende Informationen mit Beschreibungen von Wechselwirkungen innerhalb und zwischen den Sphären finden sich beispielsweise im Jahresgutachten des Wissenschaftlichen Beirats Globale Umweltveränderungen (WBGU 2000).

Dieses Modell der erdsystemischen Sphären soll für die Arbeit als Teil des konzeptionellen Rahmens und als Orientierungshilfe für den Leser dienen. Es wird anhand dieses transdisziplinären Vorgehens versucht, nicht allein die Technosphäre als Raum menschlichen Handelns und Wirtschaftens zu sehen. Vielmehr sollen die anthropogen bedingten Prozessketten das komplette System Erde, unterteilt in diese Sphären, umfassen - von der Rohstoffförderung aus der Lithosphäre, über die Mobilisierung und Funktionalisierung in der Technosphäre, bis hin zu den Verteilungspfaden und -formen und den entsprechenden ökologischen Implikationen in den übrigen Sphären.



**Abbildung 9: Die Erdsphären und ihre ressourcenspezifischen Charakteristika**

Quelle: eigene Darstellung. Fotoquellen unter *Abb.9* im Literaturverzeichnis.

## 2.4 Biologischer und industrieller Metabolismus – eine Analogie

Während die essenziellen Nährstoffe wie Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor die Grundlage der biologischen Stoffkreisläufe dieser Erde formen, können die Metalle als die Nährstoffe unserer anthropogenen technologischen Stoffkreisläufe gesehen werden. Dabei stehen diese biologischen und technosphärischen Stoffkreisläufe jedoch längst nicht mehr nebeneinander und für sich getrennt. Vielmehr zeigt diese Arbeit, wie sehr unser menschliches Handeln auch in kleinsten Mengen in die biosphärischen Stoffkontexte interveniert. Und in diesem Eingreifen ist auch schon der größte Unterschied zwischen den beiden Stoffwechselprozessen zu erahnen. Während natürliche Stoffwechselprozesse geschlossene Kreisläufe bilden, sind anthropogen induzierte Stoffwechselprozesse offen und somit häufig noch weit entfernt von unserer angestrebten Circular Economy (Ayres 1994, S. 25; Ellen MacArthur Foundation 2013).

Bekanntheit erlangte diese Form der Betrachtung anthropogen induzierter Stoff- und Energieström in Analogie zu den biologischen Stoffwechselprozessen primär durch die wissenschaftliche Bewegung der *Industrial Ecology* (IE). Erstmalige Erwähnung fand dieser Begriff Ende der 80er Jahre durch Frosch und Gallopoulos (1989), also etwa zeitgleich



mit dem Aufkommen der Diskussion um Nachhaltigkeit, insbesondere durch den Brundtland-Bericht 1987, der nachhaltige Entwicklung als *„eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen“* (WCED 1987, Ch. 2, übersetzt) definierte.

Der Ansatz dieser Forschungsrichtung basiert darauf, industrielle Systeme entsprechend dem nachhaltigen Vorbild der Natur als industrielle Ökosysteme zu verstehen und zu gestalten. Arnim von Gleich (2008, S. 20) bezeichnet die Herangehensweise der IE als das Ziel einer nachhaltigen Integration der Technosphäre in die natürlichen Erdsphären und einer Verbindung wirtschaftlich-technischer in natürliche Systeme. Um nachhaltig zu agieren, muss die natürliche Umwelt immer in der Lage sein die Technosphäre zu tragen, ohne unter deren Last zusammenzubrechen.

Hier lässt sich also wieder der Sphärengedanke aufgreifen, dessen Konzept einen vereinfachten stofflichen wie auch räumlichen Ausschnitt aus der realen Welt ermöglicht. Die Umwelt stellt Ressourcen und Energie zur Verfügung, die von uns innerhalb der Technosphäre verarbeitet und genutzt werden. Die Emissionen und Reststoffe werden wieder in die Natur entlassen. So gesehen fungieren die Übergänge zwischen den Sphären als Grenzen des Wachstums, oder konkreter gesprochen als Grenzen der Ressourcenverfügbarkeit beziehungsweise Grenzen der Emissionssenken. Insbesondere diese Senken werden durch eine zunehmende Dissipation vor große Herausforderungen gestellt, was einen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt (Baccini und Brunner 2012; Brunner et al. 2002; Krausmann et al. 2008).

## 2.5 Zwischenfazit – Unser Umgang mit Ressourcen im Kontext des Systems Erde

Durch die beschriebenen Erdsystem- und sozio-ökonomischen Trends kommt der Meinung vieler Forscher zufolge dem Mensch eine besonders prägende Bedeutung im System Erde zu – mit der Folge, dass vielfach nicht mehr vom geologischen Zeitalter des Holozäns die Rede ist, sondern vom Anthropozän (Crutzen 2002). Die bisherige Zivilisationsgeschichte spielte sich seit der letzten Eiszeit vor 11.000 Jahren in einer Periode relativ stabiler natürlicher Lebensbedingungen ab. Durch die starken, menschenverursachten Veränderungen verlieren diese Bedingungen jedoch zunehmend an Stabilität. Noch ist das Anthropozän aber nicht in die offizielle Nomenklatur der geologischen Zeitalter aufgenommen worden. Die zuständige *International Commission on Stratigraphy* berät aktuell noch über den definitiven Startpunkt dieses neuen Zeitalters. Laut der Kommission (SQS 2019) lassen sich mehrere Phänomene als Indiz für eines möglichen Anthropozäns deuten. Beispielsweise ausgeprägte und abrupte anthropogene Störungen der natürlichen Stoffkreisläufe von Elementen wie Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor oder auch das Auftreten neuer chemischer Verbindungen, welche die Natur von sich nie hervorgebracht hätte. Zudem zeigen sich Umweltveränderungen, die nur durch diese Störungen hervorgerufen werden, einschließlich der globalen Erwärmung, des Anstiegs des Meeresspiegels und der Versauerung der Ozeane. Und schließlich wird im Bericht auch die globale Verbreitung und Dissipation vieler neuer Materialien, darunter Beton, Flugasche und Kunststoffe, sowie die künftig daraus entstehenden Technofossilien, hervorgehoben (Zalasiewicz 2018, 4.2).

Um die Umstände, die ein umweltverträgliches und gesichertes Umfeld für die menschliche Zivilisation bieten sollen, zu beurteilen, hat eine Forschergruppe um Johan Rockström vom Stockholm Resilience Centre im Jahr 2009 die sogenannten Planetaren Grenzen postuliert (Rockström et al. 2009a; Rockström et al. 2009b). Dieses, aktuell wohl umfassendste und meistgenutzte Konzept zur ökologischen Tragfähigkeit der Erde und den ökologischen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts, bewertet neun Dimensionen (u.a. Klimawandel, Landnutzungswandel, Intaktheit der Biosphäre, Eintrag neuer Substanzen in das Ökosystem), die unabdingbar für die sozial-ökologische Stabilität sind. Ein Überschreiten dieser Belastungsgrenzen zieht eine irreversible Gleichgewichtsabkehr von den aktuellen Lebensbedingungen für Flora und Fauna nach

sich. Vier der neun formulierten Grenzen sind bereits überschritten oder liegen zumindest in einem gewissen Unsicherheitsbereich. Diese sind die biogeochemischen Flüsse bestehend aus Stickstoff und Phosphor, die Intaktheit der Biosphäre hinsichtlich ihrer genetischen Vielfalt, der zunehmende Landnutzungswandel sowie der Klimawandel. Stoffliche Feinverteilung spielt hierbei eine nicht unwesentliche Rolle, sei es die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Belastung, der zunehmende Eintrag von Phosphor und Stickstoff in Form von feinverteilten Düngemitteln auf dem gesamten Globus oder auch der Eintrag neuartiger Substanzen und Chemikalien in die Umwelt (Steffen et al. 2015, S. 736).

Ganz aktuell ist eine Gruppe israelischer Wissenschaftler um Ron Milo (Elhacham et al. 2020) der Frage nachgegangen, wie im Kontext dieser Trends der materielle Output menschlicher Aktivitäten im Verhältnis zur globalen Biomasse einzuordnen ist. Dabei stellten sie fest, dass wir uns gerade am Kreuzungspunkt befinden. Die Masse aller vom Menschen produzierten Gegenstände übertraf 2020 wohl erstmals die Masse aller Lebewesen auf dem Planeten. Und der Trend ist unverkennbar – laut der Studie verdoppelt sich das Gewicht der menschengemachten Gegenstände momentan etwa alle 20 Jahre. Der gewichtsmäßig größte Anteil entfällt dabei auf Baustoffe wie Beton und Ziegel (Elhacham et al. 2020, S. 443).

Zusammengefasst stellen also immer häufiger wissenschaftliche Arbeiten den aus den Fugen geratenen Mensch-Umwelt-Nexus heraus, sei es durch die beschriebenen Konzepte des Anthropozäns und der Planetaren Grenzen oder global relevanten Publikationen wie die IPCC-Berichte zum Klimawandel. Die beträchtlichen Fortschritte menschlicher Zivilisation werden durch teils drastische ökologische Auswirkungen teuer erkaufte.

Dissipation, das titelgebende Phänomen der vorliegenden Arbeit, spiegelt in diesem Kontext einen nicht unerheblichen Anteil an den einflussreichen anthropogen bedingten Veränderungen im Mensch-Umwelt-Gefüge wider. Das folgende Hauptkapitel geht genauer auf die relevanten Begrifflichkeiten und Definitionen ein und liefert damit die Grundlage für eine ausgiebige Analyse und Diskussion.



### 3 Ressourcen und Dissipation – Zum Stand der Forschung

Im Zuge einer umfassenden Betrachtung von stofflicher Dissipation zeigt sich auch die Notwendigkeit nach einer genauen Festlegung, was hier unter diesen (*Roh-*)*Stoffen* beziehungsweise *Ressourcen* verstanden wird. Und wo liegt eigentlich der Unterschied zwischen Rohstoffen und Ressourcen? Darüber geben die folgenden Unterkapitel Aufschluss.

#### 3.1 Der Begriff Ressource

Grundsätzlich können unter Ressourcen eine Vielzahl materieller als auch immaterieller (z.B. Informationen) Aspekte verstanden werden. So werden in der Wirtschaftslehre unter Ressourcen die Produktionsfaktoren Arbeit, Boden und Kapital verstanden (Hasenack et al. 1962, S. 45). Auch in diversen weiteren Fachdisziplinen finden sich eigens zugeschnittene Definitionen des Begriffs. Die folgende kurze Literaturübersicht sowie die daran ansetzende Definition von Ressourcen für diese Arbeit beschränkt sich auf *natürliche Ressourcen*, wie sie primär in den Natur- und Geowissenschaften verstanden wird. Eine weitere, wenn auch nach eigenen Worten unvollständige Übersicht hierzu liefern Ardente et al. (2019).

So definiert die UN (1997, S. 51) natürliche Ressourcen als „*natural assets (raw materials) occurring in nature that can be used for economic production or consumption*“, also als von der Natur bereitgestellte Güter, die für die wirtschaftliche Produktion und die anschließende Nutzung verwendet werden können. Die Europäische Kommission (2003) bezeichnet in ihrer Strategie zur nachhaltigen Nutzung von Ressourcen aus dem Jahr 2003 ebendiese als Rohstoffe, die für die meisten menschlichen Aktivitäten erforderlich sind, als auch die Umweltmedien Luft, Wasser und Boden, die das Leben auf der Erde ermöglichen. Hier wird also zusätzlich noch der Begriff *Rohstoff* eingebracht. Dabei handelt es sich grundsätzlich um Ressourcen, die auch tatsächlich gefördert und einem Produktionsprozess zugeführt werden (Reller et al. 2013, S. 47). Neben anderen ergänzt beispielsweise Armstrong (2015, S. 131) in seiner Definition von natürlichen Ressourcen diese um die Energieressourcen. Hier kommt allerdings erschwerend hinzu, dass insbesondere im Kontext der Dissipation zwischen stofflichen gebundenen Energieressourcen (u.a. Erdöl, Erdgas, Kohle, Uran) und Energieformen wie Solar- und Windenergie, die lediglich physikalisch umgewandelt werden, unterschieden werden

muss. Und letztlich kann noch zwischen abiotischen und biotischen, und damit zwischen nicht-regenerativen und regenerativen Ressourcen unterschieden werden (Reller et al. 2013, S. 46).

Des Weiteren wird, auch in dieser Arbeit, mehrfach von sogenannten Funktionsmetallen oder Funktionsmaterialien gesprochen. Bis auf ein paar Ausnahmen (z.B. die essentiellen Elemente Kalium und Phosphor in Düngemitteln) sind es nämlich nicht die Metalle per se, die wir benötigen, sondern ihnen ganz spezifische, immanente physikochemische Eigenschaften, die wir uns zunutze machen – wir funktionalisieren sie. Aus diesem Grund ist es häufig möglich Rohstoffe zu substituieren. Basierte unsere Kommunikationsinfrastruktur bisher größtenteils auf Kupferkabeln, werden diese heute nach und nach durch Glasfaserkabel ersetzt. Diese bestehen aus dem unabdingbaren Element Silizium und zu geringen Mengen aus weiteren Metallen wie Germanium. Die Funktion der Telekommunikation bleibt hier also erhalten, obwohl die zugrundeliegenden Rohstoffe getauscht werden (BGR et al. 2016, S. 93). Die Anzahl der Beispiele ist hier fast beliebig erweiterbar. Doch wiederum andere Stoffe sind aufgrund ihrer Funktion in bestimmten Technologien nicht substituierbar. Ein Beispiel: Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird noch genauer auf das Edelgas Helium eingegangen (Kapitel 5). Dieses weist mit knapp  $-269^{\circ}\text{C}$  die niedrigste Siedetemperatur aller Elemente auf. Bestimmte Technologien wie etwa Supraleiter funktionieren nur bei solch niedrigen Temperaturen. Die physikalische Eigenschaft macht den Stoff somit für gewisse Funktionen unersetzbar. Der gleiche Stoff wird jedoch aufgrund anderer Eigenschaften auch bei weiteren Technologien und Produkten eingesetzt. Das unreaktive Gas (chemische Eigenschaft) wird so etwa auch als Reingas in der Halbleiterproduktion genutzt und ist auch hier nur schwer zu ersetzen. Ein und derselbe Stoff tritt aufgrund dieser physikalisch als auch chemisch bedingten Multifunktionalität in verschiedenen Produkten und Prozessen also miteinander in Wettbewerb.

Stoffspezifischen Eigenschaften werden von einem Akteur bestimmte Funktionen zugewiesen, sie werden also funktionalisiert. Diese Funktionen dienen einer Tätigkeit, einer Leistung, die sich der Akteur zunutze macht (Gantner 2016, S. 41).

Somit können als Synthese zum Thema Ressourcen folgende Punkte festgehalten werden:

- Natürliche Ressourcen haben chemische und physikalische Eigenschaften, die ihnen einen intrinsischen Wert geben oder sich funktionalisieren lassen (aus anthropogener Sicht)
- Dieser Wert muss nicht ökonomischer Natur sein, sondern kann bspw. auch kultureller Natur sein
- Natürliche Ressourcen können biotisch oder abiotisch sein
- Abiotische Ressourcen (Metalle, Minerale wie Sand und Kies, fossile Brennstoffe) sind nicht regenerierbar und somit endlich
- Infolge der Zufuhr von Ressourcen in einen anthropogenen Produktionsprozess wird von Rohstoffen gesprochen

Auf Grundlage dieser Übersicht soll für die weitere Arbeit folgende Definition des Ressourcenbegriffs gelten. Dabei handelt es sich keinesfalls um eine vollständige, sondern eine die für diese Arbeit relevanten Aspekte abdeckende Definition:

*Natürliche Ressourcen sind erschöpfliche biotische und abiotische Bestandteile der Natur und stellen für den Menschen einen Wert oder eine Funktion dar. Zu diesem Zwecke werden Ressourcen gefördert und in Form von Rohstoffen verarbeitet und konsumiert.*

## 3.2 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, sei es beispielsweise das schon angesprochene Phosphor in Form von Düngemitteln, das Edelgas Helium, das ist in dieser Arbeit noch genauer betrachtet wird, 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 natürlich auch von stofflicher Dissipation gesprochen werden. Aus einer umwelt- und ressourcenspezifischen Sicht existieren hierzu bisher allerdings nur wenige Definitionsansätze. Die folgende Literaturanalyse hilft dabei, die unterschiedlichen Facetten und Vorstellungen von Dissipation zu verdeutlichen.

So definieren Zimmermann und Gößling-Reisemann (2013) wie folgt:

*„Dissipative Verluste sind Materialverluste in die Umwelt, andere Materialflüsse oder dauerhafte Abfalllager, die zu solchen Konzentrationen im Empfangsmedium führen, sodass eine Rückgewinnung dieser Materialien aus technischen oder ökonomischen Gründen nicht durchführbar ist.“* (Zimmermann und Gößling-Reisemann 2013, S. 775, übersetzt)

Entscheidend sind hier also die drei Empfangsmedien, die einen unterschiedlichen Einfluss auf die ökologischen Auswirkungen von Dissipation haben. Am problematischsten



sind Zimmermann und Gößling-Reisemann zufolge die direkten Stoffströme in die Umwelt, da hier die höchste Mobilisierung und die stärkste Reduzierung der Stoffkonzentration stattfindet. Zudem ist hier die Möglichkeit vorhanden, dass sich die Stoffe chemisch und physikalisch transformieren und somit neue Stoffeigenschaften ausbilden.

Dissipation in andere anthropogene Materialströme, etwa durch unzureichende Abtrennung beim Recyclingvorgang, ist demzufolge als ökologisch verträglicher einzustufen. Hier besteht die Problematik primär im potenziellen Downcycling des neuen Trägermaterials, sodass durch diese Kontamination mit unerwünschten Metallen die gewünschten Eigenschaften verändert werden.

Als am wenigsten problematisch schätzen Zimmermann und Gößling-Reisemann (2013, S. 776) die dissipativen Einträge in anthropogene Stofflager bzw. Deponien ein. Bei korrekter Bauweise wird ein Übertritt in die Umwelt unterbunden und somit ein Stofflager im Sinne einer Urban Mine geschaffen, die gegebenenfalls unter entsprechenden technologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen einer Wiedergewinnung denkbar macht.

Diesem Gedanken widerspricht Ayres (1994, S. 26 & 31) – einer der ersten Wissenschaftlicher, der sich mit stofflicher Dissipation auseinandersetzte – indem er den zeitlichen Aspekt hervorhebt und betont, dass bei entsprechend langer Zeit ein Stoffaustritt aus einem anthropogenen Lager in die Umwelt immer wahrscheinlicher wird. Er argumentiert hierbei aus einer thermodynamischen Perspektive, in welcher ein Stoffverlust, und damit eine Zunahme der Entropie, nur mit einer ununterbrochenen Zufuhr von Energie möglich sei (Ayres 1994, S. 26 & 31).

Lifset et al. (2012, S.138) beschreiben Dissipation als absichtlichen oder unbeabsichtigten Verlust von Material und insbesondere Metallen, was zu so geringen Konzentrationen im Empfangsmedium führt, dass eine Verwertung technisch oder wirtschaftlich nicht durchführbar ist. Absichtliche Dissipation kann etwa die Verbreitung von metallbasierten Pestiziden sein, bei der die Funktion auf der Feinverteilung des Materials beruht.

Kral et al. (2013) sowie Pongrácz (2014) beschäftigten sich mit der *Clean Cycle* Strategie. Prämisse ist hierbei, dass die in den letzten Jahren insbesondere in der EU verordneten

erhöhten Recyclingquoten vieler Metalle aufgrund von Dissipation auch negative Auswirkungen mit sich bringen, da Recyclingkreisläufe sowohl nützliche als auch gefährliche Stoffe mit sich führen können (Kral et al. 2013, S. 820). Zum einen können diese in den Produkten fein konzentrierten Stoffe das resultierende Rezyklat verunreinigen. Das wird, wie bereits angesprochen, als Downcycling bezeichnet. Bekannte Beispiele sind die Verunreinigung von Stahl durch Kupfer oder die Kontamination in der Verpackungsindustrie durch Mineralölrückstände (Kappen et al. 2012, S. 18). Und zum anderen können Gefahrstoffe das Kreislaufsystem verlassen und so in die Umwelt gelangen. Daher plädieren Kral et al. für ein Optimum statt Maximum an Rezyklat (Kral et al. 2013, S. 822).

Pongrácz (2014) bezieht sich in einigen Bereichen auf die Arbeit von Kral et al. und beschäftigt sich insbesondere mit dissipativen Verlusten von kritischen Rohstoffen, die in sehr geringen Konzentrationen in zukunftssträchtigen Technologien wie Photovoltaik-Anlagen, Windkraftanlagen und Akkumulatoren verwendet werden. Dabei setzt sich ihr zufolge die Kritikalität der Rohstoffe aus zwei Hauptaspekten zusammen. Zum einen die Tatsache, dass es sich um Rohstoffe handelt, die in nur relativ geringen Mengen gefördert und auch in nur relativ geringen Konzentrationen innerhalb eines Produktes eingesetzt werden. Und zum anderen werden viele dieser Rohstoffe eben dissipativ genutzt (Pongrácz 2014, S. 3), was sich auch in den berechneten Werten von (Zimmermann und Gößling-Reisemann 2013) widerspiegelt. So liegt die Dissipationsrate der meisten kritischen Metalle bei über 50% bezogen auf die Primärförderung, bei vielen sogar über 90%. Solche Abschätzungen und Berechnungen dissipativer Verluste, meist auf der Grundlage von Materialflussanalysen (MFA), sind rar, wurden aber in jüngster Vergangenheit zunehmend vorgenommen (Eckelman und Graedel 2007; Mao et al. 2009; Lifset et al. 2012; Thorenz und Reller 2011; Ciacci et al. 2015; Licht et al. 2015).

So beschäftigen sich etwa auch Licht et al. (2015) in ihren globalen Materialflussanalysen mit den für Zukunftstechnologien essenziellen Metallen Gallium, Germanium und Indium. Auch hier werden die hohen, dissipativ verlorenen Mengen betont, was zu einer kritischen Situation in der künftigen Bedarfsdeckung führen könnte.

Die hier genannten Arbeiten der letzten 25 Jahre zeigen das Spektrum von stofflicher Dissipation auf. Jedoch behandeln einige dieser Arbeiten das Thema lediglich, ohne dabei genau zu definieren, was eigentlich unter Dissipation jeweils verstanden wird.

Tabelle 1 liefert einen chronologischen Überblick über Arbeiten die explizit einen Beitrag zur Definition von Ressourcendissipation geleistet haben und beruht dabei zu Teilen auf Vorarbeiten von Beylot et al. (2020b). Dabei zeigen sich diverse inhaltliche und definitorische Gemeinsamkeiten. So sprechen unter anderem Stewart und Weidema (2005), Kapur und Graedel (2006), Ciacci et al. (2015) und Zimmermann und Gößling-Reisemann (2013) davon, dass Dissipation ein potenzielles Recycling nahezu oder gänzlich unmöglich macht. Ayres (1994), Kapur und Graedel (2006), Zimmermann und Gößling-Reisemann (2013), Ciacci et al. (2015) als auch Beylot et al. (2020b) behandeln in ihren Definitionen auch die Frage, wohin Materialien dissipieren. Größtenteils wird hier die Umwelt oder Biosphäre als ultimatives Empfangsmedium behandelt. Nur selten werden weitere Kompartimente betrachtet, wie etwa die Dissipation in andere Materialströme oder in Deponien bei Zimmermann und Gößling-Reisemann (2013) und die technosphärische Betrachtung mit der Gefahr von Downcycling bei Kral et al. (2013).

Mit Blick auf die vorhandenen Definitionen von Dissipation wird zum einen ihr dynamischer Charakter ersichtlich. So schreiben etwa Zimmermann und Gößling-Reisemann (2013) als auch Beylot et al. (2020b) von technischen und ökonomischen Hürden, die eine Rückgewinnung dissipierter Materialien undurchführbar machen. Beide sind offenkundig dynamischer Natur: Technik unterliegt stetigem Wandel und Fortschritt, neue Techniken können die Grenze zwischen wiederverwertbar und dissipiert durchaus zugunsten der Wiederverwertbarkeit verschieben. Gleiches gilt für ökonomische Gründe – volatile Rohstoffpreise können darüber entscheiden, ob ein Stoff dissipiert oder einem nachhaltigen Kreislaufstrom zugeführt wird.

Und nicht zuletzt unterscheiden sich die gängigen Betrachtungen durch die Verwendung der Begriffe *dissipative Verluste (losses)* und *dissipative (Material-) Ströme (flows)*. Dabei können diese bei genauerer Betrachtung durchaus unterschiedliche Bedeutungen aufweisen. Auch Beylot et al. (2020b) liefert hierzu eine Darstellung. So verdeutlicht die Verwendung des negativ konnotierten Begriffs *Verlust* eine ökonomisch orientierte Sichtweise. Materialien gehen aus der technosphärischen Prozesskette verloren und entziehen sich einer weiteren Nutzung. *Dissipative*

*Ströme/Flüsse* weisen dagegen aufgrund ihrer neutralen Semantik einen deskriptiven Charakter auf, wie sie beispielsweise auch in Ökobilanzierungen als quantifizierbare Pfade innerhalb eines Produktsystems verwendet werden. Zudem können Flüsse aber auch eine qualitative Komponente aufweisen. So können etwa Funktionseinbußen durch dissipative Verunreinigungen qualitativ beschrieben werden.

**Tabelle 1: Definitionen von ressourcenspezifischer Dissipation in der Literatur**

<b>Autoren</b>	<b>Inhalt / Definition</b>
Ayres 1994	<i>„There are only two possible long-run fates for waste materials: recycling and reuse or dissipative loss. (...) The more materials are recycled, the less will be dissipated into the environment, and vice versa. Dissipative losses must be made up by replacement from virgin sources. (...) a good measure of unsustainability is dissipative use.“</i> (Ayres 1994, S. 31)
Stewart und Weidema 2005	<i>“(...) the loss of resources from the technosphere in such a way that it is not possible to recycle them back into the technosphere.”</i> (Stewart und Weidema 2005, S. 241)
Kapur und Graedel 2006	<i>„Dissipated stock is the amount of a resource that has been used in the technosphere but has then been returned to nature in a form that makes recovery difficult or impossible.“</i> (Kapur und Graedel 2006, S. 3137)
Zimmermann und Gößling-Reisemann 2013	<i>“Dissipative losses are losses of material into the environment, other material flows, or permanent waste storage that result in concentrations in the receiving medium such that a recovery of these materials is technically or economically unfeasible.”</i> (Zimmermann und Gößling-Reisemann 2013, S. 775)
Kral et al. 2013	<i>“(...) hazardous substances have to be eliminated from material cycles. Otherwise recycling strategies run the risk to a) support a qualitative down-cycling of materials (...) and b) raise the potential for harmful material losses throughout the material life cycle.”</i> (Kral et al. 2013, S. 820)

- „Dissipative material losses cover point and diffuse emissions with no option for recovery.” (Kral et al. 2013, S. 821)*
- Ciacci et al. 2015 *“(…) dissipative losses are the flows of materials from the anthroposphere (i.e., human systems) to the biosphere (i.e., environment) in a manner that makes their future recovery extremely difficult, if not impossible. These flows may be desirable or undesirable, intentional or unintentional, and can occur during any stage of a material’s life cycle (e.g., tailings and slag from the production stage or outputs to air, water, and soil during waste treatment). (Ciacci et al. 2015, A)*
- Ciacci et al. 2016 *“Employing metals in dissipative uses, in which scattering and dispersion in the environment occurs with virtually no chance for recovery (e.g., fertilizers, metal powder used in pyrotechnics), or in ways for which no viable recycling options currently exist (e.g., the deoxidizing aluminum used in steelmaking) reduces the quantity of a metal that could potentially be recycled.” (Ciacci et al. 2016, S. 11394)*
- Sonderegger et al. 2017 *“Natural resources and (raw) materials are lost if the required qualities for their functionality are lost (e.g., through dissipation).” (Sonderegger et al. 2017, S. 1924)*
- Beylot et al. 2020b *“Dissipative flows of abiotic resources are flows to sinks or stocks that are not accessible to future users due to different constraints. These constraints prevent humans to make use of the function(s) that the resources could have in the technosphere. The distinction between dissipative and non-dissipative flows of resources may depend on technological and economic factors, which can change over time.” (Beylot et al. 2020b, S. 6)*
-

### 3.3 Abgeleitete Dissipationsursachen

Zusammenfassend können anhand dieser Dissipationsbetrachtungen also 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
- Ineffiziente Recycling-/Sammelsysteme

Große Verluste können bereits durch eine ineffiziente Rohstoffförderung und -verarbeitung auftreten. Helbig (2019) hat in seiner Arbeit Materialflussanalysen auf Literaturbasis erstellt und dabei einen indikatorbasierten Einbezug von Dissipation vorgenommen. Dabei setzt er die in den Materialflussanalysen identifizierten Dissipationsströme in Relation zur Fördermenge (*Dissipation-to-Extraction Ratio*) sowie zur erstmalig für die Nutzung bereitgestellten Menge eines bestimmten Rohstoffs (*Dissipation-to-Consumption Ratio*). Auf dieser Grundlage haben sich insbesondere für Koppelprodukte wie Gallium, Germanium, Selen und Tellur teils sehr ineffiziente Verarbeitungsprozesse gezeigt, bei denen die Dissipationsquote bei über 95 % liegt (Helbig 2019, S. 136).

Wie bereits in Kapitel 2.3 aufgezeigt wurde, beruhen viele aktuelle Technologieprodukte auf den Funktionen diverser strategischer Metalle, die häufig in äußerst geringen Mengen eingesetzt werden. Hierbei wird auch von sogenannten Würzmetallen gesprochen (Reller et al. 2009; Reller et al. 2013, S. 116). Die geringe Stoffkonzentration sowie die zunehmende Stoffkomplexität in Form von einem immer komplizierter werdenden Materialmix innerhalb eines Produktes bringt jedoch auch große Herausforderungen für ein geeignetes Recycling mit sich (Reuter 2013, S. 53). Diese können zum einen technologischen Ursprungs sein, wenn zum jeweiligen Zeitpunkt keine ausreichend effiziente Technologie für ein Recycling zur Verfügung steht. Zum anderen können die Hürden auch ökonomischer Natur sein. Meist sind die Stoffkonzentrationen niedriger als im jeweiligen Erzvorkommen, was die Primärförderung somit meist kostengünstiger macht.

Beide Aspekte hängen offensichtlich miteinander zusammen. Bei höheren Stoffkonzentrationen wäre die Recyclinganreize größer und die technologischen Hürden womöglich kleiner.

Ein weiterer in der Forschungsliteratur häufig genannter Grund für stoffliche Dissipation ist die dissipative Anwendung per se. Diese kann beabsichtigt oder unbeabsichtigt, gewollt und ungewollt sein. Beispiele sind Düngemittel und Opferanoden zum Rostschutz (Ciacci et al. 2015, A), bei welchen die Materialverteilung Teil der Funktion ist. Beispiele einer ungewollten Dissipationsanwendung finden sich viele und werden im Laufe dieser Arbeit auch noch genauer behandelt, insbesondere in Form der ausgearbeiteten Fallbeispiele in Kapitel 4 und 5.

Und nicht zuletzt müssen die nötigen Infrastrukturen für ein wirksames Sammelsystem aufgebaut werden, um all die Produktgruppen mit ihrer Materialvielfalt unserer heutigen Konsumgesellschaft zurückzuerlangen und einem potenziellen Recycling zuzuführen. Das ist jedoch für viele Stoff- und Produktgruppen bisher nicht der Fall (Graedel 2011, S. 22; Foth et al. 2012, S. 77).

Dieser Einblick in die bestehende Literatur und die bestehenden Definitionen zu Dissipation soll für den weiteren Verlauf der Arbeit an dieser Stelle genügen. Zum Ende der Arbeit (Kapitel 6) werden die neu gewonnenen Erkenntnisse in diese Synthese eingearbeitet und in Form einer eigenen Neudefinition formuliert.

### ***Exkurs***

#### **Positive Dissipation**

*Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt eindeutig auf den neugestalteten, anthropogen verursachten Materialströmen, deren Dissipation potenziell risikobehaftete Auswirkungen für die natürliche Umwelt mit sich bringt. Doch Dissipation hat durchaus auch positive Effekte und ist gar lebensnotwendig.*

*So benötigt laut Bardi (2014, S. 16) nahezu jedes Lebewesen für seine Körperstruktur und seinen*

Stoffwechsel mindestens 16 chemische Elemente in äußerst niedrigen, spezifischen Konzentrationen. Die drei lebensnotwendigen Elemente Sauerstoff, Kohlenstoff und Wasserstoff stammen direkt aus der Atmosphäre. Alle anderen müssen von Lebewesen im Form von Mineralien aus dem Boden gewonnen werden. Dieser Vorgang erfolgt primär über Pflanzen, die gelöste Stoffe wie Stickstoff, Schwefel oder Kalium aus der obersten Erdschicht (Humus) gewinnen. Tiere holen sich die Mineralien wiederum aus den Pflanzen und geben die Stoffe in unterschiedlicher Form feinverteilt an die Umwelt zurück, wodurch sich der Nährstoffkreislauf schließt (Bardi 2014, S. 63).

Der vielleicht bekannteste natürliche Kreislauf ist der des Kohlenstoffs. Dabei kommt der Kohlenstoff in unterschiedlichen Formen in allen in Kapitel 2.3 vorgestellten Erdsphären vor. Jede dieser Sphären dient als Zwischenspeicher im globalen Kreislauf. In der Lithosphäre, dem mit Abstand größten Speicher, liegt der Kohlenstoff beispielsweise als Karbonatgestein (Kalk) oder auch als Erdöl vor. Vulkanausbrüche sind eine Möglichkeit, den Kohlenstoff feinverteilt in Form von  $\text{CO}_2$  in die Atmosphäre zu transportieren. Der Photosynthese-Prozess von Pflanzen verlagert das  $\text{CO}_2$  wiederum in die Biosphäre, wo er nach dem Absterben der Pflanze über geologische Zeiträume wieder in die Lithosphäre transportiert wird (O'Hara 2014, S. 55f.).

Wie der Mensch diesen Kreislauf aus dem Gleichgewicht gebracht hat ist bekannt. Durch die Verbrennung fossilen Kohlenstoffs, die massenhafte Rodung von Wäldern und diverse weitere Aktivitäten wurden seit der Industrialisierung die Kohlenstoffemissionen in die Atmosphäre erhöht und die Senken reduziert. Die klimatisch weitreichenden Auswirkungen sind als anthropogen verursachter Klimawandel bekannt (UNFCCC 2015; IPCC 2018).

Auch für einige Metalle gilt, dass sie für bestimmte biologische Prozesse von essenzieller Bedeutung sind. Hierbei wird von Spurenelementen gesprochen (z.B. Phosphor und Calcium für die Knochen, Eisen für den Sauerstofftransport im Blut, Kupfer für die Zellatmung, etc.). Auch hier entscheidet aber die jeweilige Konzentration über Nutzen oder Schaden. Über Jahrtausende hat sich ein Gleichgewicht eingestellt, indem sich Organismen und ihre Ökosysteme an die äußeren Bedingungen angepasst haben (Ebeling et al. 2020).

Diesen stofflichen Balanceakt hat der Mensch im Laufe seiner zivilisatorischen Geschichte aus dem Gleichgewicht gebracht (Bardi 2014, S. 64–65). So hat er beispielsweise begonnen, den Kreislauf zu durchbrechen, indem er Rohstoffe direkt aus der Lithosphäre gewonnen hat, wie das Beispiel der fossilen Brennstoffe zeigt.

Diese natürlichen Stoffkreisläufe zeigen deutlich, dass Dissipation durchaus auch seine positive Seite hat und die gering konzentrierte Stoffverteilung für das Leben auf der Erde von essenzieller Bedeutung ist.



### 3.4 Auswahl der Fallbeispiele

In Anbetracht der nun aufgezeigten, teils extrem unterschiedlichen Formen und Typen von Dissipation, fällt es offenkundig schwer, 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 all diesen Gründen bilden zwei sehr unterschiedliche Fallbeispiele die Säulen dieser Arbeit, da kein einzelner Stoff alle diese Eigenschaften verbinden kann. Diese zwei Elemente unterscheiden sich in ihrer Häufigkeit auf der Erde, in ihrem typischen Aggregatzustand und ihrer charakteristischen physikochemischen Wirkformen und demzufolge natürlich auch hinsichtlich ihrer Stoffkette, von der Förderung über die Verarbeitung, Nutzung bis hin zu den jeweiligen Nachnutzungsformen und den ökologischen oder stofflichen Auswirkungen eines womöglich unzureichenden Managements am Ende ihres Lebenszyklus. Die Interaktionen und eingeschlagenen Stoffpfade zwischen den jeweiligen Sphären könnten unterschiedlicher kaum sein.

Interessanterweise, und damit dem erzählerischen Leitfaden dieser Arbeit zuträglich, liegen die Hauptanwendungsfelder beider Stoffe im Medizinwesen; um genau zu sein in der Diagnosemethode der Magnetresonanztomographie (MRT).

Bei Fallbeispiel 1 handelt es sich um Gadolinium, einem Element aus der Gruppe der Seltenen Erden, das in der MRT als Kontrastmittel dient (Kapitel 4).

Fallbeispiel 2 ist Helium, ein Gas, das auf der Erde relativ selten ist und immer elementar vorkommt. Es ist insbesondere im High-Tech-Bereich von großer Bedeutung. So wird dieses Gas etwa in MRTs zur Kühlung der starken Magneten im Inneren der Tomographen genutzt (Kapitel 5).



## 4 Fallbeispiel Gadolinium

Dieser Arbeitsschwerpunkt liefert einen umfassenden Blick auf Gadolinium, das von essenzieller Bedeutung für die Kernspintomographie ist. Das Element aus der Gruppe der Seltenen Erden ist wichtigster Bestandteil von Kontrastmitteln, die häufig zur besseren visuellen Darstellung genutzt werden.

### 4.1 Magnetresonanztomographie

Hinführend zu einer ausgiebigen Betrachtung ressourcenstrategischer Fragestellungen wird im Folgenden der Vollständigkeit halber auch auf die Funktionsweise von Magnetresonanztomographen (MRT), auch Kernspintomographen genannt, eingegangen. Dabei werden die physikalischen Grundlagen möglichst einfach gehalten und erheben somit nicht den Anspruch auf absolute physikalische Vollständigkeit. Ein Verständnis der Funktionsweise ist empfehlenswert, jedoch keine Voraussetzung für den weiteren Inhalt dieser Arbeit. Im Anschluss an die technische Funktionsweise wird auf die Bedeutung von Gadolinium als Kontrastmittel eingegangen.

Grundlage für die medizinische Nutzung der MRT-Technologie war die Entdeckung des namensgebenden Kernspineffekts, im Englischen „Nuclear Magnetic Resonance“ genannt. Aufgrund des negativ konnotierten Begriffs „Nuklear“ setzte sich in den 70er Jahren letztlich die Bezeichnung „Magnetresonanz“ durch (Loewenhardt 2001, S. 108).

Unser gängiges Atommodell beschreibt den Aufbau eines Atoms aus einem Kern und einer oder mehreren Schalen (sog. Schalenmodell). Der Kern ist mit Protonen (positiv) sowie Neutronen (neutral) und die Schale mit Elektronen (negativ) besetzt. Atomkerne mit einer ungeraden Anzahl an Protonen oder Neutronen weisen einen Eigendrehimpuls, den sogenannten Kernspin, auf. Bei paarigen Protonen und Neutronen heben sich die Spins gegenseitig auf (Loewenhardt 2001, S. 116). Bewegte Ladungen, in diesem Fall also die Rotation des positiv geladenen Protons, verursachen, wie auch durch die Induktion bekannt ist, ein magnetisches Dipolmoment. Es entsteht also ein magnetisches Feld und jeder Kern repräsentiert, vom Standpunkt der klassischen Physik aus gesehen, einen kleinen Stabmagneten.

In der klinischen Anwendung werden zumeist Wasserstoffkerne (H) genutzt. Der Aufbau des Wasserstoffs ist sehr einfach. Der Kern besteht aus lediglich einem Proton. Zudem

ist H das häufigste Isotop im menschlichen Körper, der zu 65% aus Wasser besteht (Schmidt et al. 2010, S. 666). Die Rotationsachsen der Kerne (*kleine Stabmagneten*) nehmen eine zufällige Orientierung im Raum ein. Werden sie nun in ein äußeres magnetisches Feld gebracht richten sich die Achsen der Kerne an den Feldlinien des angelegten Magnetfelds aus. Allerdings richten sich einige parallel und andere antiparallel dazu aus. Der Unterschied liegt in den Energieniveaus. Bei einem äußeren Magnetfeld von 1 Tesla beträgt das Verhältnis 1.000.007 : 1.000.000. Aufgrund dieser Ausrichtung heben sich die Spins einer Million Kerne auf, sodass lediglich 7 Kerne für die folgende Resonanz zur Verfügung stehen. Dass dennoch eine Magnetisierung messbar ist liegt an der großen Menge Wasser im menschlichen Körper (Loewenhardt 2001, S. 116).

Nun ist die Ausgangssituation erreicht, um eine messbare Resonanz der Kerne zu erzeugen. Durch einen kurzen Hochfrequenz(HF)-Impuls senkrecht zum Magnetfeld werden die Kernspins aus dem Gleichgewicht gebracht. Der Impuls wird durch ein zweites Magnetfeld erzeugt, das rechtwinklig zum äußeren Magnetfeld anliegt. Die Frequenz muss genau der Kernspinfrequenz der kreiselnden Protonen entsprechen, was zur Resonanz führt.

Entscheidend für die Bildgebung ist nun die sogenannte Relaxationszeit, die zeitliche Dauer der Rückkehr des Systems zum Gleichgewicht. Grundsätzlich wird zwischen T1 und T2 unterschieden, diese Informationen sind auch auf allen Befundbildern zu sehen. Bei T1 (Spin-Gitter-Relaxation) emittieren die Kerne ihre gespeicherte Energie an die Umgebung (Gitter). Diese Abklingzeit hängt von der chemischen und molekularen Umgebung im Gewebe ab, in der sich die Kerne befinden. Die so entstehenden Signalstärken werden in verschiedenen Helligkeiten im Bild dargestellt. Die Relaxationszeit T1 liegt bei Flüssigkeiten im Bereich von Sekunden und bei Weichteilen im Bereich von Zehntelsekunden.

Als T2-Relaxation wird der Übergang von der synchronen zur asynchronen Kreiselbewegung nach dem Ausschalten des HF-Impulses bezeichnet. Die Energieabgabe erfolgt nicht in das umliegende Gewebe, sondern zwischen den Kernspins untereinander (Spin-Spin-Relaxation). Gewebe, das den synchronen Zustand relativ lange beibehalten kann wird im Bild hell dargestellt. Jede Relaxation bedeutet eine Energieänderung und damit die Emission einer Radiofrequenz, die durch elektronische Empfänger aufgefangen und

am Rechner verarbeitet werden kann (Loewenhardt 2001, S. 118; Weishaupt et al. 2014, S. 7–8).

Um ein kontrastreiches Bild zu erhalten wird eine bestimmte Gewebeschicht mehrmals angeregt und T1 sowie T2 unterschiedlich gewichtet. Entscheidend ist zudem die Zeit zwischen den Anregungen, in der sich die Protonen wieder im Magnetfeld ausrichten können. Bei langer Pause (mehrere Sekunden) sind alle Gewebearten in der Lage, die Ausgangssituation wiederherzustellen. Damit senden alle Gewebe die gleiche Frequenz aus, das Bild erscheint hell und ohne Kontrast. Die Pause muss also so kurz gewählt werden, dass nur bestimmte Gewebearten es in dieser Zeit schaffen, vollkommen zu relaxieren. Damit wird der Kontrast zwischen den Gewebearten maximiert. Dieses Vorgehen wird bei T1 gewichteten Aufnahmen gewählt um feste, fetthaltige Gewebearten wie das Gehirn dazustellen. Ebenso ist die Zeitspanne zwischen Aussenden des Hochfrequenzimpulses und der Messung des zugehörigen Signals von Bedeutung. Bei relativ langen Zeiten (>60ms) sind Bereiche mit kurzer T2 (Fettgewebe) schon relaxiert, senden kaum noch Signal aus und erscheinen daher dunkel. Stoffe, die nur langsam relaxieren senden dagegen noch ein Signal aus. Dies sind vor allem Flüssigkeiten und Fettgewebe, die somit bei langer Zeitspanne heller erscheinen als Feststoffe (Weishaupt et al. 2014, S. 16).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mehrere Magnetfelder zur Bildgebung vonnöten sind. Das charakteristische laute Klopfergeräusch wird durch den starken Stromfluss durch sogenannte Gradientenspulen erzeugt. Die Spulen werden von einer Wechselspannung gespeist und in kürzester Zeit wechselweise an- und abgeschaltet, innerhalb von Millisekunden fließen mehrere hundert Ampere und infolgedessen kommt es zu starken magnetischen Kräften. Die Kunststoffhülle des Tomographen wirkt durch die erzeugten Schwingungen wie ein Lautsprecher (Attenberger und Nitz 2011, S. 6). Die Gradientenspulen dienen der Ortskodierung der ausgesendeten Resonanzfrequenzen. Deren genaue Funktionsweise geht für diese Arbeit zu weit, ist aber beispielsweise bei Dössel (2016, S. 308–310) nachzulesen. Tabelle 2 fasst beiden Darstellungsvarianten von MRT Bildern zusammen.

**Tabelle 2: Übersicht über die Darstellungsarten von MRT-Befunden**

	Helle Darstellung	Dunkle Darstellung
T1-Gewichtung	Fettgewebe	Wasser
	Kontrastmittel	Knochen Bänder, Sehnen
T2-Gewichtung	Wasser	Knochen
	Fett (aber dunkler als bei T1)	Bänder, Sehnen

Nun bleibt die Frage welche Rolle das Seltenerd-Element Gadolinium hierbei spielt. In einigen Fällen reicht der Kontrast normaler MRT-Aufnahmen nicht aus, um eine aussagekräftige Diagnose stellen zu können. In diesen Fällen wird auf ein Kontrastmittel zurückgegriffen. Als Kontrast wird der Helligkeitsunterschied zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Bereich eines Bildes bezeichnet. Je größer dieser ist, desto besser können normalerweise Gewebearten voneinander unterschieden werden. Dieses Vorgehen gilt auch für andere bildgebende Diagnoseverfahren wie Computertomographie (CT) oder Sonografie (Ultraschall). Allerdings werden jeweils unterschiedliche Stoffe eingesetzt.

In der Magnetresonanztomographie wird aufgrund bestimmter chemisch-physikalischer Eigenschaften Gadolinium verwendet. Dieses reduziert die T1- und T2-Relaxationszeiten und verstärkt dadurch den Kontrast. Der Informationsgehalt der Aufnahmen wird also erhöht (Caravan et al. 1999, S. 2294).

Im folgenden Abschnitt wird aus einem ressourcenstrategischen Blickwinkel umfassend auf Gadolinium und die Gruppe der Seltenen Erden als Ganzes eingegangen.

## 4.2 Die Gruppe der Seltenen Erden und Gadolinium im Besonderen

Gadolinium ist sicher eines der unbekanntesten Elemente des Periodensystems. Deutlich größere Bekanntheit erlangte im letzten Jahrzehnt die Gruppe der Seltenen Erden als Ganzes – dieser gehört auch Gadolinium an. Vor allem im Kontext klimafreundlicher Energieerzeugung und Mobilität fand diese Elementgruppe großes Gehör. Viele neue Technologien kommen ohne diese Elemente kaum aus, so etwa Windkraftanlagen und Elektromotoren.

Als Seltenerdelemente (in dieser Arbeit mit *SEE* abgekürzt) werden die Elemente des Periodensystems von Lanthan bis Lutetium definiert. Häufig werden diese auch als Lanthanoide, als Lanthan-ähnliche, bezeichnet. Zusätzlich werden meist auch die beiden Elemente Scandium und Yttrium in die SEE miteinbezogen, da sie in der Natur immer zusammen mit den SEE auftreten und chemisch ähnliche Eigenschaften aufweisen (Lucas et al. 2015, S. 1).

### 4.2.1 Chemische und physikalische Eigenschaften

Die folgenden Unterkapitel behandeln die Elemente der Seltenen Erden insgesamt und das Element Gadolinium im Besonderen.

Aufgrund ihrer Entstehung und chemischen Ähnlichkeit kommen die Elemente immer zusammen vor, allerdings nicht gediegen, sondern vergesellschaftet in nur wenigen Mineralen. Die bedeutendsten abbauwürdigen Mineralerze sind Bastnäsit, Monazit sowie ionenadsorbierende Tone (IAC = Ion Adsorption Clays) (Lucas et al. 2015, S. 4). Auf die Bastnäsit- und Monazitvorkommen entfallen in etwa 90% der Förderung (70% B / 20% M), gerade für die Gadoliniumgewinnung sind jedoch auch die IAC von großer Bedeutung. In ihrer chemischen Verwandtschaft weisen die 17 Elemente jedoch so spezifische Unterschiede auf, dass sie nicht oder kaum untereinander substituierbar sind.

Der Name dieser Elementgruppe ist im Wortsinn irreführend, denn weder handelt es sich um erdähnliche, noch sind die Elemente per se selten. Der Name geht zurück auf den frühen chemischen Ausdruck *Erde* für Oxide, und diese wurden lange Zeit für selten gehalten (Nauckhoff 2010, S. 297). Reiners (2001, S. 111) zufolge könnte *selten* hier so

viel wie *verwunderlich*, *seltsam*, *außergewöhnlich* bedeuten, eine etymologische Begriffserweiterung aus dem 15. Jahrhundert.

Gadolinium ist mit einem Anteil von 6 ppm (parts per million) an der Erdkruste immerhin um den Faktor 1.000 häufiger als Gold und Platin. Ähnliches gilt für andere Elemente dieser Gruppe, Cer (68 ppm) ist beispielsweise in etwa so häufig wie Kupfer und Zink (Jahn und Daumann 2018, S. 151). Von einer geologischen Seltenheit kann also nicht gesprochen werden, auch wenn diese ppm-Angaben nur globale, durchschnittliche Schätzwerte sind und je nach Studie in geringem Maße variieren können (vgl. Allègre et al. 2001; Gao 2010; Binder 1999; Zepf 2013).

