
**Quantitative Analyse der Kritikalität
mineralischer und metallischer Rohstoffe
unter Verwendung eines systemdynamischen
Modell-Ansatzes**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Simon Glöser-Chahoud
aus Kirchheim unter Teck

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung:
09.05.2017

Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr. rer. nat. Bernd Lehmann
Hauptberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. pol. Rainer Walz

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist im Zuge meiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe entstanden.

Besonderer Dank gebührt hierzu meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, der durch seine pragmatische und ergebnisorientierte Betreuung ein konstruktives Zusammenspiel zwischen angewandter Forschung am Fraunhofer ISI und deren Anbindung an die Universität ermöglichte.

Weiterhin möchte ich meinem Abteilungsleiter Herrn Prof. Dr. Rainer Walz für die Ermöglichung der Promotion am Fraunhofer ISI und die Übernahme der Zweitbegutachtung dieser Dissertation danken.

Frau Dr. Nina Roth danke ich ganz herzlich für ihre Unterstützung als wissenschaftliche Assistentin von Herrn Prof. Faulstich in allen organisatorischen Angelegenheiten der Promotion an der TU Clausthal sowie für die Planung der Doktorandenseminare, die einen regen Austausch ermöglichten und eine gute Vorbereitung auf die Disputation bildeten.

Meinem Arbeitsgruppenleiter Dr.-Ing. Luis Tercero Espinoza danke ich für die Unterstützung bei der Akquise und Organisation passender Projekte am Fraunhofer ISI, die meine Dissertation inhaltlich ergänzt haben und auf diese Weise notwendige Synergieeffekte zwischen operativer Projektarbeit und Promotionsinhalten erzielt werden konnten.

Für den kontinuierlichen Austausch, die konstruktive Zusammenarbeit und die zahlreichen fachlichen Diskussionen danke ich meinen Kollegen am Fraunhofer ISI, insbesondere Marcel Soulier und Matthias Pfaff, mit denen ich im Bereich der Modellierung stets zielführend zusammengearbeitet habe.

Weiterhin gebührt den studentischen Hilfskräften und Masteranden Stefan Haag, Adrian Klöckner, Patrick Novinsky, Simon Metzsig und Felix Fehringer Dank, die durch ihre Arbeiten eine entscheidende Datengrundlage für diese Dissertation geschaffen haben.

Ein ganz besonderer Dank für den konstanten Rückhalt und die ertragenen Entbehrungen, besonders in der Endphase der Dissertation in unserem Hochzeitsjahr 2015, geht an meine Frau Mada Chahoud, ohne deren Unterstützung in den vergangenen Jahren diese Arbeit nicht entstanden wäre.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
1.1. Problemstellung und Zielsetzung	8
1.2. Aufbau und Struktur	9
2. Kritische Rohstoffe	11
2.1. Begriffsabgrenzung	11
2.2. Historische Debatte um begrenzte Rohstoffverfügbarkeit und Versorgungsrisiken	12
2.2.1. Entwicklung der anthropogenen Nutzung metallischer und mineralischer Rohstoffe	12
2.2.2. Debatte um die Sicherheit der Rohstoffversorgung im 20. Jahrhundert	17
2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität	20
2.3.1. Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der klassischen Risikobetrachtung	23
2.3.2. Risikoindex als Multiindikatoransatz	35
2.3.3. Zeitreihenanalysen, statistische Trends und Szenarien	39
2.4. Zusammenfassung, Vergleich und Ergänzungen zu den betrachteten aktuellen Studien	48
2.4.1. Die Kritikalitätsmatrix im Kontext der Risikodefinition	48
2.4.2. Multiindikatorsysteme zur Risikobewertung	54
2.4.3. Zeitreihen- und Trendanalysen	54
2.4.4. Aus der Literaturrecherche abgeleiteter Forschungsbedarf	55
3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen	57
3.1. Analyse von Rohstoffeigenschaften durch Methoden der Multivariaten Statistik	57
3.1.1. Identifikation relevanter Eigenschaften aus bisherigen Studien	57
3.1.2. Multidimensionale Skalierung	61
3.1.3. Hierarchische Clusteranalyse	63
3.1.4. Korrelationsmatrizen und Streudiagramme	64
3.1.5. Multiple Korrespondenzanalyse	66
3.1.6. Weitere Verwendungspotenziale dimensionsreduzierender Verfahren bei der Analyse von Rohstoffen	68
3.2. Indikatoren basierend auf Zeitreihen als erste Ansätze zur Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes	70
4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen	79
4.1. Der System Dynamics Ansatz	79
4.1.1. Rückkopplungseffekte und zeitliche Verzögerungen	80
4.1.2. Grundsätzliches Vorgehen bei der Modellentwicklung	83
4.2. Dynamische Stoffstrommodellierung	85
4.2.1. Industrial Ecology, Material- und Stoffflussanalysen	85
4.2.2. Statische und dynamische Ansätze zur Stoffstromanalyse	87
4.2.3. Dynamische Stoffkreisläufe und Produktlebenszyklen	89
4.3. Modellierung von Marktdynamik	92