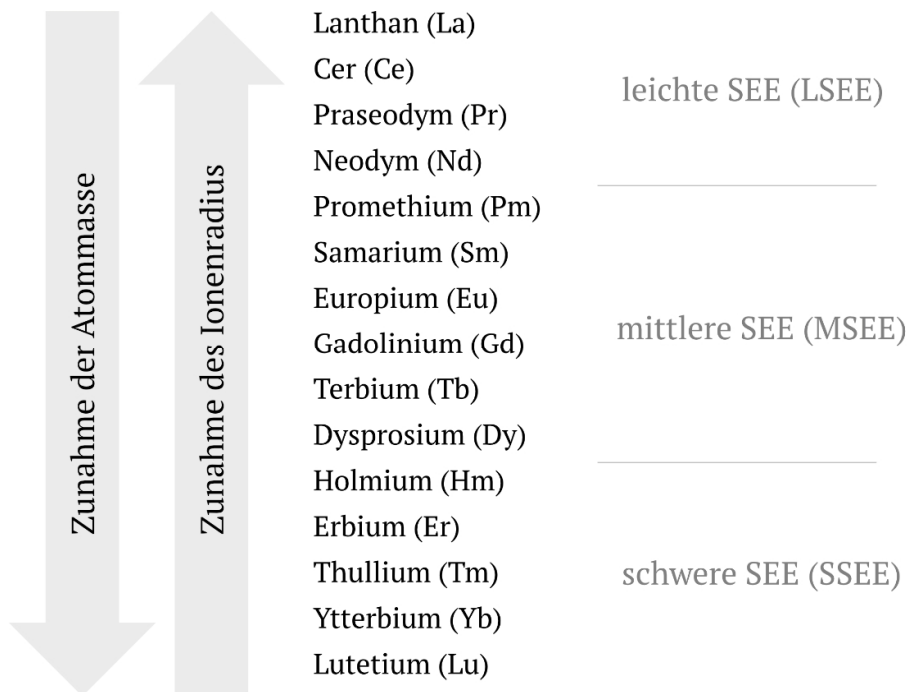
Zepf (2013, S. 14) zeigt in seiner Arbeit diese Unterschiede und deren ökonomische Bedeutung deutlich auf. So weisen beispielsweise Lanthan und Neodym oder Gadolinium und Dysprosium in der Erdkruste recht ähnliche ppm- Konzentrationen auf. In den jeweiligen Erzen unterscheiden sich die Konzentrationen jedoch teils stark, wie Tabelle 4 (S. 53) in Form der Erzzusammensetzungen ausgewählter bedeutender Minen zeigt. Die SEE sind in ihrer stabilen, und in dieser Verbindung üblicherweise auch gehandelten, oxidischen Form (SEO) angegeben.

Die Konzentration hat natürlich direkte Auswirkungen auf die Abbaumentabilität, bezogen auf das jeweilige Oxid. Der Grund für diese Unterschiede zwischen Erdkrusten- und Erzkonzentration liegt laut Zepf (2013, S. 14) an den Ionenradien der Elemente. Größere Radien erleichtern die geologische Einlagerung von Elementen in Gesteine und Erze. Elemente mit kleineren Ionenradien neigen also dazu, dispers in der gesamten Gesteinsschicht aufzutreten. In diesem Kontext findet sich auch häufig die Unterscheidung zwischen sogenannten *leichten SEE* und *schweren SEE* und teils auch den *mittleren SEE*. Die Elemente werden dabei auf Grundlage ihrer atomaren Masse und ihrer Elektronenkonfiguration in diese Gruppen unterteilt. Abbildung 10 zeigt die Liste der SEE mitsamt der dreiteiligen Gliederung. Allerdings erfolgt diese Einteilung nicht einheitlich, so teilt der USGS nur in LSEE und SSEE und ordnet Gadolinium den LSEE zu. Dagegen ordnet das von der Europäischen Kommission initiierte Kompetenznetzwerk *European Rare Earths Competency Network* (ERECON) alle Elemente ab Europium, und somit auch Gadolinium, den SSEE zu. Für unspezifische quantitative Aussagen kann dieser rein nomenklatorische Unterschied allerdings durchaus von Bedeutung sein. Üblicherweise stellen die schweren Seltenen Erden in Lagerstätten den weitaus kleineren Anteil der



gesamten SEE-Menge, meist unter 10%. Dies hängt direkt mit dem weiter oben erwähnten Ionenradius zusammen. Innerhalb einer Periode (d.h. im Periodensystem von links nach rechts) nehmen die Atommasse und der Ionenradius normalerweise zu. Das gilt jedoch nicht für die Lanthanoide. Während die Atommasse von links nach rechts in dieser Gruppe zunimmt, nimmt der Ionenradius gleichzeitig ab. Es wird von der Lanthanoidenkontraktion gesprochen (Mortimer und Müller 2019, S. 92? überprüfen; Tyler 2004, S. 233).

Beispielsweise können in den beiden großen Lagerstätten in den USA und in Australien kaum SSEE gefördert werden (BGR 2011, S.1). Um diesem Umstand und der unklaren Zuordnung von Gadolinium zu entsprechen, macht es Sinn eine dritte Kategorie, die mittleren SEE, einzuführen, wie es beispielsweise auch Kingsnorth (2012, S.6) handhabt. Dabei bezieht sich das *mittlere* sowohl auf die Anordnung und damit die molekulare Masse innerhalb der Lanthanoide, als auch auf den Mengenanteil in vielen Lagerstätten. Dieser liegt zwar meist deutlich unter einigen leichten, allerdings auch über mehreren schweren SEE.



**Abbildung 10: Ordnung der Seltenerdelemente**

Die erwähnte chemische Ähnlichkeit basiert auf der außergewöhnlichen Elektronenkonfiguration dieser Gruppe. Atome bestehen aus Protonen, Neutronen (Kern) sowie Elektronen (Hülle), wie in Kapitel 4.1 bereits erläutert wurde. Die Anzahl dieser Teilchen steigt mit zunehmender Ordnungszahl. Die Elektronenhülle besteht dabei aus mehreren Schalen, wobei sich die Elektronen in den meisten Fällen möglichst auf die äußeren Schalen verteilen. Je weiter außen diese Schalen liegen, desto größer ist der chemische Unterschied zwischen den Elementen. Die SEE fallen jedoch aus diesem Muster, hier füllen die Elektronen nicht die äußeren Schalen auf, sondern einer weiter innen liegende, die sogenannte 4f-Schale. Daher sind die chemischen Unterschiede zwischen diesen Elementen so gering (Mortimer und Müller 2019, S. 93; Zepf 2013, S. 17). Üblicherweise unterscheiden sich in chemischer Hinsicht also alle Elemente des Periodensystems aufgrund der stetig zunehmenden Ionenradien. Die La-Kontraktion führt jedoch dazu, dass einige der SEE anderen Elementen chemisch sehr ähnlich sind. Dies trifft insbesondere auf Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Thorium ( $\text{Th}^{4+}$ ) sowie Uran ( $\text{U}^{4+}$ ) zu. Ersteres dieser Drei wird im Fallbeispiel Gadolinium noch von Bedeutung sein.

Im Gegensatz zu den chemischen Eigenschaften zeigen sich die physikalischen Eigenschaften der SEE sehr divers. Das ist auch der Grund für das breite Anwendungsspektrum der Elementgruppe. Explizit erwähnt seien hier die magnetischen als auch licht-emittierenden Eigenschaften. Einen genaueren Einblick in die unterschiedlichen Verwendungen verschafft das nächste Kapitel.

#### **4.2.2 Verwendung**

Einen ersten Überblick über das breite Anwendungsspektrum gibt das Canadian Rare Earth Elements Network (NRCAN, S. 1). Dem Bericht zufolge entfielen im Jahr 2018 21% der eingesetzten Seltenen Erden auf Permanentmagnete, 20% auf Katalysatoren, 18% auf Legierungen, 15% auf Poliermittel, 7% auf Leuchtmittel, 5% auf die Keramikproduktion und 5% auf Sonstiges. Noch aggregierter lässt sich der SEE-Markt in zwei Segmente unterteilen. Der schon länger entwickelte und gereifte Markt, bestehend aus der Katalysator-, Glas- und Metallindustrie, wird hauptsächlich von leichten SEE wie Cer und Lanthan bedient. Das neuere und sich in starkem Wachstum befindliche Segment, bestehend aus der Magnet-, Keramik- und (Batterie-)Legierungsindustrie basiert auf weiteren leichten (Neodym, Praseodym) sowie einigen schweren SEE wie Dysprosium

und Ytterbium (Charalampides et al. 2015, S. 129). Während in den letzten Jahrzehnten also primär die chemischen Eigenschaften funktionalisiert wurden, nehmen heute tendenziell die magnetischen sowie elektronischen Eigenschaften an Bedeutung zu.

Gerade bei Gadolinium (Gd) ist die Verwendung allerdings sehr intransparent. Seit Jahren geht der United States Geological Survey (USGS) davon aus, dass ein großer Teil des Gd in die Magnetproduktion fließt. So schreibt etwa Goonan in einem USGS Report (2011, S. 3), dass dieser Sektor fast 70% des verwendeten Gd ausmacht. Mehrere weitere Studien beziehen sich auf diese Informationen (z.B. Charalampides et al. 2015; Cullbrand und Magnusson 2011; Du und Graedel 2011). Guyonnet et al. (2015, S. 7) widersprechen dieser Aussage und gehen nach einem Expertengespräch mit dem REE-Prozessor Solvay davon aus, dass überhaupt kein Gd in der Magnetproduktion verwendet wird.

Tabelle 3 zeigt die einzelnen SEE und ihre jeweils bedeutendsten Anwendungsfelder. Auffällig ist, dass keines der Elemente als Strukturmetall verwendet wird, sondern ausschließlich als Funktionsmetall. Häufig sind es also nur kleine Mengen, die aufgrund ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften zur Verwendung beitragen und häufig essenziell sind. In Kapitel 1.3.1 wurde hierzu bereits der Begriff Gewürzmetall eingeführt. Teilweise wird auch von sogenannten *process enablers* und *product enablers* gesprochen. Ersteres beschreibt die essenzielle Bedeutung für Produktionsprozesse, und Letzteres die Bedeutung für charakteristische Funktionen eines Produktes (Ebrahimi und Barbieri 2019, S. 3). Die Tabelle zeigt bereits den Anwendungsbereich Kontrastmittel des Seltenerdelements Gadolinium. Dieses wird als Fallbeispiel für das Hauptthema dieser Dissertation, der Dissipation, dienen (siehe Kapitel 4).

**Tabelle 3: Überblick über die bedeutendsten Anwendungen der einzelnen SEE (sortiert nach Ordnungszahl)**

SEE	Symbol	Anwendung
Scandium	Sc	Hochleistungslegierungen (AlSc), Keramik, Leuchtstoff
Yttrium	Y	Leuchtstoff, Supraleiter, Laser, Keramik
Lanthan	La	Mischmetall (Zündstein), Keramik, Politur, Glas, Batterien (NiMH), Katalysator (Erdöl-Cracking)
Cer	Ce	Mischmetall (Zündstein), Keramik, Politur, Glas, Katalysator (Erdöl-Cracking), UV-Filter
Praseodym	Pr	Magnete (Substitut für Nd), Glas
Neodym	Nd	Magnete, Glaspigment, UV-Filter
Promethium	Pm	Instabil, Halbwertszeit 2,6 Jahre, daher keine Anwendungen
Samarium	Sm	Magnete (SmCo)
Europium	Eu	Leuchtstoff (rote und blaue Farbe in Kathodenstrahlröhren und Leuchtstofflampen, je nach Oxidationsstufe)
<b>Gadolinium</b>	<b>Gd</b>	<b>MRT-Kontrastmittel</b> , Leuchtstoff, Phasenschieber (Radar)
Terbium	Tb	Terfenol (Lautsprecher), Leuchtstoff (grüne Farbe in Leuchtstofflampen)
Dysprosium	Dy	Magnete (Zugabe zu NdFeB), Laser
Holmium	Ho	Laser, Magnetfeldverstärker
Erbium	Er	Laser, Glasfaser-Signalverstärker
Thulium	Tm	Hochdruckbogenlampen, Forschung
Ytterbium	Yb	Laser, Glasfaser-Signalverstärker
Lutetium	Lu	kaum kommerzielle Anwendungen, teils in Szintillatoren zur Leck-Detektion

Quelle: Zusammengestellt aus Charalampides et al. 2015; Gray 2013; Zepf 2013

### 4.2.3 Überblick über Vorkommen, Produktion und Raffination

Der Großteil der verwendeten SEE kommt überwiegend aus Primärlagerstätten, auch wenn diverse Recyclinganstrengungen unternommen werden und künftig womöglich eine größere Rolle in der Versorgung spielen werden.

In dieser Arbeit wird nur in aller Kürze auf die unterschiedlichen Erzvorkommen eingegangen. Genauere Informationen, insbesondere zu den geologischen Prozessen der Lagerstättenogenese können unter anderem bei Goodenough et al. (2018), Neukirchen und Ries (2020) und Zepf (2013) gefunden werden.

In Kapitel 4.2.1 wurden bereits die bedeutendsten Erzvorkommen von SEE erwähnt. Dabei handelt es sich um Bastnäsit, Monazit, Xenotime sowie lateritische Tone. Insgesamt gibt es aber über 250 Erze, die SEE enthalten, jedoch ökonomisch nicht von Bedeutung sind (Jordens et al. 2013, S. 98). Erwähnt sei hier lediglich, dass die Erze voneinander stark abweichen können, was SEE-Anteil sowie Förderbedingungen betrifft. Auch geologisch gesehen gleiche Erzvorkommen, etwa Bastnäsit, können sich untereinander stark unterscheiden, was zu jeweils eigenen Verarbeitungsprozessen führen kann. Tabelle 4 zeigt die SEO (Seltenerdoxid)-Konzentrationen ausgewählter bedeutender Minen weltweit. Auffällig ist der relativ hohe Anteil LSEE in Bastnäsit- und Monazitvorkommen und dagegen der deutlich höhere Anteil an SSEE (inkl. Yttrium) in IAC.

Die in Tabelle 4 aufgelisteten bedeutenden Minen spiegeln sich auch in Tabelle 5 wider. Hier werden die Mengen geförderter SEE nach Ländern sowie ihre jeweiligen Reserven aufgelistet. Neben China, Australien und USA als große Produzenten finden sich noch einige weitere Nationen wie Indien und Russland. Auch Myanmar stieg in den letzten Jahren in die Riege der bedeutenden Produktionsländer auf; insbesondere durch die IAC-Vorkommen und den darin enthaltenen SSEE (Argus Media 2020, S. 3). Mit über 60% des Gesamtfördervolumens ist China jedoch auch im Jahr 2019 noch der größte Produzent. Nicht eingeschlossen sind hierin illegale Förderungen. Diese betreffen insbesondere die lateritischen IAC im Südosten Chinas. Genaue Zahlen hierzu sind nicht vorhanden. Letzte, jedoch auch schon einige Jahre alte Schätzungen gehen von bis zu 40.000 Tonnen aus (Packey und Kingsnorth 2016, S. 113; Nguyen und Imholte 2016, S. 1950).

**Tabelle 4: Seltenerdoxid(SEO)-Konzentrationen ausgewählter bedeutender Minen weltweit**

<b>SEO</b>	<b>Mountain Pass, USA Bastnäsit</b>	<b>Mount Weld, Australia Monazit</b>	<b>Bayan Obo, China Bastnäsit &amp; Monazit</b>	<b>Maoniuping, China Bastnäsit</b>	<b>Weishan, China Bastnäsit</b>	<b>Guangdong, China Xenotime</b>	<b>Provinz Jiangxi, China Ionenadsorbierende Tone (IAC)</b>
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.20%	23.88%	25.00%	31.49%	32.90%	1.2%	27.56%
CeO <sub>2</sub>	49.10%	47.55%	50.72%	47.67%	48.65%	3.0%	3.23%
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	4.30%	5.16%	5.10%	4.11%	4.39%	0.6%	5.62%
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.00%	18.12%	16.60%	12.96%	12.70%	3.5%	17.55%
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.80%	2.44%	1.20%	1.47%	0.73%	2.2%	4.54%
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10%	0.53%	0.18%	0.26%	0.10%	0.2%	0.93%
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.20%	1.09%	0.70%	0.66%	0.10%	5.0%	5.96%
Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	0.06%	0.09%	0.01%	0.08%	0.10%	1.2%	0.68%
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05%	0.25%	0.01%	0.22%	0.10%	9.1%	3.71%
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02%	0.03%	0.01%	0.04%	0.12%	2.6%	0.74%
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02%	0.06%	0.01%	0.06%	0.00%	5.6%	2.48%
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02%	0.01%	0.01%	0.02%	0.00%	1.3%	0.27%
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02%	0.03%	0.01%	0.05%	0.11%	6.0%	1.13%
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	1.8%	0.21%
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.10%	0.76%	0.43%	0.00%	0.00%	59.3%	24.26%

Quelle: Zusammengestellt aus Packey und Kingsnorth 2016; Zepf 2013

Allerdings unternimmt die chinesische Regierung in den letzten Jahren auch einige Anstrengungen, die illegale Förderung aus marktverzerrenden und ökologischen Gründen zu reduzieren (Standaert 2019; Shen et al. 2020, S. 4).

**Tabelle 5: Produktion und Reserven Seltener Erden nach Ländern in Tonnen**

	Produktion <sup>g</sup>		Reserven
	2018	2019	
Australien	21.000	21.000	3.300.000
Brasilien	1.100	1.000	22.000.000
Burundi	630	600	NV
China	120.000	132.000	44.000.000
Grönland	0	0	1.500.000
Indien	2.900	3.000	6.900.000
Kanada	0	0	830.000
Madagaskar	2.000	2.000	NV
Myanmar	19.000	22.000	NV
Russland	2.700	2.700	12.000.000
Südafrika	0	0	790.000
Tansania	0	0	890.000
Thailand	1.000	1.800	NV
USA	18.000	26.000	1.400.000
Vietnam	920	900	22.000.000
Sonstige	60	0	310.000
<b>Welt</b>	<b>190.000</b>	<b>210.000</b>	<b>120.000.000</b>

Quelle: USGS 2020, S. 132–133

<sup>g</sup> geschätzt; NV = Nicht verfügbar

Mit Blick auf die vorangehende Tabelle zeigt sich also, dass die für einige Jahre bzw. gar Jahrzehnte vorherrschende Monopolstellung Chinas mit einem damaligen Förderanteil von über 90% (USGS 2014, S. 129) mittlerweile gebrochen ist. Viele Explorations- und Förderprojekte wurden, insbesondere seit dem sprunghaften Anstieg des Interesses an Seltenen Erden von 2008, initiiert, was sich mittlerweile deutlich bemerkbar macht. Und mit diesen Projekten sind auch die Reserven angestiegen. Nachgewiesene und zu aktuellem Zeitpunkt ökonomisch sowie technisch förderbare Lagerstätten belaufen sich laut USGS (2020, S. 132–133) auf 120 Millionen Tonnen (s. Tabelle 5).

In Kapitel 2.2 wurde die Diskussion um die Endlichkeit von Rohstoffen bereits aufgegriffen. Im Zuge dessen gab und gibt es immer wieder Studien, welche die Erschöpfungszeit von natürlichen Ressourcen auf Basis der statischen Reichweite berechnen. Diese Reichweite  $\tau_R$  wird durch den Quotienten aus der Reservemenge  $R$  und der Produktionsrate  $P$  eines Rohstoffs berechnet und in Jahren angegeben.

$$\tau_{R1} = \frac{R}{P} \quad (1)$$

Bezogen auf die Produktionsmenge Seltener Erden in Höhe von 210.000 t im Jahr 2019 ergibt sich daraus eine statische Reichweite von 570 Jahren.

Dieser Wert ist jedoch mit größter Vorsicht zu betrachten, denn die Berechnungsvariablen *Jahresproduktion* und *Reservenmenge* dieser statischen Reichweite verhalten sich keineswegs statisch, sondern teils sehr dynamisch, da sie von ökonomischen und technologischen Faktoren abhängen. Der Wert stellt daher eine Art Schnappschuss der aktuellen Situation dar.

Dennoch kann mit Blick auf die aktuell berechneten 570 Jahre von einer geologisch bedingten kritischen Versorgungslage bei Seltenen Erden also kaum gesprochen werden. Auch die wirtschaftliche Versorgungssituation kann, bezogen auf die Diversifikation der Förderländer in den letzten Jahren, als Schritt in Richtung einer entspannteren Situation gewertet werden.

Die erste Verarbeitung der geförderten SEE-Erze, die sogenannte Raffination, ist sehr komplex und nur in wenigen Studien ausführlich beschrieben. Auch hier soll nur in aller Kürze auf ein paar Aspekte eingegangen werden. Die wohl ausführlichste Abhandlung zu den technischen Details liefern Gupta und Krishnamurthy (2005). Darin unterteilen sie die Produktion zumeist in die vier Schritte Rohstoffförderung, technische/mechanische Bearbeitung, chemische Behandlung sowie letztlich verschiedene Separationsprozesse wie Oxidation und Reduktion.

Im ersten Schritt werden die Erze, üblicherweise im Tagebau, gefördert. Durch technische Prozesse werden Erzkonzentrate gewonnen, so etwa mittels Zerkleinerung durch Mahlen, elektromagnetische Abtrennung oder mittels Flotation, bei der diverse Bestandteile abgeschieden werden. Die hieraus gewonnenen Konzentrate werden



anschließend einer chemischen Behandlung mit verschiedenen Säuren und Laugen unterzogen. Die endgültige Separation der einzelnen Elemente kann durch mehrere unterschiedliche Schritte, etwa Oxidation, Reduktion und fraktionierte Kristallisation, erfolgen. Letztlich können sich all diese Schritte, je nach Lagerstätte und Erz, erheblich unterscheiden. Die Prozesse weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, so etwa die erzielbare Reinheit, Zeitintensität aber auch ökologische Auswirkungen, beispielsweise durch hohen Chemikalieneinsatz (Gupta und Krishnamurthy 2005, S. 191).

Wie mittlerweile deutlich gemacht wurde, kommen die SEE immer gemeinsam in Erzen vor. Es existiert also keine Cer-Mine, genauso wenig wie eine Gadolinium-Mine. Da zur endgültigen Nutzung alle enthaltenen Elemente voneinander getrennt werden müssen und die Verhältnisse der SEE zueinander in den einzelnen Erzvorkommen variieren, resultiert eine marktspezifische Herausforderung. Denn das Verhältnis der SEE zueinander in den Erzen entspricht natürlich nicht dem Verhältnis des anthropogenen Bedarfs, was ein Balance-Problem hervorruft, wie es Falconnet schon 1985 (S.12) benannte. Besonders problematisch wird es bei den schweren Seltenen Erden, die insbesondere in High-Tech-Anwendungen benötigt werden. Steigt der Bedarf und dementsprechend die Fördermenge dieser einzelnen Elemente, wie etwa Dysprosium oder Erbium, so müssen auch alle anderen Elemente gefördert werden, was insbesondere bei den häufiger vorkommenden LSEE zu Lagerhaltung und nachfolgenden Marktverzerrungen führt.

### 4.3 Gadolinium als Kontrastmittel

Das Anwendungsspektrum der SEE ist weit gestreut. Eine Sonderstellung darunter nimmt Gadolinium ein. Dieses Element ist in seiner Form als Gadolinium-Kation  $Gd^{3+}$  der wichtigste und am häufigsten verwendete Rohstoff für die Magnetresonanz-Kontrastmittelproduktion (engl. *gadolinium-based contrast agent* = GBCA). Der Grund für diese Ausnahmestellung Gadoliniums liegt in der außergewöhnlichen Elektronenkonfiguration der SEE. Aufgrund seiner sieben ungepaarten Elektronen in der f-Schale ist es das stärkste paramagnetische Element (Caravan et al. 1999, S. 2293). Wie in Kapitel 4.1 erläutert, messen Magnetresonanztomographen die Relaxationszeit der in einem Magnetfeld mittels Radiofrequenzen angeregten Wasserstoffprotonen. Die paramagnetischen Gadolinium(III)-Komplexe erzeugen in dieser Konstellation ein eigenes kleines Magnetfeld und beeinflussen damit die sie umgebenden Wasserstoffprotonen des Körpers. Es wird also nicht das Kontrastmittel per se sichtbar, sondern das hierdurch verstärkte Signal der Protonen.

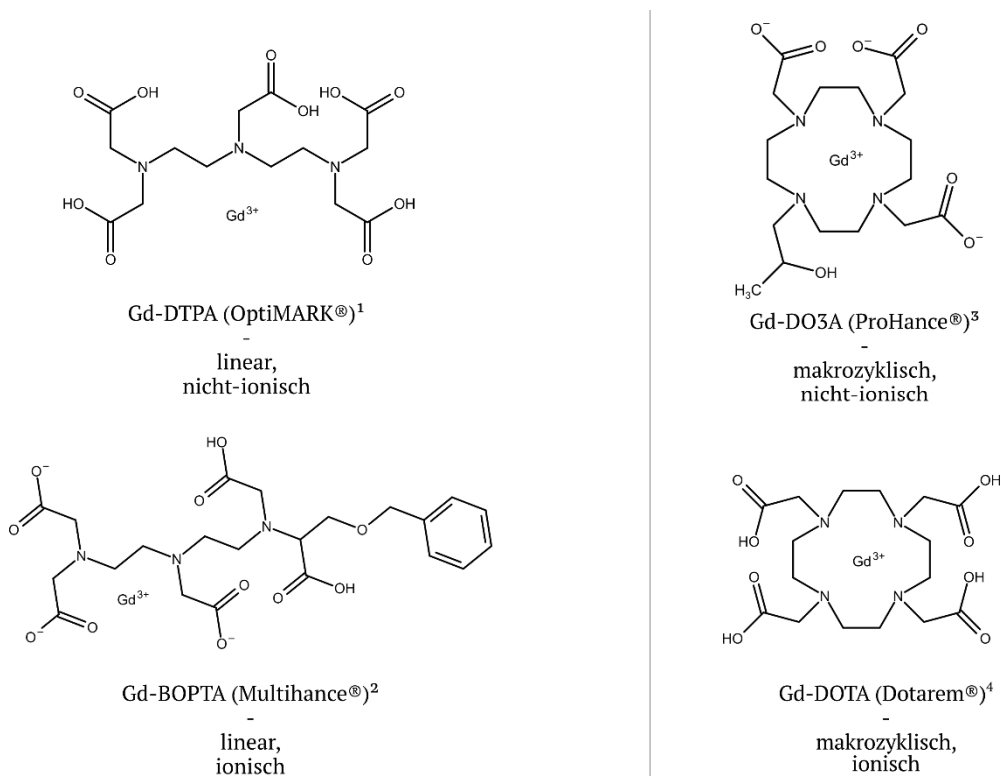
Das natürlich vorkommende  $Gd(III)$ -Ion ist jedoch hochtoxisch. Die für eine MRT-Untersuchung mit Kontrastmittelgabe benötigte Menge läge im LD50-Bereich (Letale Dosis). 50% der untersuchten Patienten würde bei einer solchen Verabreichung also sterben (Jahn und Daumann 2018, S. 152). Die Toxizität basiert auf der starken Ähnlichkeit zum Kalzium-Ion  $Ca^{2+}$ , was zum sogenannten Kalziumantagonismus führen kann, einem Konkurrenzverhalten in biologischen Prozessen, die  $Ca^{2+}$  erfordern. Das  $Gd^{3+}$  würde sich in Kalziumkanäle einlagern, diese blockieren, sich in Leber und Milz anreichern sowie sich stark negativ auf Blutbildung und -gerinnung auswirken (Fröhlich 2006, S. 109; Reimer und Vosschenrich 2004, S. 176). Genauere Ausführungen zur Humantoxikologie finden sich in Kapitel 4.5.

Um diese toxischen Eigenschaften zu unterbinden, werden die Ionen beispielsweise mit Polyaminocarbonsäure-Chelaten komplexiert. Dieser Chelat-Komplex ist deutlich stärker als klassische chemische Komplexverbindungen, da das Zentralatom (in diesem Fall Gadolinium) umschlossen wird. Das  $Gd^{3+}$ -Ion ist so gesehen in ein festes Paket gepackt, wodurch sich die toxischen Eigenschaften im Körper nicht entfalten können. Der Komplex ist hydrophil, bevorzugt also den Kontakt mit Wasser, was dafür sorgt, dass das Medikament theoretisch relativ schnell über die Nieren ausgeschieden wird und kein

Zelleintritt erfolgt (Caravan et al. 1999, S. 2295). Ausnahmen werde im weiteren Verlauf noch aufgezeigt.

Der Körper scheidet das Mittel nach der Verabreichung schnell mit einer durchschnittlichen Halbwertszeit von 1–2 Stunden renal aus (Zhou und Lu 2013, S. 3). Das Mittel wird intravenös verabreicht, um über die Blutbahnen in alle Körperregionen zu gelangen. Bei oraler Verabreichung wäre es im sauren Magenmilieu nicht stabil (Jahn und Daumann 2018, S. 152).

Es können zwei Arten von Chelat-Verbindung unterschieden werden, die linearen und die makrozyklischen. Die Linearen besitzen eine einfache Molekülstruktur, in der das toxische Gadolinium-Ion deutlich instabiler integriert ist als in den Makrozyklischen. Zudem können GBCA jeweils ionisch oder nichtionisch, also geladen oder elektrisch neutral sein. Auch das wirkt sich auf die Stabilität aus. Aufgrund der Ladungskräfte bilden ionische GBCA ein kompakteres Chelat-Paket. Abbildung 11 zeigt die vier möglichen Kontrastmittel-Molekülstrukturen.



**Abbildung 11: Molekülstruktur ausgewählter Kontrastmittel**, Unterscheidung nach Klassifikation (linear, makrozyklisch) und Ladung (ionisch, nichtionisch), Handelsname in Klammern  
 Quelle: erstellt mit Thermo Fisher Scientific, Inc. nach <sup>1)</sup> PubChem 2021a; <sup>2)</sup> PubChem 2021b; <sup>3)</sup> PubChem 2021c; <sup>4)</sup> PubChem 2021d

## 4.4 Globale Materialflussanalyse von Gadolinium

In diesem Kapitel wird eine quantitative Betrachtung der Verarbeitungskette von Gadolinium allgemein und seiner Verwendung als Kontrastmittel im Speziellen vorgenommen. Es wird eine Materialflussanalyse mit dem Ziel durchgeführt, die Stoffflüsse eines einzelnen Seltenerdelements durch das technosphärische System mit einem besonderen Blick auf die dissipativen Verlustwege zu veranschaulichen.

### 4.4.1 Methodik und Quantifizierung

Brunner und Rechberger (2017, S.3) zufolge ist eine MFA eine systemische Erfassung der Materialflüsse in einem räumlich und zeitlich begrenzten System. Eine typische Materialflussanalyse verfolgt und quantifiziert also die Stoffmengen eines Produktes oder eines Materials entlang der verschiedenen Phasen einer Wertschöpfungskette und kann damit einen Hinweis auf die Nachhaltigkeit eines solchen Systems geben. In den folgenden Abschnitten wird die genaue Methodik erläutert, die Ergebnisse vorgestellt und schließlich interpretiert.

Das Blockflussdiagramm zeigt anhand der Breite der Pfeile den Weg samt Verluste von Gadolinium über die komplette globale Wertschöpfungskette hinweg und beruht dabei auf dem Prinzip der Massenbilanz:

$$\sum_{in} m_{in} = \sum_{out} m_{out} + m_s \quad (2)$$

Hierbei entspricht die Summe der Massen aller Materialinputs  $m_{in}$  in ein System der Massensumme aller Materialoutputs  $m_{out}$  aus dem System plus die im System verbliebenen Mengen (stocks)  $m_s$ .

Die in der MFA abgedeckten Prozessschritte umfassen Erzförderung, Raffination, (Halbteil-) Fertigung, Fabrikation, Verwendung sowie die unterschiedlichen End-of-Life-Pfade. Da Gadolinium ein Element aus der Gruppe der Seltenen Erden ist, sind die Prozessschritte denen aller SEE sehr ähnlich (siehe hierzu beispielsweise Du und Graedel 2011; Gupta und Krishnamurthy 2005). Die einzelnen Phasen werden in diesem Kapitel erläutert und quantifiziert. Die Daten und Berechnungsschritte der einzelnen Prozessphasen der Materialflussanalyse finden sich im Anhang (Tabelle A. 1).

In den meisten Publikationen werden Mengenangaben zu Seltenen Erden als Gesamtmenge deklariert, ohne auf die Anteile der einzelnen Elemente genauer einzugehen (vgl. bspw. USGS 2020, S. 133; BGS 2011, S. 27). Nur für wenige Einzelemente stehen genauere Informationen zur Verfügung, so etwa das in modernen Permanentmagneten genutzte Neodym. Zu allen anderen Elementen der SEE fehlen genaue Angaben, häufig finden sich nur vereinzelt Schätzungen, so etwa bei (Gschneidner 2011, S. 4) oder beim australischen SEE-Produzenten Lynas (Lynas Corp. Ltd. 2010, S. 14). Die Angaben variieren dabei zwischen absoluten Mengen und relativen Anteilen an der SEE-Gesamtproduktion. Bezogen auf Gadolinium reicht die Spannweite beispielsweise von 1,5% der jährliche SEE-Fördermenge (Gschneidner 2011, entspricht Stand 2016: 1.890 t) bis zu absoluten Angaben in Höhe von 2.800 t (Lynas Corp. Ltd. 2010), was die Unsicherheiten in den Mengenangaben verdeutlicht.

Um genauere Mengenangaben zu erhalten, wird in der vorliegenden Arbeit ein anderer Ansatz verfolgt. Statt von der Gesamtmenge den Gd-Anteil zu berechnen, wird die Gd-Menge auf Basis der Erzzusammensetzung und der Produktionsdaten der relevanten Minen für das Jahr 2016 berechnet. Aufgrund der schlechten Datenlage wird auf dieses Jahr zurückgegriffen, da hierzu nach einer Literatursichtung die beste Verfügbarkeit existiert. Dennoch muss in Einzelfällen auch auf ältere Daten zurückgegriffen werden, was aufgrund der insgesamt relativ konstanten Weltproduktion von Seltenen Erden über diesen Zeitraum hinweg als vertretbar für diese Arbeit angesehen wird.

Eine der umfangreichsten Zusammenstellungen von SEE-Minen und ihrer jeweiligen Erzzusammensetzung findet sich bei Packey und Kingsnorth (2016, S.113). Die Angaben erfolgen in der häufig verwendeten oxidischen Form, im Falle von Gd also das Gadoliniumoxid  $Gd_2O_3$ .

An Produktionsdaten einzelner Minen zu gelangen, ist häufig nur sehr schwer möglich. Die hier verwendeten Daten stammen größtenteils aus der kostenpflichtigen Datenbank von *S&P Global* und basieren auf Berechnungen anhand von Literaturangaben. Tabelle 6 listet die für die Gadolinium-Produktion als am relevantesten identifizierten Minen auf. Diese beschränken sich auf Bayan Obo, die größte SEE-Mine der Welt, Mt. Weld, die bedeutendste SEE-Mine in Australien, sowie die ionenadsorbierenden Tone (IAC) im Südosten Chinas. Insbesondere bei den IAC kommt es zu großen illegalen Bergbauaktivitäten, die die gesamte Gd-Produktion um mehrere hundert Tonnen erhöhen könnten,

aufgrund der intransparenten Datenlage hier jedoch nicht miteinbezogen werden (Packey und Kingsnorth 2016, S. 113). Zu anderen Minen sind entweder keine Daten verfügbar, oder die Fördermenge sowie der Gd-Gehalt sind vernachlässigbar gering. In der Tabelle sind die jeweiligen Gesamtfördermengen der einzelnen Minen, sowie deren Gd-Gehalte angegeben. Auf dieser Grundlage wurde die Gd-Produktionsmenge in Höhe von 2.692 t berechnet. Auch hier handelt es sich um die oxidische Form (SEO). Der Massenanteil elementaren Gadoliniums an  $Gd_2O_3$  beträgt 2.336 t. Dennoch wird im weiteren Verlauf die, aufgrund der chemischen Reaktivität, typische oxidische Form verwendet oder andernfalls explizit darauf hingewiesen. Wie anhand von Tabelle 6 berechnet wurde, lag die Menge des aus der Lithosphäre extrahierten Gadoliniumoxids bei 2.696 t.

**Tabelle 6: Seltenerd- und Gadolinium-Produktion relevanter Minen (Oxide)**

Vorkommen (Region, Land)	SEO Produktion (t)	Gd Gehalt (%)	Gd Produktion (t)
Bayan Obo, China	44.500 <sup>(1)</sup>	0.7 <sup>(4)</sup>	308
Mt. Weld, Australien	17.800 <sup>(2)</sup>	1.09 <sup>(4)</sup>	194
Ionenadsorbierende Tone, China	36.750 <sup>(3)</sup>	5.96 <sup>(4)</sup>	2.190
Total			2.692

Datengrundlage Jahr 2016, außer anders ausgewiesen. <sup>(1)</sup> S&P Global Market Intelligence 2019a; <sup>(2)</sup> S&P Global Market Intelligence 2019b; <sup>(3)</sup> Yang et al. 2013; <sup>(4)</sup> Packey und Kingsnorth 2016

Die im weiteren Verlauf einbezogenen Prozessverluste basieren auf den Ergebnissen von Du und Graedel (2011). Bereits während der Rohstoffförderung gehen 20 % durch Erzabraum (sog. Tailings) verloren oder werden auf Deponien verbracht (Du und Graedel 2011, S. 3). Die verbliebenen 2.157 t werden in Raffinerien in die einzelnen SEE getrennt, wie in Kapitel 4.2.4 erläutert. Hier gehen etwa 10 % des eingesetzten Materials prozessbedingt verloren (Du und Graedel 2011, S. 3). Die Prozesse Halbteil- und Endfertigung können je nach Produkt sehr unterschiedlich ausfallen. Beiden gemein ist das Anfallen von Produktionsschrott, der größtenteils in der Abfallbehandlung und zu einem sehr geringen Teil im Recycling landet. Dieses Recycling bezieht sich allerdings nur auf produktionsinternes Schrottmanagement.

Es gibt kaum Informationen dazu, wieviel Gadolinium schließlich wirklich weltweit in Produkten Verwendung findet. Lynas Corp. Ltd. (2010, S. 14) gibt für das Jahr 2010 820 t

an. Du und Graedel (2011, S. 3) gehen von etwa 600 t aus. In der Materialflussanalyse wurden, aufgrund der intransparenteren Datengrundlage von Du und Graedel bezogen auf die verwendeten Mengen, die Angaben von Lynas übernommen. Auch diese müssen mit Blick auf die schwierige Datenlage unter Vorbehalt gesehen werden. Allerdings hat sich die SEE-Gesamtproduktion zwischen 2010 und 2016 nicht erhöht. Somit können die 820 t aus dem Jahr 2010 für 2016 übernommen werden.

Demzufolge sind also 1.755 t (minus 88 t Schrott) in die Endproduktion, aber letztlich nur 820 t in Produkte geflossen. Die Destination der verbliebenen 849 t können im Zuge dieser Arbeit nicht zu absoluter Sicherheit nachvollzogen werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die chinesische Regierung Anstrengungen zur Lagerhaltung von Seltenen Erden unternimmt, was auch Guyonnet et al. (2015, S. 7) vermuten und Informationen der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffen (Yun Schüler-Zhou 2018, S. 3) nahelegen.

Um den hier gewählten thematischen Schwerpunkt von Gadolinium als Kontrastmittel hervorzuheben, wurde die Verwendung aufgeteilt in Kontrastmittel sowie alle anderen Verwendungsarten. Wie in Kapitel 4.2.2 erwähnt, ist die Verwendungslage bei Gadolinium (ohne GBCA) sehr intransparent. Für diese Arbeit ist das jedoch kaum relevant. Zum einen ist es den ausgiebigen Recherchen zufolge sehr unwahrscheinlich, dass Gd in langlebigen, möglicherweise sogar infrastrukturelevanten Produkten verwendet wird. Daher wird in der MFA nicht von sogenannten *In-Use Stocks*, also eines aktuell verwendeten, teils langlebigen Metallkapitals in der Form von in Gebrauch befindlichen Vorräten, ausgegangen. Und zum anderen ist keine Form des Recyclings von Gd bekannt. Diese zwei Aspekte, verbunden mit der Tatsache, dass Gd primär als *process enabler* (z.B. Erdöl-Cracking) sowie *product enabler* in kurzlebigen Hightech-Produkten verwendet wird, sorgen für einen schnellen Durchlauf durch die Technosphäre und resultieren in einem hundertprozentigen Verlust des Metalls aus der Wertschöpfungskette.

Die in den Körper injizierte Menge  $Gd^{3+}$  liegt bei etwa 0,1 mmol/kg Körpergewicht, was sich je nach Hersteller und Kontrastmittel leicht unterscheiden kann. Bei einem durchschnittlich schweren Erwachsenen ergibt sich daraus 1 g Gadolinium. Die Halbwertszeit

im Körper beträgt etwa 90 Minuten, weshalb nach 24 Stunden über 90% der verabreichten Dosis unmetabolisiert ausgeschieden sind (Lawrence et al. 2009, S.3535; Froehlich 2008, S.113).

Im Folgenden wird am Beispiel des Kontrastmittels Gadoteridol, Handelsname ProHance, Hersteller Bracco Imaging, auf Grundlage der Packungsbeilage und der chemischen Strukturformel die üblicherweise verabreichte Menge  $m_{Gd}$  berechnet:

Molekülformel Gadoteridol	$C_{17}H_{29}GdN_4O_7$
Molare Molekülmasse	558 mg/mmol
Molare Masse Gadolinium-Anteil $M_{Gd}$	157,25 mg/mmol
Potenz P Gadoteridol	0,5 mmol/ml
Ø Dosis D:	0,2 ml/kg Körpergewicht
Ø Körpergewicht $m_{kg}$	75 kg

$$m_{Gd} = M_{Gd} * P * D * m_{Kg} \quad (3)$$

Daraus ergibt sich eine durchschnittlich pro Patient verabreichte Menge von 1,18 g. Die erstmalige klinische Nutzung von Gd-Chelaten als Kontrastmittel erfolgte im Jahr 1988 in Deutschland, Japan und den USA. Seitdem wurden etwa 300 Millionen Untersuchungen mithilfe von GBCA durchgeführt (Lohrke et al. 2016, S. 2; Ebrahimi und Barbieri 2019, S. 10; Runge 2015, S. 482). Bei einer durchschnittlich verabreichten Menge von 1,18 g entspräche dies einem Gd-Verbrauch von insgesamt 354.000 kg.

Da genaue Informationen zum jährlichen Bedarf nicht verfügbar sind, wird er in dieser Arbeit berechnet. Die Berechnung basiert auf der Anzahl der verabreichten Dosen in 30 OECD-Staaten und der durchschnittlichen Menge an Gd pro Kontrastmitteleinheit. Aus der Tendenz heraus, dass die MRT-Technologie mit zunehmendem industriellen Entwicklungsstand genutzt wird, vereinen diese 30 Staaten das Gros der weltweiten jährlichen Tomographien auf sich und sind damit höchstwahrscheinlich auch für den Großteil des GBCA-Verbrauchs verantwortlich (OECD 2019, S. 193–194).

Auf Grundlage der MRT-Einsätze pro 1.000 Einwohnern, einem durchschnittlichen Kontrastmittel-Einsatz in jedem dritten Fall, sowie den 1,18 g Gd pro Patient ergibt sich ein Jahresverbrauch von 28 Tonnen Gadolinium, die als Kontrastmittel eingesetzt werden. Informationen zu Berechnung und Quellen finden sich im Anhang (Tabelle A. 2).



Mit Blick auf die Eingrenzung auf die OECD Daten sind die 28 Tonnen als ein konservativer, unterer Grenzwert zu betrachten. Die gesamte Menge gelangt letztlich über den Urin der Patienten in Abwässer und darüber in Kläranlagen. Eine Abtrennung findet hier jedoch nur in äußerst geringer Menge statt, da die etablierten Reinigungsstufen nicht ausreichen, diese mikroskopisch kleinen Stoffe erfolgreich zu sequestrieren, wie Verplanck et al. (2010, S. 3878) nachgewiesen haben.

#### **4.4.2 Zusammenfassung der MFA-Resultate aus dem Blickwinkel der Dissipation**

Abbildung 12 zeigt die grafische Darstellung der Materialflussanalyse, beruhend auf den ausgeführten Schätzungen und Berechnungen. Mit Blick auf die Ergebnisse der MFA 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. Da diese vornehmlich auf Deponien landen, ist die Einordnung als dissipativer Stoffstrom nicht ganz eindeutig. Einerseits sind diese Stoffmengen räumlich begrenzt und bekannt und daher prinzipiell wiederverwendbar. Andererseits kommt es immer wieder zu Stoffaustritten aus Deponien. Zudem sind die Stoffkonzentrationen meist so gering, dass eine Wiederverwertung weder ökonomisch noch technisch realisierbar ist. Aufgrund der Dynamik dieser Variablen muss das aber kein persistenter Zustand sein. Vermutlich wird sich an diesem Zustand aber erst etwas ändern, wenn die Stoffkonzentrationen in Deponien höher sind als in den geogenen Erzvorkommen und die Rentabilität damit steigt. Daher werden diese Stoffflüsse in der vorliegenden Arbeit als dissipative Flüsse betrachtet.

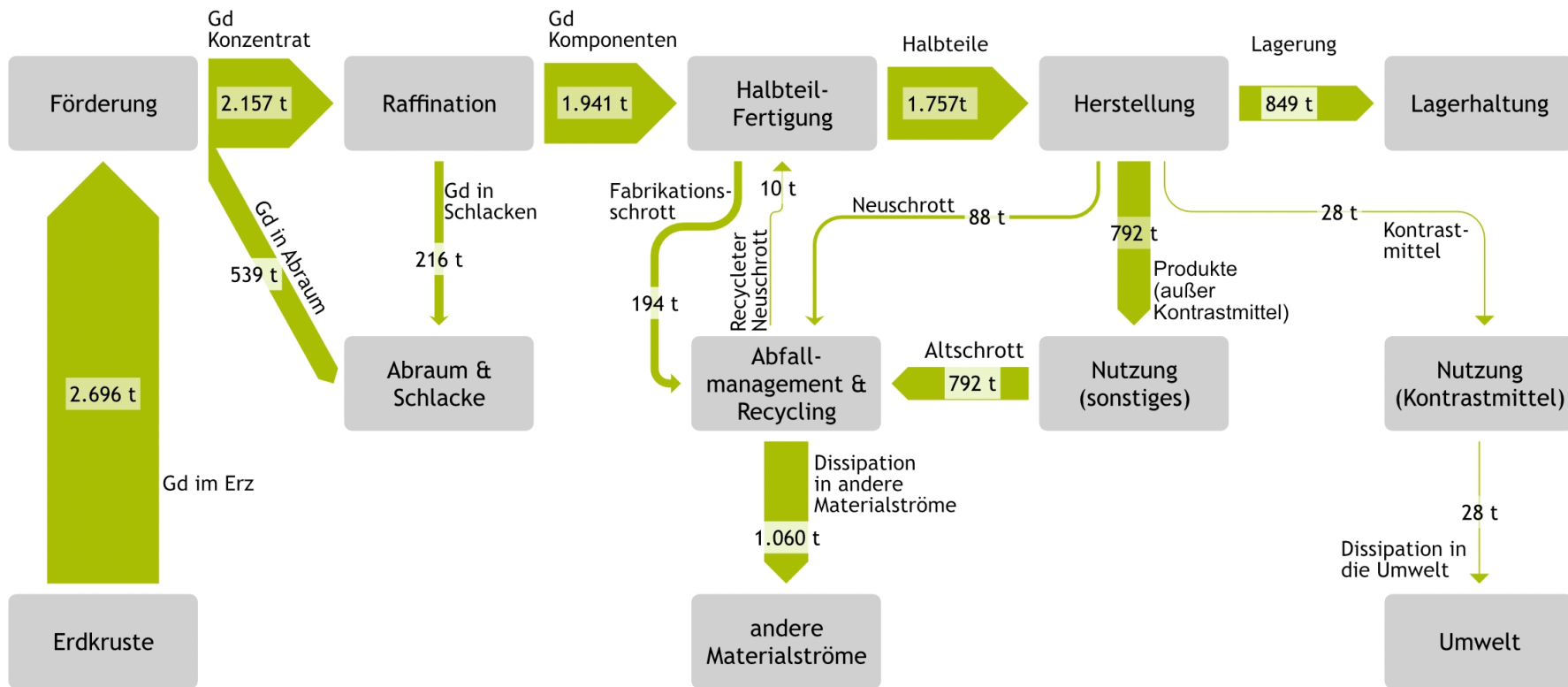
Zweitens landen beträchtliche Mengen in anderen Stoffströmen, die aus einer unzureichenden (Produktions-)Abfallbehandlung und einem nicht vorhandenen Recycling resultieren, was zu weiteren Herausforderungen wie dem Downcycling anderer Materialien führt. Das aktuelle Forschungsprojekt DownMet des Umweltbundesamtes (UBA) beschäftigt sich mit diesem Thema. Darin heißt es, dass

*„(...) Zusätze (Kupfer in Stahl zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit) und Verunreinigungen meist in so niedriger Konzentration und komplex verteilter Form vorliegen, dass sich eine Abtrennung im metallurgischen Prozess äußerst*

*schwierig gestaltet. Durch die Kreislaufführung kommt es damit sukzessive zu einer unerwünschten Anreicherung in der Schmelze. Diesem ungewollten Qualitätsverlust, dem sogenannten Downcycling, wird aktuell durch die Zugabe von Primärmaterial begegnet.“ (UBA 2019, S. 2)*

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. Der folgende Abschnitt (Kapitel 4.5) zeigt jedoch diverse ökologische Risiken auf, die verdeutlichen, 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.



**Abbildung 12: Globale Materialflussanalyse von Gadolinium für das Jahr 2016**  
 Datengrundlagen: Siehe Anhang Tabelle A. 1

## 4.5 Umwelt- und Gesundheitsrelevanz

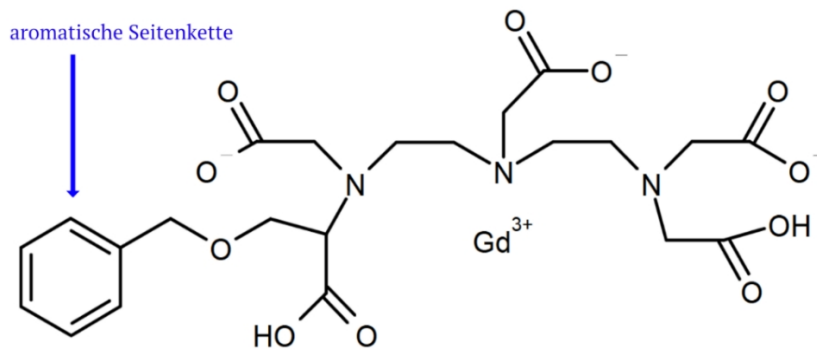
Immer mehr pharmazeutische Wirkstoffe können in Abwässern, Oberflächen- und sogar Grund- und Trinkwasser nachgewiesen werden (Kunkel und Radke 2012, S. 5551–5552; Richardson und Ternes 2014, S. 2824–2829; UBA 2014). Seit den 1980er Jahren gehört dazu auch das Seltenerdelement Gadolinium. Auch wenn, wie die Materialflussanalyse des vorherigen Kapitels aufzeigt, lediglich wenige Tonnen pro Jahr direkt als Kontrastmittel in die Umwelt gelangen, ist diese neuartige Stoffgruppe mittlerweile in vielen Gewässern weltweit nachweisbar. Insbesondere seit den Veröffentlichungen von Bau & Dulski (1996) beschäftigten sich einige Studien (u.a. Jakubowski et al. 2013; Ebrahimi und Barbieri 2019; Neubert 2008) mit diesbezüglichen umweltrelevanten Themen wie Bioakkumulation in Flora und Fauna, Stabilitätsuntersuchungen in Süß- und Salzwasser oder Toxizitätstests an Fischen. Zudem wurden mittlerweile auch medizinische Nebenwirkungen und unerwartete humanpharmakologische Entwicklungen offensichtlich, die hier kurz beleuchtet werden.

### 4.5.1 Umweltverhalten und Ökotoxikologie

Obwohl Kontrastmittel mittlerweile weltweit in Gewässern nachweisbar sind, gibt es nur wenige Erkenntnisse über ihr Verhalten unter Umweltbedingungen oder in den technischen Prozessen der Wasseraufbereitung hinsichtlich ihres potenziellen Abbaus oder der Bildung von Transformationsprodukten. Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Jakubowski et al. 2013) untersuchte die Kontrastmittelaufnahme von Pflanzen am Beispiel der Kressepflanze. Über mehrere Tage wurde das Gießwasser mit verschiedenen GBCA dotiert. Anschließend schlossen die Forscher die Pflanzen auf und ermittelten die Gd-Konzentration mittels ICP-MS (Plasmamassenspektrometrie). Alle einzelnen Kontrastmittel konnten in der Pflanze nachgewiesen werden, die Konzentrationen entsprachen denen im Gießwasser. Allerdings kommt es auch in den Pflanzen zu keiner Metabolisierung, das Gd liegt weiterhin in seiner gebundenen Chelatform vor. Neben einer Kontamination der Ernährungskette wird befürchtet, dass die Gd-Ionen ebenso wie im menschlichen Körper als Ca-Antagonisten auftreten und negative Auswirkungen etwa auf das Zell- und Wurzelwachstum oder auch die Photosyntheseleistung der Pflanze bewirken (Ebrahimi und Barbieri 2019, S. 29).

Auch in der aquatischen Flora und Fauna können die Gd-Anomalien mittlerweile festgestellt werden. Neubert (2008, S. 58) setzte Fische, Wasserflöhe sowie Algen unter Laborbedingungen Gd-haltigem Wasser aus, um akute Toxizität, Immobilisierung, Reproduktion sowie Algenwachstum zu untersuchen. Dafür wurden sowohl GBCA (Chelat) als auch freie Gd-Ionen in Form von Gadolinium(III)-Chlorid-Hexahydrat als Referenz eingesetzt. Bei den Fischen konnte über den kompletten Expositionszeitraum weder eine erhöhte Mortalität noch abnormes Verhalten festgestellt werden. Bei Verwendung von freiem Gadolinium kam es bei Wasserflöhen zu Immobilisierung und Reproduktionshemmung sowie zu Wachstumshemmung bei Algen. Letzteres trat auch bei bestimmten Kontrastmitteln auf (Gadobutrol, Gadodiamid).

Birka et al. (2016) untersuchten die Stabilität verschiedener Gd-basierter Kontrastmittel unter UV-Einstrahlung. Untersucht wurden vier gängige GBCA: Gd-DTPA, Gd-DOTA, Gd-BT-DO<sub>3</sub>A sowie Gd-BOPTA. Während die ersten drei eine sehr hohe Stabilität aufweisen, konnte für Gd-BOPTA sowohl eine starke Zersetzung als auch die Bildung von Transformationsprodukten durch UV-Strahlung nachgewiesen werden. Nach 300 minütiger Bestrahlung konnten in einer Oberflächenwasserprobe nur noch 18 % der eingebrachten Kontrastmittel in seiner vollständigen, stabilen Form vorgefunden werden (Birka et al. 2016, S. 248). Der Grund für die Instabilität von Gd-BOPTA liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an der erhöhten UV-Absorptionsfähigkeit durch eine aromatische Molekülstruktur, eine sogenannte aromatische Seitenkette, welche nur dieses Kontrastmittel aufweist (siehe Abbildung 13). Aufgrund der kurzen Bestrahlungsdauer von 300 Minuten werden hier allerdings keine natürlichen Bedingungen in der Umwelt, oder die Bestrahlungsintensitäten in Trinkwasseraufbereitungsanlagen mittels UV-Bestrahlung simuliert. Gerade letzteres wird als sogenannte End-of-Pipe-Maßnahme, also als letzte Maßnahme der Trinkwasseraufbereitung in vielen Weltregionen vermehrt genutzt (Pullerits et al. 2020, S. 1).



**Abbildung 13: Gd-BOPTA Strukturformel mit aromatischer Seitenkette**

Quelle: Birka et al. 2016, S. 245

Nach den hier beschriebenen Stoffpfaden und den in Gewässern gefundenen Gd-Anomalien überrascht es nicht, dass diese mittlerweile auch vermehrt in Trinkwasser nachgewiesen werden können (Brünjes und Hofmann 2020, S. 1). Die Frage nach Verordnungen und Grenzwerten zur Einhaltung der Trinkwasserqualität liegt nahe. Allerdings gibt es bisher keinen Grenzwert für Gadolinium in der entsprechenden deutschen Trinkwasserverordnung (TrinkwV). Wie für solche Fälle üblich, greift daher die General-Forderung des § 4 TrinkwV, in der es heißt:

*„Trinkwasser muss so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit insbesondere durch Krankheitserreger nicht zu besorgen ist. Es muss rein und genusstauglich sein.“* (BGBl 2019)

Zur Entsprechung dieser General-Forderung leitet das Umweltbundesamt sogenannte Gesundheitliche Orientierungswerte (GOW) ab. Dieser wird immer so niedrig angesetzt, dass selbst bei lebenslanger Aufnahme einer bestimmten Substanz keine gesundheitlichen Bedenken bestehen müssen. Bei Gadolinium liegt der GOW bei 0,1 µg/l (100 ng/l) (Hermann 2011; UBA 2017).

#### 4.5.2 Humantoxikologie

Die mittlere letale Dosis ( $LD_{50}$ ) von intravenös verabreichtem, unchelatiertem Gadolinium, liegt zwischen 0,3 und 0,4 mmol / kg Körpergewicht (Bousquet et al. 1988, S. 697).  $LD_{50}$  beschreibt die Konzentration, bei der eine 50 %ige Letalität der Versuchsorganismen (hier Mäuse und Ratten) vorliegt. Diese geringe Menge verdeutlicht die sehr hohe Toxizität von Gadolinium(III)-Ionen und die dementsprechend notwendige Komplexbildung. Hierdurch wird die  $LD_{50}$ , je nach Kontrastmittel, auf das 20–30-fache erhöht und damit deutlich sicherer gemacht (Modo 2007, S. 17; Weinmann et al. 1984, S. 621). Bei einer durchschnittlich injizierten GBCA-Menge von etwa 0,1 mmol/kg Körpergewicht sollte eine toxische Gefährdung also auf jeden Fall ausgeschlossen sein. Dennoch haben sich in den wenigen Jahrzehnten der medizinischen Anwendungen zwei, teils schwerwiegende Arten humanmedizinischer Kontraindikationen gezeigt.

Trotz der hohen Stabilität der Chelate und der guten Verträglichkeit der Kontrastmittel bei der Mehrzahl der Patienten, wurde in den letzten zwei Jahrzehnten das Aufkommen einer neuartigen Krankheit mit dem Namen *nephrogene systemische Fibrose* (NSF) beobachtet. Dabei kommt es zu teils irreversiblen Verhärtungen von Haut und Organen. Erstmals beschrieben wurde die Krankheit 2000 von Cowper et al., seit 2006 richtete sich der Blick auf Kontrastmittel als Ursache. Betroffen sind primär Patienten, die an einer Niereninsuffizienz leiden oder häufig Gd-Injektionen mit hoher Dosis verabreicht bekommen (Blaurock-Busch 2011, S. 24). Erste Gegenmaßnahmen wurden 2008 ergriffen. Zwischen dem ersten Auftreten der Krankheit und einem Erkennen des Zusammenhangs mit GBCA dauerte es also nahezu ein Jahrzehnt.

Die umfassendste Studie zu dieser Erkrankung stammt von Attari et al. (2019) und beinhaltet eine Fallanalyse, bei der alle aufgezeichneten Fälle aus den Jahren 2000 bis 2019 untersucht wurden. Demzufolge gab es in diesem Zeitraum 639 Fälle. Für 405 dieser Patienten konnte die GBCA-Art recherchiert werden. 89,6 % dieser Fälle können demnach auf die Anwendung nichtionischer, linearer Kontrastmittel zurückgeführt werden. Thomsen (2014, S. 214) geht von einer hohen Dunkelziffer an Patienten aus, deren NSF-Erkrankung vor allem in den Jahren 1996–2006 unerkannt blieb.

Positiv hervorzuheben ist, dass aus dem Zeitraum nach 2008 lediglich 14 Fälle bekannt sind. Dies geht allem Anschein nach auf die seitdem geltenden regulatorischen Empfehlungen zur Vermeidung von GBCA bei Patienten mit eingeschränkter Nierenfunktion zurück (Attari et al. 2019). Seitdem gab es auch einige Behandlungsfortschritte bei erkrankten Patienten. Physische Verbesserungen gehen hauptsächlich auf eine Wiederherstellung der Nierenfunktion zurück, beispielsweise durch eine Nierentransplantation.

Im Jahr 2015 konnten Gd-Ablagerungen im Gehirn nach MRT mit Kontrastmittelgabe nachgewiesen werden (Kanda et al. 2015), unabhängig von der vorher beschriebenen Krankheit NSF und unabhängig von der Nierenfunktion. Dabei stieg der Gd-Gehalt im Gehirn korrelierend mit der Gabe von linearen GBCA. Der Zusammenhang mit Kontrastmitteln konnte somit statistisch nachgewiesen werden. Makrozyklische GBCA zeigten dagegen keine langfristige Einlagerung in das Hirngewebe. Nach 3–24 Tagen waren diese meist nicht mehr nachweisbar. Die Messwerte linearer Kontrastmittel waren dagegen 10 mal höher und konnten auch nach diesem Zeitraum noch nachgewiesen werden, unter anderem herausgelöst aus der ursprünglichen Chelat-Struktur (Choi und Moon 2019, S. 137). In Tests lag der Anteil freier  $Gd^{3+}$  Ionen in Humanserum bei Körpertemperatur nach 15 Tagen bei 25–29 % (Frenzel et al. 2008, S. 822). Ein Grund für das Aufbrechen der Chelatkomplexe könnte den Wissenschaftlern zufolge Transmetallierung sein. Endogene Metalle wie  $Fe^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$  oder  $Cu^{2+}$  ziehen die Liganden an und ermöglichen dem Gadolinium das Loslösen aus der Verbindung (Choi und Moon 2019, S. 139).

Zwar können bis heute keine gesundheitlichen Auswirkungen nachgewiesen werden. Aufgrund der Toxizität des im Gehirn eingelagerten Metalls beschloss die Europäische Arzneimittelagentur aber dennoch aus dem Vorsorgeprinzip heraus ein Verbot von linearen Kontrastmitteln (mit wenigen Ausnahmen wie der Bildgebung der Leber) innerhalb der Europäischen Union (Europäische Kommission 2017a). Andere Nationen wie die USA sind diesem Beispiel nicht gefolgt. Allerdings hat sich eine Verschiebung der verwendeten Kontrastmittel hin zu den makrozyklischen GBCA eingestellt. Diese machen beispielsweise in den USA mittlerweile 95 % aller GBCA aus (Keutel 2018).

Anhand dieser Ausführungen zeigen sich, bei allem Nutzen, auch die umwelt- und humantoxikologischen Risiken eines Einsatzes von GBCA. Trotz der geringen Gd-Mengen,



die als Kontrastmittel eingesetzt werden, unterscheidet sich diese Stoffgruppe hinsichtlich ihres mittlerweile vielerorts ubiquitären Auftretens kaum von anderen Pharmazeutika in der Umwelt. Angesichts dessen werden die bisher allgemeinen Erkenntnisse anhand eines Fallbeispiels in ihrer konkreten räumlichen Ausprägung analysiert.

## 4.6 Räumliche Betrachtung von Gadolinium in sächsischen Oberflächengewässern

In diesem Kapitel werden die bereits allgemein aufgezeigten Prozesse und Erkenntnisse auf lokaler Ebene analysiert. Dazu werden Daten aus Gewässerproben untersucht und im Kontext der geographischen Gegebenheiten eingeordnet, um das Ausmaß dissipativer Stoffströme festzustellen.

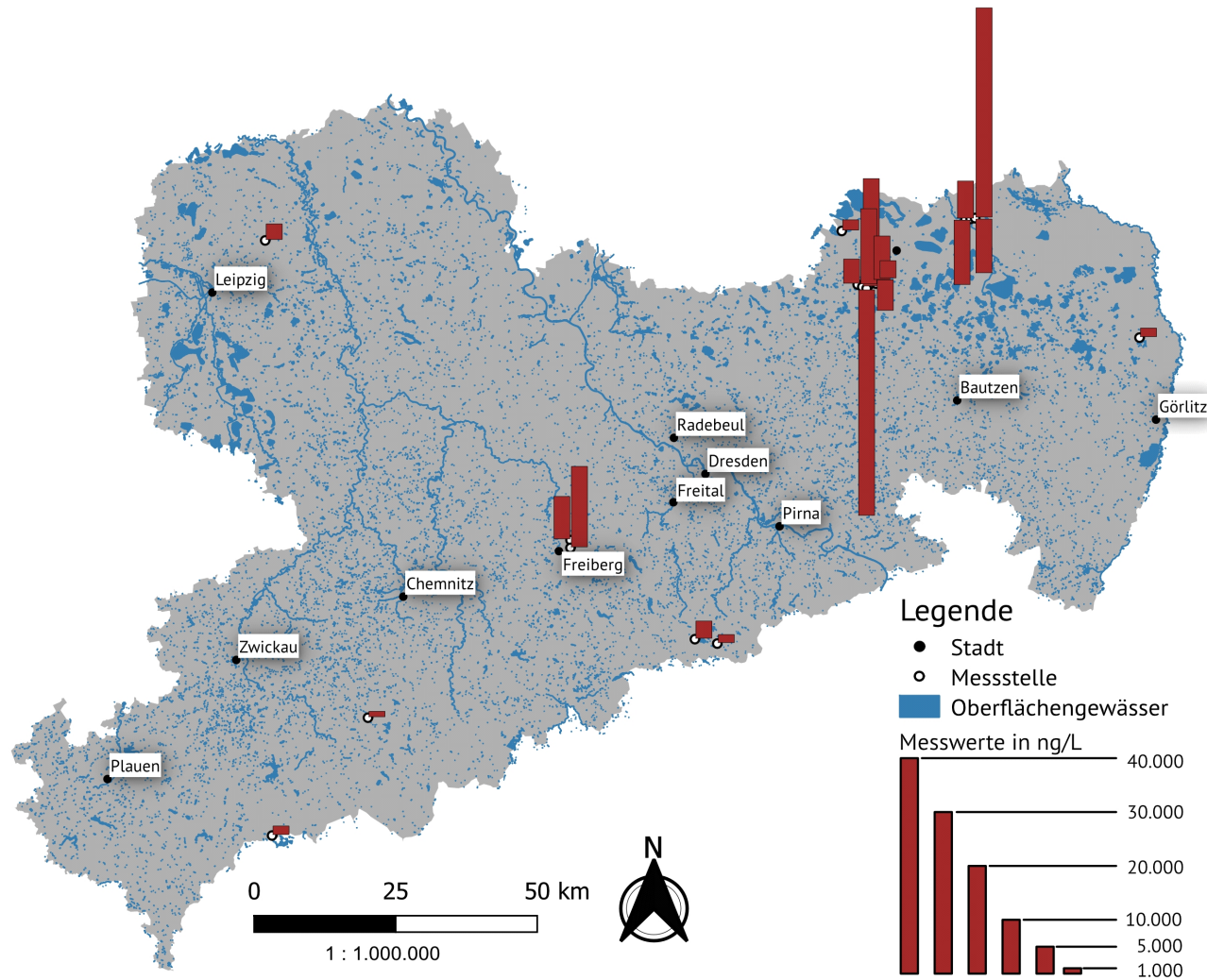
Die deutschlandweit einzigen frei zugänglichen Daten zur Gd-Belastung von Oberflächengewässern (OFG) finden sich beim Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaats Sachsen (LfU SN 2020). Die derzeit aktuellsten Werte stammen aus dem Jahr 2019 (siehe hierfür Anhang Tabelle A. 3). Die Spannweite der ermittelten Konzentrationen liegt bei den OFG zwischen  $\leq 20$  ng/l ( $\cong$  Detektionslimit) und 42.000 ng/l. Das Detektionslimit (= LOD, Level of Detection) unterscheidet sich je nach Messmethode und liegt in diesem Fall verhältnismäßig hoch. Werte unter dieser Schwelle fallen dadurch aus der Betrachtung. Für genauere Messungen müssten die einzelnen Proben angereichert werden, was im Zuge der Erhebung dieses Datensatzes nicht gemacht wurde. Auf diese Problematik wird im weiteren Verlauf noch genauer eingegangen.

Die Karten der Abbildungen 14 und 15 zeigen den Freistaat Sachsen. Eingezeichnet sind die größten Städte (> 30.000 EW) sowie die Oberflächengewässer. Die Säulendiagramme zeigen die jeweiligen Messwerte zur OFG-Belastung. Die Karte der Abbildung 14 zeigt alle Messstellen aus dem Jahr 2019, die einen Messwert von 1000 ng/l oder höher aufwiesen (Maximalwert bei 42.000 ng/l). Dieser Schwellenwert wurde gewählt, da das Gros an bisher durchgeführten Gd-Messungen in deutschen Oberflächengewässern Werte in einem Bereich von meist deutlich unter 1.000 ng/l aufweist, so etwa bei Kulaksiz und Bau (2011, S. 1880). Diese Konzentrationen finden sich meist nur im Bereich von Kläranlagen oder Krankenausabwässern (siehe hierzu Tabelle A. 4 im Anhang). Der Schwellenwert von 1.000 ng/l zeigt also im deutschlandweiten Vergleich außergewöhnlich hohe Ausreißer, die es zu erklären und einzuordnen gilt. Allerdings ist hier deutlich zu betonen, dass es insgesamt nur sehr wenige, flächendeckende Messwerte gibt.

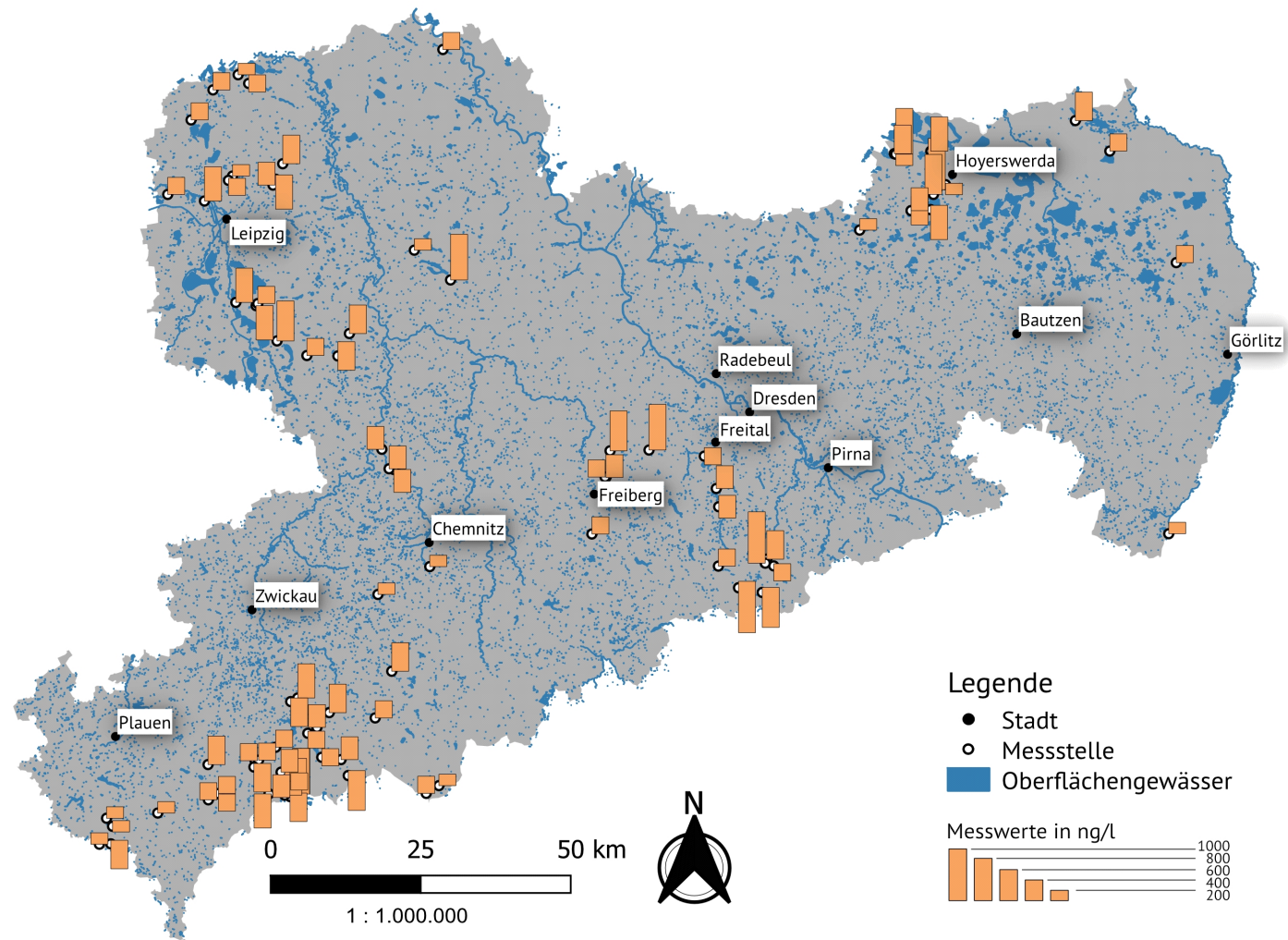
Auffällig ist die Ballung hoher Gd-Messwerte im Bereich des Lausitzer Tagebaureviers rund um Hoyerswerda, sowie die Werte im Erzgebirge in der Region Freiberg. Die gemessenen 42.000 ng/l übersteigen nahezu alle per Literatur-Screening gefundenen Messwerte von urbanen Gewässern. So liegt dieser Wert beispielsweise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

Abbildung 15 zeigt komplementär zur vorherigen Karte die OFG-Werte  $> 20$  ng/l und  $< 1.000$  ng/L. Dieser Wertebereich entspricht den in anderen Studien gefundenen Vergleichswerten (Künnemeyer et al. 2009, S. 2886; Ebrahimi und Barbieri 2019, S. 19). Im Gegensatz zur ersten Karte zeigt sich hier eine deutlich weiträumigere und homogenere Verteilung ohne markante Ballungen.

Nun zeigen diese zwei Karten also durchaus auffällige Unterschiede in der räumlichen Verteilung. Eine Interpretation des anthropogenen Einflusses auf die Messwerte erfordert jedoch Wissen zur geogenen, also zur natürlich vorhandenen Grundbelastung ohne einen potenziellen Eintrag durch den Menschen. Die geogene Konzentration kann durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden, etwa durch die Geologie, also den Aufbau und der Zusammensetzung der Erdkruste in dieser Region. Ebenso können diverse Formungsprozesse an der Erdoberfläche, so etwa die klimatischen und erosiven Bedingungen vor Ort, zur Verwitterung des Gesteins und damit zur Freisetzung von Gd führen (Bahlburg und Breitzkreuz 2017, S. 16).



**Abbildung 14: Gd-Messwerte ( $\geq 1.000$  ng/l) in Oberflächengewässern in Sachsen für das Jahr 2019**  
 Daten: LfU SN 2020; LfU SN 2021



**Abbildung 15: Gd-Messwerte (< 1.000 ng/l) in Oberflächengewässern in Sachsen für das Jahr 2019**  
 Daten: LfU SN 2020; LfU SN 2021

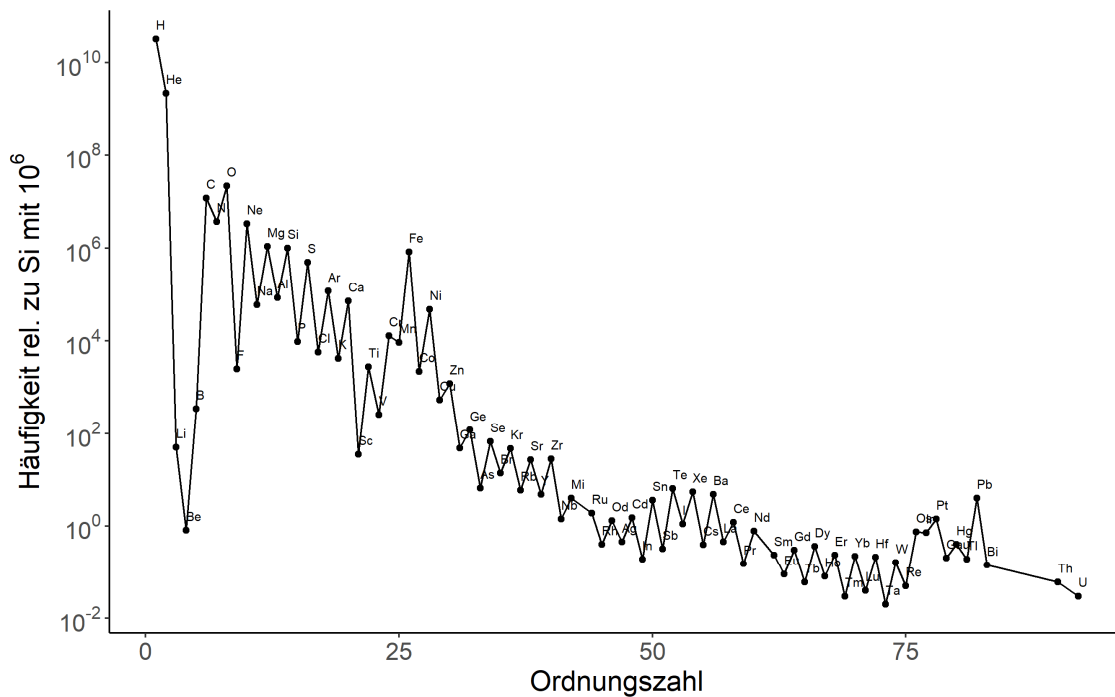
#### 4.6.1 Klassisches methodisches Vorgehen

Die naheliegende Berechnungsformel der anthropogen mobilisierten Gd-Menge ( $Gd_{anth}$ ) wäre demzufolge die Differenz aus der Gesamtmenge ( $Gd_{total}$ ) und der geogenen Menge ( $Gd_{geo}$ ):

$$Gd_{anth} = Gd_{total} - Gd_{geo} \quad (4)$$

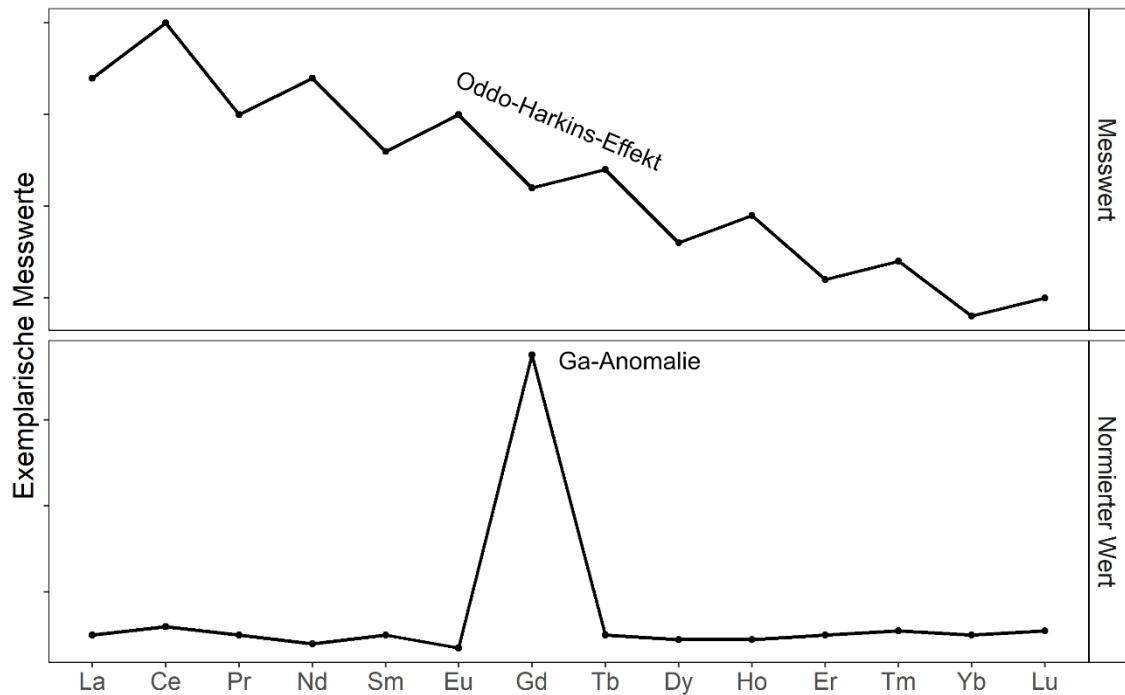
Solche Messungen von präanthropogenen Bedingungen sind jedoch natürlich nicht vorhanden. Meist würden die Gd-Werte im einstelligen ng/l-Bereich liegen, was je nach Region allerdings stark variieren und daher nicht allgemeingültig verwendet werden kann (Kümmerer and Helmers 2000, S. 576; Ebrahimi und Barbieri 2019; Lindner 2017, S. 32).

Eine Möglichkeit zur indirekten Abschätzung des anthropogenen Einflusses auf die Konzentrationen ist der Vergleich mit anderen Elementen der Seltenen Erden. Denn aufgrund ihrer chemischen Ähnlichkeit zeigen die Elemente dieser Gruppe, ausgenommen Cer und Europium, auch in der Umwelt ein weitestgehend kohärentes Verhalten. Beim Auftragen von natürlichen Messwerten der Seltenerdelemente zeichnet sich ein charakteristisches „Zick-Zack“ Muster ab. Dieses Muster wird durch den Oddo-Harkins-Effekt beschrieben. Dieser erklärt die gesetzmäßige Verteilung von Elementen im Universum, wonach die Häufigkeit der Elemente mit zunehmender Ordnungszahl und zunehmender Größe tendenziell abnimmt. Bei benachbarten Elementen im Periodensystem gilt aufgrund bestimmter stellarer Entstehungsmechanismen jedoch, dass Atome mit gerader Ordnungszahl in der Regel häufiger vorkommen als Atome mit ungerader Ordnungszahl (North 2008, S. 602). Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 16 die Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem mit ebenjener tendenziell abfallenden Linie mit Zickzack-Verlauf, sortiert nach ihrer Ordnungszahl.



**Abbildung 16: Relative Häufigkeit der Elemente im Sonnensystem**

Diese charakteristische Form macht es jedoch unmöglich, etwaige Anomalien in der Häufigkeit visuell zu erkennen. Daher werden die SEE-Konzentrationen in der Regel entsprechend einer geologischen Referenz normiert. Für Wasserproben sind die beiden Referenzen Post-Archean Australian Shale (PAAS) (Mc Lennan 1989) und North American Shale Composite (NASC) (Gromet et al. 1984) die gebräuchlichsten. Für europäische Wasserproben wurde kürzlich von Bau et al. (2018) eine neue Referenz, die European Shale (EUS) empfohlen und quantifiziert. Die gemessenen Werte werden zu diesen theoretischen Referenzwerten in Bezug gesetzt, um davon auffällig abweichende Werte zu erkennen. Hierbei wird von Normalisierung gesprochen. Visuell führt dies zu einer Glättung der Kurve, in der potenzielle anthropogene Anomalien als Ausschläge deutlicher zu erkennen sind, wie Abbildung 17 beispielhaft zeigt.



**Abbildung 17: Illustration von SEE-Messwerten und den entsprechend normierten Messwerten mit deutlicher Gd-Anomalie (fiktives Beispiel)**

Dieses seit dem Vorschlag von Bau und Dulski (1996) gebräuchliche Vorgehen ist im Fall der sächsischen Daten jedoch nicht möglich, da lediglich Messdaten für Gadolinium sowie Lanthan (La) vorliegen. Zumindest für ein paar weitere Elemente dieser Reihe wären Messungen nötig, um einen normierten Kurvenverlauf darstellen und eine potenzielle Gd-Anomalie erkennen zu können. Hier, ebenso wie für viele andere Regionen gilt es also künftig mehr Daten zu erheben.

#### 4.6.2 Alternativer methodischer Ansatz

Um dennoch eine Aussage treffen zu können wurde für diese Arbeit ein leicht abgewandeltes Vorgehen gewählt, für das die vorhandenen Daten zu Gd und La ausreichend sind. Diese ist mit Unsicherheiten verbunden, was allerdings auch für das klassische Vorgehen gilt. Denn auch bei Letztgenanntem geht es lediglich darum, visuell eine Anomalie aufzuzeigen, die anschließend interpretiert werden muss. Exakte quantitative Daten zur Ableitung konkreter Handlungsoptionen werden hierbei nicht gewonnen. Gleiches gilt für den hier erstellten Ansatz.

Grundlage dieses Vorgehens ist, dass die Messwerte der einzelnen SEE in einer geographischen Region in einem spezifischen Verhältnis zueinander stehen, eine



Tatsache die auch in der beschriebenen Normierung ausgenutzt wird. Abweichungen von diesem Verhältnis zeigen demzufolge eine Anomalie an. Je größer die Abweichung, desto größer die Anomalie. Die Beziehung der Elemente bzw. ihrer Messwerte lässt sich sowohl statistisch als auch visuell aufzeigen. Zusammengefasst lassen sich folgende Möglichkeiten sowie Einschränkungen dieser Herangehensweise für dieses spezielle Fallbeispiel formulieren:

### **Grundlagen & Einschränkungen**

---

Die Messwerte unterschiedlicher SEE in einer Region korrelieren aufgrund ihrer chemischen Kohärenz miteinander, diese Korrelation lässt sich statistisch aufzeigen.

---

Menschlicher Einfluss, etwa durch den Eintrag einzelner SEE, kann diese Korrelation stören; demzufolge gilt: je geringer die Korrelation, desto höher der anthropogene Einfluss.

---

Es ist nicht ausgeschlossen, dass auch geogene Besonderheiten zu einer geringen Korrelation führen.

---

Ein Korrelationswert kann keine spezifischen Besonderheiten einzelner Messwerte aufzeigen.

---

Die visuelle Darstellung der normierten Messwerte zeigt Anomalien in Form von Ausschlägen.

---

Es werden nur Messstellen einbezogen, an denen alle zu betrachtenden Elemente untersucht wurden (in diesem Fall Gadolinium und Lanthan); falls an einer Messstelle nur eines der beiden Elemente untersucht wurde, kann keine Korrelation untersucht werden.

---

Es werden nur Messwerte  $\geq$  LOD (Detektionslimit) einbezogen. Dies verringert die Stichprobengröße und die Zahl der Freiheitsgrade.

---

Um diesen Einschränkungen entgegenzuwirken könnten weiterführende statistische Methoden wie die Maximum-Likelihood-Abschätzung angewendet werden.

---

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass diese Kombination aus statistischer und visueller Analyse dabei hilft, Aussagen zu Messwerten in einer geographischen Region zu treffen. Eine Interpretation der Erkenntnisse sollte aber immer unter Einbezug der räumlichen Gegebenheiten vorgenommen werden. Eine hohe Korrelation deutet auf einen geogenen Zusammenhang hin. Eine geringe Korrelation deutet dagegen auf anthropogenen Einfluss hin. Diese Zusammenhänge sind hinfällig, sobald die untersuchten Elemente (hier Gd, La) unwahrscheinlicherweise in gleichem Maße

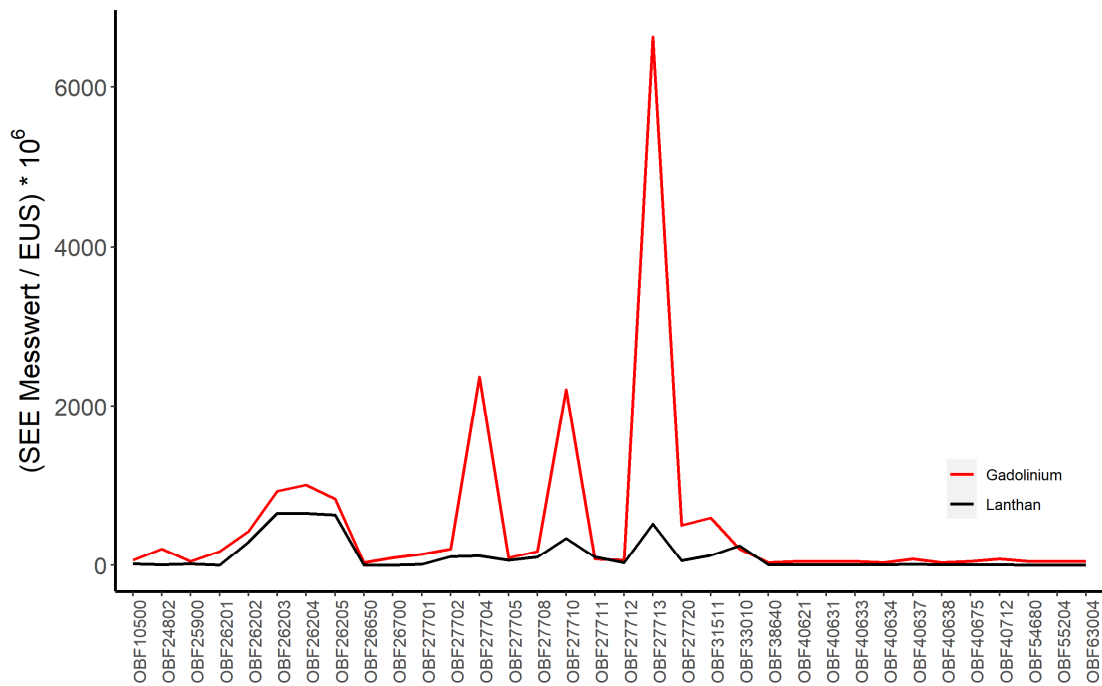
anthropogen in die untersuchten Gewässer eingeleitet werden. Einzelne Anomalien können in der visuellen Darstellung erkannt werden, erfordern aber weiterhin eine Interpretation.

Im Unterschied zur klassischen Methode wird hier also nicht eine Messstelle auf möglichst viele SEE untersucht. Stattdessen werden möglichst viele Messstellen auf lediglich zwei SEE untersucht. Die Aussagekraft hinsichtlich des anthropogenen Gd-Eintrages ist daher als geringer als bei der Untersuchung vieler SEE einzuordnen.

#### **4.6.3 Analyse der Gadolinium-Belastung in sächsischen Oberflächengewässern**

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse des Untersuchungsraums Sachsen. Die entsprechenden Daten beinhaltet Tabelle A. 5 im Anhang. Nach der Bereinigung der Daten (Einheitenumrechnung, Normierung über die European Shale (EUS) Referenz, Aussortierung von Messwerten  $< LOD$ ) blieben 34 relevante Messstellen übrig. Die Messwertverläufe zeigen ein größtenteils kohärentes Verhalten mit ein paar wenigen sehr auffälligen Ausschlägen. Wären die Linien exakt gleich verlaufend, dargestellt also als zwei sich überlagernde Linien, so würden die Messungen aufgrund der Normierung mittels der EUS-Referenz dem europäischen Durchschnitt entsprechend. Dies ist hier offensichtlich nicht der Fall. Die Gadolinium-Messwerte liegen bei nahezu allen Messstellen über dem Linienverlauf von Lanthan. Die Gd-Werte sind also grundsätzlich leicht erhöht. Dies kann sowohl geogene als auch anthropogene Gründe haben. Auffällig sind die drei Gd-Spitzen an den Messstellen OBF27704, OBF27710, OBF 27713. Der Wert der letztgenannten Messstelle liegt beispielsweise mehr als 10mal höher als zu erwarten wäre.

Die statistische Analyse (Tabelle 7) zeigt eine signifikante Korrelation von 0,547 ( $p$ -Wert = 0,0008;  $\alpha = 5\%$ ), was einer mittelstarken Korrelation entspricht. Auch ohne die visuelle Darstellung kann auf dieser Grundlage angenommen werden, dass zu erklärende Abweichungen vom statistisch erwarteten Verlauf der Gd- und La-Werte vorhanden sind.



**Abbildung 18: Normalisierte Messwerte von Gadolinium und Lanthan in OFG im Freistaat Sachsen**

**Tabelle 7: Korrelationsanalyse der normierten Gd- und La-Messwerte, nach Pearsons Produkt-Moment-Korrelation**

Stichprobenumfang n	34
Korrelationswert c	0,5474683
Signifikanzwert p	0,0008051

#### 4.6.4 Interpretation und kritische Einordnung der Ergebnisse

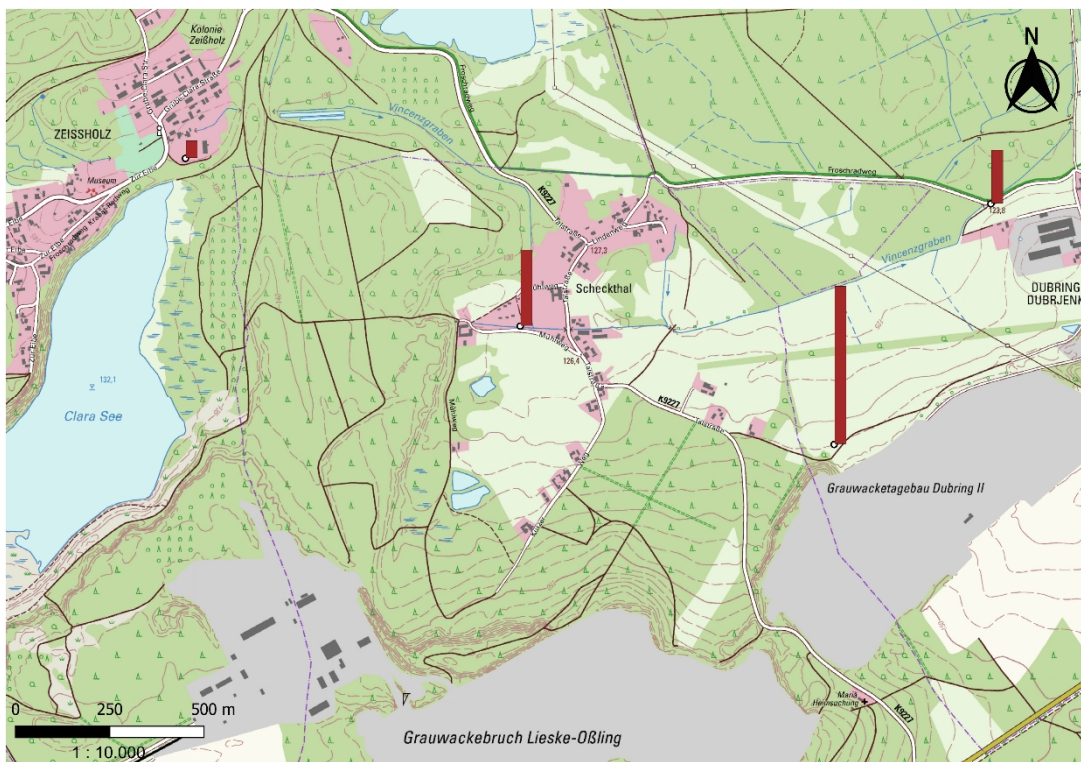
Die Analyse zeigt also diverse Erkenntnisse und Auffälligkeiten, die es zu interpretieren gilt. Zum einen zeigen die Messwerte per se, dass es extrem hohe Gd-Ausreißer gibt. Diese können, insbesondere im Vergleich mit Messwerten aus anderen Regionen, nicht allein durch den Eintrag von Kontrastmitteln erklärt werden. Zudem ist das Detektionslimit bei diesen Daten zu hoch angesetzt, um Kontrastmittel auch in ihrer niedrigeren Konzentration nachzuweisen. Erfahrungsgemäß liegen diese meist im zwei- bis dreistelligen Nanogramm-Bereich pro Liter Wasser (siehe Tabelle A. 4 Anhang). Lediglich an bestimmten Orten wie Kläranlagenausflüssen oder Krankenhaus-Abwasserkanälen werden vier- bis sogar hohe fünfstelligen Werte gemessen (Lerat-Hardy

et al. 2019, S. 416). Die sächsischen Extremwerte treten aber nicht in Agglomerationsgebieten, geschweige denn in eben erwähnten Abwässern auf, sondern in der Bergbauregion Oberlausitz sowie im Erzgebirge bei Freiberg (Karte Abbildung 15). Die Messwerte unterhalb von 1.000 ng/l sind dagegen deutlich homogener verteilt. Allerdings verhindert das hohe LOD eine genaue Analyse zum Herausarbeiten von Anomalien auf niedrigem Niveau. So weisen beispielsweise auch große sächsische Flüsse wie Elbe und Mulde kaum Messwerte auf, da die Konzentration durch die Wassermassen verdünnt werden. Um hier Analysen anstellen und Aussagen treffen zu können muss die Datenverfügbarkeit künftig verbessert werden, beispielsweise durch ein dichteres Messstellennetz und niedrigere Detektionslimits.

Eine Verbindung der erhöhten Messwerte zu den Bergbautätigkeiten liegt folglich nahe und kommt nicht gänzlich überraschend, was ein Blick auf die Vielzahl an Studien und Berichten zur erhöhten Schwermetallbelastung von sächsischen Gewässern, bedingt durch die Bergbau-Historie, verdeutlicht (Schräber et al. 1990; Hoyer 2016; Sundermann et al. 2018). Verschiedenste (Schwer-)Metalle werden durch den Aufschluss und Abbau von Erzkörpern durch Grundwasser oder eintretendes Niederschlags- und Oberflächenwasser als sogenanntes Grubenwasser ausgeschwemmt (Baacke 2001, S. 1). Durch das Absenken des Grundwasserspiegels im Zuge des Bergbaus werden neue unterirdische Flächen für die Reaktion mit Sauerstoff freigelegt. Durch verschiedene Verwitterungsformen werden im Erz enthaltene Metalle mobilisiert und treten insbesondere in gelöster Form aus den Gruben aus, und das teils noch für Jahrzehnte nach der Bergwerksstilllegung (Beuge et al. 1994). Als Quellgesteine kommen laut Kluge et al. (1998, S. 154) beispielsweise Graugneis und karbonatische Erzgesteine in der Freiburger Region in Frage. Rund um Hoyerswerda treten dagegen vermehrt SEE-führende präkambrische Alkaligesteine wie Granodiorit und Grauwacken auf (Greif et al. 2002, S. 10).

Bleibt die Frage nach den drei extremen Gd-Anomalien bei den Messstellen OBF27704, OBF27710 und OBF 27713. Hier hilft ein Blick auf die genauen Örtlichkeiten, die in der Karte der Abbildung 19 eingezeichnet sind:

OBF27704 und 27710 sind Messstellen am Vincenzgraben. Dieser entwässert die Grube Clara. Dabei handelt es sich um den mittlerweile mit Wasser gefüllten, ehemaligen Braunkohletagebau Grube Clara III. Nach der Stilllegung wurde die Grube bis in die 1990er Jahre für die Verkipfung von Asche aus einer Brikettfabrik und von Abraum aus einem nahegelegenen Grauwackesteinbruch genutzt (LMBV 2013, S. 31). Am Entwässerungsgraben (sog. Sumpfungsgraben) ebendieses Steinbruchs liegt auch die Messstelle OBF27713 (LMBV 2013, S. 27).



Datenbasis: Geoportal Sachsen GeoSN 2021

**Abbildung 19: Hohe Messwerte (rote Balken) in der Region Dübring, Sachsen; Einordnung in den geographischen Kontext**

Quelle: LfU SN 2020; LfU SN 2021

Es lassen sich also letztlich mehrere Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die Oberflächengewässer im Freistaat Sachsen verzeichnen teils extrem hohe Gadolinium-Belastungen
- Diese sind zu einem hohen Grad auf die Geologie und die Bergbauhistorie zurückzuführen

- Eine Untersuchung der Kontamination durch Gd-haltige Kontrastmittel wird dadurch erschwert
- Die angewandte Methode aus Korrelation der Messwerte und raumbezogener Betrachtung der Daten kann zur Interpretation der Messwerte dennoch als geeignet angesehen werden
- Ein niedrigeres LOD der Messwerte würde auch eine Analyse im Mengenbereich der Kontrastmittel ermöglichen

Bezüglich Dissipation schreibt Helbig (2019, S. 143): „Für die Vermeidung dissipativer Verluste es ist [sic] wichtig, nicht nur das Ausmaß der dissipativen Verluste insgesamt zu bestimmen, sondern auch die Prozesse im Wertschöpfungssystem zu identifizieren, welche die dissipativen Verluste erzeugen.“ Das Beispiel der hohen Gd-Konzentrationen in sächsischen Gewässern zeigt, dass die Definition womöglich sogar noch weiter gefasst werden muss. Denn die Wertschöpfung der sächsischen Ressourcen ist in vielen Bereichen seit Jahren eingestellt, so etwa das angesprochene Beispiel der Grube Clara. Auch Jahre und Jahrzehnte nach einer Wertschöpfung können Stoffe, bedingt durch frühere anthropogene Aktivitäten, dissipieren. Gerade im Vergleich zu den aktuellen umweltbezogenen Forschungen im Kontext der Gd-haltigen Kontrastmitteleinträge in Gewässer zeigt sich anhand dieses Beispiels, dass andere potenzielle Quellen in eine umfassende Betrachtung miteinbezogen und für etwaige Handlungsoptionen zur Reduzierung der Einträge integriert werden müssen.

#### 4.7 Erkenntnisse aus der Fallstudie und Ableitung von Handlungsoptionen

Das Element Gadolinium zeigt sich rückblickend 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 und 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 zeigt. Auf Grundlage einer globalen Betrachtung von elementaren Stoffströmen kann keinerlei Aussage darüber getroffen werden, welche konkreten Implikationen mit bestimmten Nutzungsformen auf lokaler Ebene einhergehen.

Die maßgeschneiderte Synthese und der hochspezifische Einsatz von Funktionsmaterialien wie Gd in seiner Form als Kontrastmittel erfordert eine genaue Charakterisierung im Hinblick auf unbeabsichtigte chemische Reaktivitäten in der natürlichen Umwelt. Daher wird die Bestimmung der Trajektorien mobilisierter Ressourcen im Raum immer wichtiger für eine effiziente Nutzung mit möglichst minimalen dissipativen Strömen, ebenso wie zur Reduzierung möglicher Risiken in Bezug auf Bioaktivität und Biotoxizität (Moore et al. 2020, S. 1).

Das in dieser Fallstudie gewählte Vorgehen beginnt mit einer Materialflussanalyse. Diese erlaubt es auf globaler Ebene alle relevanten Massenströme über die verschiedenen Schritte einer allgemeinen Wertschöpfungskette aufzuzeichnen und zu quantifizieren. Auf Basis dieser Massenbilanz können zudem die dissipativen Verlustmengen aus dem System quantifiziert und den verschiedenen Empfangsmedien zugeordnet werden. Hier zeigt sich, dass 100% des aus der Erdkruste geförderten Gadoliniums im Laufe der anthropogenen Mobilisierung und Funktionalisierung letztlich verloren gehen und sich einer weiteren Nutzung innerhalb der Technosphäre entziehen.

Die Geschichte dieses Stoffes kann auf diese Art erzählt und aufgezeigt werden, von der Förderung der SEE-Erze, über die Raffination, die Herstellung von Produkten, die Nutzung dieser Produkte auf der ganzen Welt, bis hin zu den verschiedenen End-of-Life Szenarien. Doch der Verlauf von Dissipation kann zumeist nicht verallgemeinert werden. Die Einflussmöglichkeiten auf die Verteilungspfade und Implikationen sind zu vielfältig und unterscheiden sich von Ort zu Ort. Dies zeigt das Screening bisher durchgeführter Untersuchungen von anthropogen bedingten Gd-Anomalien in Gewässern sowie die in Kapitel 4.6 angestellte Analyse zur Gd-Belastung sächsischer Oberflächengewässer deutlich. Zwar können weltweit, insbesondere in stark industrialisierten Regionen mit moderner Gesundheitsinfrastruktur erhöhte Konzentrationen in Oberflächen-, Grund- und Trinkwasser festgestellt werden. Die spezifischen Ausprägungen und Hintergründe sind aber durchaus divers. So zeigt das Beispiel Sachsen, dass Konzentrationsanomalien nicht automatisch dem Eintrag von Kontrastmitteln zuordnet werden können. Eine genauere Betrachtung der geographischen Gegebenheiten sowie der kulturell-historischen Landnutzung zeigt hier weitere dissipative Eintrittspfade in die aquatische Umwelt.