4.4.	Unsicherheiten und stochastische Simulationen	100
5.	Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle	103
5.1.	Identifikation der relevanten Rohstoffkandidaten für die weitere Analyse	103
5.2.	Kupfer	105
5.2.1.	Das globale Kupfermodell	106
5.2.2.	Regionalisierung des Kupfermodells für Europa (EU27)	118
5.3.	Kobalt	122
5.3.1.	Der globale Kobaltkreislauf	126
5.3.2.	Der europäische Kobalt-Kreislauf	129
5.4.	Die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium	136
5.5.	Globales Angebot und Verwendungsstrukturen Seltener Erden	137
5.5.1.	Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe	140
5.5.2.	Globales Modell der Neodym- und Dysprosium-Materialflüsse	151
5.5.3.	Neodym und Dysprosium in der deutschen industriellen Wertschöpfung	153
6.	Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte	167
6.1.	Statistische Trends und ökonometrische Zeitreihenanalyse zur Modellerweiterung für prospektive Simulationen	167
6.2.	Systemmodell Kupfer und dessen Marktdynamik	169
6.2.1.	Ergänzung des globalen Kupfermodells um marktdynamische Effekte	170
6.2.2.	Modellkalibrierung und Ergebnisse zur Entwicklung des Kupfermarktes	171
6.2.3.	Vergleich der Ergebnisse des SD-Modells mit Autoregressionsmodellen (ARIMA)	172
6.3.	Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium	174
6.3.1.	Das Globale Mobilitätsmodell (GloMo)	175
6.3.2.	Prinzip der Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen	180
6.3.3.	Kopplung von “GloMo” mit dem globalen Kobaltmodell	182
6.3.4.	Kobalt als Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien	182
6.3.5.	Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe für Traktionsmotoren	190
7.	Ergänzende Risikobetrachtungen mit den systemdynamischen Modellen	203
7.1.	Bewertung von Marktrisiken auf globaler Ebene	203
7.2.	Schnittpunkte zu ökonomischen Modellen auf regionaler Ebene	209
8.	Zusammenfassung und Ausblick	211
8.1.	Zusammenfassung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse	211
8.2.	Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeit	216
A.	Anhang	219
A.1.	Ergänzende Daten zu den Kritikalitätsstudien	219
A.2.	Datentabellen und methodische Ergänzungen zu den statistischen Analysen	220
A.2.1.	Datengrundlage Multivariate Analysemethoden	220
A.3.	Zusatzinformationen zur System Dynamics Modellierung	222
A.3.1.	System Dynamics Softwarelösungen	222
A.3.2.	Optimierungsalgorithmus zur Kalibrierung der Modelle in Vensim	223
A.3.3.	Mathematische Erläuterungen zu numerischen Lösungsmethoden von Differenzialgleichungen	224