Gleichzeitig zeigen weltweite Untersuchungen (Lawrence et al. 2009; Nozaki et al. 2000; Hatje et al. 2016) den steigenden Anteil von gadoliniumhaltigen Kontrastmitteln an der Gewässerbelastung, insbesondere in Agglomerationsräumen des Globalen Nordens. Städtische Wasserversorger und Kläranlagen sehen sich einer zunehmenden Herausforderung gegenüber, die künftig noch zunehmen wird. Dabei spielt Gd für diese Akteure quantitativ nur eine untergeordnete Rolle. Sogenannte anthropogene Spurenstoffe, also



synthetische Materialien und Verbindungen, welche die Natur in dieser Art nie hervorbringen würde, gelangen in immer größerer Vielzahl bei gleichzeitig geringer Konzentration im µg/l oder ng/l-Bereich in die aquatische Umwelt. In der EU sind derzeit ungefähr 100.000 chemische Verbindungen zugelassen. Dazu zählen Human- und Veterinärpharmaka, Waschmittelinhaltsstoffe, Kosmetika und Pflanzenschutzmittel (Barjenbruch et al. 2015, S. 8–9). In diese Kategorie fallen auch Kontrastmittel-Einträge. Die gemessenen Konzentrationen können für den Menschen häufig als unbedenklich erachtet werden. Kumulative Effekte, Persistenzen, Wechselwirkungen zwischen den Stoffen, Transmetallierung, Metabolisierung oder Umweltdegradation können häufig aber nicht ausgeschlossen werden (Ahting et al. 2018, S. 16), wie das Beispiel des Aufbrechens bestimmter Gadolinium-Chelate durch UV-Strahlung zeigt (Kap. 4.5.1). Einzelstoffbewertungen sind mit Blick auf die enorme Vielzahl an Stoffen nicht ausreichend, Wechselwirkungen und Stoffgemische treten in den Vordergrund (Springer Professional 2018).

Wasserrechtliche Vorgaben im Sinne von maximalen Eintragsmengen oder Maximalkonzentrationen fehlen für diese Stoffgruppe häufig. Eine rechtliche Verpflichtung zur Reduzierung und Vermeidung von Mikroverunreinigungen ergibt sich lediglich für sogenannte prioritäre, nachweislich für die Umwelt nachteilige Stoffe, aus der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) beziehungsweise deren nationalen Umsetzung durch das Wasserhaushaltsgesetz (Ahting et al. 2018, S. 8).

Für ein nachhaltiges Management von unerwünschten Stoffen, die nicht in diese Kategorie fallen, bedarf es dennoch weiterer Handlungsoptionen im Sinne des Vorsorgeprinzips. Zum einen könnten diese Stoffe auf eine Beobachtungsliste gesetzt werden, was teilweise schon auf EU- und nationaler Ebene gemacht wird (bspw. EU Surface Water Watch List oder LAWA Beobachtungsliste). Gd-Kontrastmittel sind hierauf allerdings nicht zu finden. Am Landesamt für Umwelt Bayern werden aktuell potenzielle aquatische Gd-Mobilitätspfade am Beispiel der Uferfiltration untersucht (zum aktuellen Zeitpunkt unveröffentlicht). Dies kann ein wichtiger Bestandteil zur Untersuchung von Dissipationspfaden in der Umwelt sein.

Für eine umfassendere Behandlung von Spurenstoffen bedarf es grundsätzlich eines mehrstufigen Managements, von der Anwendung der Stoffe, über die Eintrittspfade in die Umwelt, bis hin zu nachgelagerten Maßnahmen, so etwa in Kläranlagen. Erster Ansatzpunkt ist die Minimierung der Anwendung von Kontrastmitteln auf die medizinische Notwendigkeit. Übertherapien und Überdiagnosen finden sich auch bei der MRT-Nutzung (Emery et al. 2013).

Die punktuellen Einträge in die aquatische Umwelt sind bei Kontrastmitteln auf zwei Schwerpunkte einzugrenzen. Ein Teil gelangt bei stationärer Anwendung über Krankenhausabwässer in das kommunale Abwassersystem. Der weitaus größere Anteil an MRT-Untersuchungen findet allerdings ambulant statt. Patient\*innen verlassen nach der Untersuchung die Klinik, wodurch das ausgeschiedene KM über den Haushaltsabfluss in das Abwassersystem gelangt. Dieser dezentrale Stoffeintrag lässt Ansätze zur Verringerung des Gd-Eintrages in die Umwelt als herausfordernd erscheinen. Allerdings kann sich die kurze Verweildauer im Körper (~24h) zunutze gemacht werden. In Deutschland fanden beispielsweise in den letzten Jahren Studien zum Auffangen von kontrastmittelhaltigem Urin mittels Urinbeutel statt (Niederste-Hollenberg und Schuler 2020). Hierbei handelte es sich zwar um Röntgenkontrastmittel, das Vorgehen lässt sich aber direkt übertragen. Als wichtigste Maßnahme neben der Ausgabe von entsprechenden Beuteln wurde dabei die Schaffung von Bewusstsein und Akzeptanz bei den Patienten identifiziert. Schulung und Weiterbildung sowie ein verstärkter Umweltbezug in Ausbildung und Studium von medizinischem Personal sollte unterstützend gefördert werden.

Kläranlagen stellen die finale Möglichkeit zur Abtrennung von Gd-KM dar. Wie in Kapitel 4 beschrieben, findet in Klärwerken mit drei Reinigungsstufen (mechanische, biologische, chemische) nahezu keine Sequestrierung von Spurenstoffen wie Gadolinium statt (Verplanck et al. 2010, S. 3878). Bisher sind in der Abwasserverordnung (AbwV) auch keine rechtlichen Anforderungen zu Mikroverunreinigungen enthalten.

Eine der aktuell wenigen Möglichkeiten zur Abtrennung von Gadolinium im Zuge einer Wasseraufbereitung ist die Umkehrosmose (Lawrence et al. 2010, S. 691). Eine solche vierte Reinigungsstufe kann zu einer deutlichen Reduzierung anthropogener Spurenstoffe führen. Die Anwendung von Umkehrosmose findet aber sehr selten statt, da die

Energiekosten enorm hoch sind (UBA 2015, S. 18). Daher wird in Deutschland vermehrt auf Ozonungs- und Aktivkohleverfahren gesetzt, die für eine Abtrennung von medizinischen Mikroverunreinigungen allerdings wenig geeignet sind (Ahting et al. 2018, S. 45). Zudem werden nur schrittweise einige wenige große kommunale Kläranlagen mit dieser zusätzlichen Reinigungsstufe ausgerüstet (Ahting et al. 2018, S. 43).

Insgesamt zeigt sich im Fall von Gd-haltigen KM somit eine dreistufige Maßnahmenstruktur: quellenorientierte, anwendungsorientierte und nachgelagerte Maßnahmen, die hier nochmals kurz zusammengefasst werden:

- **Quellenorientiert:** Sensibler Umgang mit der Anwendung von Kontrastmitteln; Entwicklung von Substituten, die aber womöglich mit höheren Kosten und/oder einer Qualitätsminderung des Kontrastes im Vergleich zu Gd einhergehen.
- **Anwendungsorientiert:** Auffangen von Urin nach der Behandlung; begleitend können hier weitere Maßnahmen sinnvoll sein, bspw. Schulung von medizinischem Personal, Sensibilisierung von Patienten, Installation gesonderter Toiletten in medizinischen Einrichtungen.
- **Abtrennungsorientiert:** Sequestrierung aus der aquatischen Umwelt; Einführung neuer Reinigungsstufe mit neuen Technologien wie Umkehrosmose notwendig.

Die Gliederung dieser drei Punkte lässt sich auch als empfohlene Vorgehenshierarchie interpretieren. Grundsätzlich gilt es quellenorientierte Strategien zu bevorzugen, statt auf Technologien wie die vierte Reinigungsstufe zu setzen, die mit weiteren Rohstoffbedürfnissen und weiteren Risiken einhergehen. Eine Verringerung des Eintrags in aquatische Systeme verringert auch die Notwendigkeit von Abtrennungsmaßnahmen in Kläranlagen.



## 5 Fallbeispiel Helium

Helium, das zweite Fallbeispiel dieser Arbeit, findet ebenfalls im Gesundheitswesen Anwendung und wird ebenso wie Gadolinium im Rahmen der Magnetresonanztomographie benötigt. Der Grund hierfür liegt einmal mehr in den einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften des Elements. So hat Helium die niedrigste Siedetemperatur aller Elemente im Periodensystem und kann auf  $-269^{\circ}\text{C}$  heruntergekühlt werden, ohne zu gefrieren. Damit eignet es sich hervorragend zum Kühlen des supraleitenden Magneten im MRT (Thomas 2014, S. 191). Zur Erinnerung: Der elektrische Widerstand von Metallen (und auch einigen anderen Materialien) sinkt mit abnehmender Temperatur. Doch einige dieser Materialien weisen eine ihnen ganz spezifische Sprungtemperatur auf. Unterhalb dieser Temperatur fällt der elektrische Widerstand sprunghaft auf nahezu Null ab. Diese Materialien sind sogenannte Supraleiter (Buckel und Kleiner 2012, S. 1–3). Das bis heute meistverwendete Metall für diese Zwecke ist Niob, das in einer Legierung mit Titan zu elektrischen Supraleitermagneten für MRT verarbeitet wird. Niob hat eine Sprungtemperatur von  $-264^{\circ}\text{C}$  und muss somit mit Helium auf diese Temperatur heruntergekühlt werden. Das Kühlmittel (hierfür kommen natürlich nur Gase bzw. Flüssigkeiten in Frage) mit dem zweittiefsten Siedepunkt ist Wasserstoff mit  $-253^{\circ}\text{C}$ , das für die Kühlung von Niob also schon nicht mehr ausreichend ist.

Diese Eigenschaft macht Helium zu einem essenziellen Stoff für das Gesundheitswesen und ist bisher und auch auf absehbare Zeit nicht substituierbar. Erschwerend steht dem aber die Tatsache gegenüber, dass Helium auf der Erde nur sehr selten vorkommt, und das obwohl es im gesamten Universum das zweithäufigste Element ist (Bradshaw und Hamacher 2013, S. 2694). Kapitel 5.3 geht auf diesen scheinbaren Widerspruch noch genauer ein. Ein kurzer Blick auf die Geschichte der Heliumproduktion verdeutlicht das dichotome Verhältnis aus essenzieller Bedeutsamkeit und begrenzter Verfügbarkeit.

## 5.1 Geschichte der Heliumproduktion

Die Geschichten von Mensch und Helium verknüpften sich erst vor relativ kurzer Zeit, im Jahr 1903 in Dexter, Kansas. Das Gas führte damals zu großer Enttäuschung, als ein großes Erdgasreservoir durch eine Bohrung erschlossen wurde. Bei der feierlichen Eröffnung der Leitung sollte mittels einer Flamme das Gas entzündet werden. Stattdessen löschte das zugeleitete Gas die Flamme jedoch aus (Nuttall 2014, S. 15). Das nun als „Windgas“ bekannte Gasgemisch wurde an der University of Kansas genauer untersucht, wobei sich eine Zusammensetzung von 72% Stickstoff, etwas Methan und einem ungewöhnlich hohen Anteil von 1,84% Helium ergab (Nuttall et al. 2013, S. 33). In den nächsten Jahren wurden weitere Bohrlöcher in Kansas sowie Missouri auf ihren Heliumgehalt getestet. Alle Lagerstätten wiesen einen Heliumanteil auf, wenn auch meist deutlich niedriger als der in Dexter. Doch eine Verwendung für dieses extrem reaktions-träge Gas fand man in den folgenden Jahren nicht.

Ausschlaggebend für die Gründung einer Helium-Industrie war der Erste Weltkrieg. Im Jahr 1914 erschien vom deutschen Chemiker Austerweil das Buch *Die angewandte Chemie in der Luftfahrt*, in dem er die Vorteile des nichtbrennbaren Heliums gegenüber Wasserstoff für Zeppeline erläuterte. Gleichzeitig wurde zu Beginn des Krieges ein deutscher Zeppelin angegriffen, dessen gasgefüllter Auftriebskörper jedoch trotz vieler Treffer kein Feuer fing. Daraufhin fühlten sich insbesondere das Vereinigte Königreich sowie etwas später auch die USA in ihrer Annahme bestätigt, dass Deutschland über Helium verfügte und hierdurch einen luftstrategischen Vorteil gegenüber den Alliierten besaß. Auch wenn sich diese Annahme als falsch herausstellte (was letztlich durch das Unglück der mit Wasserstoff gefüllten Hindenburg im Jahr 1937 deutlich wurde), kann dies dennoch als der Startpunkt für einen Wettkampf um die Heliumproduktion gesehen werden. Die industrielle Produktion begann allerdings erst einige Jahre nach dem Ersten Weltkrieg (Nuttall 2014, S. 17–25). Nichtsdestotrotz hielt man an der Strategie fest, die Heliumproduktion zu industrialisieren. Das wurde in den USA insbesondere durch den *Helium Conservation Act* von 1925 vorangetrieben, in dem Helium als kritischer Kriegsrrohstoff definiert wurde, sowie den *Helium Control Act* von 1927, in dem der Verkauf von Helium an nichtstaatliche Abnehmer sowie an andere Staaten untersagt wurde. Die

zentrale staatliche Institution zur Heliumförderung war fortan das US Bureau of Mines (BOM). Allerdings nahm der Heliumverbrauch nicht den prognostizierten Verlauf. Einige Ereignisse, wie das Hindenburg-Unglück oder auch Unfälle der großen amerikanischen Luftschiffe in den 30er Jahren führten zu einem starken Rückgang der Nachfrage. Auch der Zweite Weltkrieg führte zu keiner erhöhten Nachfrage. Statt Luftschiffen gewannen in dieser Zeit die deutlich überlegenen Flugzeuge immer mehr an Bedeutung. All das führte letztlich im Januar 1945 zu dem Entschluss, Produktionsüberschüsse im Erdgasfeld „Cliffside“ nahe Amarillo in Texas einzulagern (Nuttall 2014, S. 33). Dies war der Beginn der sogenannten US Federal Helium Reserve, die bis heute existiert.

In der Folgezeit stieg der Bedarf wieder drastisch an. Verantwortlich waren neue Anwendungsmöglichkeiten durch die Produktion von bis dahin unerreichten Reinheitsgraden bis zu 99,95%. In den 50er Jahren war das Lichtbogenschweißen eines der Hauptanwendungsgebiete, etwa für Stahlkonstruktionen oder im Automobilbau. Zudem steigerten der Kalte Krieg und insbesondere der Wettlauf ins All in den 60er Jahren den Bedarf. Um diesen auch langfristig zu decken, schuf der Staat einen Anreiz für private Unternehmen der Gasindustrie, Helium abzutrennen und mittels langfristiger Abnahmeverträge an das BOM zu verkaufen, als klar wurde, dass enorme Mengen an Helium während der Produktion von Erdgas ungenutzt in die Atmosphäre entlassen werden (NAS 2010, S. 88). Diese Tatsache spielt auch heute noch eine große Rolle und wird mit Blick auf die offensichtliche Dissipation im weiteren Verlauf dieser Arbeit nochmals aufgegriffen.

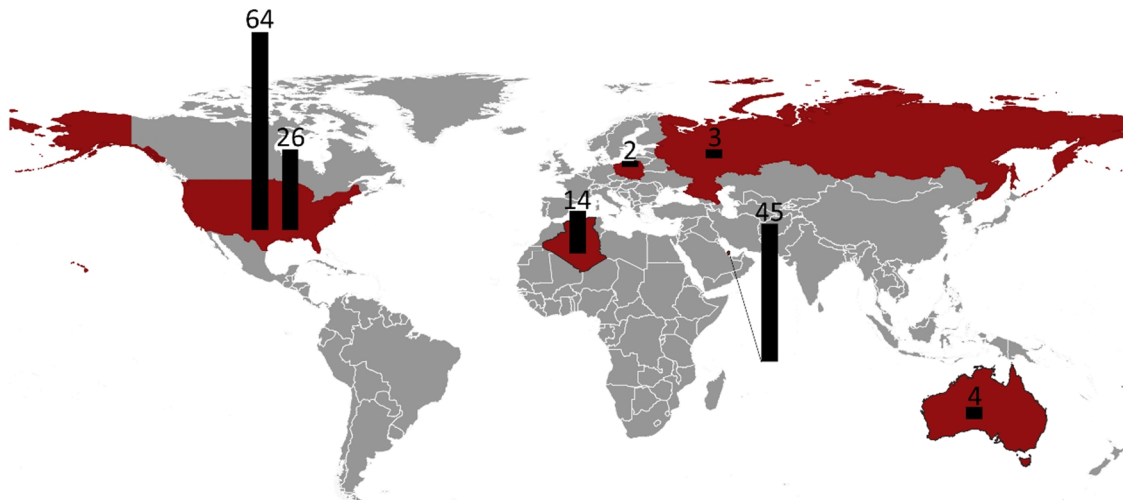
Um die privaten Extraktionsanlagen in Kansas, Texas, Colorado und Oklahoma mit dem staatlichen Reservoir in Cliffside zu verbinden, wurde Anfang der 60er eine etwa 700 Kilometer lange Pipeline gebaut. Doch schon zehn Jahr später übertraf die Heliumproduktion und –lagerung die Nachfrage bei weitem, was zu sinkenden Marktpreisen und einer damit einhergehenden hohen Verschuldung der staatlichen Heliumlagerstätte führte. Daher sah sich die Regierung dazu veranlasst in Form des sogenannten *Helium Privatization Act* von 1996 die Einlagerung von Helium stark zu reduzieren, den Lagerbestand mittels rigider Preispolitik zu verkleinern und die hohen Schulden somit zu tilgen. Dazu wurde die staatliche Produktion privatisiert und ein fester Verkaufspreis

errechnet, um die Schulden spätestens bis zum 1. Januar 2015 abzubauen. Der Preis bildete sich aus der Menge an eingelagertem Helium dividiert durch die Höhe der Schulden. Dieser Festpreis stellte sich im Laufe der Jahre als großer Fehler heraus. Ursprünglich war der Preis gut 30% über dem Marktpreis angesiedelt. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die Reserven nur langsam aufgelöst werden und den globalen Heliummarkt nicht beeinträchtigen, was die ersten Jahre auch funktionierte. Anfang der 2000er Jahre stieg der weltweite Heliumbedarf jedoch ebenso schlagartig an wie die Preise für Helium. So wurde das Helium aus staatlicher Lagerung innerhalb weniger Jahre von der teuersten zur billigsten Quelle weltweit, was entgegen jeglicher Regeln des freien Marktes ist und vor allem der heimischen privaten Heliumwirtschaft enormen Schaden zufügte (Sears 2015, S.132–133).

Doch trotz des geringen Preises waren die Schulden bereits 2013 abbezahlt und Cliffside sollte geschlossen werden. Dies hätte, aufgrund der bisherigen herausragenden Stellung der Reserve für den Weltmarkt, zu ungeahnten Verwerfungen geführt. Daher griff Präsident Obama im Herbst 2013 ein und verschob die Schließung auf unbestimmte Zeit. Der US-amerikanische Anteil an der Weltversorgung soll langsam verringert werden, bis die Reserven voraussichtlich Ende 2022 versiegen werden, wie das zuständige Bureau of Land Management im April 2020 bekannt gab (BLM 2020).



## 5.2 Globaler Überblick über Produktion und Anwendungen



**Abbildung 20: Helium produzierende Länder, Produktionsmenge als Säulen (in Mio. m<sup>3</sup>)**  
Quelle: eigene Darstellung, Datengrundlage (USGS 2020, S. 77)

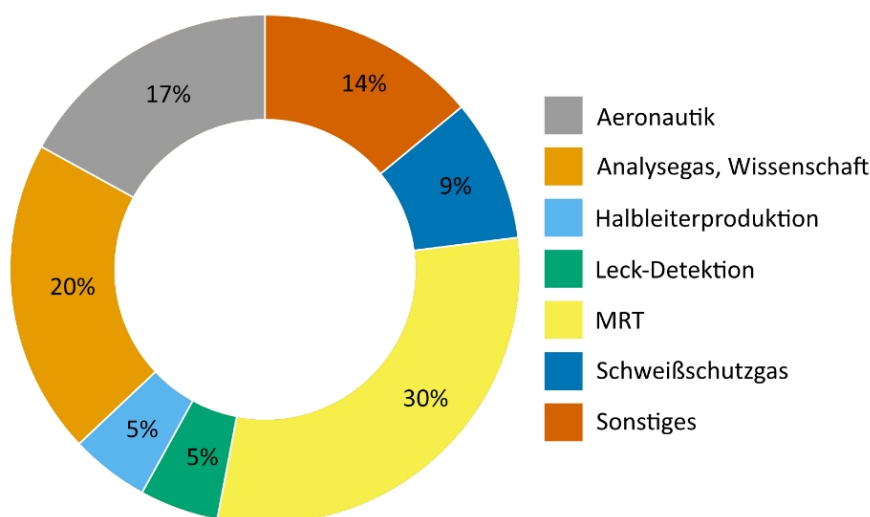
Neben der US Federal Helium Reserve gibt es weltweit nur wenige andere Produzenten in insgesamt acht Ländern (siehe Abbildung 20 sowie Tabelle 8). Wie anhand der Tabelle deutlich zu erkennen ist, sind insbesondere Daten zu Heliumreserven extrem rar. Valide Angaben könnten nur getroffen werden, wenn alle vorhandenen Erdgasfelder auf ihren Heliumgehalt hin analysiert und die Mengen aggregiert würden, was in vielen Ländern nicht gemacht wird. Zudem sind die Reserveangaben nur unter Vorbehalt zu betrachten. Zwar sind diese Mengen zum aktuellen Zeitpunkt aus ökonomischer sowie technischer Sicht förderbar. Allerdings wird ein großer Teil im Zuge der Erdgasproduktion verschwendet, da die erforderlichen Raffinerien nicht vorhanden sind. Um aussagekräftige Zahlen zu Reserven zu erhalten, müssten also von den genannten Heliummengen innerhalb der Erdgaslagerstätten die stetigen Verlustquoten aufgrund der nicht vorhandenen Raffinationskapazitäten abgezogen werden.

**Tabelle 8: Weltweite Heliumproduktion 2018 u. 2019 in Mio. m<sup>3</sup>**

	2018	2019	Reserven
<b>Algerien</b>	14	14	1800
<b>Australien</b>	4	4	NV
<b>Kanada</b>	<1	<1	NV
<b>China</b>	NV	NV	NV
<b>Polen</b>	2	2	NV
<b>Katar</b>	45	51	NV
<b>Russland</b>	3	2	1700
<b>USA (aus Erdgas)</b>	64	68	3900
<b>USA (Federal Reserve)</b>	26	21	In USA (aus Erdgas) inkludiert
<b>Weltweit</b>	158	160	NV

Quelle: USGS 2020, S. 77; NV = Nicht verfügbar

Abbildung 21 zeigt prozentual die größten Anwendungsfelder von Helium in den USA im Jahr 2019. Zahlen zur globalen Verwendung sind nicht verfügbar, daher werden die amerikanischen Zahlen exemplarisch herangezogen. Mit 30% verzeichnen Magnetresonanztomographen (MRT) den größten Heliumbedarf. Weitere bedeutende Anwendungsbereiche sind unter anderem die Aerostatik mit 17% (Helium als Traggas in Wetterballons etc.; wie weiter oben beschrieben die erste Verwendungsform von Helium) sowie die Bereiche Analysegas und Wissenschaft mit insgesamt 20%.



**Abbildung 21: Anwendungsfelder von Helium**

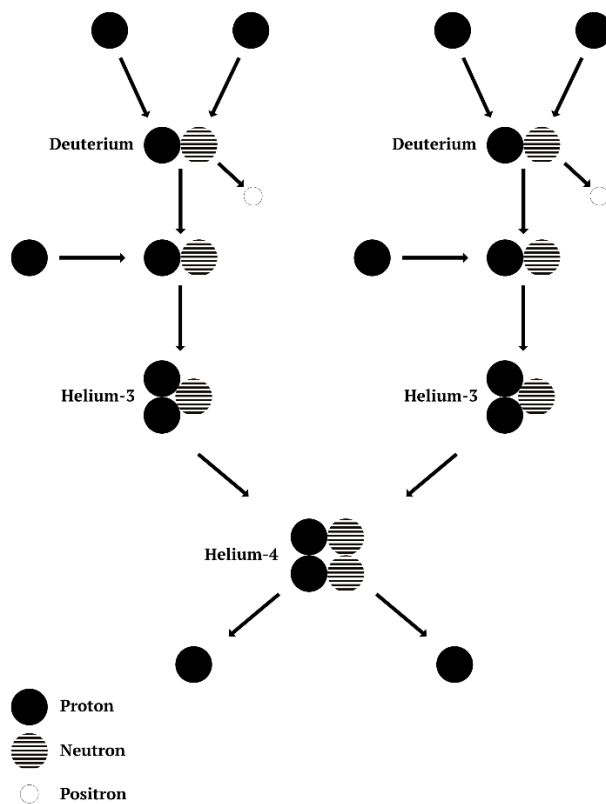
Quelle: eigene Darstellung nach USGS 2020, S. 76

### 5.3 Dissipative Dynamik von Helium

Um die kritische Situation von Helium zu verstehen, ist es notwendig, die Entstehung von Helium zu erklären. Auf der Erde kommt Helium nur in zwei stabilen Formen vor: dem Helium-4 Isotop ( ${}^4\text{He}$ ), bestehend aus 2 Protonen, 2 Neutronen und 2 Elektronen, das etwa 99.99986% des Heliums auf der Erde ausmacht, sowie dem millionenfach selteneren Helium-3 Isotop ( ${}^3\text{He}$ ) aus 2 Protonen, 1 Neutron und 2 Elektronen.

Aufgrund der Rarität von  ${}^3\text{He}$  gibt es hierfür nur wenige, meist im Forschungsbereich liegende Anwendungsgebiete. Der Großteil davon ist vermutlich kosmogenen Ursprungs und innerhalb weniger Minuten nach dem Urknall entstanden. Hierbei wird von der Proton-Proton-Kette oder auch von Wasserstoffbrennen gesprochen. Ein einziges Proton ist der Kern eines Wasserstoffatoms. Im Grunde fusionieren beim Wasserstoffbrennen vier  ${}^1\text{H}$  (Wasserstoff)-Atome (also vier Protonen) zu einem  ${}^4\text{He}$ -Atom. Solch eine Vierfach-Kollision ist jedoch viel zu unwahrscheinlich. Daher fusionierten Wasserstoffprotonen bei den extrem hohen Temperaturen direkt nach dem Urknall zu Deuterium und weiter zu Helium (Weigert und Wendker 1996, S. 142). Auch  ${}^4\text{He}$  ist auf diese Weise entstanden. Abbildung 22 zeigt schematisch die Fusionskette von Helium kurz nach dem Urknall. Gleiches geschieht auch heute noch im Inneren von Sternen aufgrund der Kombination aus hoher Temperatur und hohem Druck. Zwei Wasserstoffatome, die lediglich aus je einem Proton bestehen, fusionieren zu Deuterium, wobei sich eines der Protonen unter Abgabe eines Positrons und eines Neutrinos zu einem Neutron wandelt. Deuterium fusioniert daraufhin mit einem weiteren Proton zu  ${}^3\text{He}$ , bestehend aus zwei Protonen und einem Neutron. Und schließlich können zwei dieser  ${}^3\text{He}$ -Kerne miteinander fusionieren und unter Abgabe von zwei Protonen  ${}^4\text{He}$  bilden. Der beschriebene Prozess ist in dieser Arbeit möglichst kurzgehalten. Vertiefende Informationen können beispielsweise bei Unsöld und Baschek (2002) oder Christian (2018) gefunden werden. Im Übrigen ist dieser Prozess die Hauptenergiequelle von Sternen. Die jeweiligen Endprodukte dieser exothermen Reaktion weisen eine geringere Masse auf als die Summe der Massen der in die Reaktion eingegangenen Edukte. Hier wird vom Massendefekt gesprochen. Aufgrund von  $\Delta E = \Delta m * c^2$  und der damit einhergehenden

Äquivalenz von Energie und Masse wird der Massendefekt als Energie freigesetzt (Unsöld und Baschek 2002, S. 274).



**Abbildung 22: Fusionsprozess von Proton zu Helium-4; sog. Proton-Proton-Kette**

Auf der Erde ist der Großteil an  ${}^4\text{He}$  allerdings Produkt radioaktiven Zerfalls von Uran und Thorium und beruht auf dem Alphazerfall. Instabile, radioaktive Nuklide neigen dazu, unter Abgabe von Protonen und Neutronen einen stabilen Zustand anzustreben. Beim Alphazerfall werden dabei jeweils zwei Protonen und zwei Neutronen sowie zwei Elektronen abgestoßen. Dabei handelt es sich also, wie in Abbildung 22 erläutert, um nichts anderes als ein  ${}^4\text{He}$ -Atom. Nach der Aufnahme von zwei Elektronen aus der Umgebung bleibt dieses Helium stabil. Wie die folgende Gleichung zeigt, zerfällt beispielsweise  ${}^{238}\text{U}$  unter Abgabe von zwei Protonen und 2 Neutronen ( $\Rightarrow$  Massezahl 4) sowie 2 Elektronen ( $\Rightarrow$  Kernladungszahl 2) zu  ${}^{234}\text{Th}$  und  ${}^4\text{He}$  (Grynia und Griffin 2016, S. 164).



Dieser Zerfallsprozess dauert an, bis letztlich stabile Isotope von Blei entstehen. Aus einem Atom  $^{238}\text{U}$  bilden sich über die komplette Zerfallskette betrachtet insgesamt acht  $^4\text{He}$  Atome. 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 gast 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 somit Erdgaslagerstätten bilden. Aktuell wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis von akkumuliertem Helium zur Gesamtmenge im Laufe der Erdgeschichte bei lediglich  $10^{-7}$  (0,00001%) liegt (Bradshaw und Hamacher 2013, S. 2695).

Erdgas ist ein natürliches Gasgemisch, das je nach Lagerstätte in seiner Zusammensetzung variieren kann. Hauptbestandteil ist zumeist Methan. Daneben können beispielsweise Propan, Butan, Ethan, Stickstoff und eben Helium vorkommen (NAS 2010, S. 19). Ab einem Heliumanteil von etwa 0,3% am Gasgemisch wird die Abtrennung von Helium ökonomisch rentabel (Kryc 2013, S. 19).

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  $5 \times 10^{14}$  t) und deren Halbwertszeiten müssen zu einer Heliumproduktion in Höhe von  $3 \times 10^5$  t pro Jahr führen. Relativ zur Gesamtmenge werden 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  $1 \times 10^{14}$  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 und Hamacher 2013, S. 2695). Zwangsläufig muss also die Frage gestellt werden, wo die enormen Mengen des restlichen Heliums verblieben sind. Offensichtlich muss Helium in der Lage sein, die Atmosphäre zu verlassen und in den Weltraum zu entgasen. Dieses Phänomen zeigt eine ganz neue Qualität von Dissipation. Das Gas entzieht sich nicht nur einer potenziellen anthropogenen Nutzung, indem es wie viele andere Stoffe seine

Form oder seine Konzentration ändert, sondern es tritt über die für den Menschen geltenden Systemgrenzen hinweg und verlässt die Erde. Jedes Heliumatom, das aus der Erdkruste in die Atmosphäre gelangt und ungenutzt bleibt oder vor der Erdgasverbrennung nicht separiert wird, ist unweigerlich für den Menschen verloren. Diese Dynamik führt, zusammen mit der komplizierten Versorgungslage durch wenige Produzenten zu einer kritischen Rohstoffsituation. So haben zwischenzeitlich sowohl die Europäische Union (Europäische Kommission 2017c), als auch die Vereinigten Staaten von Amerika (Department of the Interior 2018) Helium als kritischen Rohstoff deklariert. Der Definition von Kritikalität nach ist Helium somit von großer wirtschaftlicher und militärischer Bedeutung und gleichzeitig anfällig für Versorgungsunterbrechungen.

## 5.4 Mechanismen des Heliumaustritts aus der Atmosphäre

Prinzipiell können Atome die Atmosphäre auf drei verschiedene Arten verlassen. Diese Möglichkeiten sind der thermische Austritt, der nicht-thermische Austritt sowie der Impact-bedingte Austritt, bei dem Helium durch den Einschlag von Asteroiden und Kometen aus der Atmosphäre geschleudert wird. Da letztgenannter Austritt selbsterklärend und extrem selten ist, werden im Folgenden nur die beiden Ersteren betrachtet. Neben Helium entflieht hauptsächlich Wasserstoff der Atmosphäre. Diese beiden Elemente sind die leichtesten und damit flüchtigsten des Periodensystems. Der thermische Austritt spielt für Helium auch nur eine untergeordnete Rolle und wird daher nur kurz angeschnitten.

### 5.4.1 Thermischer Austritt

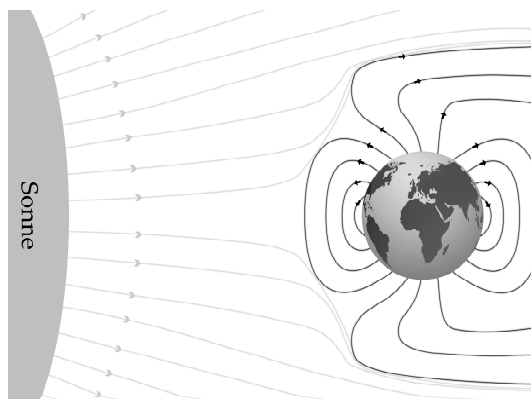
Grundsätzlich hält die Gravitationskraft der Erde die Atmosphäre zusammen und verhindert den Austritt von Atomen und Molekülen aus dieser Schicht. Teilchen können die Atmosphäre nur verlassen, wenn sie eine bestimmte Fluchtgeschwindigkeit erreichen, um der Gravitationskraft zu entfliehen. Dies kann beim thermischen Austritt auf zwei Arten geschehen.

Beim sogenannten *Jeans Escape*, benannt nach dem britischen Astronomen James Jeans, verflüchtigen sich die leichten Elemente in die oberen Schichten der Atmosphäre. Dieser Prozess ist langwierig, da die meisten Teilchen in den niedrigen Atmosphärenbereichen immer wieder gegeneinanderstoßen und so den Aufstieg stark einschränken. Erreichen sie dennoch die Exosphäre (genau genommen die Thermopause, den unteren Randbereich der Exosphäre) in einer Höhe von etwa 500km, wird die Luft so dünn, dass kaum noch Partikel miteinander kollidieren. Erreichen sie hier die nötige Geschwindigkeit, ist die Wahrscheinlichkeit eines Austritts in den Weltraum groß (Catling und Zahnle 2009a, S. 2). Dieser Prozess ist jedoch von zu vielen Faktoren abhängig, als dass er für große Mengenanteile des Austritts verantwortlich sein könnte. Die Atome müssen bis zur Thermopause gelangen, dürfen dabei keine Verbindung eingehen (was lediglich bei Wasserstoff, nicht aber bei Helium vorkommen kann) und

zudem die nötige Geschwindigkeit erreichen. Catling und Zahnle (2009, S. 2) gehen davon aus, dass lediglich ein Heliumatom pro Million auf diese Art die Atmosphäre verlässt.

#### 5.4.2 Nicht-thermischer Austritt

Der nicht-thermische Austritt ist auf die Masse bezogen die deutlich bedeutsamere Variante. Hier gibt es mehrere Austrittspfade. Für Helium ist der sogenannte Polarwind entscheidend. Dieser ist aber nicht mit dem Polarwind im Sinne einer Luftmassenbewegung zu verwechseln, sondern bezieht sich



**Abbildung 23: Atmosphärenaustritt von Helium durch den Sonnenwind**

auf die Interaktion von irdischen Magnetfeldlinien in Polnähe mit dem Sonnenwind. Hierbei wird sozusagen eine natürliche Schwachstelle des Erdmagnetfelds ausgenutzt. Abbildung 23 zeigt die schematische Darstellung der Erdmagnetfeldlinien. Diese verbinden typischerweise die beiden Pole miteinander, wie es auch von Stabmagneten

bekannt ist. Das Magnetfeld verhindert, dass geladene Teilchen aus der Atmosphäre entweichen können. Geladen werden die Teilchen, indem sie in den oberen Atmosphärenschichten durch die dort auftretende starke Sonnenstrahlung in Ionen und Elektronen aufgespaltet, also ionisiert, werden. Dabei wird diese hochenergetische Strahlung absorbiert, was Grundlage für das Leben auf der Erde ist (Meschede 2010, S. 465–466). Mit zunehmendem Abstand von der Erde werden die Magnetfeldlinien schwächer, gelangen nicht mehr von einem Pol zum anderen und bewegen sich durch den Einfluss des Sonnenwindes weiter in Richtung Weltraum. Das somit geöffnete Magnetfeld kann den Ionen den Austritt in den Weltraum ermöglichen (Catling und Zahnle 2009a, S. 8; Axford 1968, S. 6856). Wie unter 5.4 erläutert liegt die Produktionsrate von Helium in der Erdkruste bei  $3 \times 10^5$  t pro Jahr (3.000 Tonnen pro Jahr). Aktuellen Erkenntnissen zufolge (Catling und Zahnle 2009b, S. 36; Challoner 2018, S. 93) liegt die Austrittsrate aus der Atmosphäre in den Weltraum bei 50 Gramm pro Sekunde, was etwa



1.600 Tonnen pro Jahr entspricht. Die Bilanz aus Austritt in die Atmosphäre und Austritt aus der Atmosphäre ist also nahezu ausgeglichen. Die Differenz dieser beiden Werte erhöht den Heliumgehalt der Atmosphäre nur äußerst geringfügig pro Jahr (Akumulation / Gesamtmenge in der Atmosphäre =  $4 \times 10^{-7}$ ).

## 5.5 Eine Ökobilanz von Helium in der Magnetresonananztherapie <sup>1</sup>

Die angesprochene Verlustdynamik dieser linearen Wertschöpfungskette von Helium gibt Anlass, diese unter gesonderter Betrachtung ihrer Nachhaltigkeit eingehender zu analysieren. Ziel ist es, die mit der Dissipation von Helium verbundenen Umweltauswirkungen aus einer umfassenden Systemperspektive auf globaler Ebene zu untersuchen. Stoffverluste aus der Wertschöpfungskette müssen durch eine erhöhte Primärförderung ausgeglichen werden, was die Umweltauswirkungen dementsprechend erhöht. Endliche Lagerstätten werden dadurch schneller erschöpft, was wiederum die Versorgungssicherheit reduziert.

Das in diesem Kapitel gewählte methodische Vorgehen soll aufzeigen, wie im Zuge einer Ökobilanz das Thema Dissipation miteinbezogen werden kann. Das primäre Ziel dieser Bilanz (siehe Fußnote 1) war die ökologische Bewertung von MRT Scans mit dem Hauptaugenmerk auf der Heliumversorgung. Das methodische Fundament wird in dieser Arbeit genutzt, um den Aspekt der Dissipation von Helium zu quantifizieren und zu bewerten. Genauere Informationen zu Ökobilanzen im Allgemeinen und der durchgeführten Analyse von Helium in MRTs liefern die folgenden Kapitel.

### 5.5.1 Kurzeinführung in das Thema Ökobilanz

Eine Ökobilanz, im Englischen *Life Cycle Assessment* genannt, untersucht Produkte oder Dienstleistungen entlang der kompletten Wertschöpfungskette hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen. Die Wertschöpfungskette beinhaltet dabei den kompletten Lebensweg von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung und Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (DIN 14044, S. 5). Im Folgenden wird die Methode in einem kurzen, für diese Arbeit aber ausreichenden Maße erläutert. Tiefergehende Informationen liefern beispielsweise die DIN 14040 (2009) und DIN 14044 (2006) sowie Hauschild et al. (2018).

Im Zuge des fortschreitenden Interesses an ökologischen Fragestellungen und der Entwicklung nachhaltiger Handlungsstrategien auf unternehmerischer, politischer, als auch auf Verbraucherebene entstanden in den 1960er Jahren die ersten Ansätze zu Ökobilanzierungen. Diese untersuchten beispielweise den Energieverbrauch in der

Herstellung chemischer Produkte oder verglichen unterschiedliche Getränkeverpackungen hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen (Bjørn et al. 2018, S. 19).

Das Ziel einer Ökobilanz liegt meist darin, beispielsweise anhand der gewonnenen Erkenntnisse Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten in den verschiedenen Phasen ihres Lebensweges aufzuzeigen oder etwa darin, entscheidungstragende Akteure zu informieren (DIN 14044, S. 5).

Das Vorgehen ist in den DIN EN ISO 14040 und 14044 verankert und standardisiert. Diese umfassen:

- die Phase der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen (goal and scope);
- die Sachbilanz-Phase (Life Cycle Inventory LCI);
- die Phase der Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment LCIA);
- die Phase der Auswertung (Interpretation).

In der ersten Phase wird festgelegt, zu welchem Zweck eine Ökobilanzierung durchgeführt wird. Dazu wird das zu untersuchende Produkt beziehungsweise dessen Nutzen oder Funktion definiert. Damit einher geht die Festlegung der zu betrachtenden Stationen des Lebenszyklus, also etwa die Rohstoffgewinnung, Verarbeitung und Nutzung. Den Mittelpunkt des Untersuchungsrahmens bildet die funktionelle Einheit. Sie ist die Bezugsgröße, auf die alle Umweltauswirkungen gerechnet werden und ermöglicht einen Vergleich von Produkten oder Nutzungsszenarien (z.B. Transport einer Person über 100 km; Bereitstellung von einem Liter Getränk mit unterschiedlichen Verpackungen; Kühlen eines Kühlschranks für ein Jahr). So wird auch ein Vergleich verschiedener Produkte bezogen auf eine Leistung ermöglicht, etwa der Vergleich zwischen Verbrenner- und Elektroautos zum Transport ebenjener Person über 100 km.

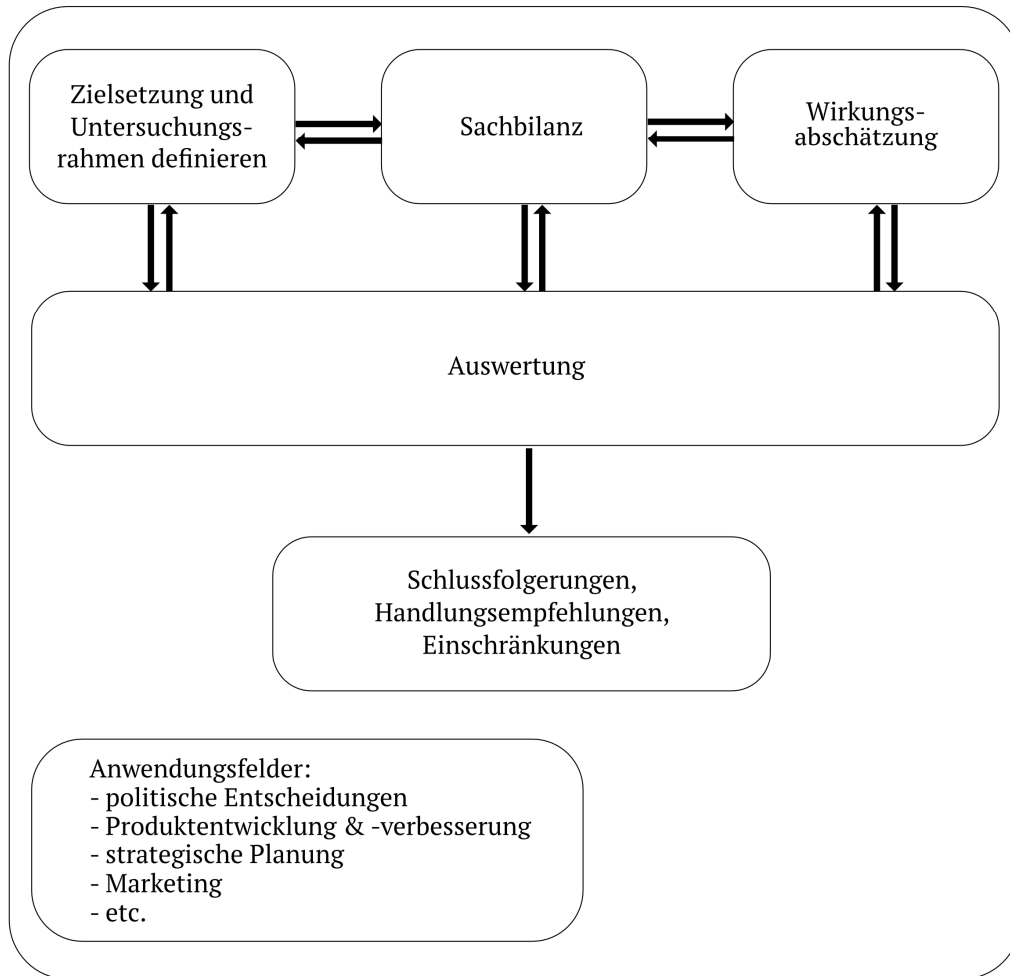
Für jede funktionelle Einheit wird zudem ein Referenzfluss definiert. Dieser beschreibt das physikalische Produktsystem (in der Regel auch mittels physikalischer Einheit wie Masse oder Energie), das den vorher definierten Nutzen oder die Leistung ermöglicht (Detzel et al., S. 101). Um beim Beispiel der Getränkebereitstellung zu bleiben, wäre der Referenzfluss hier das Gewicht des gewählten Verpackungssystems plus das Gewicht des Getränks.

Für die Sachbilanz werden die Input- und Output-Flüsse aller relevanten Prozesse aufgelistet und bilanziert. Diese beinhalten die Menge verwendeter Ressourcen, die Emissionen über alle Prozessstufen hinweg oder auch den entsprechenden Landverbrauch. Das Prozessmodell wird hier also modelliert und mit quantitativen Daten gefüttert. Die Erhebung und Auflistung dieser Daten ist üblicherweise der aufwändigste Teil einer Ökobilanz (Ausberg et al. 2015, S. 215, 216).

Die Phase der Wirkungsabschätzung ist entscheidend, um den Einfluss der bilanzierten Stoffströme auf die Umwelt ableiten zu können. Um eine Beurteilung dieser Auswirkungen vornehmen zu können, werden die meist unzähligen Stoffströme auf der Grundlage von Ursache-Wirkungs-Ketten in Wirkungskategorien eingeteilt und gebündelt. Beispielsweise können CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wirkungskategorie Klimawandel oder der Ausstoß von FCKW der Kategorie Ozonabbau zugeordnet werden. Die vielen unterschiedlichen Stoffströme mit ihren verschiedenen Substanzen werden dafür mittels eines Charakterisierungsfaktors in eine Referenzeinheit umgerechnet. So werden beispielsweise atmosphärische Emissionen mit Treibhauspotenzial in die bekannte Referenz CO<sub>2</sub>-eq. (CO<sub>2</sub> Äquivalente) umgerechnet (DIN 14044, S. 37).

Die Ergebnisse einer Ökobilanz sind meist sehr komplex. Um bestimmte Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen abzuleiten, müssen die Ergebnisse für die jeweilige Zielgruppe aufbereitet, komprimiert und verständlich kommuniziert werden. So kann etwa hervorgehoben werden, welche Sachbilanz-Parameter und welche Maßnahmen relevant für eine mögliche Reduzierung der Umweltwirkungen sind. Oder wie die Datenlage der Ökobilanz ist und welche Schritte unternommen werden müssen, um eine signifikantere Aussage treffen zu können (Ausberg et al. 2015, S. 230–231).

Zusammenfassend zeigt Abbildung 24 schematisch den Aufbau einer Ökobilanz. Der Ablauf einer solchen Bilanzierung läuft iterativ ab, die einzelnen Phasen müssen zum Zwecke der Zielerreichung immer wieder angepasst werden, was durch die wechselseitigen Pfeile dargestellt ist.



**Abbildung 24: Phasen einer Ökobilanz**

Quelle: eigene Darstellung nach DIN 14044, S. 47

### 5.5.2 Analyse dissipativer Aspekte von Helium mittels einer Ökobilanz

Die ökobilanziellen Ausführungen der vorliegenden Arbeit basieren auf einer internationalen Projektarbeit. Die hier vorgestellten Analysen und Ergebnisse sind jedoch daraus eigenständig hervorgegangen.

#### Ziel und Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsgegenstand dieser Fallstudie ist eine Cradle-to-Grave-Ökobilanz der Nutzung von flüssigem Helium als Kühlmittel in einem Magnetresonanztomographen. Ziel ist es, insbesondere die Dissipationsflüsse zu identifizieren, quantifizieren und die ökobilanziellen Auswirkungen zu bemessen.

Die funktionelle Einheit wird definiert als ein durchschnittlicher MRT-Scan. Als Referenzfluss dient die Menge an flüssigem Helium, die benötigt wird, um Kälte für die Erstellung eines durchschnittlichen MRT-Scans bereitzustellen. Genauere Angaben zu den einzelnen Prozessschritten finden sich im Anhang (Tabelle A. 6 - A. 12). Somit kann quantifiziert werden, welche ökologischen Auswirkungen die Gewinnung, der Transport sowie die Nutzung von Helium bezogen auf einen MRT-Scan haben.

Funktionelle Einheit:	1 MRT-Scan
Referenzfluss:	Heliummenge zur Bereitstellung von Kälte für einen durchschnittlichen MRT-Scan

Das Ziel ist es also, alle Prozessschritte von der Heliumgewinnung bis einschließlich der Nutzung im MRT zu identifizieren und zu quantifizieren. Somit können die ökologischen Auswirkungen eines MRT-Scans berechnet werden. Diese Berechnung ist allerdings nur von indirekter Bedeutung. Vielmehr soll dieses Vorgehen als Grundlage dafür dienen, die mit den dissipativen Verlusten entlang der Prozesskette von Helium einhergehenden ökologischen Auswirkungen zu bemessen. Dazu wird anfangs ein idealisiertes Basisszenario ohne jeden Heliumverlust berechnet. Ausschlaggebend für die ökologischen Auswirkungen sind hier also Faktoren wie die Heliumgewinnung, der Transport oder auch der Energieverbrauch im Betrieb. Daran anknüpfend können innerhalb dieses Modells die Stellschrauben der dissipativen Heliumverluste beliebig gedreht werden. So können entlang der Prozesskette verschiedene Verlustmengen integriert

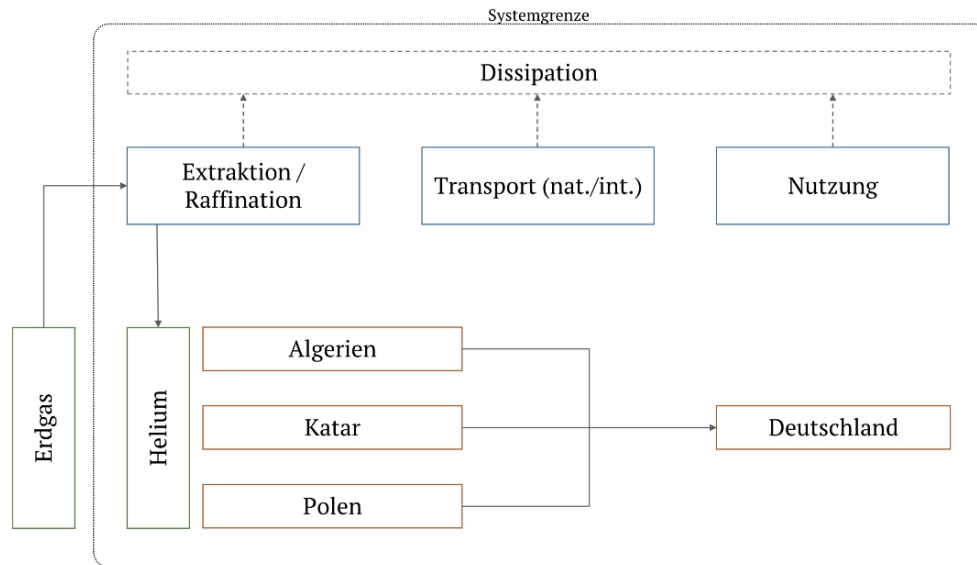
werden, die letztlich zu einem absoluten Mehrbedarf an Helium führen. Dieser Mehrbedarf kann mittels der Differenz aus Verlustszenario und Basisszenario berechnet werden.

### **Systemgrenzen**

Die Studie ist eine Cradle-to-Grave-Ökobilanz (*Wiege bis zum Grab*) von Helium, das in einem Magnetresonanztomographen zur Kühlung eingesetzt wird. Es werden möglichst alle technosphärischen Prozesse dieser Wertschöpfungskette einbezogen. *Cradle*, also der Anfangspunkt der Betrachtung, bezieht sich hierbei auf die Stoffmenge Helium, die im Raffinationsprozess aus Erdgas abgetrennt wird. *Grave*, der Endpunkt, meint hier das Produkt flüssiges Helium, das zu Kühlzwecken in ein MRT gefüllt und für einen Scan genutzt wird. Die Daten beziehen sich aus Gründen der Verfügbarkeit, soweit nicht anders angegeben, auf das Jahr 2018.

### **Geographische Grenzen und Beschreibung der Prozesskette**

Der Weg des Heliums von den Erdgasfeldern zum Endverbraucher ist ein komplizierter, mehrstufiger Prozess. Der hier vorgestellte Weg bezieht sich auf die Nutzung von Helium in MRTs in Deutschland. Dementsprechend sehen die Betrachtungsgrenzen für das Jahr 2018 wie folgt aus (Abbildung 25 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. Danach erfolgt der Transport per LKW zu internationalen Häfen, oder in sehr seltenen Fällen zu Flughäfen. Die Berechnungen beziehen sich allerdings allein auf den Schiffs-transport, da sich hierauf der größte Anteil der transportierten Menge beläuft. Über den Hafen in Hamburg gelangt das Helium in das Zielland Deutschland. 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 25: Untersuchungsrahmen und Systemgrenze**

### Sachbilanz

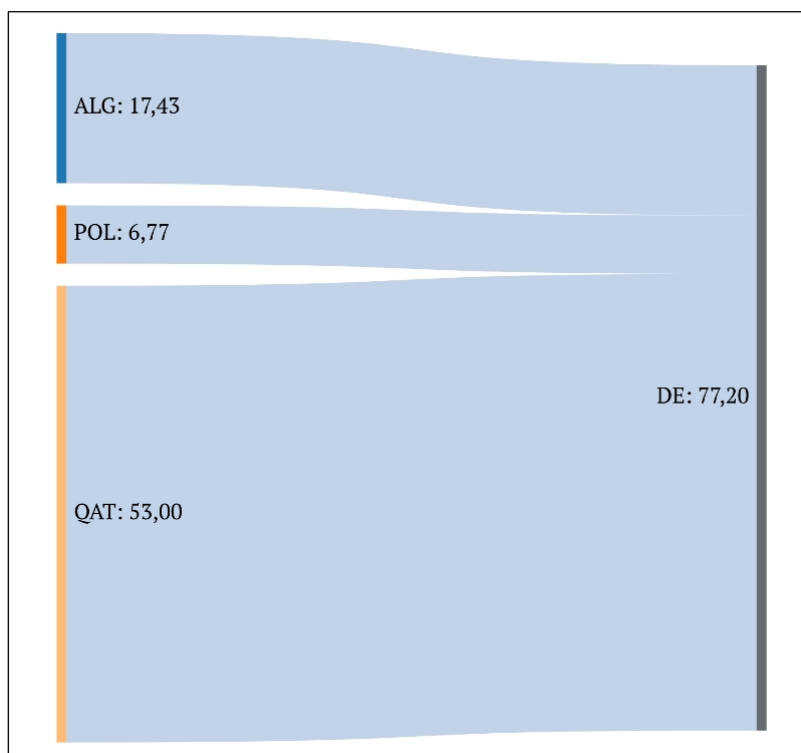
In der Sachbilanz erfolgt das Aufsummieren dieser Flüsse, was die Verknüpfung aller Schritte mit dem Referenzfluss und damit den Bezug auf die funktionelle Einheit erfordert. Die Sachbilanz der Stoffströme wurde hauptsächlich mit der Ecoinvent v3.4-Datenbank durchgeführt (Wernet et al. 2016). Deren Daten werden von Forschungsinstituten und Beratern erhoben und basieren auf Industriedaten.

Die Produktionsdaten von Helium im Jahr 2018 stammen vom United States Geological Survey (USGS). Diese wurden bereits in Tabelle 8 (Kapitel 5.2 „Globaler Überblick über Produktion und Anwendungen“) aufgelistet. Als Hauptaussage lässt sich festhalten, dass 2/3 der Weltproduktion auf die beiden Länder USA und Katar entfallen, gefolgt von Algerien mit knapp 9% sowie Australien, Polen und Russland als Kleinproduzenten (USGS 2020, S. 77). Die genaue Lage der Raffinerien wird anhand von Internetquellen gesucht und mittels Luftbilder von Google Earth (Google o.J.) verifiziert. Daraus ergibt sich zum einen die Lage im Land und damit die Distanz zum nächsten Hafen für den internationalen Transport. Zum anderen kann so die Größe der Anlage bemessen werden. Zusammen mit der Produktionskapazität kann so für jede Anlage ein eigenes Profil erstellt werden (siehe im Anhang Tabelle A. 6). Die Bilanz beginnt mit der Abtrennung und Verflüssigung von Helium aus dem Erdgasgemisch. Die vorherige Erdgasförderung und -produktion ist in dieser Betrachtung nicht integriert. In den Stromverbrauch fließt



länderspezifisch der jeweilige Strommix des Jahres 2018 ein (Tabelle A. 7). Lediglich das Technologielevel wird aufgrund fehlender Daten über die einzelnen Raffinerien hinweg als einheitlich angenommen.

Für das in dieser Arbeit untersuchte Beispielland Deutschland zeigt Abbildung 26 die Versorgungssituation als Importflüsse. Im Jahr 2018 importierte Deutschland Helium im Wert von 77,20 Millionen Dollar. Anteilig kamen 69 % des Heliums aus Katar, etwa 22 % aus Algerien und knapp 9 % aus Polen. Die Daten stammen aus der UN Comtrade Datenbank (UN 2020). Diese weist als Versorgungsländer auch Nicht-Förderländer wie etwa Frankreich auf. Diese agieren als Zwischenstationen und erschweren dadurch eine Analyse. Aus Gründen der Simplifizierung werden diese Mengen dem Förderland mit dem größten Anteil an dieser Zwischenstation zugerechnet. Um beim Beispiel Frankreich zu bleiben werden dessen Lieferungen an Deutschland dem Produzenten Algerien zugeordnet. Unterstützt wird dieses Vorgehen durch die Tatsache, dass Helium als Edelgas keine etwaigen Verarbeitungsprozesse in den entsprechenden Ländern durchläuft und daher lediglich transportiert wird.



**Abbildung 26: Heliumversorgung im Jahr 2018 in Mio. US \$**  
Quelle: Datengrundlage (UN 2020)

Auch die verschiedenen Transportstrecken werden mit Google Earth (Google o.J.) gemessen und einem Verkehrsmittel zugeteilt. Dazu zählen die Strecken zwischen Raffinerie und Hafen per LKW, der internationale Schiffstransport (beziehungsweise per LKW aus Polen), die Routen vom Importhafen zu einem Verteilzentrum und der Weitertransport zu einem Krankenhaus per LKW (EURO5 Standard). Der internationale Transport erfolgt in standardisierten ISO-Containern mit einem Volumen von 41.000 Litern. Ab dem Verteilzentrum erfolgt der Weitertransport in 500-Liter-Dewars. Die Gewichte der Container wird in die Berechnung miteinbezogen, ebenso die Europaletten zum Transport eines Dewars (Tabelle A. 8). Die Lage des Verteilzentrums respektive die Entfernung zum Krankenhaus wird statistisch berechnet (Tabelle A. 9 für weitere Informationen).

Als Nutzungsszenario wird ein MRT-Gerät in einem fiktionalen Krankenhaus in Berlin gewählt. Die relevanten Daten stammen aus der Ecoinvent Datenbank sowie aus Literaturquellen. Berücksichtigt werden der Tomograph, primär bestehend aus elektronischen Komponenten, der dafür benötigte Raum im Gebäude, der Strombedarf, sowie natürlich das Kühlmittel Helium. Der Magnet eines MRT wird aufgrund schlechter Datenlage nicht miteinbezogen.

Alle Werte werden auf die funktionelle Einheit, also einen Scan, bezogen. So wird beispielsweise statistisch die Raumfläche berechnet, die für einen Scan nötig ist oder, der Kühlmittelverlust, der statistisch mit einem Scan verbunden ist. Bei dieser Zuordnung von Prozessen zu einem untersuchten Produktsystem wird im Rahmen von Ökobilanzen von *Allokation* gesprochen (DIN 14044, S. 11).

In den Stromverbrauch, sowohl in den Förderländern als auch in Deutschland, fließt der jeweils länderspezifische Strommix ein. In den Förderländern betrifft das den Produktionsprozess von Helium, in Deutschland als Abnehmer betrifft es die Prozessschritte Verteilzentrum und Betrieb im Krankenhaus.

Angaben zum Energieverbrauch pro Patient stammen von PE International (Rock und Herrmann 2012), ebenso die durchschnittliche Dauer pro Scan, woraus die Anzahl an

Scans pro Zeiteinheit berechnet wird. Die benötigte Fläche setzt sich aus mehreren Räumen zusammen, darunter der Scan-Raum und der Überwachungsraum. Alle Informationen hierzu finden sich im Anhang (Tabelle A. 12).

Der Heliumverbrauch variiert je nach Maschinentyp relativ stark. Insbesondere moderne Geräte haben häufig ein kreislauffähiges Kühlsystem integriert, das für relativ geringe Verlustraten und damit für seltene Auffüllungen sorgt. In dieser Arbeit wird mit einem Verlustszenario in einer Höhe von 1.130 Liter pro Jahr kalkuliert (LBNmedical o.J.). Für den Verlustausgleich werden also 2,26 Deware benötigt, die typischerweise je 500 Liter fassen. Mittels der zuvor erhobenen Anzahl an Scans pro Jahr kann damit der Bedarf an Dewaren pro Scan berechnet werden, der sich in diesem Fall auf  $1,22E-04$  beläuft. Tabelle A. 11 im Anhang fasst die relevanten Informationen und Ergebnisse nochmals zusammen.

### **Resultate und Interpretation der Ergebnisse**

Da nun alle relevanten Informationen für das Basisszenario vorhanden sind, können die ökologischen Auswirkungen analysiert und bewertet werden. Die Berechnungen erfolgen mit dem Programm openLCA (GreenDelta 2021), die Wirkungskategorien werden als Midpoint Level nach der Baseline Methode berechnet, wobei in dieser Arbeit der Blick speziell auf die Wirkungskategorie *Klimawandel* gerichtet wird. Im Anhang (Tabelle A. 13 & Tabelle A. 14) werden jedoch auch andere mitberechnete Kategorien und deren Resultate angegeben. Diese sind Eutrophierung, Versauerung, Zerstörung der Ozonschicht, aquatische Ökotoxizität Süßwasser, aquatische Ökotoxizität Meerwasser, Humantoxizität sowie terrestrische Ökotoxizität.

Wie schon zu Beginn von Kapitel 5.6 erläutert, ist das Ziel, 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.

Die Abbildungen 27 und 28 zeigen jeweils die zehn klimarelevantesten Bereiche der zwei untersuchten Prozessketten. Im idealisierten Prozess ohne Heliumverluste beträgt das Treibhauspotential pro MRT-Scan  $8,6495 \text{ kg CO}_2 \text{ eq}$ . Im Verlustszenario liegt das

Potential bei 8,6633 kg CO<sub>2</sub> eq. Die prozessbedingten Heliumverluste entlang der Produktions- und Lieferkette von Helium für Magnetresonanztomographen erhöhen die Klimaauswirkungen folglich um 0,16%. Den Grund für diese geringe Differenz zwischen den beiden Szenarien zeigt ein Blick auf die größten Verursacher. Den weitaus größten Anteil an den Treibhauspotenzialen hat in beiden Szenarien die Stromproduktion aus den fossilen Brennstoffen Steinkohle, Braunkohle und Erdgas. Das liegt im deutschen Strommix begründet, der noch große Teile an Kohlestrom aufweist (2018: 39%). Neun der zehn größten THG-verursachenden Prozesse entfallen auf die Produktion und Verbrennung fossiler Brennstoffe. Insgesamt liegt der Anteil der durch die deutsche Stromproduktion bedingten THG-Emissionen bei über 96% der Gesamtemissionen eines MRT-Scans. Dadurch haben die Emissionen entlang der Prozesskette außerhalb Deutschlands, also insbesondere der Transport oder die Heliumproduktion, kaum Einfluss auf die Gesamtbilanz. Die Anteile der einzelnen Prozessstufen an den Emissionen sind in Abbildung 29 dargestellt.

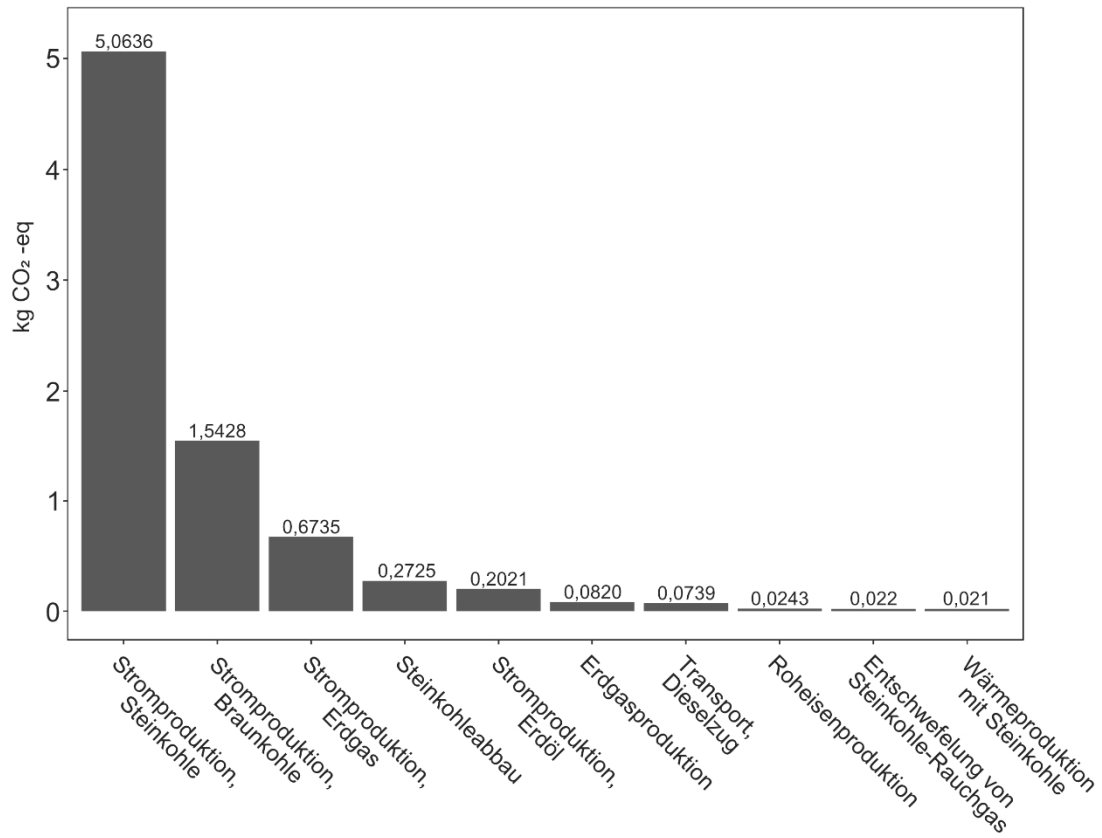


Abbildung 27: Treibhauspotential Helium-Null-Verlust-Szenario

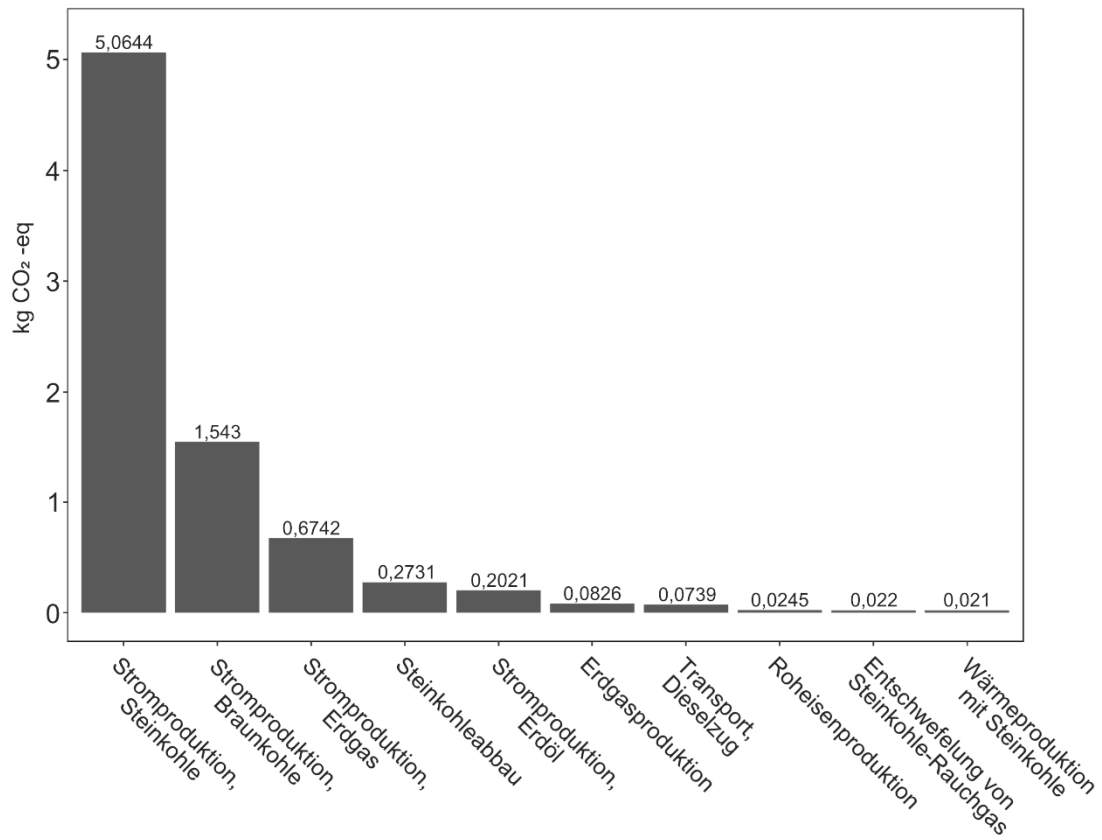
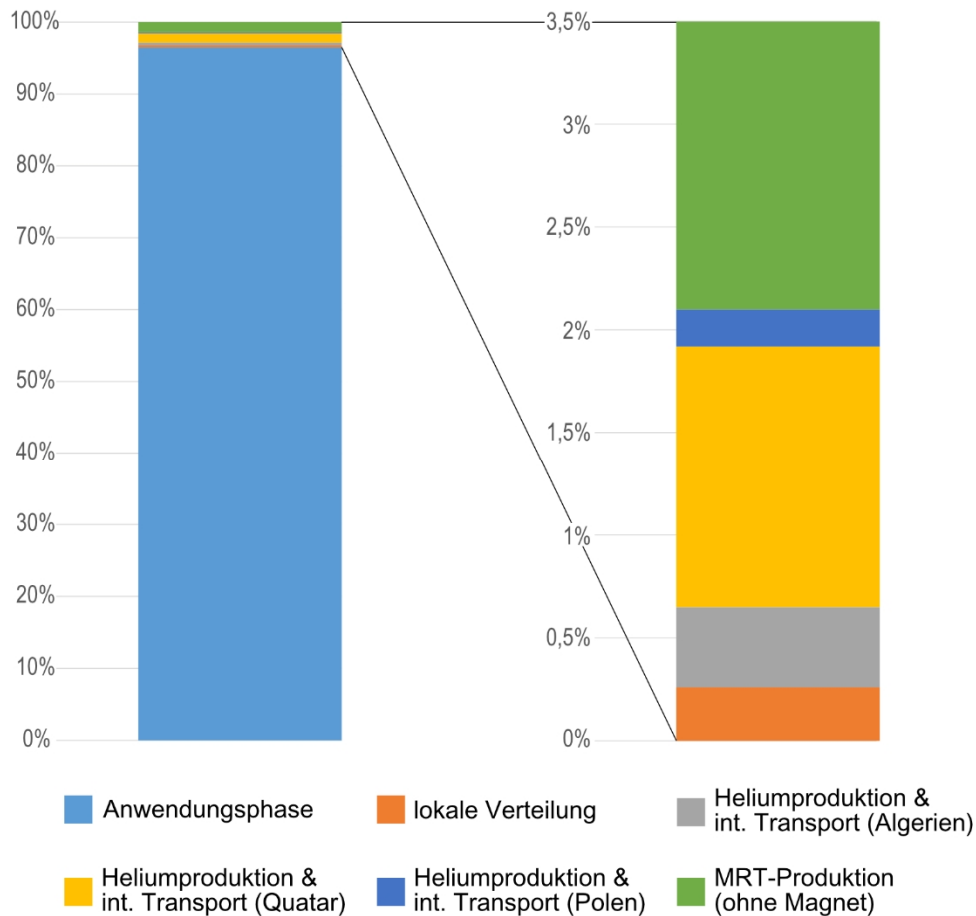


Abbildung 28: Treibhauspotential Helium-Verlust-Szenario

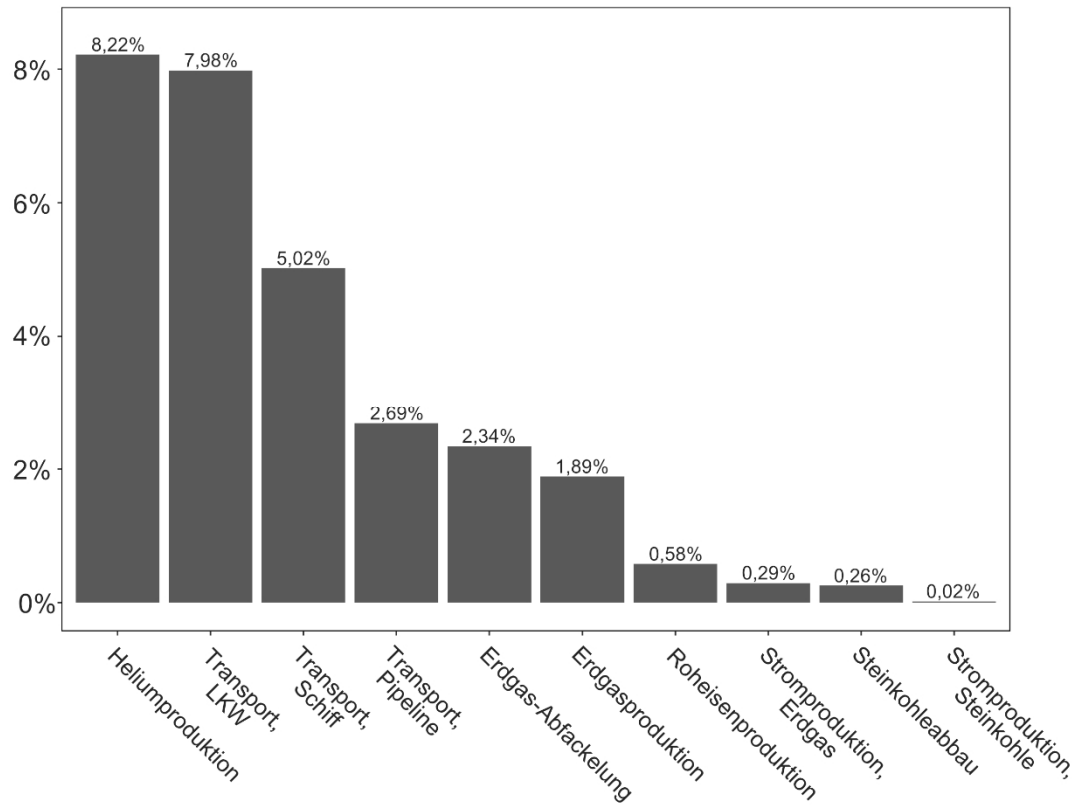


**Abbildung 29: Anteile der Lebenszyklusphasen an den gesamten THG-Emissionen (Verlust-Szenario)**

Einen genaueren Blick auf die Verluste bietet Abbildung 30. Diese 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.

Tabelle 9 zeigt letztlich 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 Tonnen CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen in einer Höhe von circa 170 Tonnen.



**Abbildung 30: Anstieg der THG-Emissionen in Folge von Dissipation, nach Prozessen**

**Tabelle 9: Treibhauspotenzial von MRT-Scans in Deutschland im Jahr 2018**

Bevölkerung	82.792.351	(Eurostat 2021)
MRT / 1000 EW	149	(OECD 2020, S. 221)
Untersuchungen	12.336.060	
<hr/>		
Treibhauspotenzial (kg CO <sub>2</sub> eq.) bedingt durch Dissipation	170.641	
<hr/>		
Treibhauspotenzial (kg CO <sub>2</sub> eq.) aller deutschen MRT-Untersuchungen	106.870.779	

### 5.5.3 Reflexion der Ökobilanzergebnisse und Erläuterung der Limitierungen

Das hier präsentierte Fallbeispiel zu Helium zeigt eine weitere Betrachtungsebene von Dissipation aus einem ökologischen Blickwinkel auf. Das einleitende Kapitel (5.3) offenbart deutlich die Problematik im Management von Helium, die sich durch die enorme Flüchtigkeit des Gases ergibt. Die mit dieser 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. Beylot (2020b) beschäftigt sich eingehend mit den Herausforderungen einer Implementierung von Dissipation in dieses Konzept. 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 Depo-nien, für die andernfalls weitere Stoffströme und Wirkkategorien zugeordnet werden müssten. Zampori und Sala (2017) haben zu möglichen Vorgehensweisen einer integrierten Dissipationsbetrachtung in Ökobilanzen genauere Untersuchungen angestellt. Die größte Herausforderung einer Ökobilanzierung sehen sie in der limitierten Daten-verfügbarkeit. Es sollte immer der Anspruch sein, möglichst umfassende und akkurate Daten zu nutzen. Je nach Prozessschritt kann die Datenqualität und -verfügbarkeit jedoch stark schwanken. So musste beispielsweise auf die Integration des MRT-Magneten, dem eigentlichen Herzstück eines Tomographen, verzichtet werden. Zudem endet die Analyse mit einem Scan. Daran anknüpfende Prozesse, wie die nötige Infrastruktur zur Daten- und Bildauswertung, fließen nicht in die Untersuchung mit ein. Auch zu den



frühen Phasen der Lieferkette mussten einige Annahmen getroffen werden. Alle Helium-Produktionsstätten gehen mit dem gleichen Stand der Technik in die Berechnung ein, was etwa den Energiebedarf und die Prozesseffizienz anbelangt. Das entspricht vermutlich nicht der Realität. Unterschiede in den THG-Emissionen in den Produktionsländern werden dadurch unpräziser. Ähnliches gilt für den internationalen Transport. Die Annahme direkter Handelswege zwischen Produzent und Konsument muss selbstverständlich als idealisierter Zustand angenommen werden. Dieses Vorgehen hat die Bilanzierung deutlich erleichtert. Allerdings geht das mit einem Verlust an Informationen an anderer Stelle einher. Emissionen in den Transitländern fallen aus der Betrachtung heraus. Zudem werden dissipative Verluste von Helium, die beispielsweise durch eine verlängerte Transportzeit über Transitländer entstehen, nicht miteinbezogen.

Mit Blick auf all diese Einschränkungen zeigt sich, dass weitergehende Untersuchungen in diesem Feld wünschenswert sind. Die vorliegende Arbeit kann als Fundament dienen. Und 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 ganz offensichtlich vor allem durch einen grüneren Strommix verbessert werden. Einmal mehr zeigt sich der eklatante Einfluss der Kohleverstromung.

Zudem gilt es, die Heliumverluste entlang der Lieferkette zu minimieren. Hier kann die Nutzungsphase als Positivbeispiel erwähnt werden. Die großen Hersteller von Kernspintomographen wie Philips, Siemens und GE bringen vermehrt Geräte mit sogenannter *Zero Boil-off* Technologie auf den Markt, die den Verlust von Helium im Betrieb beträchtlich reduziert, indem es in einem internen Kreislaufsystem geführt wird. Dagegen sind insbesondere die Ab- und Umfüllphasen mit nicht zu vernachlässigenden Verlusten verbunden. Die Transportphase verzeichnet zwar erstaunlich geringe Verlustmengen. Das wird jedoch durch erheblichen Material- und Energieaufwand an anderer Stelle erkaufte. Beispielsweise werden Helium-Transportcontainer meist mit einer Hülle aus flüssigem Stickstoff gekühlt, um die Erwärmung des Heliums und damit

die Ausdehnung und den Gasaustritt möglichst gering zu halten (Chrz 2010). Die Dissipation von teurem, aber THG-irrelevantem Helium wird also gegen die Dissipation von günstigem, aber THG-relevantem Stickstoff getauscht. Ein Einbezug dieser externalisierten Umweltauswirkungen in tiefergehende Ökobilanz-Analysen wäre erstrebenswert.

## 6 Allgemeine Abschlussdiskussion und Ausblick

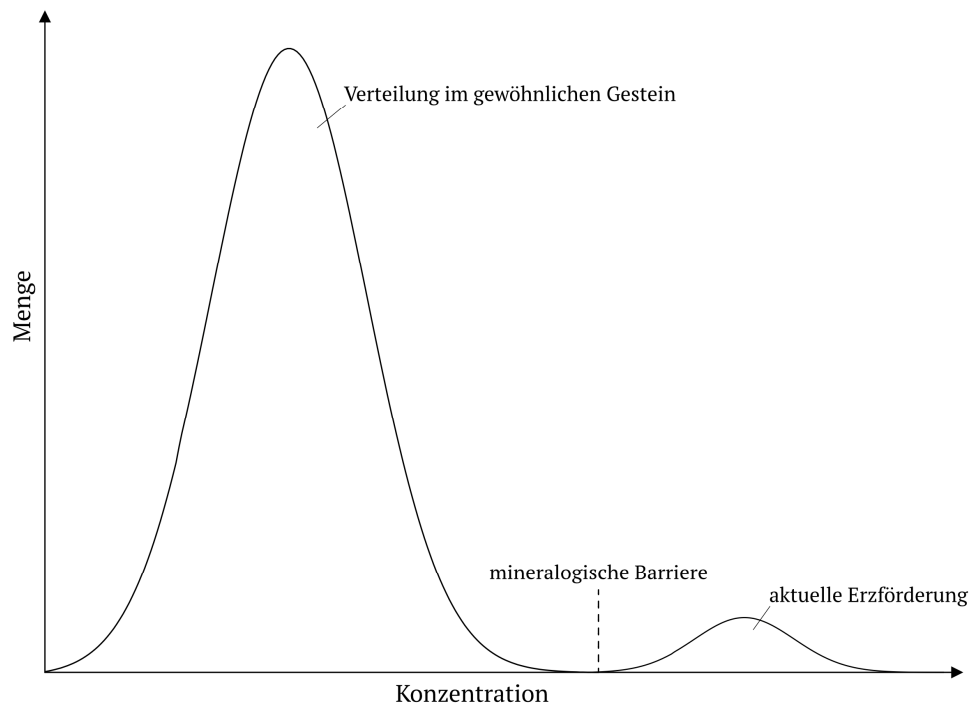
Das letzte Kapitel dieser Arbeit bildet eine Diskussion über die vielfältigen und komplexen Themen, die im Zuge dieser Arbeit vorgestellt wurden. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den theoretischen und analytischen Abschnitten werden zusammengeführt und mit Blick auf die anfangs gesetzten Ziele dieser Arbeit in Form einer kritischen Würdigung eingeordnet. Zuvor jedoch sollen, mit Blick auf das übergeordnete Projekt zum Thema Nexus Ressourcenschonung und Klimaschutz, die Erkenntnisse im größeren Rahmen aktueller gesamtgesellschaftlicher Entwicklungen diskutiert werden. Relevante Themen sind hierbei etwa auf politischer Ebene die Bedeutung von Dissipation für die *Ziele für nachhaltige Entwicklung* (Sustainable Development Goals, SDG) der Vereinten Nationen oder auf systemökonomischer Ebene die Betrachtung von Dissipation im Kontext der *Circular Economy* Bestrebungen. Erst mit dieser Kontextualisierung ist eine abschließende kritische Beantwortung der eingangs (Kapitel 1.2) gestellten Fragen sinnvoll.

Zu Beginn dieser Arbeit wurde der bisher unaufhörlich zunehmende anthropogene Rohstoffverbrauch aufgezeigt. Dieser 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 herausragender Bedeutung. Dies 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. Denn, wie eingangs erwähnt, können 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 am Beispiel von Helium

aufgezeigte Austritt dieses Gases aus der Atmosphäre führt zu einem endgültigen Verbrauch.

Dissipation stellt folglich insbesondere für Metalle den eigentlichen Verbrauch dar, indem einer theoretisch möglichen Wiedernutzung technologische, systemische oder energetische Grenzen entgegenstehen. Eine dieser Grenzen bildet die mineralogische Barriere. Diese Barriere kann mithilfe des bimodalen Verteilungsmodells erklärt werden, mit dem Skinner (1976) die Verteilung von Metallen in der Erdkruste beschrieb. In Abbildung 31 ist zu erkennen, dass nur eine geringe Menge an Metallen in hoher Konzentration vorliegt (in Form von Erzen; dargestellt als kleine Kurve). 90% der Gesamtmenge ist in niedriger Konzentration und somit fein verteilt in der gesamten Erdkruste zu finden (Gleich 2006, S. 23). Empirisch konnte dieses Modell bisher weder bestätigt noch widerlegt werden. Doch schon allein der zweite Hauptsatz der Thermodynamik zeigt auf, dass hochkonzentrierte Ressourcen in Form von Erzen selten sein müssen und vice versa viele Ressourcen niedrigkonzentriert vorkommen.

Die Vorräte an Mineralen, die Metalle in höheren Konzentrationen als in der durchschnittlichen Erdkruste enthalten, also sogenannte Erze, sind demnach sehr begrenzt. Aus Gründen der Rentabilität werden diese zuerst erschlossen. Infolgedessen nimmt die Metallkonzentration der weltweiten Erze durchschnittlich immer weiter ab und die relativ hochkonzentrierten Erze werden in Vorkommen niedrigerer Qualität umgewandelt (Prior et al. 2012, S. 578). Für viele Gase, wie etwa Helium, gilt das ebenso, da deren Vorkommen auf bestimmte geologische Formationen angewiesen sind. Nach einem Erschöpfen der hochkonzentrierten Vorkommen und der damit erreichten mineralogischen Barriere muss auf Vorkommen mit niedriger Konzentration zurückgegriffen werden, was einen höheren finanziellen, energetischen sowie technischen Aufwand bedeutet (Reller et al. 2013, S. 63). Um also auf die erwähnte Verschiebung dieser Barriere zurückzukommen, sorgt der dissipative Ressourcenumgang dafür, dass ehemals durch die Natur in langwierigen Prozessen aufkonzentrierte Ressourcen durch nicht-nachhaltiges Ressourcenmanagement feinverteilt und damit in niedrigkonzentrierte Vorkommen umgewandelt werden. Die mineralogische Barriere verschiebt sich zu unseren Ungunsten.



**Abbildung 31: Bimodales Verteilungsmodell nach Skinner (1976)**

Quelle: eigene Darstellung nach (Skinner 1976)

Mit Blick auf das, dieser Arbeit übergeordnete, Leitthema Ressourcenschonung und Klimaschutz zeigt dieser Aspekt demnach einen Beitrag von Dissipation zur Rohstoffverknappung. Noch dazu bedingen sich Rohstoffknappheit und Energieknappheit gegenseitig. Viele Ressourcen müssen mit einem immer größer werdenden Energieaufwand gefördert werden. Diverse Vorkommen erfordern einen viel zu großen Energieinput, wodurch die Rentabilität und damit die Verfügbarkeit sinkt. Dadurch werden auch wichtige Rohstoffe für die angestrebte Energiewende knapper und teurer. Der Einfluss von Dissipation ist hierbei nicht zu vernachlässigen.

Dieser zunehmende Aufwand, an Rohstoffe zu gelangen in Kombination mit dem stetig wachsenden Rohstoffhunger durch die in Kapitel 2 aufgezeigten Entwicklungen führt in vielen Fällen zu einem wachsenden Druck auf die ökologischen Belastungsgrenzen. Infolgedessen wird es künftig womöglich nicht unbedingt eine Frage der Endlichkeit von Ressourcen sein, sondern die Resilienz der Umwelt, die uns in bestimmten Bereichen Grenzen setzt. So wird seit dem ersten Bericht an den *Club of Rome* (Meadows 1972) die Endlichkeit fossiler Brennstoffe diskutiert. Nun ist die Menschheit aber an einem Punkt angelangt, an dem nicht mehr eine mögliche Erschöpfung von Erdöl, sondern die mit

dessen Nutzung einhergehenden ökologischen Auswirkungen für eine Abkehr von der bedenkenlosen Weiternutzung sorgen. Analog ist das natürlich auch für weitere Rohstoffe möglich, wenn die Kapazitätsgrenzen entsprechender ökologischer Senken erreicht werden (Gleich 2006, S. 32).

Somit hat die Reduzierung von Dissipation in dieser Hinsicht immer zwei positive Aspekte. Zum einen werden Primärressourcen geschont, die andernfalls zum Ausgleich der Verluste dienen. Zum anderen wird die Gefahr ökologischer Auswirkungen minimiert. Eine Reduzierung gebietet sich daher schon aus dem Vorsorgeprinzip heraus.

## 6.1 Nachhaltiges Ressourcenmanagement

Mit Blick auf den Sphärengedanken aus Kapitel 2.3 zeigt sich, dass es vor allem die Übergänge zwischen den Sphären sind, an denen sich ökologische Implikationen darstellen. Nachhaltigkeitsorientiertes Ressourcenmanagement bezog sich lange Zeit darauf, den Umgang mit Abfällen und Emissionen zu regeln (Gleich 2006, S. 10). Immer stärker kristallisiert sich jedoch heraus, dass es darum gehen muss, Abfälle und Emissionen gar nicht erst in diesem Ausmaß entstehen zu lassen, wie es mittlerweile etwa in der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie (Europäisches Parlament 2008) oder auch dem Kreislaufwirtschaftsgesetz auf nationaler Ebene (KrWG 2012) formuliert ist. Solche Vermeidungsstrategien setzen sich grob aus zwei Teilbereichen zusammen. Zum einen ist hier die absolute Reduktion anthropogen induzierter Stoffströme durch Dematerialisierung zu nennen. Wenn negative Auswirkungen unseres rohstoffbezogenen Handelns immer deutlicher werden, führt eine Reduktion unserer Material- und Energieströme auch zu einer Verminderung der Auswirkungen. Bekannt wurde die Idee der Dematerialisierung in den 1990er Jahren durch Friedrich Schmidt-Bleeks *Faktor 10*-Konzept. Demzufolge ist für industrialisierte Staaten wie Deutschland eine Reduktion der Materialströme um den Faktor 10 nötig, um wieder ein nachhaltiges Niveau zu erreichen (Schmidt-Bleek und Klüting 1994, S. 167). Um keine wirtschaftlichen und wohlstandsbezogenen Einschränkungen erwarten zu müssen, wird dieses Konzept häufig mit den Ideen der Ressourceneffizienz verbunden (Europäische Kommission 2011, S. 2). Das heißt, material- und produktspezifische Funktionen und Dienstleistungen sollen konstant bleiben, bei einer gleichzeitigen Reduzierung der eingesetzten Ressourcen. Die Gefahr ist hoch, dass erreichte Effizienzsteigerungen, etwa mittels Miniaturisierung der Produkte, durch Rebound-Effekte wieder kompensiert werden (siehe Kapitel 2.3). Noch dazu wird ein effektives Recycling durch solche Prozesse teils deutlich erschwert. Je unkonzentrierter ein Rohstoff im jeweiligen Produkt vorliegt, desto komplizierter erweist sich das Recycling, was wiederum zur Dissipation dieser Stoffe führt (Fendel und Kempkes 2014, S. 211). Effizienzzunahmen werden somit durch Externalisierung mit Auswirkungen an anderer Stelle erkaufte.

Der zweite Bereich sieht eine Erhöhung der Verweildauer von Materialien und Produkten in der Technosphäre vor. Wenn der Fokus bisher auf dem Abfallmanagement lag, muss er künftig stärker auf das Ressourcen- und Produktmanagement im anthropogenen System gelegt werden. Es gilt, den Übergang von der Technosphäre in die Umwelt zu begrenzen. Gleich (2006, S. 10) zufolge muss daher neben die Abfall- und Emissionspolitik eine stärkere Produkt- und Produktionspolitik treten, die insbesondere auch Dissipation entlang des kompletten Lebenszyklus beachtet. Eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft soll diese Aspekte beinhalten.



## 6.2 Leitbahnen einer Kreislaufwirtschaft

Eine umfassende wissenschaftliche Abhandlung über die Potenziale und Herausforderungen einer Kreislaufwirtschaft stammt aus dem Jahr 2013 von der Ellen MacArthur Foundation mit dem Titel *Towards a Circular Economy*. Auch im Deutschen ist inzwischen vermehrt von Circular Economy anstatt von Kreislaufwirtschaft die Rede. Denn die Prinzipien der in Deutschland bekannten Kreislaufwirtschaft basieren auf dem bereits erwähnten und gleichnamigen, 1996 formulierten Gesetz (KrWG 2012). Auch heute noch wird damit häufig eine abfallorientierte Sichtweise verbunden, die vorrangig auf der Abfallvermeidung, dem Umgang mit Abfallstoffen und ihrer Wiedereingliederung in den Produktionsprozess basiert. Das Konzept der Circular Economy geht aber weit darüber hinaus und umfasst die komplette Prozess- und Stoffkette des Wirtschaftssystems.

Seit Beginn der Industrialisierung basiert der maßgebende Teil des Weltwirtschaftssystems auf einem linearen Prinzip im Sinne von *take, make, dispose*. Der Mensch fördert Ressourcen, erstellt aus den Rohstoffen Produkte und wirft diese nach dem Konsumieren weg. In Anbetracht der wachsenden Nachhaltigkeitsdebatte wurde Recycling lange Zeit als Allheilmittel betrachtet. Doch ein kurzer Blick auf die Zahlen zu global rezyklierten Stoffen, etwa im Bericht des UN Umweltprogramms aus dem Jahr 2011 (UNEP 2011), reicht aus um zu erkennen, dass eine nachhaltige Kreislaufführung in den meisten Fällen weit entfernt ist. Auch das Thema Dissipation findet in dieser klassischen Sichtweise kaum Beachtung. Noch dazu findet Dissipation nur zu einem Teil in der vom Recycling abgedeckten Produktlebensphase statt. Für dissipative Stoffströme in den vor- und nachgelagerten Lebenszyklusphasen greift das reine Recyclingkonzept nicht. Umso erstaunlicher ist es, wie auch Zimmermann (2015, S. 184) herausstellt, dass sich insbesondere die Diskussion um kritische Metalle noch immer sehr auf den Recycling-Aspekt fokussiert. Zimmermann stellt hier beispielsweise die Arbeiten von Buchert et al. (2009), Hagelüken (2014) und Rademaker et al. (2013) an.

Eine umfassende Kreislaufwirtschaft orientiert sich in ihrem Grundprinzip an natürlichen Ökosystemen, die durch geschlossene Kreisläufe gekennzeichnet sind, wie es im Kapitel 2.4 als Analogie zwischen industriellem und biologischem Metabolismus beschrieben wurde (WBGU 2011, S. 145–146). Das Konzept setzt konsequenterweise ganz

am Anfang der Prozesskette an, im Denken von Produkten und dem Entwerfen von Designs, die eine systemische Integration in ein nachhaltiges Stoff- und Produktmanagement ermöglichen. Die Vermeidung von Dissipation muss ebenso als Kernelement einer Kreislaufwirtschaft gelten. Um Rohstoffe möglichst lang im technosphärischen Kreislauf zu führen, müssen Quantitäts- wie auch Qualitätsminderungen so weit wie möglich minimiert werden. Es gilt also das Prinzip, den Einsatz von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe zu substituieren. Wie Reuter et al. (2018, S. 69) hervorheben, sind dem Ganzen natürlich thermodynamische Grenzen gesetzt. Insbesondere die Recyclingfähigkeit hängt dabei enorm von der jeweiligen Material- respektive Metallzusammensetzung ab. Aufgrund technologischer und energetischer Einschränkungen ist es gegenwärtig nicht möglich, alle Metalle im Recyclingprozess voneinander abzutrennen. Hier sind besonders die Stahl- und Aluminiumindustrie hervorzuheben. Aus diesen Trägermetallen sind viele der beigemenigten Legierungsmetalle kaum wiederverwertbar. Reuter et al. (2018, S. 70) haben hierfür das sogenannte *Metallrad* entwickelt, das die Verluste und potenziellen Rückgewinnungen verschiedener Metallkombinationen veranschaulicht. Es zeigt beispielsweise, dass Kupfer, Zinn, Silber und Platin weder aus dem Stahl- noch aus dem Aluminiumrecycling wiedergewonnen werden können und obendrein noch teils negative Auswirkungen auf deren Eigenschaften haben (sog. Downcycling). Die Folge sind hohe Dissipationsraten und eine erhöhte Primärförderung von Eisen und Aluminium, die dem recycelten Rohstoff beigemenigt werden müssen, um die Verunreinigungen auszugleichen. Gerade das Produktdesign ist hier also gefragt, um solche Metallkombinationen in Produkten möglichst zu vermeiden oder im Zweifelsfall eine getrennte Sammel- und Recycling-Infrastruktur zu ermöglichen. Genau hier muss eine Kreislaufwirtschaft also ansetzen und insbesondere auch Dissipation über den kompletten Wertschöpfungszyklus integriert beachten.

Weiterführende Informationen zum komplexen Thema Circular Economy können beispielsweise im Hauptgutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU 2011) aus dem Jahr 2011 oder beim Bericht der Ellen MacArthur Foundation (2013) gefunden werden.

### 6.3 Dissipation aus dem Blickwinkel der planetaren Grenzen

Schon in Kapitel 2.5 wurde das Konzept der planetaren Grenzen kurz angesprochen. Mit den anthropogen induzierten Entwicklungen steigen auch die ökologischen Auswirkungen. Wir, die Menschen, verändern unter anderem durch unseren Rohstoffverbrauch, durch unsere industrielle Produktion und unseren steigenden Konsum die biogeochemischen Kreisläufe des Planeten und hinterlassen gleichzeitig Zeugnisse unseres Handelns als klare Anzeichen für das vieldiskutierte Zeitalter des Anthropozäns. Diese Entwicklungen zehren beständig an der systemischen Stabilität und Tragfähigkeit des Planeten, der den Menschen in den letzten 10.000 Jahren eine lebensfreundliche Umwelt geboten hat. Das Konzept der planetaren Grenzen zeigt auf, dass eben dieser Stabilität Grenzen gesetzt sind. Das Überschreiten kritischer Kipppunkte erhöht das Risiko, abrupte, irreversible Umweltveränderungen zu erzeugen (Rockström et al. 2009b, S. 5).

Eine nachhaltige Entwicklung im Rahmen der planetaren Grenzen muss aus ressourcenbezogener Perspektive alle Glieder der Wertschöpfungskette betrachten. Im aktuellen Zustand unserer Weltwirtschaft, in der eine Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch noch nicht erreicht ist, gilt nach wie vor: Wo die Rohstoffgewinnung zunimmt, nehmen auch die ökologischen Auswirkungen zu. Wo die Natur zur Optimierung tendiert, tendiert die Menschheit zur Maximierung. Effizienzgewinne werden selten zur Systemstabilisierung, sondern für Wachstum genutzt (Diederer 2010, S. 42), wie es sich beispielsweise immer wieder durch den Rebound Effekt zeigt. Dies führt zusehends zu einer immer stärkeren Konfrontation mit den planetaren Grenzen.

Die in der vorliegenden Arbeit analysierten Fallbeispiele verdeutlichen die Auswirkungen von Dissipation auf insbesondere zwei der planetaren Grenzen. Es wurde aufgezeigt, welche klimawandelbezogenen Auswirkungen die dissipativen Verluste aus der Prozesskette von Helium als Kühlmittel für Magnetresonanztomographen bedingen. Die Bedeutung wie auch die Einschränkungen dieses Vorgehens wurden in Kapitel 5.7 diskutiert und eingeordnet. Zwar handelt es sich bei dieser isolierten Betrachtung eines Anwendungsbeispiels um relativ geringe Treibhausgasemissionen. Dennoch

konnte aufgezeigt werden, dass insbesondere aufgrund unseres auf fossilen Brennstoffen basierenden Energiesystems auch die dissipativen Verluste einen quantifizierbaren Teil zur Belastung der planetaren Grenzen beitragen.

Das Fallbeispiel Gadolinium hat den Einfluss von Dissipation auf eine weitere Dimension verdeutlicht. Im Konzept der planetaren Grenzen wird hier von der Dimension *Einbringung neuartiger Substanzen* gesprochen. Bekannt und offensichtlich wurde deren Einfluss auf die Umwelt durch Stoffe wie PCBs oder Schwermetalle wie Quecksilber (Minamata-Krankheit). Das Stockholm Resilience Centre um Johan Rockström spricht hier von Verbindungen, die potenziell irreversible Auswirkungen auf lebendige Organismen und auf die physikalische Umwelt haben können. Durch Persistenz und Bioakkumulation reicht auch ein zum aktuellen Zeitpunkt ungefährliches, subletales Niveau, um in Zukunft kumulative Effekte wie verminderte Fruchtbarkeit oder das Potenzial einer dauerhaften Schädigung mit schwerwiegenden Auswirkungen auf Ökosysteme zu haben (Steffen et al. 2015, S. 7). Die räumliche Komponente kann dabei je nach Stoff ganz unterschiedlich ausfallen. Die Verteilung dissipierter Stoffe ist stark abhängig vom jeweils empfangenden Umweltmedium. Die Wirkungen können global wie auch regional auftreten. Ebenso können Verunreinigung und Quelle räumlich weit voneinander entfernt liegen. Diese räumliche Trennung von Ursache und Wirkung unterscheidet sich stark von den zu Beginn dieser Arbeit beschriebenen historischen Entwicklungen des menschlichen Umgangs mit Ressourcen. Umweltauswirkungen zeigten sich in präindustriellen Zeiten primär auf lokaler Ebene und beeinträchtigten die lokalen Belastungsgrenzen. Heutzutage verdeutlicht sich immer stärker ein globaler Charakter. Durch systemisch zusammenhängende, globalisierte Strukturen zeigen sich viele Umweltveränderungen im kompletten System Erde (Steffen 2004, S. 131).

Die Untersuchungen von Gadolinium als Kontrastmittel zeigen stark regionale Ausprägungen, die jedoch mittlerweile weltweit beobachtet werden können. Allerdings hat die Analyse in dieser Arbeit auch gezeigt, dass Gd-Messwerte nicht monokausal einer Anwendung zugeordnet werden können. Umso wichtiger ist es hier nochmals zu betonen, alle Abschnitte eines Stoffstroms über alle relevanten Sphären hinweg zu untersuchen. Die regionale Untersuchung sächsischer Gewässermesswerte hat klargemacht, dass erhöhte Gd-Werte nicht instinktiv aufgrund der aktuellen Thematik in diesem Ursache-

Wirkungsgefüge verortet werden können. Eine Rückverfolgung der Kette unter Einbezug der geographischen Gegebenheiten ist umso wichtiger.

Allerdings zeigt das Gd-Beispiel auch die bisher ungelöste Herausforderung im konzeptionellen Umgang mit solchen neuartigen Stoffströmen im Rahmen der planetaren Grenzen: bisher ist es nicht möglich, einen einzelnen Grenzwert zu quantifizieren, ab dem die Belastungsgrenzen des Planeten irreversibel überschritten werden (Rockström et al. 2009b, S. 18–19). Der Blick auf die geschätzt über 350.000 von der Menschheit entwickelten Chemikalien – alles Stoffe welche der Planet Erde so nie hervorgebracht hätte - mit all ihren unterschiedlichen ökologischen Auswirkungen verdeutlicht das Problem (Wang et al. 2020, S. 2575). Noch dazu liegen bei weitem nicht für alle diese Stoffe ökotoxikologische Studien vor. Und erschwerend kommt hinzu, dass im Zulassungsprozess von Chemikalien keine Wechselwirkungen mit all den anderen hunderttausenden synthetischen Stoffen untersucht werden (Souza Machado et al. 2019, S. 4680). Daher gehen Forderungen zu einer neuausgerichteten Ökotoxikologie weg von der Untersuchung einzelner Eintragsstoffe, hin zur umfassenderen Analyse der Resilienz biologischer Systeme (Souza Machado et al. 2019, S. 4681). So hat auch Steffen (2004, S. 131) im Zuge seiner Untersuchungen zur *Great Acceleration* (siehe Kapitel 2.2) schon betont, dass einige Systeme gut gepuffert seien und eine Resilienz gegenüber Veränderungen aufweisen können. Andere sind es dagegen nicht und in einigen Fällen kann ein Schwellenwert der Resilienz überschritten werden und das System in einen instabilen Zustand übergehen. Resilienz beschreibt dabei die Fähigkeit eines Systems, seine Struktur und Verhaltensmuster angesichts von Störungen aufrechtzuerhalten (Gunderson et al. 2014, S. 76). Es stellt sich also weiterhin die Frage, welches Maß an Chemikalieneintrag das System Erde als Ganzes verkraftet, ohne durch das Überschreiten eines Kipppunktes irreversible Veränderungen zu erfahren.

## 6.4 Dissipation aus politischer Perspektive

In der Wissenschaft findet die Bedeutung von Ressourcendissipation mittlerweile breiten Konsens. Dem folgend stellt sich natürlich die Frage, inwiefern das Thema Dissipation, und dem übergeordnet das Thema Ressourcen als Ganzes, auch auf politisch-regulatorischer Ebene aufgegriffen wird. Die Politik setzte sich 2015 mit den Sustainable Development Goals (SDG) auf globaler Ebene ein Rahmenwerk, um die erkannten Herausforderungen (UN 2015b) anzugehen und eine nachhaltigere Zukunft zu ermöglichen, ohne die angesprochenen Belastungsgrenzen des Planeten zu überschreiten. Die in Deutschland auch als Agenda 30 bekannten 17 Ziele sollen ein weltweit menschenwürdiges Leben ermöglichen und dabei soziale, ökonomische wie auch ökologische Aspekte miteinbeziehen (Bundesregierung 2021) sowie Leitlinien und eine Orientierungshilfe für die nationale und lokale Politik bieten (Mancini et al. 2019, S. 3). Zentrale Ziele sind etwa die Armutsbekämpfung, die Minderung von Ungleichheit, ein nachhaltiges Produzieren und Konsumieren oder auch das Umsetzen von Klimaschutzbestrebungen. Die Frage, welche Bedeutung Rohstoffe und insbesondere deren Dissipation in diesem globalen Rahmenwerk einnehmen, wird im Verlauf der Diskussion zum Schluss dieser Arbeit nochmals aufgegriffen.



**Abbildung 32: Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDG, Sustainable Development Goals)**  
Quelle: UN 2015a

Mancini et al. (2019) haben in einer Studie die Rolle von Rohstoffen im Konzept der SDGs genauer untersucht. Dabei stellen sie als Herausforderung die in vielen Fällen zweigeteilte Rolle von Rohstoffen heraus. Beispielsweise verursacht die Förderung von Rohstoffen THG-Emissionen, zugleich werden aber womöglich ebendiese Rohstoffe in klimafreundlichen Energietechnologien eingesetzt, um den Klimawandel zu mindern (Mancini et al. 2019, S. 60).

Entlang ihrer Wertschöpfungskette können Rohstoffe und im Endeffekt auch die Dissipation von Rohstoffen auf viele der SDG-Ziele direkten oder indirekten Einfluss haben. Hervorzuheben ist hier insbesondere Ziel 12 *Nachhaltige/r Konsum und Produktion*. Die wichtigsten enthaltenen Indikatoren betreffen den nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen, die Abfallreduzierung und den umweltgerechten Umgang mit Chemikalien und Abfällen. Hier zeigt sich deutlich die Verbindung zu den Bestrebungen einer umfassenden Kreislaufwirtschaft.

Auch in diversen weiteren Initiativen wird die Bedeutung von Rohstoffen für eine ökologisch tragfähige Zukunft immer stärker berücksichtigt. So bezeichnet beispielsweise die Europäische Kommission in ihrem Strategiepapier *Ein sauberer Planet für alle* Rohstoffe als „(...) unverzichtbar, um CO<sub>2</sub>-neutrale Lösungen in allen Wirtschaftssektoren zu ermöglichen“ (Europäische Kommission 2018, S. 14).

Auch die Europäische Rohstoffinitiative (Europäische Kommission 2003, S. 5) stellt Rohstoffe als Pfeiler der Ökonomie heraus und zeigt ihre Bedeutung für die Industrie auf. Dabei basiert die Initiative auf den drei Säulen *Sicherung des Zugangs zu Rohstoffen, die Förderung von europäischen Quellen* sowie *die Reduzierung des Primärrohstoffverbrauchs*. Letztgenannter Punkt beinhaltet beispielsweise Effizienzsteigerungen sowie Erhöhung der Recyclingmengen. Dissipation findet in den meisten dieser Papiere jedoch höchstens indirekt Einzug.

Bisher zeigt sich die Technosphäre häufig als Black Box. Es existieren zahlreiche Instrumente zum Monitoring von Rohstoffförderung und damit vom Übertritt aus den Umweltsphären in die Technosphäre (z.B. LCIA, MFA). Zusätzlich bestehen am Ende der Wertschöpfungskette verschiedene recyclingspezifische Instrumente. Auf politischer Ebene werden diese Aspekte aufgegriffen und gefördert, etwa durch die schon erwähnte

Rohstoffinitiative, das Umweltinnovationsprogramm (UIP) und das deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess II). Sowohl der Input als auch der Output von Rohstoffen stehen dementsprechend im Fokus. Die genauen Wege der Rohstoffe innerhalb der Technosphäre sind aber häufig unbekannt. Doch gerade hier kommt es zur Funktionalisierung und zur Veränderung der chemischen Form, die den weiteren Weg und die damit einhergehenden Implikationen festlegen. Daher ist es von grundlegender Bedeutung, die Art und Weise, wie Ressourcen innerhalb der Technosphäre kontrolliert, modelliert und bilanziert werden, zu verbessern, auch im Hinblick auf die Bewertung von Produkten im Kontext der Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (Zampori und Sala 2017, S. 5–6; Beylot et al. 2020a, S. 3).



## 6.5 Kritische Würdigung der Arbeitsergebnisse

In Kapitel 1.2 wurden die Fragestellungen und Ziele dieser Arbeit formuliert. Die grundlegende Ausgangsposition war es, Dissipation im Rahmen **der gesamtgesellschaftlichen Ziele Ressourcenschonung und Klimaschutz** zu untersuchen.

Diesem Grundgedanken folgend wurden mehrere spezifische Fragestellungen bearbeitet, worauf im Folgenden nochmals resümierend eingegangen wird:

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

Kapitel 2 liefert hierfür einen umfassenden historischen Überblick und zeigt auf, wie sich die anthropogene Rohstoffnutzung und die Rohstoffmobilisierung im Besonderen über die Jahrhunderte und Jahrtausende hinweg entwickelt hat. Dabei zeigt sich, der Zivilisationsgeschichte entsprechend, ein Übergang von lokal und regional geprägten Rohstoffnutzungsmustern hin zu globalen Mustern mit dementsprechend anfangs eher regionalen hin zu vermehrt globalen dissipativen Stoffströmen und den damit verbundenen ökologischen Auswirkungen. Mit der Industrialisierung begann auch ein völlig neues Tempo anthropogen bedingter Stoffmobilität über den kompletten Planeten, das in den letzten Jahrzehnten in der sogenannten *Great Acceleration* gipfelte.

Im wissenschaftlichen Diskurs findet das Thema Dissipation seit einigen Jahren immer mehr Beachtung. Dabei vollzog sich ein Wandel von allgemeinen Entropiebetrachtungen (z.B. Ayres 1994) hin zu konkreten Materialbetrachtungen, die auf dissipative Austritte aus der Wertschöpfungskette untersucht werden. Für diese Arbeit wurde ein Literaturscreening vorgenommen, um einen möglichst breiten Überblick über die bisherigen Schwerpunkte und methodischen Ansätze in dieser Hinsicht zu erlangen (siehe 3.2). Dabei wurde deutlich, dass multiperspektivische und transdisziplinäre Untersuchungen, wie sie in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt wurden, nach wie vor selten sind.

***Welche Charakteristika und welche Pfade von Dissipation zeigen sich innerhalb sowie zwischen den Sphären? 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?***

Insbesondere am Fallbeispiel Gadolinium wurde das Potenzial einer transdisziplinären Analyse, bestehend aus einer Kombination aus globaler Materialflussanalyse und regionaler GIS (Geoinformationssystem)-Analyse, aufgezeigt. Daraus können wertvolle Informationen über die Quellen und räumlichen Verteilungspfade von Rohstoffen gewonnen werden. Die Kombination aus quantitativer Analyse makroskopischer Vorgänge und eines regionalen empirischen Ansatzes zur höheren Auflösung stellte sich als praxistauglich heraus. Die Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von Daten erwies sich jedoch als große Herausforderung. Innerhalb Deutschlands war wegen sonst fehlender oder nicht-zugänglicher Daten, Sachsen die für diese Arbeit einzig mögliche Beispielregion. Aufgrund der schlechten Datenlage musste eine neue Methode zur Unterscheidung von anthropogen induzierter und geogener Stoffkonzentration gefunden werden. Diese ist mit interpretativen Ansätzen verbunden, die gewisse Unsicherheiten mit sich bringen. Diese Vorgehensweise kann auch auf andere Dissipationsstoffe und auch andere geographische Räume übertragen werden, um Dissipationspfade und mögliche Risiken zu untersuchen – eine entsprechende Datenlage vorausgesetzt. Die Verwendung einer räumlichen Perspektive verbessert die Grundlagen zur Bewertung von Auswirkungen dissipativer Lebenszyklusphasen und kann zum Beispiel als Ansatzpunkt für regionale Ökotoxizitätsanalysen dienen. Die Einbringung einer zeitlichen Perspektive kann die Aussagekraft noch weiter erhöhen.

Es hat sich zudem gezeigt, dass in vielen Fällen ein unterschiedliches Verständnis von stofflicher Dissipation besteht, was eine disziplinübergreifende wissenschaftliche Auseinandersetzung erschwert. Daher wird, auf der Grundlage der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse aus Theoriestudium und analytischer Untersuchungen, folgende Definition vorgeschlagen:

*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.*

**Welche Handlungsoptionen zur Vermeidung beziehungsweise Verminderung von Dissipation konnten aufgezeigt werden?**

Der Aufbau dieser Arbeit erlaubt und erfordert es, mögliche Handlungsoptionen in zwei Teilbereiche aufzugliedern. Zum einen erschließen sich anhand der Fallbeispiele ganz konkrete Optionen zur Minderung von Dissipation. Zum anderen lassen sich darauf aufbauend allgemeine Maßnahmen ableiten. In den jeweiligen Schlussbetrachtungen der zwei Fallbeispiele (Kapitel 4.7 & 5.7) wurden die Ergebnisse schon für jeweils reflektiert und Handlungsoptionen aufgezeigt.

Insbesondere am Beispiel von Gadolinium zeigte sich, dass auf wissenschaftlicher Ebene die Funktionsformen von Stoffen und nicht ihre elementare Form untersucht werden müssen, um potenzielle Auswirkungen nachvollziehen zu können. Nur so können konkrete Handlungsoptionen abgeleitet werden, wie das Fallbeispiel Kontrastmittel zeigt. Zwar ist meist von Elementen die Rede (wie auch hier von Gadolinium), allerdings ist es in vielen Fällen die physikochemische Funktionalisierung durch den Menschen, welche das Anwendungsprofil der Stoffe formt und somit auch die dissipativen Pfade einleitet. Eine räumliche Analyse auf lokaler Ebene kann dabei helfen, diese Pfade in höherer Auflösung nachzuverfolgen.

Auch wenn in diesem konkreten Fall ökotoxikologische Auswirkungen bisher kaum, beziehungsweise nur in äußerst geringem Umfang festgestellt wurden, zeigt sich, dass umfassende Untersuchungen zu kumulativen Effekten, Persistenzen, Wechselwirkungen zwischen den Stoffen, Transmetallierung, Metabolisierung oder Umweltdegradation weitestgehend fehlen. Humantoxikologische Auswirkungen wurden dagegen in den letzten Jahren festgestellt. Ein konsistenteres Vorgehen in Forschung und Entwicklung nach den Leitlinien des Vorsorgeprinzips der Europäischen

Union (Europäische Kommission 2017b) könnte sich künftig als noch wichtigeres Instrument zur Vermeidung dissipativ-toxischer Effekte etablieren.

Das Fallbeispiel Helium verdeutlichte, dass die komplette Prozesskette eines Rohstoffs oder eines Produktes betrachtet werden sollte, um jeweils angepasste Handlungsoptionen zur Vermeidung dissipativer Verluste aufzeigen zu können. Zudem wurde eine ganz grundsätzliche Herausforderung im Umgang mit dem häufig als kritischen Rohstoff bezeichneten Helium verdeutlicht. Im Gegensatz zu nahezu allen anderen Ressourcen weist Helium eine bisher völlig unbeachtete Komponente von Dissipation auf – es dissipiert aus dem Erdsystem hinaus. Damit erwies sich Helium insgesamt als weiteres sehr geeignetes Fallbeispiel zur Untersuchung von stofflicher Dissipation. Deutlich wurden hierbei die facettenreichen, möglichen Auswirkungen dissipativer Stoffnutzungen. Neben potenzielle ökologische Auswirkungen durch Stoffeinträge in die Umwelt (Beispiel Gadolinium) tritt die durch einen nötigen Ausgleich der Verluste erhöhte Primärproduktion, was folglich wiederum Einfluss auf die übergeordneten Themenbereiche Ressourcenschonung und Klimaschutz hat.

Ganz grundsätzlich und unabhängig von den Fallbeispielen sollte das Schließen von Materialkreisläufen innerhalb der Technosphäre das prioritäre Ziel zur Vermeidung von Dissipation sein. Das Verhindern von Stoffaustritt aus der Technosphäre in die Umwelt und damit der Eintritt synthetischer, persistenter und womöglich toxischer Materialien in die Umwelt sollte Gebot solch systemischer Bestrebungen sein. Um gleichzeitig der Anreicherung ungewollter Stoffe innerhalb der Technosphäre im Zuge der Kreislaufwirtschaft entgegenzuwirken, müssen ganzheitliche Konzepte gängig werden, die beim recyclingfreundlichen Design von Stoffen und Produkten anfangen.

## 6.6 Methodische Einschränkungen der Arbeit

Zum Ende der beiden Fallbeispiele wurde das jeweils gewählte Vorgehen sowie die damit verbundenen methodischen und interpretatorischen Einschränkungen bereits dargelegt. An dieser Stelle soll im Rahmen einer kurzgehaltenen Reflexion der trans- und interdisziplinären methodischen Vorgehensweise die Aussagekraft und Repräsentativität der Arbeit eingeordnet werden. Tiefergehende Erläuterungen bieten die Kapitel 4.6.4 und 5.7.

Die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit wurde so gewählt, dass das breite Spektrum des Themas zum einen möglichst umfassend abgedeckt wird und zugleich in bestimmten Teilbereichen auf tiefergehende, ganz spezifische Ausprägungen von Dissipation eingegangen werden kann. Die Wahl eines aufgeteilten Vorgehens in theorieorientierte Arbeit zur breiten Abdeckung sowie in detaillierte fallbasierte Arbeit zur empirisch-analytischen Untersuchung ganz spezifischer Stoffe und Anwendungen stellte sich dafür als erforderlich und zweckdienlich heraus. Dieses Vorgehen sowie die Größe des Themas brachte es mit sich, dass nur eine ausschnitthafte Beleuchtung erfolgen konnte. Theoretische Grundlagen konnten anhand der Fallbeispiele jedoch empirisch deutlich konkretisiert und veranschaulicht werden. Die völlig unterschiedlichen Beispiele verdeutlichen dabei einmal mehr die Komplexität und Spannweite von stofflicher Dissipation. Die Relevanz des Themas konnte dadurch aber von globaler bis auf lokaler Ebene, zumindest ausschnitthaft, aufgezeigt werden.

Als herausfordernd zeigte sich zudem die Datenverfügbarkeit, sowohl in den globalen und lokalen Untersuchungen zu Gadolinium, als auch in der Lebenszyklusanalyse von Helium. Daher sind die analytischen Untersuchungen mit Unsicherheiten behaftet. Ein stochastischer Einbezug dieser Unsicherheiten, etwa durch eine Monte Carlo Simulation, kann weiterführenden Arbeiten helfen, die Ergebnisse noch besser einzuordnen.

## 6.7 Ausblick - Aufgaben einer anknüpfenden Forschung und Praxis

Die Freisetzung von Stoffen in die Umwelt ist immer mit Umweltrisiken verbunden. 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 Arbeit aufgezeigt hat.

Vor dem Hintergrund der Arbeit geht es bei der Reduzierung bzw. Vermeidung von dissipativen Verlusten sowohl um die Schonung von Ressourcen als auch um Umweltschutz (Zimmermann 2015, S. 23). Ein breiteres Wissen über Dissipation ist somit essenziell für einen nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen.

Zum heutigen Zeitpunkt sind die Konsequenzen und Auswirkungen des Eintrages vieler Stoffe noch völlig unbekannt. Aber selbst wenn sich herausstellen sollte, dass viele der eingebrachten Stoffe zumeist unbedenklich für die Natur sind, so ist es dennoch lohnenswert, das Verhalten von möglichst vielen Stoffen und ihre eingeschlagenen dissipativen Transportwege zu kennen. Häufig lassen sich ungefährliche Stoffe als Anzeiger, sogenannte *Tracer*, für ähnliche Stoffe verwenden. Denn schon heute ist klar, dass stoffliche Dissipation in vielen Regionen der Welt künftig vorerst weiter zunehmen wird. Zwar sind insbesondere in Europa die Belastungen mit den klassischen Schwermetallen rückläufig, mit positiven Effekten für die Umwelt. Aber gerade zu neuartigen Stoffverbindungen mit ganz spezifischen Eigenschaften gibt es aktuell nur sehr wenige Informationen (Ebeling et al. 2020), wie das Beispiel Gadolinium aufgezeigt hat.

Weitere Forschungsarbeiten sind in Zukunft dringend notwendig, um frühzeitig mögliche negative Auswirkungen auf die aquatische und die marine Umwelt zu erfassen und die relevanten Dissipationspfade in Technosphäre und Umwelt zu kennen. Mit Blick auf die zunehmende Stoffvielfalt und deren häufig vermeintliche ökologische Unschädlichkeit erweist sich ein Zitat von Stephenson aus dem Jahr 1977 auch für heute, über 40 Jahre später, als äußerst passend:

*„The question of the importance attached to persistence (...) is a very difficult one. (...) there appears little reason to be concerned about a material which, even though present in the environment, is not causing any detectable damage. On the other hand, persistent materials, because of this property, will accumulate in the environment for as long as they are released. Since the environment is not effective at cleansing itself of these materials, they will remain for indefinite periods (...). The problem could become entirely out of control and it would be extremely difficult if not impossible to do anything about it. Materials which are strongly persistent can accumulate to rather high levels in the environment and effects which would not otherwise be important could become so.”*  
(Stephenson 1977, S. 48)

Die von ihm aufgeworfene Frage zum Eintrag persistenter Stoffe gilt mit Blick auf die Dissipation verschiedenster Elemente und Materialien, ob toxisch oder vermeintlich harmlos, nach wie vor. Auch heute muss, womöglich mehr denn je, die Frage gestellt werden, ob wir unsere menschengemachten neuartigen Stoffgemische, welche die Natur so niemals hervorbringen würde, mobilisieren und teils unkontrolliert in unsere Umwelt entlassen wollen.





## Literaturverzeichnis

- Abushab, K. M.; Suleiman, M. D.; Alajerami, Y.; Alagha, S. I.; ALnahal, M.; Najim, A.; Naser, M. (2018): Evaluation of advanced medical imaging services at governmental hospitals-Gaza Governorates, Palestine. In: *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 11 (1), S. 43–48.
- Abb.9: Lithosphäre: Johannes Plenio, unsplash.com; Biosphäre: Vlad Hilistanu, unsplash.com; Hydrosphäre: Michael Olsen, unsplash.com; Technosphäre: Jonathan Riley, unsplash.com; Atmosphäre: wallpapersmug.com; Erde: NASA.
- Ahting, M.; Brauer, F.; Duffek, A.; Ebert, I.; Eckhardt, A.; Hassold, E.; ... Winde, C. (2018): Empfehlungen zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau.
- Allègre, C.; Manhès, G.; Lewin, É. (2001): Chemical composition of the Earth and the volatility control on planetary genetics. In: *Earth and Planetary Science Letters* 185 (1-2), S. 49–69.
- Ardente, F.; Beylot, A.; Zampori, L. (2019): Towards the accounting of resource dissipation in LCA. In: ENEA (Hg.): Il life cycle thinking a supporto delle strategie di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici. Proceedings of the 13th Italian LCA Network Conference. Unter Mitarbeit von Gabriella Arcese, Maurizio Cellura, Sara Cortesi, Laura Cutaia, Maria C. Lucchetti, Erika Mancuso et al. Roma, 13. - 14. Juni 2019, S. 202–208.
- Argus Media (Hg.) (2020): How to build a rare earth supply chain. White Paper.
- Armstrong, C. (2015): Against ‘permanent sovereignty’ over natural resources. In: *Politics, Philosophy & Economics* 14 (2), S. 129–151.
- 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.

- Attari, H.; Cao, Y.; Elmholdt, T. R.; Zhao, Y.; Prince, M. R. (2019): A systematic review of 639 patients with biopsy-confirmed nephrogenic systemic fibrosis. In: *Radiology* 292 (2), S. 376–386.
- Attenberger, U. I.; Nitz, W. R. (2011): Praxiskurs MRT. Anleitung zur MRT-Physik über klinische Beispiele. 2., überarb. und erw. Aufl., Stuttgart: Thieme.
- Ausberg, L.; Ciroth, A.; Feifel, S.; Franze, J.; Kaltschmitt, M.; Klemmayer, I.; ... Schebek, L. (2015): Lebenszyklusanalysen. In: Kaltschmitt, M. und Schebek, L. (Hg.): Umweltbewertung für Ingenieure. Methoden und Verfahren. Berlin: Springer Vieweg, S. 203–306.
- Axford, W. I. (1968): The polar wind and the terrestrial helium budget. In: *Journal of Geophysical Research* (Vol. 73, No. 21), S. 6855–6859.
- Ayres, R. U. (1994): Industrial metabolism: Theory and policy. In: Allenby, B. R. und Richards, D. J. (Hg.): The greening of industrial ecosystems. Washington D.C.: National Academy Press, S. 23–37.
- Ayres, R. U.; Ayres, L. W.; Warr, B. (2004): Is the U.S. economy dematerializing? Main indicators and drivers. In: van den Bergh, J. C. J. M. (Hg.): Economics of industrial ecology. Materials, structural change, and spatial scales. Cambridge, Mass.: MIT Press, S. 57–93.
- Baacke, D. (2001): Geochemisches Verhalten umweltrelevanter Elemente in stillgelegten Polysulfidgruben am Beispiel der Grube „Himmelfahrt“ in Freiberg/Sachsen. Dissertation, Freiberg: Universitätsbibliothek „Georgius Agricola“.
- Baccini, P.; Brunner, P. H. (2012): Metabolism of the anthroposphere. Analysis evaluation design. 2nd ed., Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Bahlburg, H.; Breitzkreuz, C. (Hg.) (2017): Grundlagen der Geologie, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bardi, U. (2014): Der geplünderte Planet. Die Zukunft des Menschen im Zeitalter schwindender Ressourcen. Ein Bericht an den Club of Rome. Lizenzausg. für die Bundeszentrale für politische Bildung, München: Oekom.

- Barjenbruch, M.; Biebersdorf, N.; Burkhardt, D.; Firk, W.; Gnirss, R.; Joss, A. et al. (2015): Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen. Stand: April 2015, Hennef: DWA (DWA-Themen, 3).
- 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.
- Bau, M.; Schmidt, K.; Pack, A.; Bendel, V.; Kraemer, D. (2018): The European Shale: An improved data set for normalisation of rare earth element and yttrium concentrations in environmental and biological samples from Europe. In: *Applied Geochemistry* 90, S. 142–149.
- Beuge, P.; Hoppe, T.; Kluge, A.; Martin, M. (1994): Grubenwässer des Erzgebirges - Quellen von Schwermetallen in der Elbe. In: *Spektrum der Wissenschaft* (5), S. 102–107.
- Beylot, A.; Ardente, F.; Marques, A.; Mathieux, F.; Pant, R.; Sala, S.; Zampori, L. (2020a): Abiotic and biotic resources impact categories in LCA. Development of new approaches: accounting for abiotic resources dissipation and biotic resources, Luxembourg: Publications Office of the European Union (EUR, 30126).
- Beylot, A.; Ardente, F.; Sala, S.; Zampori, L. (2020b): Accounting for the dissipation of abiotic resources in LCA: Status, key challenges and potential way forward. In: *Resources, Conservation and Recycling* 157, 104748.
- BGBI (2019): Trinkwasserverordnung - Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. TrinkwV, vom 21.05.2001. Fundstelle: 2126-13-1.
- Binder, H. H. (1999): Lexikon der chemischen Elemente. Das Periodensystem in Fakten, Zahlen und Daten; mit vielen tabellarischen Zusammenstellungen, Stuttgart, Leipzig: Hirzel.
- Birka, M.; Roscher, J.; Holtkamp, M.; Sperling, M.; Karst, U. (2016): Investigating the stability of gadolinium based contrast agents towards UV radiation. In: *Water research* 91, S. 244–250.

- Bjørn, A.; Owsianiak, M.; Molin, C.; Hauschild, M. Z. (2018): LCA history. In: Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K. und Olsen, S. I. (Hg.): *Life Cycle Assessment*. Cham: Springer International Publishing, S. 17–30.
- Blanton, H. (2006): The atlantic cable medal of 1866. Online verfügbar unter <https://atlantic-cable.com/Souvenirs/1866Medal/AtlanticCableMedal1866.pdf>, zuletzt geprüft am 15.03.2021.
- Blaurock-Busch, E. (2011): Kontrastmittelzusatz Gadolinium und die Nephrogene Systemische Fibrose. In: *AZN* 1, S. 23–26.
- Blij, H. J. de; Muller, P. O. (1993): *Physical geography of the global environment*, New York: Wiley.
- Bousquet, J. C.; Saini, S.; Stark, D. D.; Hahn, P. F.; Nigam, M.; Wittenberg, J.; Ferrucci, J. T. (1988): Gd-DOTA: characterization of a new paramagnetic complex. In: *Radiology* 166 (3), S. 693–698.
- Bradshaw, A. M.; Hamacher, T. (2013): Nuclear fusion and the helium supply problem. In: *Fusion Engineering and Design* 88 (9-10), S. 2694–2697.
- British Geological Survey (BGS) (1913-1947): *Mineral statistics of the British Empire and foreign countries. 1913-1947*. London: Her Majesty's Stationary Office.
- British Geological Survey (BGS) (1942-1971): *Statistical summary of the mineral industry. 1942-1971*. London: Her Majesty's Stationary Office.
- British Geological Survey (BGS) (1970-2002): *World mineral statistics. 1970-2002*. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- British Geological Survey (BGS) (2000-2015): *World mineral production. 2000-2015*. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- British Geological Survey (BGS) (2011): *Rare earth elements profile*. Keyworth, Nottingham: British Geological Survey.
- Brünjes, R.; Hofmann, T. (2020): Anthropogenic gadolinium in freshwater and drinking water systems. In: *Water research* 182, S. 115966.

- Brunner, P. H.; Rechberger, H.; Munn, T. (2002): Anthropogenic metabolism and environmental legacies. In: Munn, T. (Hg.): Encyclopedia of global environmental change. Chichester: Wiley, S. 54–72.
- Brunner, P. H.; Rechberger, H. (2017): Handbook of material flow analysis. For environmental, resource, and waste engineers. Zweite Edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor et Francis Group.
- Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D.; United Nations Environment Programme (UNEP) (Hg.) (2009): Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Öko-Institut.
- Buckel, W.; Kleiner, R. (Hg.) (2012): Supraleitung, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Buckman, G. (2013): Global trade. Past mistakes, future choices. 1st ed., London: Zed Books (Global Issues).
- Bundesregierung (Hg.) (2021): Agenda 2030. Ziele für eine nachhaltige Entwicklung weltweit. Bundesregierung. Online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/ziele-fuer-eine-nachhaltige-entwicklung-weltweit-355966>, zuletzt geprüft am 11.03.2021.
- Bureau of Land Management (BLM) (2020): BLM announces disposal process for Federal Helium System. U.S. Department of the Interior; Bureau of Land Management (BLM).
- 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.
- Catling, D. C.; Zahnle, K. J. (2009a): The escape of planetary atmospheres. In: *Scientific American* (300), S. 1–14.
- Catling, D. C.; Zahnle, K. J. (2009b): The planetary air leak. In: *Scientific American* (300), S. 36–43.
- Challoner, J. (2018): The atom. A visual tour, Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

- Charalampides, G.; Vatalis, K. I.; Apostoplos, B.; Ploutarch-Nikolas, B. (2015): Rare earth elements: Industrial applications and economic dependency of Europe. In: *Procedia Economics and Finance* 24, S. 126–135.
- Choi, J. W.; Moon, W.-J. (2019): Gadolinium deposition in the brain: Current updates. In: *Korean journal of radiology* 20 (1), S. 134–147.
- Christian, D. (2018): Big History. Die Geschichte der Welt - vom Urknall bis zur Zukunft der Menschheit. 2. Auflage, München: Carl Hanser Verlag.
- Chrz, V. (2010): Helium storage and transport. Liquid Helium Week. Chart Ferox. CERN, Geneva, Switzerland, 09/2010. Online verfügbar unter <https://indico.cern.ch/event/90787/sessions/113901/attachments/1093425/>, zuletzt geprüft am 25.03.2021.
- Ciacci, L.; Harper, E. M.; Nassar, N. T.; Reck, B.; Graedel, T. E. (2016): Metal dissipation and inefficient recycling intensify climate forcing. In: *Environmental science & technology*.
- Ciacci, L.; Reck, B.; Nassar, N. T.; Graedel, T. E. (2015): Lost by design. In: *Environmental science & technology* 49 (16), S. 9443–9451.
- Cowper, S. E.; Robin, H. S.; Steinberg, S. M.; Su, L. D.; Gupta, S.; LeBoit, P. E. (2000): Scleromyxoedema-like cutaneous diseases in renal-dialysis patients. In: *The Lancet* 356 (9234), S. 1000–1001.
- Crutzen, P. J. (2002): Geology of mankind. In: *Nature* 415 (6867), S. 23.
- Cullbrand, K.; Magnusson, O. (2011): The use of potentially critical materials in passenger cars. Chalmers University Of Technology (Report No. 2012:13), Gothenburg.
- Department of the Interior (2018): Final list of critical minerals 2018. Office of the Secretary, Interior (83 FR 23295).
- Detzel, A.; Kauertz, B.; Grahl, B.; Heinisch, J.: Prüfung und Aktualisierung der Ökobilanzen für Getränkeverpackungen. UBA (Forschungskennzahl 3711 92 315, UBA-FB 002276).

- Diederer, A. (2010): Global resource depletion. Managed austerity and the elements of hope, Delft, The Netherlands: Eburon.
- DIN 14044, 2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006).
- DIN 14040, 2009: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- Dössel, O. (2016): Bildgebende Verfahren in der Medizin. Von der Technik zur medizinischen Anwendung. 2. Auflage, Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch).
- Du, X.; Graedel, T. E. (2011): Uncovering the global life cycles of the rare earth elements. In: *Scientific reports* 1, S. 145.
- Ebeling, A.; Zimmermann, T.; Pröfroc, D. (2020): Metalle in der Umwelt: lebensnotwendig oder giftig? Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG). Online verfügbar unter <https://hcdc.hzg.de/storymaps/metalle/>, zuletzt geprüft am 24.01.2021.
- Ebrahimi, P.; Barbieri, M. (2019): Gadolinium as an emerging microcontaminant in water resources: threats and opportunities. In: *Geosciences* 9 (2), S. 93.
- Eckelman, M. J.; Graedel, T. E. (2007): Silver emissions and their environmental impacts: A multilevel assessment. In: *Environ. Sci. Technol.* 41 (17), S. 6283–6289.
- Elhacham, E.; Ben-Uri, L.; Grozovski, J.; Bar-On, Y. M.; Milo, R. (2020): Global human-made mass exceeds all living biomass. In: *Nature* 588 (7838), S. 442–444.
- Ellen MacArthur Foundation; Ellen MacArthur Foundation (Hg.) (2013): Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition, Cowes, UK.
- Emery, D. J.; Shojania, K. G.; Forster, A. J.; Mojaverian, N.; Feasby, T. E. (2013): Overuse of magnetic resonance imaging. In: *JAMA internal medicine* 173 (9), S. 823–825.
- Europäische Kommission (2003): Questions and answers on resources strategy (KOM(2003) 572). Online verfügbar unter

[https://ec.europa.eu/environment/archives/natres/pdf/q\\_a.pdf](https://ec.europa.eu/environment/archives/natres/pdf/q_a.pdf), zuletzt geprüft am 12.04.2021.

Europäische Kommission (2011): Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa (KOM(2011) 571), Brüssel.

Europäische Kommission (2017a): Durchführungsbeschluss der Kommission vom 23.11.2017 betreffend die Zulassungen von Gadolinium enthaltenden Kontrastmitteln für die Verwendung beim Menschen mit einem oder mehreren der Wirkstoffe „Gadobensäure, Gadobutrol, Gadodiamid, Gadopentetsäure, Gadotersäure, Gadoteridol, Gadoversetamid und Gadoxetsäure“ gemäß Artikel 31 der Richtlinie 2001/83/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. C(2017)7941/F1 - DE.

Europäische Kommission (2017b): Science for environment policy. The precautionary principle: decision-making under uncertainty (Future Brief, 18), Produced for the European Commission DG Environment, Communication Unit, UWE, Bristol. Online verfügbar unter <http://ec.europa.eu/science-environment-policy>, zuletzt geprüft am 04.07.2021.

Europäische Kommission (2017c): Study on the review of the list of critical raw materials. Critical raw materials factsheets, Luxembourg: Publications Office of the European Union.

Europäische Kommission (2018): Ein sauberer Planet für alle. Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft (COM(2018) 773 final).

Europäisches Parlament (2008): Richtlinie über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. 2008/98/EG. In: *Amtsblatt der Europäischen Union* (L 312/3).

Eurostat (2021): Bevölkerung am 1. Januar nach Alter und Geschlecht. Eurostat. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DEMO\\_PJAN\\$DEFAULTVIEW/default/table](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DEMO_PJAN$DEFAULTVIEW/default/table), zuletzt geprüft am 23.03.2021.

Exner, A.; Held, M.; Kümmerer, K. (Hg.) (2016): Kritische Metalle in der Großen Transformation. 1. Aufl. 2016, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.



- Falconnet, P. (1985): The economics of rare earths. In: *Journal of the Less Common Metals* (Volume 111, Issues 1–2), S. 9–15.
- Fendel, A.; Kempkes, P. (2014): Die veränderte Welt des Metallrecyclings – Steigende Vielfalt der Funktionswerkstoffe – Entropie und Dissipation in Schrotten. In: *uwf UmweltWirtschaftsForum* 22 (2-3), S. 207–212.
- Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. L. (1989): Quantum mechanics, Redwood City, Calif.: Addison-Wesley (The Feynman lectures on physics, mainly mechanics, radiation, and heat; Vol. 3).
- Foth, H.; Calliess, C.; Hohmeyer, O.; Holm-Müller, K.; Niekisch, M.; Schreurs, M. A.; Faulstich, M. (2012): Verantwortung in einer begrenzten Welt. Juni 2012, Berlin: E. Schmidt (Umweltgutachten, 2012).
- Frenzel, T.; Lengsfeld, P.; Schirmer, H.; Hütter, J.; Weinmann, H.-J. (2008): Stability of gadolinium-based magnetic resonance imaging contrast agents in human serum at 37 degrees C. In: *Investigative Radiology* 43 (12), S. 817–828.
- Fröhlich, J. (2006): MR Contrast Agents. In: Weishaupt, D., Köchli, V. und Marincek, B. (Hg.): How does MRI work? An introduction to the physics and function of magnetic resonance imaging. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 103–128.
- Frosch, R. A.; Gallopoulos, N. E. (1989): Strategies for manufacturing. In: *Scientific American* (261 (3)), S. 144–152.
- Gantner, O. (2016): Ressourcenstrategische Betrachtung der Kritikalität von Phosphor. Dissertation. Shaker Verlag GmbH.
- Gao, S. (2010): Chemical composition of the continental crust: a perspective from China. In: *Geochemical News* 2010 (143), S. 1–16.
- GE Healthcare (2016): MRI buyer's guide 2017. GE Healthcare, Waukesha, WI 53188 USA.
- Gleich, A.; Ayres, R. U.; Gößling-Reisemann, S. (Hg.) (2006): Sustainable metals management. Securing our future - steps towards a closed loop economy (19).

- Gleich, A. von (2006): Outlines of a sustainable metals industry. In: Gleich, A., Ayres, R. U. und Gößling-Reisemann, S. (Hg.): Sustainable metals management. Securing our future - steps towards a closed loop economy (19), S. 1–39.
- Gleich, A. von (2008): Tragekapazitäten. Ein grundlegendes Konzept in der Nachhaltigkeitsdebatte und der Industrial Ecology. In: Gleich, A. von (Hg.): Industrial ecology. Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner (Praxis), S. 20–25.
- Goodenough, K. M.; Wall, F.; Merriman, D. (2018): The rare earth elements: Demand, global resources, and challenges for resourcing future generations. In: *Natural Resources Research* 27 (2), S. 201–216.
- Google (o.J.): Google Earth / Maps, zuletzt geprüft am 13.11.2020.
- Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.; ... Hagelüken, C.; United Nations Environment Programme (UNEP) (Hg.) (2011): Recycling rates of metals. A status report, a report of the working group on the global metal flows to the international resource panel.
- Granata, V.; Cascella, M.; Fusco, R.; dell'Aprovitola, N.; Catalano, O.; Filice, S.; ... Petrillo, A. (2016): Immediate adverse reactions to gadolinium-based MR contrast media: A retrospective analysis on 10.608 examinations. In: *BioMed research international* 2016, S. 3918292.
- Gray, T. (2013): Die Elemente. Bausteine unserer Welt, Köln: Komet.
- GreenDelta (2021): openLCA. Version 1.10.2: GreenDeltaGmbH. Online verfügbar unter <https://www.openlca.org/>, zuletzt geprüft am 18.03.2021.
- Greif, A.; Pälchen, W.; Rank, G.; Weidensdörfer, H. (2002): Geochemischer Atlas des Freistaates Sachsen. Teil 2: Spurenelementgehalte in Bachsedimenten. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfU SN) (Materialien zum Bodenschutz), Dresden.
- Gromet, L. P.; Dymek, R. F.; Haskin, L. A.; Korotev, R. L. (1984): The "North American shale composite": Its compilation, major and trace element characteristics. In: *Geochim. Cosmochim. Acta* (48), S. 2469–2482.

- Grynia, E.; Griffin, P. J. (2016): Helium in natural gas - occurrence and production. In: *Journal of Natural Gas Engineering* 1 (2), S. 163–215.
- Gschneidner, K. A. (2011): The rare earth crisis - the supply / demand situation for 2010-2015. In: *Material Matters* 2011 (Vol. 6, Art. 2).
- Gunderson, L. H.; Allen, C. R.; Holling, C. S. (2014): Foundations of ecological resilience, Washington DC: Island Press.
- Gupta, C. K.; Krishnamurthy, N. (2005): Extractive metallurgy of rare earths, Boca Raton, London, New York, Washington D.C.: CRC Press (37).
- Guyonnet, D.; Planchon, M.; Rollat, A.; Escalon, V.; Tuduri, J.; Charles, N.; ... Fargier, H. (2015): Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. In: *Journal of Cleaner Production* 107, S. 215–228.
- Haff, P. K. (2014): Technology as a geological phenomenon: implications for human well-being. In: *Geological Society, London, Special Publications* 395 (1), S. 301–309.
- Hagelüken, C. (2014): Recycling of (critical) metals. In: *Critical Metals Handbook*, S. 41–69.
- Hahn, B. (2009): Welthandel. Geschichte, Konzepte, Perspektiven. Lizenzausg, Darmstadt: Wiss. Buchges.
- Hansen, S. (2001): Von den Anfängen der prähistorischen Archäologie Christian Jörgensen Thomsen und das Dreiperiodensystem. In: *Praehistorische Zeitschrift* (76), S. 10–23.
- Hasenack, W.; Kilger, W.; Fettel, J.; Böhrs, H.; Kosiol, E.; Kolbinger, J. et al. (1962): Arbeit und Lohn als Forschungsobjekt der Betriebswirtschaftslehre. Vorträge der Tagung des Verbandes der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft e. V. vom 24. bis 27. Mai 1961 in Mannheim, Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint.
- 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.

- Hauschild, M. Z.; Rosenbaum, R. K.; Olsen, S. I. (Hg.) (2018): *Life Cycle Assessment*, Cham: Springer International Publishing.
- Helbig, C. (2019): *Metalle im Spannungsfeld technoökonomischen Handelns: Eine Bewertung der Versorgungsrisiken und der dissipativen Verluste mit Methoden der Industrial Ecology*. Online verfügbar unter <https://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/47832>, zuletzt geprüft am 16.05.2021.
- Held, M. (2018): *Metallzeiten. Von der Kupferzeit zum All Metals Age*. In: Held, M., Jenny, R. D. und Hempel, M. (Hg.): *Metalle auf der Bühne der Menschheit. Von Ötzi Kupferbeil zum Smartphone im All Metals Age*. München: oekom verlag (DBU, 11), S. 11–26.
- Held, M.; Schindler, J. (2017): *All metals age: Die postfossile Gesellschaft braucht alle Elemente des Periodensystems*. In: *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 26 (4), S. 305–308.
- Hermann, H. D. (2011): *Grenzwerte, Leitwerte, Orientierungswerte, Maßnahmenwerte - Aktuelle Definitionen und Höchstwerte*. In: *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 2009 (52), S. 1202–1206.
- Hoffmann, W. G. (2007): *Das Wachstum der deutschen Wirtschaft seit der Mitte des 19. Jahrhunderts. Kapitel: Die Produktion von Industrie und Handwerk: GESIS Datenarchiv, Köln. ZA8243 Datenfile Version 1.0.0*.
- Hoyer, K.; Freistaat Sachsen (Hg.) (2016): *Emissionsbericht Abwasser 2013/2014. Sechste Bestandsaufnahme der Abwasser- emissionen im Freistaat Sachsen*. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfU SN).
- Jahn, B.; Daumann, L. J. (2018): *Die faszinierende bioanorganische Chemie der Selten-Erd-Elemente*. In: *Chemie in unserer Zeit* (52), S. 150–158.
- Jakubowski, N.; Lindner, U.; Lingott, J.; Panne, U. (2013): *Der Nachweis von Gadolinium. Kontrastmittel in Oberflächengewässern und Pflanzen*. Git-Labor. Online verfügbar unter <https://www.git-labor.de/forschung/umwelt/der-nachweis-von-gadolinium>, zuletzt geprüft am 26.05.2021.

- Jordens, A.; Cheng, Y. P.; Waters, K. E. (2013): A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. In: *Minerals Engineering* 41, S. 97–114.
- Kanda, T.; Fukusato, T.; Matsuda, M.; Toyoda, K.; Oba, H.; Kotoku, J.; ... Furui, S. (2015): Gadolinium-based contrast agent accumulates in the brain even in subjects without severe renal dysfunction: evaluation of autopsy brain specimens with inductively coupled plasma mass Spectroscopy. In: *Radiology* 276 (1), S. 228–232.
- Kaniewski, D.; van Campo, E.; Guiot, J.; Le Burel, S.; Otto, T.; Baeteman, C. (2013): Environmental roots of the late bronze age crisis. In: *PLoS ONE* 8 (8), e71004.
- Kappen, J.; Demel, I.; Schiefer, M.; Seidemann, C. (2012): Sustainable paper recycling – Threats, needs and future opportunities. Riskcycle Conference, Dresden, 08.05.2012.
- Kapur, A.; Graedel, T. E. (2006): Copper mines above and below the ground. In: *Environmental Science and Technology*, S. 3135–3141.
- Karlsson, S. (1999): Closing the technospheric flows of toxic metals: Modeling lead losses from a lead-acid battery system for Sweden. In: *Journal of Industrial Ecology* 3 (1), S. 23–40.
- Keutel, S. (2018): Gadolinium-Ablagerung: Echte Gefahr oder „Geister-Debatte“? Interview mit Alexander Radbruch. Online verfügbar unter <https://healthcare-in-europe.com/de/news/gadolinium-ablagerung-echte-gefahr-oder-geister-debatte.html>, zuletzt geprüft am 16.05.2021.
- Kingsnorth, D. J. (2012): The global rare earths industry: A delicate balancing act. In: *Deutsche Rohstoffagentur* (April).
- Klee, R. J.; Graedel, T. E. (2004): Elemental cycles. A status report on human or natural dominance. In: *Annu. Rev. Environ. Resour.* 29 (1), S. 69–107.
- Kluge, A.; Baacke, D.; Martin, M.; Schlösser, D.; Heinrich, E. (1998): Migration von Seltenerdelementen und Präzipitation in Sintern schwermetallreicher Grubenwässer. In: Kluge, A. und Beuge, P. (Hg.): *Geochemische Indikationen in den Geo- und Umweltwissenschaften. Beiträge zur Tagung junger Geochemiker.* Technische Universität Bergakademie Freiberg (Wissenschaftliche Mitteilungen Sonderheft, 7).

- Kral, U.; Kellner, K.; Brunner, P. H. (2013): Sustainable resource use requires "clean cycles" and safe "final sinks". In: *The Science of the total environment* 461-462, S. 819–822.
- Krausmann, F.; Fischer-Kowalski, M.; Schandl, H.; Eisenmenger, N. (2008): The global sociometabolic transition. In: *Journal of Industrial Ecology* 12 (5-6), S. 637–656.
- Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) (2012): Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 23.10.2020 I 2232 geändert worden ist. Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG.
- Kryc, K. A. (2013): What's up with helium? In: *GSA Today* (23), S. 19–20.
- Kulaksız, S.; Bau, M. (2011): Anthropogenic gadolinium as a microcontaminant in tap water used as drinking water in urban areas and megacities. In: *Applied Geochemistry* 26 (11), S. 1877–1885.
- Kunkel, U.; Radke, M. (2012): Fate of pharmaceuticals in rivers: Deriving a benchmark dataset at favorable attenuation conditions. In: *Water research* 46 (17), S. 5551–5565.
- 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) (Hg.) (2020): Interdisziplinäre Daten und Auswertungen (iDA). Online verfügbar unter <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/46037.htm>, zuletzt geprüft am 16.11.2020.
- Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfU SN) (Hg.) (2021): Geoportal Sachsenatlas. Capabilities viewer. Online verfügbar unter [https://geoportal.sachsen.de/cps/capabilities\\_viewer.html](https://geoportal.sachsen.de/cps/capabilities_viewer.html), zuletzt geprüft am 19.01.2021.
- Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) (2013): Lausitzer Braunkohlerevier, Wandlungen und Perspektiven. Heide/Zeissholz (23).

- Lawrence, M. G.; Keller, J.; Poussade, Y. (2010): Removal of magnetic resonance imaging contrast agents through advanced water treatment plants. In: *Water science and technology : a journal of the International Association on Water Pollution Research* 61 (3), S. 685–692.
- 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.
- LBNmedical (o.J.): Liquid helium in MRI machines – use, cost, and more. Online verfügbar unter <https://lbnmedical.com/liquid-helium-in-mri-machine/>, zuletzt geprüft am 22.03.2021.
- Lerat-Hardy, A.; Coynel, A.; Dutruch, L.; Pereto, C.; Bossy, C.; Gil-Diaz, T.; ... Schäfer, J. (2019): Rare earth element fluxes over 15 years into a major european estuary (Garonne-Gironde, SW France). Hospital effluents as a source of increasing gadolinium anomalies. In: *The Science of the total environment* 656, S. 409–420.
- Licht, C.; Peiró, L.; Villalba, G. (2015): Global substance flow analysis of gallium, germanium, and indium. Quantification of extraction, uses, and dissipative losses within their anthropogenic cycles. In: *Journal of Industrial Ecology* 19 (5), S. 890–903.
- 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.
- Lindner, U. (2017): Speziation von Gadolinium-MRT-Kontrastmitteln in Umweltmatrizes. Dissertation. Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät.
- Loewenhardt, B. (2001): Bildgebende Diagnostik. Technik, Anatomie, Pathologie; physikalisch-technische Grundlagen bildgebender Verfahren in der radiologischen Diagnostik. 2., völlig Neubearb. Aufl., Künzler: Wiss. Selbstverl. Loewenhardt.
- Lohrke, J.; Frenzel, T.; Endrikat, J.; Alves, F. C.; Grist, T. M.; Law, M.; ... Pietsch, H. (2016): 25 years of contrast-enhanced MRI: Developments, current challenges and future perspectives. In: *Advances in therapy* 33 (1), S. 1–28.

- Lucas, J.; Lucas, P.; Le Mercier, T.; Rollat, A.; Davenport, W. (2015): Rare earths. Science, technology, production and use, Amsterdam: Elsevier.
- Lynas Corp. Ltd. (Hg.) (2010): ASX Mid Caps Conference presentation. ASX Mid Caps Conference. New York, March 2010. Online verfügbar unter [https://www.asx.com.au/smalltomidcaps/london/2010/presentation\\_lynas.pdf](https://www.asx.com.au/smalltomidcaps/london/2010/presentation_lynas.pdf), zuletzt geprüft am 13.05.2021.
- Mancini, L.; Vidal Legaz, B.; Vizzarri, M.; Wittmer, D.; Grassi, G.; Pennington, D.; Europäische Kommission (Hg.) (2019): Mapping the role of raw materials in sustainable development goals. A preliminary analysis of links, monitoring indicators, and related policy initiatives (JRC science for policy report), Luxemburg.
- Mao, J. S.; Cao, J.; Graedel, T. E. (2009): Losses to the environment from the multilevel cycle of anthropogenic lead. In: *Environmental Pollution* 157 (10), S. 2670–2677.
- Marscheider-Weidemann F.; Langkau S.; Hummen T.; Erdmann L.; Espinoza L.; Angerer G.; ... Benecke, S. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016 (DERA Rohstoffinformationen, 28), Berlin.
- Mc Lennan, S. M. (1989): Rare Earth Elements In Sedimentary Rocks: Influence Of Provenance And Sedimentary Processes. In: Lipin, B. R. und McKay, G. A. (Hg.): *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*, Chapter 7: de Gruyter, S. 169–200.
- McNeill, J. R. (2003): Blue planet. Die Geschichte der Umwelt in 20. Jahrhundert, Frankfurt am Main, Zürich, Wien: Büchergilde Gutenberg.
- Meadows, D. H. (1972): The limits to growth. A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind. 3. print (A Potomac Associates book).
- Meadows, D. H.; Randers, J.; Meadows, D. L.; Held, A.; Hasan (2009): Grenzen des Wachstums, das 30-Jahre-Update. Signal zum Kurswechsel. 3. Aufl., Stuttgart: Hirzel.
- Meller, H.; Michel, K. (2018): Die Himmelsscheibe von Nebra. Der Schlüssel zu einer untergegangenen Kultur im Herzen Europas. 5. Auflage, Berlin: Propyläen.



- Meschede, D. (2010): Gerthsen Physik. 24., überarb. Aufl., Berlin: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Modo, M. M. J. (2007): Molecular and cellular MR imaging.
- Moore, E. A.; Babbitt, C. W.; Tomaszewski, B.; Tyler, A. C. (2020): Spatial perspectives enhance modeling of nanomaterial risks. In: *Journal of Industrial Ecology* 11 (1), S. 225.
- Mortimer, C. E.; Müller, U. (2019): Chemie. Das Basiswissen der Chemie. 13. vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart: Thieme.
- National Academy of Sciences (NAS) (2010): Selling the Nation's Helium Reserve, Washington, D.C.: National Academies Press.
- National Museums Scotland (o.J.): From minerals to your mobile. Online verfügbar unter <https://www.nms.ac.uk/explore-our-collections/resources/from-minerals-to-your-mobile/>, zuletzt geprüft am 28.05.2021.
- Nauckhoff, M. H. v. (2010): Strategische Metalle und Seltenerd-Metalle. Investieren in Technologiemetalle und Hightech-Metalle; Indium, Wismut, Terbium & Co, München: FinanzBuch (simplified).
- Neubert, C. (2008): Umweltverhalten und Ökotoxikologie von gadoliniumhaltigen Magnetresonanztomographie-Kontrastmitteln. Technische Universität Berlin.
- Neukirchen, F. (2016): Von der Kupfersteinzeit zu den Seltenen Erden. Eine kurze Geschichte der Metalle, Berlin, Heidelberg: Springer2016. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4471836>, zuletzt geprüft am 16.05.2021.
- Neukirchen, F.; Ries, G. (2020): The World of Mineral Deposits. A Beginner's Guide to Economic Geology. 1st ed. 2020.
- Newzoo (2019): Global Mobile Market Report. Free Version. Online verfügbar unter <https://newzoo.com/insights/trend-reports/newzoo-global-mobile-market-report-2019-light-version/>, zuletzt geprüft am 16.05.2021.

- Nguyen, R. T.; Imholte, D. D. (2016): China's Rare Earth Supply Chain: Illegal Production, and Response to new Cerium Demand. In: *JOM* 68 (7), S. 1948–1956.
- Niederste-Hollenberg, J.; Schuler, J.; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Hg.) (2020): Pilotprojekt zur Minderung des Eintrags von Röntgenkontrastmitteln in die Umwelt - Maßnahmenkombinationen (MindER2). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- North, J. D. (2008): *Cosmos. An illustrated history of astronomy and cosmology*, Chicago: Univ. of Chicago Press. Online verfügbar unter <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0827/2007035579-b.html>, zuletzt geprüft am 15.04.2021.
- Nozaki, Y.; Lerche, D.; Alibo, D. S.; Tsutsumi, M. (2000): Dissolved indium and rare earth elements in three Japanese rivers and Tokyo Bay: Evidence for anthropogenic Gd and In. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2000 (Vol. 64, No. 23), S. 3975–3982.
- NRCan: Rare earth elements facts. Online verfügbar unter <https://www.nrcan.gc.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/rare-earth-elements-facts/20522>, zuletzt geprüft am 04.07.2020.
- 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.
- Nuttall, W.; Clarke, R.; Glowacki, B. (2013): Endangered helium: Bursting the myth. In: *The Chemical Engineer* (870/871).
- Nuttall, W. J. (Hg.) (2014): *The future of helium as a natural resource*, London: Routledge (Routledge explorations in environmental economics, 35).
- OECD (2019): *Health at a Glance 2019*. Online verfügbar unter <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/4dd50c09-en>, zuletzt geprüft am 14.02.2021.
- OECD (2020): *Health at a Glance: Europe 2020. State of health in the EU cycle*. OECD.

- Offerman, S. E. (Hg.) (2018): Critical materials. Underlying causes and sustainable mitigation strategies, New Jersey: World Scientific (World Scientific series in current energy issues, volume 5).
- O'Hara, K. D. (2014): Earth resources and environmental impacts, Hoboken, NJ: Wiley.
- Osterhammel, J. (2010): Die Verwandlung der Welt. 5. Aufl., München: C.H.Beck (Historische Bibliothek der Gerda Henkel Stiftung).
- Ottaway, B.; Roberts, B. (2008): The emergence of metalworking. In: Jones, A. (Hg.): Prehistoric Europe. Theory and practice. Malden, Mass.: Wiley-Blackwell (Blackwell studies in global archaeology, 12), S. 193–225.
- Otter, C. (2017): The technosphere a new concept for urban studies. In: *Urban History* (44, 1).
- Packey, D. J.; Kingsnorth, D. (2016): The impact of unregulated ionic clay rare earth mining in China. In: *Resources Policy* 48, S. 112–116.
- Pongrácz, E. (2014): Critical materials: Recycling vs. dissipative losses - The case of Indium. Proceedings SUM 2014, Second Symposium on Urban Mining, Bergamo, Italy, 19.05.2014.
- Prior, T.; Giurco, D.; Mudd, G.; Mason, L.; Behrisch, J. (2012): Resource depletion, peak minerals and the implications for sustainable resource management. In: *Global Environmental Change* 22 (3), S. 577–587.
- PubChem (2021a): Pentetic Acid. Compound Summary. OptiMark. Online verfügbar unter <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/3053>, zuletzt geprüft am 03.12.2020.
- PubChem (2021b): Gadobenic acid. Compound Summary. MultiHance, Gd-BOPTA. Online verfügbar unter <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/131704172>, zuletzt geprüft am 03.12.2020.
- PubChem (2021c): Gadoteridol. Gd-DO3A. ProHance. Online verfügbar unter <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/60714>, zuletzt geprüft am 03.12.2020.

- PubChem (2021d): Gd-DOTA. Compound Summary. Dotarem, Gd-DOTA. Online verfügbar unter <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/450231>, zuletzt geprüft am 03.12.2020.
- Pullerits, K.; Ahlinder, J.; Holmer, L.; Salomonsson, E.; Öhrman, C.; Jacobsson, K. et al. (2020): Impact of UV irradiation at full scale on bacterial communities in drinking water. In: *npj Clean Water* 3 (1).
- Rademaker, J. H.; Kleijn, R.; Yang, Y. (2013): Recycling as a strategy against rare earth element criticality: a systemic evaluation of the potential yield of NdFeB magnet recycling. In: *Environmental science & technology* 47 (18), S. 10129–10136.
- Randers, J. (2014): 2052. Der neue Bericht an den Club of Rome; eine globale Prognose für die nächsten 40 Jahre ; [40 Jahre nach "Die Grenzen des Wachstums". 3. Aufl., Paperback, München: Oekom-Verlag.
- Reimer, P.; Vosshenrich, R. (2004): Kontrastmittel in der MRT. In: *Radiologe* 44 (3), S. 273–283.
- Reiners, C. (2001): Was ist das Seltene an den Seltenen Erden?: Eine chemiedidaktische Reflexion. In: *Chemie in unserer Zeit* 35. (Nr. 2), S. 110–115.
- Reller, A.; Bublies, T.; Staudinger, T.; Oswald, I.; Meißner, S.; Allen, M. (2009): The Mobile Phone. Powerful Communicator and Potential Metal Dissipator. In: *GAIA* (18/2), S. 127–135.
- Reller, A.; Holdinghausen, H. (2014): Der geschenkte Planet. Nach dem Öl beginnt die Zukunft, Frankfurt am Main: Westend Verlag. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=4761773>, zuletzt geprüft am 15.03.2021.
- Reller, A.; Meißner, S.; Schmidt, C.; Marshall, L. (2013): Ressourcenstrategien. Eine Einführung in den nachhaltigen Umgang mit Ressourcen: WBG.
- Rentz, S. (2019): 1.5T MRI Suite Size Requirements. Block Imaging. Online verfügbar unter <https://info.blockimaging.com/1.5t-mri-suite-size-requirements>, zuletzt geprüft am 15.03.2021.

- 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.
- Reuter, M. A.; van Schaik, A.; Ballester, M. (2018): Limits of the Circular Economy: Fairphone Modular Design Pushing the Limits. In: *World of Metallurgy – ERZMETALL* (71), S. 68–79.
- Richardson, S. D.; Ternes, T. A. (2014): Water analysis: emerging contaminants and current issues. In: *Analytical chemistry* 86 (6), S. 2813–2848.
- Rifkin, J. (1982): Entropie. Ein neues Weltbild. Unter Mitarbeit von T. Howard und N. Georgescu-Roegen, Hamburg: Hoffmann und Campe.
- Rock, A.; Herrmann, C. (2012): Magnetic Resonance Equipment (MRI) - Study on the potential for environmental improvement by the aspect of energy efficiency. PE International AG.
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, A.; Chapin, F. S.; Lambin, E. F.; ... Foley, J. A. (2009a): A safe operating space for humanity. In: *Nature* 461 (7263), S. 472–475.
- Rockström, J.; Steffen, W.; Noone, K.; Persson, Å.; Chapin, F. S., III; Lambin, E.; ... Foley, J. (2009b): Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity. In: *E&S* 14 (2).
- Runge, V. (2015): Commentary on T1-Weighted Hypersignal in the Deep Cerebellar Nuclei After Repeated Administrations of Gadolinium-Based Contrast Agents in Healthy Rats. Difference Between Linear and Macrocyclic Agents. In: *Investigative Radiology* (50), S. 481–482.
- 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.

- 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, R. F.; Lang, F.; Heckmann, M. (Hg.) (2010): Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie : mit herausnehmbaren Repetitorium. 31., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Heidelberg: Springer Medizin-Verlag (Springer-Lehrbuch).
- Schmidt-Bleek, F.; Klüting, R. (1994): Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - das Maß für ökologisches Wirtschaften, Berlin: Birkhäuser.
- Schräber, D.; Wald, S.; Arnold, K. (1990): Analyse des gegenwärtigen Zustandes des Landkreises Freiberg. In: *Freiberger Umweltbrief* (6).
- Shen, Y.; Moomy, R.; Eggert, R. G. (2020): China's public policies toward rare earths, 1975–2018. In: *Miner Econ* 7 (3), S. 29.
- Skinner, B. J. (1976): A Second Iron Age Ahead? The distribution of chemical elements in the earth's crust sets natural limits to man's supply of metals that are much more important to the future of society than limits on energy. In: *American Scientist* (Vol. 64, No. 3), S. 258–269.
- Soentgen, J. (2011): Das Unscheinbare. Online verfügbar unter [http://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/1585/file/Soentgen\\_Das\\_Unscheinbare.pdf](http://opus.bibliothek.uni-augsburg.de/opus4/frontdoor/deliver/index/docId/1585/file/Soentgen_Das_Unscheinbare.pdf), zuletzt geprüft am 14.05.2021.
- Soentgen, J. (2014): Dissipation. In: Espahangizi, K. M. und Orland, B. (Hg.): Stoffe in Bewegung. Beiträge zu einer Wissensgeschichte der materiellen Welt. 1. Aufl. Zürich: Diaphanes, S. 275–284.
- Solly, M. (2018): Lead Poisoning Wasn't a Major Factor in the Mysterious Demise of the Franklin Expedition. Smithsonian Institution (SmartNews). Online verfügbar unter <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/lead-poisoning-wasnt-major-factor-mysterious-demise-franklin-expedition-180970150/>, zuletzt geprüft am 12.12.2020.

- Sonderegger, T.; Dewulf, J.; Fantke, P.; Souza, D. M. de; Pfister, S.; Stoessel, F.; ... Hellweg, S. (2017): Towards harmonizing natural resources as an area of protection in life cycle impact assessment. In: *Int J Life Cycle Assess* 22 (12), S. 1912–1927.
- Souza Machado, A. A. de; Wood, C. M.; Kloas, W. (2019): Novel Concepts for Novel Entities: Updating Ecotoxicology for a Sustainable Anthropocene. In: *Environmental science & technology* 53 (9), S. 4680–4682.
- Spinazzi, A. (2014): Identification and Management of Acute Reactions to Gadolinium-Based Contrast Agents. In: Alexandra M. Karacozoff: MRI bioeffects, safety, and patient management. Hg. v. Frank G. Shellock und John V. Crues. Los Angeles, California: Biomedical Research Publishing Group, Ch. 10.
- Springer Professional (2018): Kläranlagen - Vierte Reinigungsstufe löst nicht das Spurenstoff-Problem. Interview mit K. Kümmerer. Onlineartikel unter <https://www.springerprofessional.de/klaeranlagen/schadstoffe/-vierte-reinigungsstufe-loest-nicht-das-spurenstoff-problem-/15602642>, zuletzt geprüft am 14.04.2021.
- SQS; Subcommittee on Quaternary Stratigraphy (SQS), Anthropocene Working Group (AWG) (Hg.) (2019): Results of binding vote by AWG Released 21st May 2019. Online verfügbar unter <http://quaternary.stratigraphy.org/working-groups/anthropocene/>, zuletzt geprüft am 24.01.2021.
- Standaert, M. (2019): China Wrestles with the Toxic Aftermath of Rare Earth Mining. Unter Mitarbeit von Zhong Yunfan. *Yale Environment* 360. Online verfügbar unter <https://e360.yale.edu/features/china-wrestles-with-the-toxic-aftermath-of-rare-earth-mining>, zuletzt geprüft am 14.04.2021.
- Steffen, W.; Crutzen, P.; McNeill, J. R. (2007): The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? In: *AMBIO* (Vol. 36, Nr. 8), S. 614–621.
- 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.; Richardson, K.; Rockström, J.; Cornell, S. E.; Fetzer, I.; Bennett, E. M.; ... Sörlin, S. (2015): Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. In: *Science (New York, N.Y.)* 347 (6223), S. 1259855.
- Steffen, W.; Sanderson, A.; Tyson, P.; Jäger, J.; Matson, P.; Moore, B.; ... Wasson, R. (2004): *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag.
- Stephenson, M. (1977): An Approach to the Identification of Organic Compounds Hazardous to the Environment and Human Health. In: *Ecotoxicology and Environmental Safety* (1), S. 39–48.
- Stewart, M.; Weidema, B. P. (2005): A Consistent Framework for Assessing the Impacts from Resource Use - A focus on resource functionality (8 pp). In: *Int J Life Cycle Assessment* 10 (4), S. 240–247.
- 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).
- Theis, T. (2007): Energy-conserving classical computation: prospects and challenges. IBM Corp. Asilomar, 03.06.2007.
- Thomas, A. (2014): Medical Imaging. Why helium prevails. In: Nuttall, W. J. (Hg.): *The future of helium as a natural resource*. London: Routledge (Routledge explorations in environmental economics, 35), S. 190–202.
- Thomsen, H. S. (2014): Nephrogenic Systemic Fibrosis and Gadolinium-Based Contrast Media. In: Thomsen, H. S. und Webb, J. A. W. (Hg.): *Contrast Media. Safety Issues and ESUR Guidelines*. 3., rd ed. 2014. Berlin: Springer Verlag (Medical Radiology - Diagnostic Imaging), S. 207–217.
- Thorenz, A.; Reller, A. (2011): Discussion of risks of platinum resources based on a function orientated criticality assessment - shown by cytostatic drugs and automotive catalytic converters. In: *Environ Sci Eur* 23 (1), S. 26.



- Tyler, G. (2004): Ionic charge, radius, and potential control root/soil concentration ratios of fifty cationic elements in the organic horizon of a beech (*Fagus sylvatica*) forest podzol. In: *The Science of the total environment* 329 (1-3), S. 231–239.
- Umweltbundesamt (UBA) (2014): Arzneimittel in der Umwelt. vermeiden, reduzieren, überwachen (Hintergrund).
- Umweltbundesamt (UBA) (2015): Organische Mikroverunreinigungen in Gewässern. Vierte Reinigungsstufe für weniger Einträge (Positionspapier).
- Umweltbundesamt (UBA) (2017): Toxikologie des Trinkwassers. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/trinkwasser/trinkwasserqualitaet/toxikologie-des-trinkwassers>, zuletzt geprüft am 19.06.2020.
- Umweltbundesamt (UBA) (2019): Ressourceneffizientsteigerung in der Metallindustrie - Analyse, Bewertung und Verminderung von Downcycling (DownMet). Umweltbundesamt (UBA).
- UN (1997): Glossary of Environment Statistics. Series F, No. 67. United Nations (UN); Department for Economic and Social Information and Policy Analysis (Studies in Methods), New York.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report. International Resource Panel.
- United Nations (UN) (2015a): Sustainable Development Goals (SDG). Communications materials. Online verfügbar unter <https://www.un.org/sustainabledevelopment/news/communications-material/>, zuletzt geprüft am 18.03.2021.
- United Nations (UN) (Hg.) (2015b): Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). Online verfügbar unter <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>, zuletzt geprüft am 18.03.2021.
- United Nations (UN) (2020): UN Comtrade Database. Commodity Code 280429. Online verfügbar unter <https://comtrade.un.org/data/>, zuletzt geprüft am 18.03.2021.

- United States Geological Survey (USGS) (2014): Mineral Commodity Summaries.
- United States Geological Survey (USGS); United States Geological Survey (USGS) (Hg.) (2020): Mineral Commodity Summaries 2020.
- Unsöld, A.; Baschek, B. (2002): The new cosmos. An introduction to astronomy and astrophysics. 5. ed., corrected 2., printing, Berlin: Springer.
- Verplanck, P. L.; Furlong, E. T.; Gray, J. L.; Phillips, P. J.; Wolf, R. E.; Esposito, K. (2010): Evaluating the behavior of gadolinium and other rare earth elements through large metropolitan sewage treatment plants. In: *Environmental science & technology* 44 (10), S. 3876–3882.
- Waldrop, M. (2016): More than Moore. In: *Nature* (530), S. 144–147.
- Wang, Z.; Walker, G. W.; Muir, D. C. G.; Nagatani-Yoshida, K. (2020): Toward a Global Understanding of Chemical Pollution: A First Comprehensive Analysis of National and Regional Chemical Inventories. In: *Environmental science & technology* 54 (5), S. 2575–2584.
- Weigert, A.; Wendker, H. J. (1996): *Astronomie und Astrophysik. Ein Grundkurs.* 3., überarb. Aufl., Weinheim: VCH.
- Weinmann, H.-J.; Brasch, R.; Press, W.; Wesbey, G. (1984): Characteristics of gadolinium-DTPA complex: a potential NMR contrast agent. In: *American Journal of Roentgenology* (142(3)), S. 619–666.
- Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2014): *Wie funktioniert MRI?*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230.
- Wikipedia (2020): Transistor Count. Online verfügbar unter [https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor\\_count](https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count).

- Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2000): Erhaltung und nachhaltige Nutzung der Biosphäre. Jahresgutachten 1999, Berlin: Springer (Welt im Wandel, 1999).
- Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2011): Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. 2., veränd. Aufl., Berlin.
- World Commission on Environment and Development (WCED) (1987): Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development, Oxford: Oxford University Press.
- World Trade Organization (WTO) (2021): Data. Online verfügbar unter <https://data.wto.org>, zuletzt geprüft am 14.04.2021.
- 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.
- Yun Schüler-Zhou; BGR (Hg.) (2018): Chinas Rohstoffpolitik für Seltene Erden. BGR (Commodity Top News, 57).
- Zalasiewicz, J.; Williams, M.; Waters, C. N.; Barnosky, A. D.; Palmesino, J.; Ronsbo, A.-S.; ... Wolfe, A. P. (2016): Scale and diversity of the physical technosphere. A geological perspective. In: *The Anthropocene Review* (4, 1), S. 1–14.
- Zalasiewicz, J. A. (Hg.) (2018): The anthropocene as a geological time unit. A guide to the scientific evidence and current debate, Cambridge: Cambridge University Press.
- Zampori, L.; Sala, S.; European Commission (Hg.) (2017): Feasibility study to implement resource dissipation in LCA (JRC Technical Reports, EUR 28994 EN). Online verfügbar unter doi:10.2760/869503.
- Zepf, V. (2013): Rare Earth Elements. A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use: Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer (Springer Theses, Recognizing Outstanding Ph. D. Research).

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.

Zimmermann, T. (2015): Dissipative Losses and Potential Optimizations. Dissertation. Bremen: Universität Bremen.

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.

## A. Anhang

**Tabelle A. 1: Berechnungsschritte und Quellen der Materialflussanalyse von Gadolinium**

Prozess	Menge (t)	Berechnungsmethode oder Literaturquelle
Gd im Erz	2.696	Berechnet auf der Grundlage der Erzzusammensetzungen und Produktionsmengen der relevanten Minen <sup>1) 2) 3)</sup>
Gd Konzentrat	2.157	(Gd im Erz) - (Gd in Abraum) <sup>4)</sup>
Gd Komponenten	1.941	(Gd Konzentrat) - (Gd in Schlacken) <sup>4)</sup>
Recyclerter Neuschrott	10	0,01 Gg <sup>4)</sup>
Halbteile	1.757	(Gd Komponenten) - (Fabrikationsschrott + Recyclerter Schrott) <sup>4)</sup>
Lagerung	849	(Halbteile) - (Neuschrott) - (Produkte außer Kontrastmittel) - (Kontrastmittel)
Gd in Produkten	820	<sup>5)</sup>
Produkte (außer Kontrastmittel)	792	(Gd in Produkten) - (Kontrastmittel)
Kontrastmittel	28	berechnet auf Grundlage der Anzahl an MRT Anwendungen mit Kontrastmittel in den 30 OECD Staaten und der durchschnittlichen Menge an Gd pro Patient
Gd in Abraum	539	20% von Gd im Erz <sup>4)</sup>
Gd in Schlacken	216	10% von Gd Konzentrat <sup>4)</sup>
Neuschrott	88	5% von Halbteile <sup>4)</sup>
Fabrikationsschrott	194	10% von Gd Komponenten <sup>4)</sup>
Altschrott	792	100% von Produkte (außer Kontrastmittel)
Dissipation in andere Materialströme	1.060	(Fabrikationsschrott) + (Neuschrott) + (Altschrott)
Dissipation in die Umwelt	28	100% von Kontrastmittel

Quelle: 1) S&P Global Market Intelligence 2019a; 2) S&P Global Market Intelligence 2019b; 3) Yang et al. 2013; 4) Du und Graedel 2011; 5) Lynas Corp. Ltd. 2010

**Tabelle A. 2: Berechnung des Gd-Bedarfs für Kontrastmittel in den OECD-Staaten für das Jahr 2018**

---

MRT Untersuchungen pro 1.000 EW <sup>(1)</sup>	67
Untersuchungen Gesamt	70.947.819
Kontrastmittelanwendungen (33% aller Fälle) <sup>(2)</sup>	23.412.780
Gd in Gramm (bei 1,2 g pro Anwendung) <sup>(3)</sup>	28.095.336
Gd in Tonnen	28

---

Quelle: <sup>(1)</sup> OECD 2020, S. 221, <sup>(2)</sup> Granata et al. 2016; Spinazzi 2014, <sup>(3)</sup> Durchschnittswert auf Grundlage der ProHance Packungsbeilage

**Tabelle A. 3: SEE-Messwerte aus Oberflächengewässern im Freistaat Sachsen für das Jahr 2019**

Messstelle	Gadolinium			Lanthan			Koordinaten (33U/WGS84)		Messstellen- name	Gewässer
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l	Ostwert	Nordwert		
OBF02831	<	0,02	20	<	0,1	100	354050	5724219	Elbdeich	Dommitzscher Grenzbach
OBF02841	<	0,02	20	<	0,1	100	345332	5724104	Hachemühle, Jagdhausweg	Dommitzscher Grenzbach
OBF04001	<	0,02	20	<	0,1	100	442749	5644545	An der Futter- presse	Schwarzbach Zufluss vom Mahl- teich
OBF06301	<	0,02	20	<	0,1	100	446125	5660173	am Ziegelberg oh. Eschdorf,	
OBF07402	<	0,02	20	<	0,1	100	425253	5655013	uh. Flutmulden	Schullwitzbach
OBF07901	<	0,02	20	<	0,1	100	413792	5634160	Glashütte nordöstlich	Brießnitzbach
OBF08001	<	0,02	20	<	0,1	100	416848	5635267	Neudörfel	Trebnitz
OBF08100	<	0,02	20	<	0,1	100	420175	5644347	oh. Dohna Vor Mündung in	Müglitz
OBF08360	<	0,02	20	<	0,1	100	414310	5628931	Große Biela	Kleine Biela Blasewitz-Grunaer Landgraben
OBF08791	<	0,02	20	<	0,1	100	416501	5655562	Draesekerstr. uh. Kleinnaund- orf	Kaitzbach
OBF09300	<	0,02	20	<	0,1	100	408414	5650934	oh. Bergbau Git- tersee	Kaitzbach
OBF09310	<	0,02	20	<	0,1	100	408739	5651204	uh. Bergbau Git- tersee	Kaitzbach
OBF09320	<	0,02	20	<	0,1	100	409199	5651315	uh. Müllkippe an der F 170	Kaitzbach
OBF09400	<	0,02	20	<	0,1	100	410699	5652259	Altmockritz	Kaitzbach
OBF09500	<	0,02	20	<	0,1	100	411698	5652264	Babisnauer Str. Querallee Gro- ßer Garten	Kaitzbach
OBF09700	<	0,02	20	<	0,1	100	412998	5654383	uh.KA, Menzer- teller	Kaitzbach
OBF10411	<	0,02	20	<	0,1	100	400638	5644209	oh. KA	Höckenbach
OBF10412	<	0,02	20	<	0,1	100	400765	5644065	Glückspilz	Höckenbach
OBF10500		0,4	400		0,71	710	409479	5624615	Brücke Wald- weg, oh. Zufluss	Rote Weißeritz Pöbelbach
OBF10601	<	0,02	20		0,15	150	405841	5628502	Bürgerstraße (KH)	Vereinigte Weiße- ritz
OBF11211	<	0,02	20	<	0,1	100	405043	5649738		Vereinigte Weiße- ritz
OBF11212	<	0,02	20	<	0,1	100	405526	5650853	Panschau	
OBF11661	<	0,02	20	<	0,1	100	406158	5658334	Hotel Pattis oh. Mdg. Hetz- bach	Zschonerbach Triebisch
OBF12600	<	0,02	20		0,21	210	393315	5649367	Mittelweg	Gabenreichbach
OBF13503	<	0,02	20	<	0,1	100	397301	5668489	uh. Höfgen	Kelzgebach
OBF13511	<	0,02	20	<	0,1	100	380785	5665299	Mauna	Schreibitzer Bach
OBF13530	<	0,02	20	<	0,1	100	386101	5665779	vor Einmün- dung in Jahna	Birmenitzer Dorf- bach
OBF14101	<	0,02	20	<	0,1	100	371892	5674092	Mündung Nahbereich Stallanlage	Salbitzer Bach
OBF14354	<	0,02	20	<	0,1	100	373448	5678127		
OBF14355	<	0,02	20	<	0,1	100	371818	5677653	Gastewitz	Salbitzer Bach
OBF15051	<	0,02	20	<	0,1	100	362892	5677906	Altmügeln	Hasenbach
OBF15201	<	0,02	20	<	0,1	100	367251	5683729	Mündung	Stranggraben

Messstelle	Koordinaten (33U/WGS84)						Messstellen- name	Gewässer		
	Gadolinium			Lanthan						
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert	Nordwert
OBF15803	<	0,02	20	<	0,1	100	367657	5694686	uh. Schöna	Schönaer Bach
OBF16043	<	0,02	20	<	0,1	100	361393	5688147	Calbitz	Altenhainer Bach
OBF16070	<	0,02	20	<	0,1	100	367410	5707400	uh. Döbeltitz	Zittelbach
OBF16100	<	0,02	20	<	0,1	100	347669	5704435	oh. Schöna Feldweg oh. Au-	Schwarzer Graben
OBF16105	<	0,02	20	<	0,1	100	350944	5706279	denhain	Wildschützgraben
OBF16151	<	0,02	20	<	0,1	100	355048	5707368	Mündung	Sitzenrodaer Bach
OBF16301	<	0,02	20	<	0,1	100	361208	5711947	Mündung	Ellergraben
OBF17003	<	0,02	20	<	0,1	100	492553	5644648	Rosenthal uh. Zodel /	Kemmlitzbach
OBF17500	<	0,02	20	<	0,1	100	502102	5678293	Deschka Brücke am Op-	Lausitzer Neiße
OBF18390	<	0,02	20	<	0,1	100	473251	5642838	peltweg uh. LAUBAG-	Leutersdorfer Bach
OBF19850	<	0,02	20	<	0,27	270	476544	5703105	Einleitung	Rothwassergraben
OBF19900	<	0,02	20	<	0,1	100	480881	5709300	Mündung	Legnitzka
OBF21955	<	0,02	20	<	0,1	100	458695	5691082	Litschen	Kleine Spree
OBF21960	<	0,02	20	<	0,1	100	456015	5703204	Burghammer	Kleine Spree
OBF22101	<	0,02	20	<	0,1	100	458132	5705510	oh. Spreewitz	Kleine Spree
OBF22600	<	0,02	20	<	0,1	100	478751	5662959	uh. KA Löbau	Löbauer Wasser
OBF22700	<	0,02	20	<	0,1	100	478411	5668237	Lautitz nordwestl.	Löbauer Wasser
OBF22713	<	0,02	20	<	0,1	100	471949	5677124	Dubrauke	Dubrauke Cunnersdorfer Was- ser
OBF22810	<	0,02	20	<	0,1	100	476672	5658261	Mündung oh. Kotitzer	
OBF23500	<	0,02	20	<	0,1	100	468356	5675074	Wasser	Albrechtsbach
OBF23800	<	0,02	20	<	0,1	100	482350	5681951	Sproitz	Schwarzer Schöps
OBF23801	<	0,02	20	<	0,1	100	482248	5683023	Mündung	Seegraben
OBF23803	<	0,02	20	<	0,1	100	477814	5689120	Kreba	Hammergraben
OBF24380	<	0,02	20	<	0,1	100	476510	5682847	Förstgen	Weigersdorfer Fließ
OBF24390	<	0,02	20	<	0,1	100	471919	5689014	Klitten Kreuzung Wirt- schaftsweg,	Weigersdorfer Fließ
OBF24611	<	0,02	20	<	0,1	100	497182	5669423	westl. B115 Brücke Haupt- str. Kodersdorf Straßenbrücke	Babiggraben
OBF24652	<	0,02	20	<	0,1	100	492951	5677141	Biehain/Horka	Bornwiesengaben
OBF24802	<	1,3	1300	<	0,17	170	494652	5682252	Neue Mündung	Mühlgraben
OBF25150	<	0,02	20	<	0,1	100	477280	5690997	Mündung Neuhofer	Weißer Schöps Pfaffendorfer Was- ser
OBF25300	<	0,02	20	<	0,1	100	493905	5666477	Mündung Neuhofer	
OBF25502	<	0,02	20	<	0,1	100	488545	5683054	Straße Niesky	Molkereigraben
OBF25710	<	0,02	20	<	0,1	100	485189	5695566	Pegel	Raklitza
OBF25900	<	0,3	300	<	0,62	620	470315	5708581	Trebendorf uh. Ablauf Hal- bendorfer See	Struga
OBF25950	<	0,02	20	<	0,18	180	469749	5709358	Am Großteich, Naturlehrpfad oh. Einleitung	Struga
OBF25970	<	0,02	20	<	0,1	100	468412	5709916	Breiter Graben	Struga
OBF26050	<	0,02	20	<	0,1	100	465313	5707089	Öberer Teich	Wellenbach
OBF26201	<	1,1	1100	<	0,1	100	463368	5705059	Unterer Teich	Wellenbach
OBF26202	<	2,7	2700	<	13	13000	463149	5705105	Rohrauslauf	Wellenbach
OBF26203	<	5,9	5900	<	29	29000	463128	5705104		



Messstelle	Gadolinium		Lanthan		Koordinaten (33U/WGS84)		Messstellen- name	Gewässer	
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert
OBF26204		6,4	6400	29	29000	462300	5704954	Am Friedhof	Wellenbach
OBF26205		5,3	5300	28	28000	461312	5704844	Mündung	Wellenbach (Altlauf Struga)
OBF26301	<	0,02	20	<	0,1	100	437314	5680207	Kamenz
OBF26401	<	0,02	20	<	0,1	100	442018	5688041	Am Schwarzen Busch
OBF26600	<	0,02	20	<	0,1	100	446384	5696386	Dörghenhausen
OBF26650		0,2	200	<	0,1	100	446870	5697072	Groß Neida
OBF26700		0,6	600		0,1	100	444205	5703083	Neuwiese
OBF26790	<	0,02	20	<	0,1	100	438109	5704564	Tätzschwitz, Brücke
OBF26800	<	0,02	20	<	0,1	100	435345	5705831	Schwarze Elster Einlauf Senften- berger See
OBF27201	<	0,02	20	<	0,1	100	439058	5683973	Zschornau, Str.- Brücke
OBF27400	<	0,02	20	<	0,1	100	445645	5677534	Straßenbr. Höf- lein
OBF27450	<	0,02	20	<	0,1	100	446992	5681284	Zerna
OBF27500	<	0,02	20	<	0,1	100	447414	5689268	Kotten, Mün- dung
OBF27610	<	0,02	20	<	0,1	100	447145	5676930	uh. Crostwitz, Denkmal
OBF27701		0,9	900	0,46	460	445288	5696157	oh. Dörghen- hausen	
OBF27702		1,3	1300	4,9	4900	443604	5693191	uh. Einleitung Grauwacke	
OBF27703	<	0,02	20	<	0,1	100	440598	5692465	oh. Restloch Clara III
OBF27704		15	0	5,3	5300	441684	5691947	oh. Einleitung Dubring II	
OBF27705		0,6	600	2,7	2700	444158	5692579	Uferrand	
OBF27708		1,1	1100	4,6	4600	441540	5691953	Mühlweg Scheckthal, oh. Vincenzgraben	
OBF27710		14	0	15	15000	442789	5692277	oh. Dubring	
OBF27711		0,5	500	4,7	4700	440652	5692397	Vincenzgraben Ausleitung Clara III (Schacht)	
OBF27712		0,4	400	1,4	1400	440652	5692397	Damm- drainage Clara III (Schacht)	
OBF27713		42	0	23	23000	442373	5691637	Einleitung Grauwacke Oßling/Dubring II	
OBF27720		3,2	3200	2,5	2500	444684	5695318	am Mittelteich nach Einlauf Stadtgraben vor	
OBF27801	<	0,02	20	0,33	330	437612	5702637	Erikasee	
OBF27802	<	0,02	20	0,24	240	437881	5702559	Lauta, OW 6	
OBF27850	<	0,02	20	<	0,1	100	449986	5671858	Coblentz
OBF27905	<	0,02	20	<	0,1	100	453201	5680749	Neschwitz
OBF28000	<	0,02	20	<	0,1	100	452857	5682772	Zescha
OBF28203	<	0,02	20	<	0,1	100	449149	5691812	Doberschützer Was- ser
OBF28354	<	0,02	20	<	0,1	100	427938	5684548	Brieschko Gottschdorf,
OBF28355	<	0,02	20	<	0,1	100	431359	5688900	Nesthakenweg Mündung
									Schönbach

Messstelle	Koordinaten (33U/WGS84)						Messstellen- name	Gewässer		
	Gadolinium			Lanthan						
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert	Nordwert
OBF28700	<	0,02	20	<	0,1	100	424793	5678993	oh. Königsbrück	Pulsnitz
OBF28750	<	0,02	20	<	0,1	100	422066	5680395	uh. Königsbrück Brücke B98	Pulsnitz
OBF28751	<	0,02	20	<	0,1	100	419398	5680310	Glauschnitz	Luggraben
OBF28810	<	0,02	20	<	0,1	100	416119	5692896	Kroppen, Brü- cke	Pulsnitz
OBF28900	<	0,02	20	<	0,1	100	428267	5678321	Mündung	Haselbach
OBF28902	<	0,02	20	<	0,1	100	431882	5677219	Bischheim-Häs- lich	Weißbach
OBF29000	<	0,02	20	<	0,1	100	424593	5683192	Straßenbr. Schmorkau	Otterbach
OBF29200	<	0,02	20	<	0,1	100	429741	5665559	uh. Großröhrs- dorf	Große Röder
OBF29300	<	0,02	20	<	0,1	100	425523	5663809	oh. Radeberg	Große Röder
OBF29450	<	0,02	20	<	0,1	100	421768	5667118	Marienmühle	Große Röder
OBF29600	<	0,02	20	<	0,1	100	414257	5672576	Großdittmanns- dorf	Große Röder
OBF29803	<	0,02	20	<	0,1	100	404730	5681143	Kalkreuth	Heidelache
OBF29903	<	0,02	20	<	0,1	100	398727	5683093	am Schießplatz	Weßnitzbach
OBF30010	<	0,02	20	<	0,1	100	393669	5683288	uh. KA Großen- hain	Große Röder
OBF30101	<	0,02	20	<	0,1	100	398264	5686050	oh. Mdg. des Zuflusses	Spitalbach
OBF30103	<	0,02	20	<	0,1	100	400534	5686107	oh. ehem. Gro- ßer Spitalteich	Spitalbach
OBF30201	<	0,02	20	<	0,1	100	387823	5698247	uh. Spansberg Straßenbrücke	Kleine Röder
OBF30203	<	0,02	20	<	0,1	100	395187	5689352	K 8582	Elligastbach
OBF30208	<	0,02	20	<	0,1	100	398101	5688851	oh. Brücke B 101	Elligastbach
OBF30209	<	0,02	20	<	0,1	100	399749	5688309	oh. Brücke OE Uebigau, oh. Bachgablung	Elligastbach
OBF30210	<	0,02	20	<	0,1	100	402491	5689900	Brücke Strau- cher Straße, Brandwiesen	Elligastbach
OBF30211	<	0,02	20	<	0,1	100	406684	5688857	Straßenbrücke Dreiberg	Elligastbach
OBF30410	<	0,02	20	<	0,1	100	392022	5699272	uh. KA Gröditz	Große Röder
OBF30622	<	0,02	20	<	0,1	100	422394	5672800	Sandfurtbrücke Ottendorf-	Mittelwasser
OBF30623	<	0,02	20	<	0,1	100	418777	5671179		Orla
OBF30625	<	0,02	20	<	0,1	100	422133	5670911	Okrilla	Saugraben
OBF30700	<	0,02	20	<	0,1	100	417046	5670656	Hölle	Kleine Röder
OBF30900	<	0,02	20	<	0,1	100	410679	5674555	Mündung	Promnitz
OBF30901	<	0,02	20	<	0,1	100	410516	5671098	Mündung	Jähnertbach
OBF30953	<	0,02	20	<	0,1	100	408840	5683547	Mündung	Schönfelder Dorf- bach
OBF30956	<	0,02	20	<	0,1	100	411313	5682721	uh. Schönfeld uh. Kienmühle	Kaltenbach
OBF30958	<	0,02	20	<	0,1	100	405267	5684299	Quersa, Brücke B 98	Quersabach
OBF31100	<	0,02	20	<	0,1	100	397304	5682132	Mündung (Nau- leis)	Hopfenbach
OBF31101	<	0,02	20	<	0,1	100	398510	5678913	Lenz	Bierlichtbach

Messstelle	Gadolinium			Lanthan			Koordinaten (33U/WGS84)		Messstellen- name	Gewässer
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l	Ostwert	Nordwert		
	OBF31301	<	0,02	20	<	0,1	100	390942		
OBF31302	<	0,02	20	<	0,1	100	387100	5629782	Bach	Zethaubach
OBF31303	<	0,02	20	<	0,1	100	387018	5630080	Mündung	Helbigsdorfer Bach
OBF31305	<	0,02	20	<	0,1	100	386114	5630190	oh. Mulda	Helbigsdorfer Bach
OBF31500	<	0,02	20	<	0,1	100	386598	5639907	Muldenhütten	Freiberger Mulde
OBF31510	<	0,02	20	<	0,1	100	386411	5641475	Hilbersdorf	Freiberger Mulde
OBF31511		3,8	3800		5,6	5600	385635	5642067	Mündung	Ablauf Spülhalde Hammerberg
OBF31530	<	0,02	20	<	0,1	100	386017	5640380	vor Mdg.	Stangenbergbach
OBF31540	<	0,02	20	<	0,1	100	386150	5640675	vor Mdg.	Hüttenbach
OBF31601	<	0,02	20	<	0,1	100	381472	5647124	uh. Kleinwaltersdorf	Kleinwaltersdorfer Bach
OBF31610	<	0,02	20	<	0,1	100	381412	5650773	Kleinvoigtsberg	Freiberger Mulde
OBF31700	<	0,02	20	<	0,1	100	383481	5653361	Obergruna	Freiberger Mulde
OBF31701	<	0,02	20		0,1	100	383043	5652971	oh. Obergruna	Freiberger Mulde
OBF31714	<	0,02	20	<	0,1	100	381856	5655282	Tiefer Wolf	Stolln
OBF31800	<	0,02	20	<	0,1	100	379143	5658319	Nossen - Altzella	Freiberger Mulde
OBF31801	<	0,02	20	<	0,1	100	377154	5657123	uh. Marbach	Marienbach
OBF32000	<	0,02	20	<	0,1	100	366806	5666034	uh. Döbeln	Freiberger Mulde
OBF32001	<	0,02	20	<	0,1	100	367416	5666718	An der Krennsche	Gärtitzer Bach
OBF32201	<	0,02	20	<	0,1	100	354587	5671491	Mündung	Görnitzbach
OBF32203	<	0,02	20	<	0,1	100	354094	5671950	uh. Polkenmühle	Polkenbach
OBF32205	<	0,02	20	<	0,1	100	351454	5671450	Mündung	Fritzschbach
OBF32206	<	0,02	20	<	0,1	100	351845	5668299	uh. Brösen	Schanzenbach
OBF32300	<	0,02	20	<	0,1	100	346226	5669658	Mdg. in Erlln	Freiberger Mulde
OBF32600	<	0,02	20	<	0,1	100	387985	5629745	Mulda	Chemnitzbach
OBF32601	<	0,02	20		0,1	100	390288	5623406	Mündung	Voigtsdorfer Bach
OBF32700	<	0,02	20	<	0,1	100	387120	5633082	Großhartmannsdorfer Bach	Weigmannsdorf
OBF32705	<	0,02	20	<	0,1	100	382229	5629894	oh. Unterer	Großhartmannsdorfer Teich
OBF32800	<	0,02	20	<	0,1	100	387559	5634025	Großhartmannsdorfer Teich	Großhartmannsdorfer Bach
OBF32900	<	0,02	20	<	0,1	100	382684	5646444	Lichtenberg	Gimmlitz
OBF32901	<	0,02	20	<	0,1	100	384513	5640672	Halsbrücke	Münzbach
OBF32906	<	0,02	20	<	0,1	100	383175	5634468	Meißner Str. vor Verrohrung	Münzbach
OBF32907	<	0,02	20		0,1	100	383000	5634276	oh. Freiberg	Münzbach
OBF33010		1,3	1300		11	11000	385645	5643547	Zufluss Erzengler Teich, Münzbach	Münzbach
									Zufluss Erzengler Teich, Kohlbach	Kohlbach Kunstgraben
									Kunstgraben	Kunstgraben
									Kgl.-Vertr.-Ges.-Stolln	Roter Graben

Messstelle	Gadolinium			Lanthan			Koordinaten (33U/WGS84)		Messstellen- name	Gewässer
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l	Ostwert	Nordwert		
OBF33020	<	0,02	20	<	0,1	100	385531	5644422	Hauptstolln- Umbruch	Roter Graben
OBF33030	<	0,02	20	<	0,1	100	385384	5644518	Brücke Tutten- dorf	Roter Graben
OBF33100	<	0,02	20	<	0,1	100	389873	5639763	Niederbobritz- sch	Bobritzsch
OBF33200	<	0,02	20	<	0,1	100	383677	5653332	Bieberstein / Zollhaus	Bobritzsch
OBF33400	<	0,02	20	<	0,1	100	390169	5643463	Mündung in Naundorf	Colmnitzbach
OBF33500	<	0,02	20	<	0,1	100	386276	5649224	Krummenhen- nersdorf	Rodelandbach
OBF33702	<	0,02	20	<	0,1	100	376745	5642037	Mündung	Schirmbach
OBF33703	<	0,02	20	<	0,1	100	375050	5642554	Mündung	Kemnitzbach
OBF33710	<	0,02	20	<	0,1	100	373837	5644728	Br. Bräuns- dorf/Riechberg	Große Striegis
OBF33713	<	0,02	20	<	0,1	100	374417	5650650	Goßberg	Aschbach
OBF33900	<	0,02	20	<	0,1	100	370258	5660017	Niederstriegis	Große Striegis
OBF34101	<	0,02	20	<	0,1	100	369662	5649427	oh. Pahlteich	Pahlbach
OBF34200	<	0,02	20	<	0,1	100	370604	5652564	Berbersdorf 2 Pegel Tannen- berg	Kleine Striegis
OBF34409	<	0,02	20	<	0,1	100	355657	5608495	Waldmühle	Zschopau
OBF34601	<	0,02	20	<	0,1	100	363613	5614455		Hüttenbach
OBF34701	<	0,02	20	<	0,1	100	362782	5619215	Mündung	Venusberger Dorf- bach
OBF34801	<	0,02	20	<	0,1	100	364392	5630027		Dittmannsdorfer Bach
OBF34802	<	0,02	20	<	0,1	100	363584	5630629	Mündung	Schwarzbach
OBF34910	<	0,02	20	<	0,1	100	364351	5635285	Claussbrücke	Zschopau
OBF35001	<	0,02	20	<	0,1	100	362853	5640363	Frankenberg	Mühlbach
OBF35002	<	0,02	20	<	0,1	100	362773	5642841	B 169 uh. Frankenber- ger Straße	Lützelbach
OBF35003	<	0,02	20	<	0,1	100	361057	5642436		Holzbach
OBF35101	<	0,02	20	<	0,1	100	358535	5645497	uh. Krumbach	Ottendorfer Bach Altmittweidaer
OBF35102	<	0,02	20	<	0,1	100	359064	5650522	Mündung	Bach
OBF35103	<	0,02	20	<	0,1	100	360025	5652306	Mündung	Auenbach
OBF35200	<	0,02	20	<	0,1	100	359176	5652028	Ringethal uh. Gewerbege- biet	Zschopau
OBF35253	<	0,02	20	<	0,1	100	359953	5660344		Richzenhainer Bach
OBF35254	<	0,02	20	<	0,1	100	363675	5660287	uh. Gebersbach	Gebersbach
OBF35255	<	0,02	20	<	0,1	100	367033	5658943	Otzdorf	Eulitzbach
OBF35257	<	0,02	20	<	0,1	100	362089	5659696	Mündung	Mortelbach
OBF35350	<	0,02	20	<	0,1	100	363661	5665704	Pischwitz Rohwasserent- nahme uh.	Zschopau
OBF35490	<	0,02	20	<	0,1	100	355370	5589044	Rennrodelbahn	Sehma
OBF35500	<	0,02	20	<	0,1	100	355969	5592722	Neudorf	Sehma
OBF35600	<	0,02	20	<	0,1	100	357684	5598006	Cranzahl	Sehma
OBF35601	<	0,02	20	<	0,1	100	357730	5597980	Cranzahl Abstrom Depo- nie	Lampertsbach
OBF35650	<	0,02	20	<	0,1	100	357903	5599614	Cranzahl	Sehma
OBF35800	<	0,02	20	<	0,1	100	357974	5607650	Wiesa	Sehma
OBF35802	<	0,02	20	<	0,1	100	357972	5607600	Tiefer St. Chris- toph Stolln,	Sehma

Messstelle	Gadolinium			Lanthan			Koordinaten (33U/WGS84)		Messstellen- name	Gewässer
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l	Ostwert	Nordwert		
									(Tiefer) Junger Andreas Stolln	
OBF36200	<	0,02	20	<	0,1	100	361220	5597363	uh. Bärenstein	Pöhlbach
OBF36300	<	0,02	20	<	0,1	100	362574	5608815	Wiesenbad	Pöhlbach
OBF36402	<	0,02	20	<	0,1	100	369100	5602280	Mündung	Steinbach
OBF36403	<	0,02	20	<	0,1	100	368793	5604690	Mündung	Haselbach
OBF36404	<	0,02	20	<	0,1	100	364232	5609860	oh. Höllen- mühle	Sandbach
OBF36500	<	0,02	20	<	0,1	100	364161	5610817	Streckewalde	Preßnitz
OBF36700	<	0,02	20	<	0,1	100	366572	5607117	Niederschmie- deberg	Rauschenbach
OBF36794	<	0,02	20	<	0,1	100	356300	5614012	Tiefer Sauber- ger Stolln, Mündung	Wilisch
OBF36800	<	0,02	20	<	0,1	100	362806	5621203	Schlößchen	Wilisch
OBF36801	<	0,02	20	<	0,1	100	355497	5615136	Thum	Jahnsbach
OBF36803	<	0,02	20	<	0,1	100	354434	5614870	(Tiefer) König Dänemark Stolln	Jahnsbach
OBF36912	<	0,02	20	<	0,1	100	388266	5613678	oh. Sportplatz	Mortelbach
OBF37000	<	0,02	20	<	0,1	100	386453	5611699	oh. Oberneu- schönberg	Flöha
OBF37001	<	0,02	20	<	0,1	100	381590	5612330	Ortseingang	Rungstockbach
OBF37103	<	0,02	20	<	0,1	100	377164	5622435	oh. Mdg. Gruthenbach	Saidenbach
OBF37104	<	0,02	20	<	0,1	100	379155	5621236	Zufluss VS	
OBF37300	<	0,02	20	<	0,1	100	363793	5635896	Forchheim	Haselbach
OBF37400	<	0,02	20	<	0,1	100	389090	5607641	Mdg. in Flöha Deutschkathari- nenberg	Flöha Schweinitz
OBF37404	<	0,02	20	<	0,1	100	389849	5611802	Tiefer Heilige Dreifaltigkeit Stolln	Seiffener Bach
OBF37500	<	0,02	20	<	0,1	100	383982	5608733	Rothenthal, am Pegel	Natzschung
OBF37800	<	0,02	20	<	0,11	110	374265	5601038	Reitzenhain, Brücke B 174	Schwarze Pockau
OBF37910	<	0,02	20	<	0,13	130	373780	5612513	oh. Neusorge	Schwarze Pockau
OBF38000	<	0,02	20	<	0,1	100	373622	5616021	Pockau, Pegel	Schwarze Pockau
OBF38100	<	0,02	20	<	0,1	100	373504	5613125	Rittersberg	Rote Pockau
OBF38101	<	0,02	20	<	0,1	100	373529	5613217	Königlich Weistaubner Tiefer Erbstolln	Rote Pockau
OBF38400	<	0,02	20	<	0,1	100	369162	5631861	Metzdorf	Große Lößnitz
OBF38500	<	0,02	20	<	0,1	100	368052	5634107	Hetzdorf	Hetzbach
OBF38600	<	0,02	20	<	0,1	100	344048	5601060	Mdg. in Große Mittweida	Schwarzbach
OBF38640	<	0,2	200	<	0,38	380	313727	5586494	Zufluss TS Mul- denberg	Rote Mulde
OBF38701	<	0,02	20	<	0,1	100	320715	5591209	Stolln Jägers- grün	Zwickauer Mulde
OBF38790	<	0,02	20	<	0,1	100	322178	5593518	uh. Morg.-Rau- tenkranz, Museum	Zwickauer Mulde
OBF38800	<	0,02	20	<	0,1	100	322782	5593614	Rautenkranz	Zwickauer Mulde

Messstelle	Koordinaten (33U/WGS84)						Messstellen- name	Gewässer	
	Gadolinium			Lanthan					
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert
OBF38900	<	0,02	20	0,1	100	325878	5595940	Schönheide	Zwickauer Mulde
OBF39002	<	0,02	20	<	0,1	335562	5602164	uh. Bockau	Bockauer Dorfbach
OBF39100	<	0,02	20	<	0,1	336883	5605753	Auerhammer	Zwickauer Mulde
OBF39200	<	0,02	20	<	0,1	335234	5611974	Niederschlema	Zwickauer Mulde
OBF39206	<	0,02	20	<	0,1	330740	5613187	Grünau, Wilden- felser Str.	Zwickauer Mulde
OBF39400	<	0,02	20	<	0,1	323242	5617947	Cainsdorf	Zwickauer Mulde
OBF39403	<	0,02	20	<	0,1	325182	5619697	Oberhohndorf, Kieshalde	Reinsdorfer Bach
OBF39406	<	0,02	20	<	0,1	324284	5620061	Reinsdorfer Bach, Mündung	Reinsdorfer Bach
OBF39501	<	0,02	20	<	0,1	323107	5623761	Mündung	Moritzbach
OBF39600	<	0,02	20	<	0,1	324331	5629379	Schlunzig	Zwickauer Mulde
OBF39704	<	0,02	20	<	0,1	326943	5633931	Lungwitztalstr.	Zwickauer Mulde
OBF40101	<	0,02	20		0,1	342161	5647684	Lunzenau	Elsbach
OBF40301	<	0,02	20	<	0,1	345530	5660742	Mündung	Erlsbach
OBF40450	<	0,02	20	<	0,1	346693	5665155	oh. Colditz	Zwickauer Mulde
OBF40500	<	0,02	20	<	0,1	345702	5669579	Mdg. Sermuth	Zwickauer Mulde
OBF40620	<	0,02	20		0,18	321952	5592396	Rautenkranz	Große Pyra
OBF40621		0,3	300		0,29	324679	5587572	Sachsengrund	Große Pyra
OBF40628	<	0,02	20		0,13	328592	5589793	Brücke Morgen- rötherstr.	Wilzsch
OBF40629	<	0,02	20		0,21	328380	5589845	alte Bahnbrücke	Wilzsch
OBF40630	<	0,02	20		0,1	326858	5591467	Wilzschhaus uh. Carlsf.	Wilzsch
OBF40631		0,3	300		0,25	328981	5587539	oh. TS	Wilzsch
OBF40633		0,3	300		0,28	328908	5587535	Zulauf TS (FG1 - Moorprojekt)	Wilzsch
OBF40634		0,2	200		0,25	328447	5587421	Wilzsch vor Zu- fluss Kranizsch (FG2 - Moorpro- jekt)	Wilzsch Moor
OBF40637		0,5	500		0,51	328475	5587076	Kranizsch- Oberlauf (FG5 - Moorprojekt)	Wilzsch Moor
OBF40638		0,2	200		0,28	327521	5587331	Ablauf Kiebi- cken (FG9 - Moorprojekt)	Wilzsch Kiebicken
OBF40642	<	0,02	20		0,11	334202	5594143	Tiefer Riesen- berger Stolln	Neudecker Bach
OBF40650	<	0,02	20		0,1	331684	5598458	Blauenthal, Mdg.	Große Bockau
OBF40660	<	0,02	20	<	0,1	333338	5599512	Mündung	Sosabach
OBF40671	<	0,02	20		0,15	328596	5604153	Torfstraße	Filzbach
OBF40675		0,3	300		0,26	329870	5604796	Zufluss Filz- teich 1, Filzbach	Filzbach
OBF40690	<	0,02	20		0,15	353072	5587650	Johgst. Schwarz- wasser, Tellerhäuser- straße	Seifenbächel
OBF40701	<	0,02	20	<	0,1	338895	5589346	Johgst. Schwarz- wasser	Johgst. Schwarz- wasser
OBF40710	<	0,02	20	<	0,1	338556	5590204	Glück Auf Stolln	Johgst. Schwarz- wasser

Messstelle	Gadolinium			Lanthan			Koordinaten (33U/WGS84)		Messstellen- name	Gewässer
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l	Ostwert	Nordwert		
OBF40711	<	0,02	20	<	0,1	100	338814	5590884	Friedrich Au- gust Stolln	Johgst. Schwarz- wasser
OBF40712		0,5	500		0,33	330	338983	5590857	Stolln 146	Johgst. Schwarz- wasser
OBF40800	<	0,02	20		0,1	100	338288	5593477	uh. Johangeor- genstadt	Johgst. Schwarz- wasser
OBF40801	<	0,02	20	<	0,1	100	338559	5594156	Roter und Wei- ßer Löwe	Johgst. Schwarz- wasser
OBF40803	<	0,02	20		0,15	150	337692	5593721	Mdg. Strbrücke uh. Kranken- haus Erlabrunn	Steinbach Johgst. Schwarz- wasser
OBF40890	<	0,02	20	<	0,1	100	341403	5596840	uh. Antonsthal	Johgst. Schwarz- wasser
OBF40900	<	0,02	20	<	0,1	100	342973	5600453	oh. Schwarzen- berg	Johgst. Schwarz- wasser
OBF40901	<	0,02	20	<	0,1	100	343649	5601826	Treue Freund- schaft Stolln	Johgst. Schwarz- wasser
OBF41202	<	0,02	20	<	0,1	100	338014	5606458	uh. Niederpfan- nenstiel	Johgst. Schwarz- wasser
OBF41203	<	0,02	20	<	0,1	100	338763	5605957	oh. Nickelhütte	Johgst. Schwarz- wasser
OBF41300	<	0,02	20	<	0,1	100	343860	5601217	Mündung	Oswaldbach
OBF41301	<	0,02	20	<	0,1	100	346238	5602387	Frisch Glück	Oswaldbach
OBF41700	<	0,02	20	<	0,1	100	343759	5601321	Stolln	Große Mittweida
OBF41710	<	0,02	20	<	0,1	100	347082	5591831	Mündung	Pöhlwasser
OBF42000	<	0,02	20	<	0,1	100	335955	5610023	oh. Ehrenzipfel	Schlemabach
OBF42001	<	0,02	20	<	0,1	100	335956	5610043	Mündung	Schlema
OBF42020	<	0,02	20	<	0,1	100	328206	5614140	Marcus Semm- ler Stolln	Wiesenburg Wildenfelser Bach
OBF42200	<	0,02	20	<	0,1	100	326158	5609039	oh. Kirch- berg/Bärenwald	Rödelbach
OBF42201	<	0,02	20	<	0,1	100	324314	5613417	e	Crinitzer Wasser
OBF42202	<	0,02	20		0,1	100	320754	5610529	Mündung	Hirschfelder Wasser
OBF42203	<	0,02	20	<	0,1	100	320069	5609916	uh. Hirschfeld	Irfersgrüner Bach
OBF42206	<	0,02	20	<	0,1	100	325036	5616160	Mündung	Plotzbach
OBF42210	<	0,02	20	<	0,1	100	322096	5610550	Wilkau-Haslau	oh. TS Wolfers- grün
OBF42300	<	0,02	20	<	0,1	100	324604	5616378	oh. TS Wolfers- grün	Crinitzer Wasser
OBF42700	<	0,02	20	<	0,1	100	325895	5627924	Mündung	Rödelbach
OBF42733	<	0,02	20		0,16	160	339507	5630198	Niedermülsen	Mülsenbach
OBF42800	<	0,02	20	<	0,1	100	335351	5628431	Lampertusstolln	Goldbach
OBF43000	<	0,02	20	<	0,1	100	327625	5634099	uh. Hermsdorf / Bernsdorf	Lungwitzbach
OBF43100	<	0,02	20	<	0,1	100	337884	5627978	Mündung	Lungwitzbach
OBF43200	<	0,02	20	<	0,1	100	333332	5627752	Gersdorf	Hegebach
OBF43300	<	0,02	20	<	0,1	100	335661	5640797	Rüsdorf	Rödlitzbach
OBF43400	<	0,02	20	<	0,1	100	334743	5638353	vor Mündung, am Pegel	Herrnsdorfer Bach
OBF43703	<	0,02	20	<	0,1	100	343282	5643289	Langenchurs- dorf	Langenberger Bach
OBF43800	<	0,02	20	<	0,1	100	344290	5645250	oh. Mdg.	Johannesbach
OBF43900	<	0,02	20	<	0,1	100	345112	5655603	Mühlauabach	Brauselochbach
									Mdg. in Biesern	Erlbach

Messstelle	Koordinaten (33U/WGS84)						Messstellen- name	Gewässer		
	Gadolinium			Lanthan						
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert	Nordwert
OBF43902	<	0,02	20	<	0,1	100	352796	5651807	Mündung	Frankenauer Bach
OBF43910	<	0,02	20	<	0,1	100	346846	5609602	oh. Zwönitz	Zwönitz
OBF44040	<	0,02	20	<	0,1	100	347821	5618103	Thalheim, Bahnhofstr.	Zwönitz
OBF44101	<	0,02	20	<	0,1	100	350702	5620553	vor Mündung	Gornsdorfer Bach
OBF44400	<	0,02	20	<	0,1	100	353770	5628584	Mdg. Altchem- nitz 1	Zwönitz
OBF44501	<	0,02	20	<	0,1	100	356446	5632696	uh. Mdg. Grund- bach	Gablenzbach
OBF44700	<	0,02	20	<	0,1	100	352570	5637243	vor KA Glösa	Chemnitz
OBF44912	<	0,02	20	<	0,1	100	347228	5645871	Mohsdorf, Fett- chemie	Chemnitz
OBF44922	<	0,02	20	<	0,1	100	346370	5645999	Mohsdorf, Chemnitztalstr.	
OBF45000	<	0,02	20	<	0,1	100	345064	5649501	uh. Fettchemie	Chemnitz
OBF45100	<	0,02	20	<	0,1	100	339401	5618510	Göritzhein	Chemnitz
OBF45101	<	0,02	20	<	0,1	100	347052	5625759	Neuwürschnitz	Würschnitz
OBF45400	<	0,02	20	<	0,1	100	353713	5628411	uh. Leukersdorf	Leukersdorfer Bach
OBF45600	<	0,02	20	<	0,1	100	344354	5623412	Mdg. Altchem- nitz 2	Würschnitz
OBF45801	<	0,02	20	<	0,1	100	347471	5631467	Mdg. / uh. KA	
OBF46300	<	0,02	20	<	0,1	100	349388	5643872	Niederdorf	Gablenzbach
OBF46601	<	0,02	20	<	0,1	100	350406	5656727	Siegmar	Wiesenbach
OBF46700	<	0,02	20	<	0,1	100	347137	5664527	Markersdorf	Röllinghainer Bach
OBF46702	<	0,02	20	<	0,1	100	347980	5663995	Mündung	Crossener Bach
OBF46900	<	0,02	20	<	0,1	100	320359	5580701	Lastau	Auenbach
OBF47000	<	0,02	20	<	0,1	100	319983	5581317	oh. Einmün- dung in	
OBF47103	<	0,02	20	<	0,1	100	343224	5674381	Auenbach	Erlbach
OBF47105	<	0,02	20	<	0,1	100	345077	5672978	Pegel Klingent- hal	Zwota
OBF47200	<	0,02	20	<	0,1	100	344503	5679895	Mündung	Brunndöbra
OBF47251	<	0,02	20	<	0,1	100	343991	5686333	oh. Schadel- mühle	Schadelgraben
OBF47254	<	0,02	20	<	0,1	100	348302	5685192	Mündung	Thümmnitzbach
OBF47255	<	0,02	20	<	0,26	260	350923	5685290	Golzern	Vereinigte Mulde
OBF47300	<	0,02	20	<	0,1	100	341279	5692641	Sportplatz	
OBF47401	<	0,02	20	<	0,1	100	337069	5696801	Oberritzschka	Launzige
OBF47402	<	0,02	20	<	0,1	100	337031	5695926	uh. Fremdis- walde	Launzige
OBF47405	<	0,02	20	<	0,1	100	338518	5692137	oh. Fremdis- walde	Launzige
OBF47450	<	0,02	20	<	0,1	100	336166	5703843	Wurzen	Vereinigte Mulde
OBF47600	<	0,02	20	<	0,1	100	332396	5718289	Püchau	Seebach
OBF47700	<	0,02	20	<	0,1	100	352915	5680729	am Sportplatz	Tresenbach
OBF47950	<	0,02	20	<	0,1	100	344494	5684349	Reiterhof Alten- bach	Altenbacher Sau- bach
OBF48022	<	0,02	20	<	0,1	100	347529	5689378	Eilenburg	Vereinigte Mulde
OBF48040	<	0,02	20	<	0,1	100	343917	5691021	Bad Düben	Vereinigte Mulde
									oh. Mutzschen	Mutzschener Was- ser
									oh. Mutzschen	Mutzschener Was- ser
									Mdg. in Neichen	
									oh. Mühlteich	Kührenscher Bach
									uh. Nemt	Mühlbach



Messstelle	Gadolinium			Lanthan			Koordinaten (33U/WGS84)		Messstellen- name	Gewässer
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l	Ostwert	Nordwert		
OBF48100	<	0,02	20	<	0,1	100	351524	5696449	uh. Falkenhain	Lossa
OBF48103	<	0,02	20	<	0,1	100	349209	5696627	Mündung	Langer Grundgra- ben
OBF48130	<	0,02	20	<	0,1	100	345668	5698340	Kleinzschepa	Lossa
OBF48140	<	0,02	20	<	0,1	100	344297	5698229	uh. KA Hohburg	Lossa
OBF48200	<	0,02	20	<	0,1	100	338135	5701054	oh. KA Thall- witz	Lossa
OBF48250	<	0,02	20	<	0,1	100	337185	5702821	Mdg. uh. KA	
OBF48311	<	0,02	20	<	0,1	100	325359	5707505	Thallwitz	Lossa
OBF48451	<	0,02	20	<	0,1	100	331590	5708664	Großwölkau	Leine
OBF48452	<	0,02	20	<	0,1	100	331395	5706240	nördlich Steu- beln	Schadebach
OBF48454	<	0,02	20	<	0,1	100	330865	5706984	Pressener Str. in Rödgen	Schadebach
OBF48600	<	0,02	20	<	0,1	100	323325	5714558	Str. zw. Naund- orf und Rödgen	Pressener Graben
OBF48820	<	0,02	20	<	0,1	100	316455	5706147	Reibitz Mün- dung	Leine
OBF48900	<	0,02	20	<	0,1	100	316281	5710103	Zschortau	Lober
OBF49000	<	0,02	20	<	0,1	100	314559	5714097	Döbernitz	Lober
OBF49150	<	0,02	20	<	0,1	100	321003	5715264	uh. Delitzsch	Lober
OBF49200	<	0,02	20	<	0,1	100	319105	5716823	Laue	Lober
OBF49310	<	0,02	20	<	0,1	100	332162	5719409	Mündung in Löbnitz	Lober-Leine-Kanal
OBF49333	<	0,02	20	<	0,1	100	336725	5718094	Mündung	Schleifbach
OBF49335	<	0,02	20	<	0,1	100	340792	5713335	nördlich	
OBF49500	<	0,02	20	<	0,1	100	303857	5572309	Görschlitze	Authausener Bach
OBF49501	<	0,02	20	<	0,1	100	305349	5574947	Mündung	Wiesenbach
OBF49502	<	0,02	20	<	0,1	100	307328	5572760	Bad Elster	Weißer Elster
OBF49505	<	0,02	20	<	0,1	100	307560	5571059	Mühlhausen	Rauner Bach
OBF49506	<	0,02	20	<	0,1	100	306209	5574306	Mündung	Haarbach
OBF49509	<	0,02	20	<	0,14	140	303597	5572720	Rauner Mühle	Rauner Bach
OBF49701	<	0,02	20	<	0,1	100	304004	5580911	oh. Jüdenloh- weg	Jüdenlohbach
OBF49702	<	0,02	20	<	0,1	100	300452	5587160	Mdg., uh. Bad	Kellergrundbach
OBF49900	<	0,02	20	<	0,1	100	299624	5587344	Mündung	Eisenbach
OBF49901	<	0,02	20	<	0,1	100	299912	5589260	Görmnitzbach bei	
OBF49992	<	0,02	20	<	0,29	290	296420	5581733	Mündung	Oelsnitz
OBF49993	<	0,02	20	<	0,13	130	295337	5583183	Adlermühle	Weißer Elster
OBF49994	<	0,02	20	<	0,1	100	295072	5584294	Oelsnitz	Hainbach
OBF49996	<	0,02	20	<	0,1	100	295656	5582389	Obertriebels	Triebelbach
OBF49999	<	0,02	20	<	0,1	100	293962	5587046	oh. Triebel	Triebelbach
OBF50001	<	0,02	20	<	0,1	100	295180	5586342	uh. Triebel	Triebelbach
OBF50002	<	0,02	20	<	0,1	100	292114	5590198	oh. Mündung in Triebelbach	Oelsbach
OBF50003	<	0,02	20	<	0,1	100	287851	5584639	Brüder Einigkeit	
OBF50004	<	0,02	20	<	0,1	100	291175	5584962	Stolln	Triebelbach
OBF50005	<	0,02	20	<	0,1	100	291413	5590598	Triebelmühle	Triebelbach
									Mündung	Feilebach
									B173 Abzweig	
									Zettlarsgrün	Feilebach
									Zufluss StH	
									Bobenneukir- chen	Schafbach
									Mündung	Kemnitzbach

Messstelle	Koordinaten (33U/WGS84)						Messstellen- name	Gewässer		
	Gadolinium			Lanthan						
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert	Nordwert
OBF50006	<	0,02	20	<	0,1	100	292252	5595003	Mündung	Kröstaubach
OBF50090	<	0,02	20	<	0,1	100	291437	5592608	Weischlitz	Weißer Elster
OBF50101	<	0,02	20	<	0,1	100	296991	5596478	Mündung	Milmesbach
OBF50200	<	0,02	20	<	0,1	100	299701	5602003	uh. Plauen oh. Elsterberg,	Weißer Elster
OBF50205	<	0,02	20	<	0,1	100	299188	5609151	OT Gippe	Weißer Elster
OBF50212	<	0,02	20	<	0,1	100	298013	5609568	Mündung	Rumpelbach
OBF50213	<	0,02	20	<	0,1	100	298469	5610832	oh. Bad	Tremnitzbach
OBF50220	<	0,02	20	<	0,1	100	299387	5609873	Elsterberg	Weißer Elster
OBF50300	<	0,02	20	<	0,1	100	300031	5611374	uh. Elsterberg	Weißer Elster
OBF50400	<	0,02	20	<	0,1	100	308360	5671464	Pegau	Weißer Elster
OBF50520	<	0,02	20	<	0,1	100	309629	5678018	Zitzschen	Weißer Elster
OBF50550	<	0,02	20	<	0,1	100	310784	5676399	Kleindalzig	Profener Elster- mühlgraben
OBF50600	<	0,02	20	<	0,1	100	314564	5686733	Großzschocher ehemalige Zu- fahrt KA	Weißer Elster
OBF50651	<	0,02	20	<	0,1	100	315152	5692664	Rosenthal oh. Mischwas- serabschlag	Elstermühlgraben
OBF50654	<	0,02	20	<	0,1	100	315798	5692073	Leutzscher Al- lee1/2 uh. Mischwas- serableitung	Elstermühlgraben
OBF50655	<	0,02	20	<	0,1	100	315330	5692154	Leutzscher Al- lee 1/2 Landauer Brü- cke	Elstermühlgraben
OBF50660	<	0,02	20	<	0,1	100	314851	5692146		Elsterbecken
OBF50700	<	0,02	20	<	0,1	100	313617	5694539	Auensee	Weißer Elster
OBF50800	<	0,02	20	<	0,1	100	306751	5696727	Schkeuditz uh. Klapper- mühle	Weißer Elster
OBF50911	<	0,02	20	<	0,1	100	308528	5576842		Ebersbach
OBF50920	<	0,02	20	<	0,1	100	304583	5584115	Marieny uh. Mündung in	Würschnitzbach
OBF50931	<	0,02	20	<	0,1	100	303817	5579507	Weißer Elster	Tetterweinbach
OBF51000	<	0,02	20	<	0,1	100	305034	5577917	Mündung in A- dorf	Schwarzbach
OBF51100	<	0,02	20	<	0,1	100	292884	5595428	Mündung in	
OBF51101	<	0,02	20	<	0,1	100	290813	5595940	Straßberg	Rosenbach
OBF51102	<	0,02	20	<	0,1	100	289279	5599963	Mündung	Leimbach
OBF51200	<	0,02	20	<	0,1	100	295798	5598308	Mündung in Plauen	Fasenbach
OBF51400	<	0,02	20	<	0,1	100	305694	5600460	uh. Mündung	Syrabach
OBF51402	<	0,02	20	<	0,1	100	303485	5598663	Treba	Trieb
OBF51650	<	0,02	20	<	0,1	100	307749	5600527	Neuensalz Mündung uh.	Rabenbach
OBF51710	<	0,02	20	<	0,4	400	307749	5600527	Treuen	Treba
OBF51711	<	0,02	20	<	0,1	100	313667	5592831	oh. TS Falken- stein	Weißer Göltzsch
OBF51900	<	0,02	20	<	0,1	100	315968	5600344	Mündung	Eulenwasser
OBF51901	<	0,02	20	<	0,1	100	308038	5608772	oh. Mylau	Göltzsch
OBF51901	<	0,02	20	<	0,1	100	304865	5612364	Mündung	Friesenbach (Göltz- sch)

Messstelle	Koordinaten (33U/WGS84)						Messstellen- name	Gewässer		
	Gadolinium			Lanthan						
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert	Nordwert
OBF51950	<	0,02	20	<	0,1	100	306682	5610479	Mylau, Hirsch- stein	Göltzsch
OBF52000	<	0,02	20	<	0,1	100	303236	5612670	uh. Mylau	Göltzsch
OBF52700	<	0,02	20	<	0,1	100	310263	5672477	Mündung Audi- gast	Schnauder
OBF52900	<	0,02	20	<	0,1	100	315022	5621951	oh. Werdau	Pleißer
OBF53002	<	0,02	20	<	0,1	100	315802	5629575	Neukirchen	Lauterbach
OBF53004	<	0,02	20	<	0,1	100	313985	5627324	Eisenbahnbrü- cke	Koberbach
OBF53100	<	0,02	20	<	0,1	100	315144	5629877	oh. Crimmit- schau	Pleißer
OBF53102	<	0,02	20	<	0,1	100	316772	5634480	Mündung	Paradiesbach
OBF53108	<	0,02	20	<	0,1	100	315711	5631133	Mündung	Döbitzbach
OBF53200	<	0,02	20	<	0,1	100	318595	5637218	Ponitz	Pleißer
OBF53300	<	0,02	20	<	0,1	100	320368	5663918	Regis	Pleißer
OBF53400	<	0,02	20	<	0,1	100	321282	5668184	Lobstädt	Pleißer
OBF53401	<	0,02	20	<	0,1	100	318344	5674059	Gaulis	Faule Pfütze
OBF53407	<	0,02	20	<	0,1	100	319360	5670129	Neukieritzsch	Pleißer
OBF53500	<	0,02	20	<	0,1	100	318355	5675169	Neumühle	Pleißer
OBF53505	<	0,02	20	<	0,1	100	318451	5675504	uh. Altlast Sachsenpelz Rötha	Kleine Pleißer
OBF53506	<	0,02	20	<	0,1	100	318867	5675145	oh. Altlast Sachsenpelz Rötha	Kleine Pleißer
OBF53600	<	0,02	20	<	0,1	100	317486	5676676	Böhlen	Pleißer
OBF53700	<	0,02	20	<	0,1	100	317315	5683408	Markkleeberg	Pleißer
OBF53701	<	0,02	20	<	0,1	100	317869	5684190	Kleine Pleißer Mark- kleeberg	
OBF53703	<	0,02	20	<	0,1	100	315880	5688191	südlich AGRA oh. Connewitzer Wehr	Pleißer
OBF53800	<	0,02	20	<	0,1	100	315329	5620887	Mündung Stein- pleiß	Neumarker Bach
OBF53801	<	0,02	20	<	0,1	100	315326	5618308	oh. Mittelmühle	Schönfelser Bach
OBF54251	<	0,02	20	<	0,1	100	333264	5647748	Landesgrenze Stauwurzel, Zu- fluss TS	Leubabach
OBF54260	<	0,02	20	<	0,1	100	330745	5649284	Schömbach	Wyhra
OBF54304	<	0,02	20	<	0,1	100	331674	5654467	Mündung	Mausbach
OBF54306	<	0,02	20	<	0,1	100	339850	5654116	Narsdorf	Ossabach
OBF54307	<	0,02	20	<	0,1	100	339568	5654279	obere Dorf- straße	Ossabach
OBF54350	<	0,02	20	<	0,1	100	329664	5657744	Streitwald	Wyhra
OBF54351	<	0,02	20	<	0,15	150	329767	5659020	Mündung	Greifenhainer Bach
OBF54410	<	0,02	20	<	0,1	100	326960	5660619	Am Reiterhof Ortseingang	Wyhra
OBF54420	<	0,02	20	<	0,1	100	326383	5661783	Wyhra	Wyhra
OBF54501	<	0,02	20	<	0,1	100	322592	5669617	am Wald	Wyhra
OBF54610	<	0,02	20	<	0,1	100	321486	5669765	uh. Großzössen	Wyhra
OBF54650	<	0,02	20	<	0,1	100	327090	5676724	Oelzschau	Gösel
OBF54652	<	0,02	20	<	0,1	100	326175	5675909	Braunzsche	Fipper
OBF54680	<	0,3	300	<	0,1	100	322349	5675316	Alte B 95	Neue Gösel
OBF54690	<	0,02	20	<	0,1	100	322659	5675699	oh. KA Espen- hain	Neue Gösel
OBF54700	<	0,02	20	<	0,1	100	318690	5675906	Rötha	Neue Gösel

Messstelle	Koordinaten (33U/WGS84)						Messstellen- name	Gewässer		
	Gadolinium			Lanthan						
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert	Nordwert
OBF54750	<	0,02	20	<	0,1	100	339197	5670305	Glasten alt	Parthe
OBF54900	<	0,02	20	<	0,1	100	336613	5678576	Grethen	Parthe
OBF54902	<	0,02	20	<	0,1	100	331482	5683299	oh. Sachsenpelz (Straßenbrücke im Ort)	Parthe
OBF54903	<	0,02	20		0,15	150	331263	5684289	oh. Autobahn- zubringer	Parthe
OBF55004	<	0,02	20	<	0,1	100	330255	5689454	nördlich Beucha	Mittelgraben
OBF55050	<	0,02	20	<	0,1	100	329024	5689745	Zweenfurth	Threne
OBF55052	<	0,02	20	<	0,1	100	328882	5688373	Mündung	Ochsengraben
OBF55053	<	0,02	20	<	0,1	100	327281	5687651	uh. Kleinpösna	Pösgraben
OBF55054	<	0,02	20	<	0,1	100	326696	5686865	oh. Kleinpösna, Str. "Durch die Felder"	Pösgraben
OBF55055	<	0,02	20	<	0,1	100	324475	5685361	am Kolmberg	Pösgraben
OBF55058	<	0,02	20	<	0,1	100	325182	5683516	Autobahnpark- platz uh. RRB	Pösgraben
OBF55059	<	0,02	20	<	0,1	100	325323	5682970	Magedeborner Straße	Pösgraben
OBF55100	<	0,02	20	<	0,1	100	329897	5688588	Beucha	Parthe
OBF55201	<	0,02	20	<	0,1	100	325400	5696988	uh. Statitzteich	Statitzgraben
OBF55202	<	0,02	20	<	0,1	100	324561	5696181	Mündung	Lösegraben
OBF55204		0,3	300	<	0,1	100	325865	5698048	uh. Pönitz	Statitzgraben
OBF55206	<	0,02	20	<	0,1	100	324210	5693647	A 14	Lösegraben
OBF55207	<	0,02	20	<	0,1	100	324012	5694303	Umspannwerk am Kleingarten- verein	Lösegraben
OBF55208	<	0,02	20	<	0,1	100	324102	5694522		Graben zum Pönit- zer Bach
OBF55209	<	0,02	20	<	0,1	100	327159	5700831	Liemehna	
OBF55400	<	0,02	20	<	0,1	100	315473	5692816	Herloßsohn- straße	Parthe
OBF55523	<	0,02	20	<	0,1	100	335672	5679813	Großsteinberg ehemal. ACZ	Gladegraben
OBF55530	<	0,02	20	<	0,1	100	313023	5694123	Gustav-Esche- Straße	Neue Luppe
OBF55532	<	0,02	20	<	0,1	100	313066	5693076	Gustav-Esche- Straße	Bauerngraben
OBF55600	<	0,02	20	<	0,1	100	306383	5695311	Schkeuditz	Neue Luppe
OBF55900	<	0,02	20	<	0,1	100	308156	5694737	Domholz	Zschampert
OBF57600	<	0,02	20	<	0,1	100	337147	5658310	uh. Geithain	Eula
OBF57630	<	0,02	20	<	0,1	100	334247	5664252	Elbisbach	Kleine Eula
OBF57650	<	0,02	20	<	0,1	100	331521	5666355	Flößberg	Eula
OBF57651	<	0,02	20	<	0,1	100	333452	5668420	uh. Heinersdorf	Heinersdorfer Bach
OBF57653	<	0,02	20		0,38	380	337115	5666278	Buchheim	Heinersdorfer Bach
OBF57660	<	0,02	20	<	0,1	100	333419	5668745	Am Betonwerk	Steingrundbach
OBF57665	<	0,02	20	<	0,1	100	333293	5668743	Heinersdorf	Steingrundbach
OBF57670	<	0,02	20	<	0,1	100	331460	5669029	vor Einmün- dung in Eula	Steingrundbach
OBF57701	<	0,02	20		0,1	100	329063	5670418	Kitzscher	Jordanbach
OBF57702	<	0,02	20		0,11	110	326127	5668982	Dorfteich	Saubach
OBF57750	<	0,02	20	<	0,1	100	325623	5669228	Kesselshain	Eula
OBF57810	<	0,02	20	<	0,1	100	325639	5670108	Mündung	Goldener Born
OBF60400	<	0,02	20		0,1	100	356078	5721359	Mündg. in Weinske	Grüne-Mühle-Bach

Messstelle	Koordinaten (33U/WGS84)						Messstellen- name	Gewässer		
	Gadolinium			Lanthan						
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l			Ostwert	Nordwert
OBF61000	<	0,02	20	<	0,1	100	317074	5696579	Wiederitzsch, Bahnhof	Nördliche Rietz- schke
OBF61004	<	0,02	20	<	0,1	100	318089	5698617	Gewerbegebiet	LBU-Graben Nördliche Rietz- schke
OBF61005	<	0,02	20	<	0,1	100	317358	5697839	Wiederitzsch	schke
OBF63000	<	0,02	20	<	0,1	100	307471	5713715	Pohritzsch	Gienickenbach
OBF63001	<	0,02	20	<	0,1	100	307503	5712185	Zschernitz Ortsausgang	Gienickenbach
OBF63002	<	0,02	20	<	0,1	100	309544	5711195	Neukyhna Ortsausgang	Gienickenbach
OBF63004		0,3	300	<	0,1	100	310605	5708702	Lissa	Gienickenbach
OBF63005	<	0,02	20	<	0,1	100	310384	5707372	uh. KA Zwochau Ebmath 2-	Gienickenbach
OBF64000	<	0,02	20		0,1	100	296334	5578118	Grenzst. 13/2	Wolfsbach
OBF64010	<	0,02	20	<	0,1	100	297370	5578376	Ebmath 1	Wolfsbach
OBF64030	<	0,02	20	<	0,1	100	295575	5577898	Papstleithen	Wolfsbach
OBF64040	<	0,02	20		0,19	190	296102	5578577	vor Grenze CR	Puchtabach
OBF64050	<	0,02	20	<	0,1	100	294739	5578282	uh. Tiefenbrunn	Fuhrbach
OBF64060	<	0,02	20	<	0,1	100	294048	5578510	Kugelreuth Landesgrenze	Erlbach
OBF64070	<	0,02	20	<	0,1	100	292857	5578758	BY	Steinseifelbach
OBF64080	<	0,02	20	<	0,1	100	292074	5578710	uh. Posseck MST 1 - Nord	Seifbach
OBS00110	<	0,02	20	<	0,1	100	308221	5688013	(tief) MST 2 - Süd	Kulkwitzer See
OBS00120	<	0,02	20	<	0,1	100	308617	5686963	(tief)	Kulkwitzer See
OBS00210	<	0,02	20	<	0,1	100	332959	5685677	MST 2	Ammelshainer See
OBS00700	<	0,02	20	<	0,1	100	332414	5685129	MST 1	Kiessee Naunhof Badesee Halben- dorf
OBS00800	<	0,02	20	<	0,1	100	469997	5710211	MST 1	Olbasee
OBS00900	<	0,02	20	<	0,1	100	471774	5680108	MST 1	Olbersdorfer See
OBS01000	<	0,02	20	<	0,1	100	484789	5637689	MST 1 MST 2 - Ost	
OBS01210	<	0,02	20	<	0,1	100	496793	5659226	(tief)	Berzdorfer See
OBS01220	<	0,02	20	<	0,1	100	496678	5659364	MST 1 - West (tief) Geierswalder	Berzdorfer See
OBS01900	<	0,02	20	<	0,1	100	438888	5706562	See	Geierswalder See
OBS02400	<	0,02	20	<	0,1	100	328026	5662630	MST 1 Neuhauser See	Harthsee
OBS03300	<	0,02	20	<	0,1	100	314658	5716373	(West) Neuhauser See	Neuhauser See
OBS03310	<	0,02	20	<	0,1	100	315854	5716477	(Ost) MST 1 - Nord	Neuhauser See
OBS03500	<	0,02	20	<	0,1	100	441486	5708361	(tief) MST 2 - Süd	Partwitzer See
OBS03510	<	0,02	20	<	0,1	100	441906	5708279	(tief)	Partwitzer See
OBS03600	<	0,02	20	<	0,1	100	316465	5717862	MST 1 (tief)	Paupitzscher See
OBS04300	<	0,02	20	<	0,1	100	321803	5718346	Ostbecken	Seelhausener See
OBS04310	<	0,02	20	<	0,1	100	319376	5717341	Westbecken	Seelhausener See
OBS04500	<	0,02	20	<	0,1	100	470047	5693440	MST 1 (Nordost) Südost (tief -	SP Bärwalde
OBS04520	<	0,02	20	<	0,1	100	469495	5690597	MST2)	SP Bärwalde
OBS04530	<	0,02	20	<	0,1	100	467322	5691999	MST 4 - West (tief)	SP Bärwalde

Messstelle	Gadolinium			Lanthan			Koordinaten (33U/WGS84)		Messstellen- name	Gewässer
	Prä- fix	µg/l	ng/l	Prä- fix	µg/l	ng/l	Ostwert	Nordwert		
OBS04600	<	0,02	20	<	0,1	100	460028	5694545	Boje	Speicher Dreiwei- bern
OBS05400	<	0,02	20	<	0,1	100	313393	5707498	Nord	Werbelineer See
OBS05410	<	0,02	20	<	0,1	100	313402	5705112	Süd RDS1-2 TP vor Stau-	Werbelineer See
OBSL0201	<	0,02	20	<	0,1	100	482650	5681263	damm	TS Quitzdorf
OBSL0202	<	0,02	20	<	0,1	100	462625	5674381	TP Staudamm	TS Bautzen
OBSL0203	<	0,02	20	<	0,1	100	300308	5603630	TP Staumauer TP vor Stau-	TS Pöhl
OBSL0204	<	0,02	20	<	0,1	100	329731	5600388	mauer	TS Eibenstock
OBSL0207	<	0,02	20	<	0,1	100	321884	5665157	TP Mitte SP Radeburg 2,	SP Borna
OBSL0209	<	0,02	20	<	0,1	100	411180	5679882	TP SP Witznitz, TP	SP Radeburg 2
OBSL0210	<	0,02	20	<	0,1	100	323778	5668642	Mitte SS Rötha, TP	SP Witznitz
OBSL0211	<	0,02	20	<	0,1	100	319177	5673864	Mitte	Stausee Rötha
OBSL0212	<	0,02	20	<	0,1	100	329457	5651578	TP Staudamm	TS Schömbach
OBSL0214	<	0,02	20	<	0,1	100	293954	5590325	TP Staumauer TP vor Stau-	TS Pirk
OBSL0215	<	0,02	20	<	0,1	100	374491	5621659	mauer	TS Saidenbach
OBSL0216	<	0,02	20	<	0,1	100	290865	5586946	TP Staumauer TS Lehmühle,	TS Dröda
OBSL0217	<	0,02	20	<	0,1	100	400910	5632276	TP Staumauer	TS Lehmühle
OBSL0218	<	0,02	20	<	0,1	100	397207	5640447	TP Staumauer	TS Klingenberg
OBSL0219	<	0,02	20	<	0,1	100	390993	5629903	TP Staumauer	TS Lichtenberg
OBSL0220	<	0,02	20	<	0,1	100	394085	5616898	TP Staumauer	TS Rauschenbach
OBSL0221	<	0,02	20	<	0,29	290	315531	5587542	TP Staudamm	TS Muldenberg
OBSL0222	<	0,02	20	<	0,1	100	405461	5642448	TP Staumauer	TS Malter
OBSL0223	<	0,02	20	<	0,1	100	424723	5632312	TP Staumauer	TS Gottleuba
OBSL0233	<	0,02	20	<	0,1	100	383160	5630152	TP Mitte Rohwasser, Stollenauslauf	Unterer Großhart- mannsdorfer Teich
OBSL0305	<	0,02	20		0,12	120	327306	5611048	Burkersdorf Rohwasser, WW	TS Eibenstock
OBSL0316	<	0,02	20	<	0,1	100	290918	5587014	Großzübern Rohwasser, WW	TS Dröda
OBSL0318	<	0,02	20	<	0,1	100	397144	5640689	Klingenberg Rohwasser, WW	TS Klingenberg
OBSL0321	<	0,02	20		0,29	290	315534	5587622	Muldenberg	TS Muldenberg

Quelle: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen (LfU SN) 2020

**Tabelle A. 4: Vergleichstabelle zu Gadolinium-Messwerten in ausgewählten deutschen Oberflächengewässern**

Probenort	Ursprüngliche Messwerte	Umgerechnete Messwerte in ng/L
Mitte	44,7 pmol/L	7,02
Friedrichshain	3,03 pmol/L	0,48
Reichstag	115 pmol/L	18,06
Reichstag 2	60,4 pmol/L	9,48
Jungfernheide	3,50 pmol/L	0,55
Zoologischer Garten	74,3 pmol/L	11,67
Kurfürstendamm	38,0 pmol/L	5,97
Schöneberg	16,9 pmol/L	2,65
Neukölln	30,6 pmol/L	4,80
Alt-Mariendorf	11,3 pmol/L	1,77
Steglitz	7,44 pmol/L	1,17
Adlershof	3,50 pmol/L	0,55
Friedrichshagen	2,26 pmol/L	0,35
Kaulsdorf	2,76 pmol/L	0,43
Marzahn	3,20 pmol/L	0,50
Buch	3,00 pmol/L	0,47
Pankow	4,23 pmol/L	0,66
Wedding	51,6 pmol/L	8,10
Wittenau	53,8 pmol/L	8,45
Tegel	58,7 pmol/L	9,22
Spandau	3,58 pmol/L	0,56
Zehlendorf	10,1 pmol/L	1,59
Hohenzollerndamm	9,2 pmol/L	1,44
Donau	48,6 pmol/L	7,63
Havel	3136 pmol/L	492,35
Havel ('95)	675 pmol/L	105,98
Krankenhausabwasser	0,5 - 27,9 nmol/L	78,5 - 44
Kläranlage	1,8 - 13,6 nmol/L	282,6 - 2135,2
Spree River (Dämeritzsee)	15,0 ng/L	15,0
Wannsee	436,0 ng/L	436,0
Havel (Jungfernsee)	215,0 ng/L	215,0
Kläranlage Zufluss	122,0 ng/L	122,0
Kläranlage Ausfluss	118,0 ng/L	118,0
Oberflächengewässer	0,6 - 7,4 nmol/L	94,2 - 1161,8
Kläranlage Ausfluss	6,5 nmol/L	1020,5
Teltow Kanal	50,0 - 990,0 ng/L	50,0 - 990
Leitungswasser	2,0 - 57,0 ng/L	2,0 - 57,0
Oberflächengewässer	82,0 - 307,0 pmol/L	12,87 - 48,20
Trinkwasser	100,0 - 298,0 pmol/L	15,7 - 46,79

Quelle: Zusammengeführt und verändert nach Ebrahimi und Barbieri 2019, S. 19; Kulaksız und Bau 2011, S. 1880; Molare Masse Gadolinium = 157

**Tabelle A. 5: Normierung\* der Gd und La Messwerte**

Messstelle	Gadolinium in ng/L	Lanthan in ng/L	Gd normiert in ng/L	La normiert in ng/L
OBF10500	400	710	6,30915E-05	1,60271E-05
OBF24802	1300	170	0,000205047	3,83747E-06
OBF25900	300	620	4,73186E-05	1,39955E-05
OBF26201	1100	100	0,000173502	2,25734E-06
OBF26202	2700	13000	0,000425868	0,000293454
OBF26203	5900	29000	0,000930599	0,000654628
OBF26204	6400	29000	0,001009464	0,000654628
OBF26205	5300	28000	0,000835962	0,000632054
OBF26650	200	100	3,15457E-05	2,25734E-06
OBF26700	600	100	9,46372E-05	2,25734E-06
OBF27701	900	460	0,000141956	1,03837E-05
OBF27702	1300	4900	0,000205047	0,000110609
OBF27704	15000	5300	0,002365931	0,000119639
OBF27705	600	2700	9,46372E-05	6,09481E-05
OBF27708	1100	4600	0,000173502	0,000103837
OBF27710	14000	15000	0,002208202	0,0003386
OBF27711	500	4700	7,88644E-05	0,000106095
OBF27712	400	1400	6,30915E-05	3,16027E-05
OBF27713	42000	23000	0,006624606	0,000519187
OBF27720	3200	2500	0,000504732	5,64334E-05
OBF31511	3800	5600	0,000599369	0,000126411
OBF33010	1300	11000	0,000205047	0,000248307
OBF38640	200	380	3,15457E-05	8,57788E-06
OBF40621	300	290	4,73186E-05	6,54628E-06
OBF40631	300	250	4,73186E-05	5,64334E-06
OBF40633	300	280	4,73186E-05	6,32054E-06
OBF40634	200	250	3,15457E-05	5,64334E-06
OBF40637	500	510	7,88644E-05	1,15124E-05
OBF40638	200	280	3,15457E-05	6,32054E-06
OBF40675	300	260	4,73186E-05	5,86907E-06
OBF40712	500	330	7,88644E-05	7,44921E-06
OBF54680	300	100	4,73186E-05	2,25734E-06
OBF55204	300	100	4,73186E-05	2,25734E-06
OBF63004	300	100	4,73186E-05	2,25734E-06

\* normiert nach Bau et al. 2018, Table 1. Normierungswert: 6,34



**Tabelle A. 6: Informationen zu den untersuchten Helium-Anlagen**

Land	Algerien	Katar	Polen
Ort	Skikda	Ras Laffan	Odolanów
Geo. Koord. (WGS 84)	36.8780 N, 6.9466 E	25.8927 N, 51.5452 E	51.5886 N, 17.6486 E
Kapazität (Mio. m <sup>3</sup> / Jahr)	17	55	2,5
Fläche (m <sup>2</sup> )	12.000	15.000	12.000

**Tabelle A. 7: Strommix nach Ländern für das Jahr 2018**

	Algerien	Katar	Polen	Deutschland
Kohle	-	-	78,28%	37,16%
Erdöl	0,49%	-	1,06%	0,81%
Erdgas	98,49%	100%	7,44%	12,97%
Nuklear	-	-	-	11,82%
Wasser	0,16%	-	1,40%	3,75%
Wind	0,01%	-	7,53%	17,10%
Solar	0,86%	-	0,18%	7,12%
Biomasse	-	-	3,80%	6,95%
Geothermie	-	-	-	0,03%
Abfall	-	-	0,31%	2,06%

**Tabelle A. 8: Materialbedarf zur Heliumproduktion  
(alle Angaben pro Dewar)**

Helium (kg)	66,66
Stromverbrauch (kWh)	125,98
Blechwalzen, Stahl chromiert (kg)	0,47
EU Palette (Stück)	1,93E-03
Landnutzung (m <sup>2</sup> ) bei 50jähriger Nutzungszeit	Alg: 4,11E-03; Kat: 2,85E-03; Pol: 2,57E-02
ISO Tank (kg)	205,51
Dewar (kg)	245

**Tabelle A. 9: Daten zum lokalen Transport in den Förderländern und im Abnehmerland**

Land	Ort / Name	Int. Hafen	Entfernung (km)	Prozess in Ecoinvent
Algerien	Skikda	Skikda	1	Road Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5
Katar	Ras Laffan	Ras Laffan	1	Road Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5
Polen	Odolanów	Danzig	380	Road Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5
Deutschland	Berlin	Hamburg	300	Road Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5

**Tabelle A. 10: Daten zum internationalen Transport**

Herkunft	Ziel	Distanz (km)	Transportmittel	Prozess in Ecoinvent
Algerien (Skikda)	Deutschland (Hamburg)	4.000	Schiff	transport, freight, sea, transoceanic ship
Katar (Ras Laffan)	Deutschland (Hamburg)	12.500	Schiff	transport, freight, sea, transoceanic ship
Polen (Danzig)	Deutschland (Hamburg)	670	LKW	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5

**Der Transport von der Produktionsanlage bis zum Verteilzentrum erfolgt in standardisierten ISO-Containern. Das Transportgewicht setzt sich aus der Heliummenge (66,66 kg) und dem anteiligen Tankgewicht (205,51 kg) zusammen, jeweils bezogen auf einen Dewar.**

**Der Transport vom Verteilzentrum zum Krankenhaus erfolgt in Dewaren. Das Transportgewicht setzt sich aus der Heliummenge (66,66 kg) und dem Dewargewicht (245 kg) zusammen.**

## Berechnung der lokalen Transportstrecke zwischen Verteilzentrum und Krankenhaus

Dazu wurde annäherungsweise der doppelte Abstand (Hin- und Rückfahrt) zweier Punkte auf einer Ebene berechnet, wobei zur einfacheren Berechnung die Stadtfläche von Berlin als quadratische Ebene bestimmt wird.

Daher gilt allgemein:

$$d = 2 * \sqrt{a} \quad (6)$$

$d$  = Abstand zwischen Verteilzentrum und Krankenhaus

$a$  = Stadtfläche

Daher gilt für Berlin:

$d=59,7$  km, bei  $a=891,8$  km<sup>2</sup>

**Tabelle A. 11: Daten zum Tomographen**

Lebensdauer (Jahre)	11,5	(GE Healthcare 2016)
Ø Untersuchungsdauer (Stunden)	0,47	(Rock und Herrmann 2012)
Scans pro Jahr	18.476,68	
Scans pro Maschine	212.481,84	
Maschine pro Scan (elektr. Komponenten)	4,71E-06	
Stromverbrauch pro Scan (kWh)	15	
Heliumverbrauch pro Jahr (Liter)	1.130	
Deware (500 Liter) pro Jahr	2,26	
Deware pro Scan	1,22E-04	

**Tabelle A. 12: Daten zum Untersuchungsraum**

Lebensdauer (Jahre)	50	Quelle: Ökobilanz-Standard
Fläche (m <sup>2</sup> )	42	Quelle: (Rentz 2019; Abushab et al. 2018)
Scans pro Raum	923.834,08	
Scans pro m <sup>2</sup>	38.801.031,2	
Raum pro Scan	1,08E-06	
m <sup>2</sup> pro Scan	2,58E-08	

**Tabelle A. 13: Wirkungskategorien Ergebnisse Szenario Zero Losses**

Wirkungskategorie	Reference unit	Result
Acidification - CML-IA baseline	kg SO2 eq	0.023177557
Eutrophication - CML-IA baseline	kg PO4--- eq	0.014219924
Fresh water aquatic ecotox. - CML-IA baseline	kg 1,4-DB eq	2.903231731
Global warming (GWP100a) - CML-IA baseline	kg CO2 eq	8.481251146
Human toxicity - CML-IA baseline	kg 1,4-DB eq	3.458006788
Marine aquatic ecotoxicity - CML-IA baseline	kg 1,4-DB eq	14278.08964
Ozone layer depletion (ODP) - CML-IA baseline	kg CFC-11 eq	3.87473E-07
Photochemical oxidation - CML-IA baseline	kg C2H4 eq	0.000887863
Terrestrial ecotoxicity - CML-IA baseline	kg 1,4-DB eq	0.008688328

**Tabelle A. 14: Wirkungskategorien Szenario Losses**

Impact category	Reference unit	Result
Acidification - CML-IA baseline	kg SO2 eq	0.023978114
Eutrophication - CML-IA baseline	kg PO4--- eq	0.014415607
Fresh water aquatic ecotox. - CML-IA baseline	kg 1,4-DB eq	2.945622621
Global warming (GWP100a) - CML-IA baseline	kg CO2 eq	8.65968511
Human toxicity - CML-IA baseline	kg 1,4-DB eq	3.529322658
Marine aquatic ecotoxicity - CML-IA baseline	kg 1,4-DB eq	14444.81511
Ozone layer depletion (ODP) - CML-IA baseline	kg CFC-11 eq	4.32649E-07
Photochemical oxidation - CML-IA baseline	kg C2H4 eq	0.000938045
Terrestrial ecotoxicity - CML-IA baseline	kg 1,4-DB eq	0.008908236