A.4. Handelsdaten	227
A.4.1. UN Comtrade für internationale Handelsdaten	227
A.4.2. Güterklassifikationen (HS-Codes)	228
A.5. Zusatzinformationen zu den dynamischen Soffstrommodellen	231
A.5.1. Kupfer	231
A.5.2. Kobalt	233
A.5.3. Seltene Erden	235
A.6. Im Zuge der Dissertation erfolgte Veröffentlichungen	242
A.6.1. Peer-reviewed Journal Paper	242
A.6.2. Konferenzpaper und Beiträge in Sammelbänden	242
A.7. Lebenslauf	243

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Aktuelle Einflüsse auf die Versorgungssicherheit und das wahrgenommene Versorgungsrisiko	7
1.2.	Aufbau und Struktur der Arbeit	9
2.1.	Darstellung des jungsteinzeitlichen Abbaus von Feuersteinen im englischen “Grime’s Graves”	13
2.2.	Europäische Kulturen und Handelsströme in der Bronzezeit	14
2.3.	Historische Entwicklung der Roheisen- und Stahlverarbeitung	15
2.4.	Kontinuierliche Zunahme der industriell genutzten Elemente	16
2.5.	Veröffentlichungen zur Rohstoffversorgung seit 1947	19
2.6.	Grundlegende Ansätze zur Bewertung von Rohstoffrisiken	20
2.7.	Prinzip der Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der klassischen Risikobetrachtung in einer Risikomatrix	23
2.8.	Ergebnis der Kritikalitäts-Studie des Nationalen Forschungsrats der USA 2008	25
2.9.	Ergebnis der Kritikalitätsstudie des “U.S. Department of Energy” 2011	27
2.10.	EU Kritikalitätsmatrix 2010	29
2.11.	EU Kritikalitätsmatrix 2014	29
2.12.	Ergebnis der KfW Studie in Form der Kritikalitätsmatrix für Deutschland 2011	32
2.13.	Erhebung der Koordinaten im “Kritikalitätsraum” (Criticality Space) auf Basis verschiedener Indikatoren nach Graedel et al. 2012	33
2.14.	Criticality Space für die geologische Kupferfamilie	34
2.15.	Methodik und Ergebnisse der Studie “Material Security - Ensuring resource availability for the UK economy” 2008	35
2.16.	Ergebnisse der vbw Studie für Bayern 2009 und 2012	37
2.17.	Ergebnisse der Landesstudien für Hessen, Bayern und Baden-Württemberg	38
2.18.	“VW-BGR-Ansatz” zur Bewertung von Versorgungsrisiken	40
2.19.	Ergebnisse des “VW-BGR Ansatzes” am Beispiel von Kupfer und Zink	41
2.20.	Reserven, Ressourcen, Reserven-Reichweite am Beispiel von Kupfer	43
2.21.	Trend- und Autoregressionsmodelle	44
2.22.	Kritikalität im Kontext der klassischen Risikodefinition	49
2.23.	Aktuelle Kritikalitätsmatrix der EU mit Höhenlinien	50
2.24.	Prinzip der Skalierung in einheitlicher Kritikalitätsmatrix	51
2.25.	Einheitliche Skalierung der Kritikalitätsmatrizen für die EU und Deutschland	52
2.26.	Unterschiede in den Kritikalitätskonzepten	53
2.27.	Kritikalitätskonzept unter Berücksichtigung zentraler politischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Einflussfaktoren	55
3.1.	Netzdiagramm der Rohstoffmerkmale	60
3.2.	Überführung einer Kreuztabelle in eine Distanzmatrix	61
3.3.	Ergebnis der Multidimensionalen Skalierung	62
3.5.	Streudiagramm der Merkmalsausprägungen	65
3.6.	Die Burt-Matrix als Kontingenztafel	66

Abbildungsverzeichnis

3.7. Ergebnis der Multiplen Korrespondenzanalyse (MCA)	67
3.8. Multidimensionale Skalierung bezüglich Preisänderungen	69
3.9. Zeitliche Entwicklung des Herfindahl-Hirschman-Index	70
3.10. Das Versorgungsrisiko ausgewählter Rohstoffe und ihre Relevanz für Zukunftstechnologien .	71
3.11. Anteil des verarbeitenden Gewerbes (Industrie) an der Bruttowertschöpfung der G7 Staaten .	73
3.12. Indikatoren für die relative wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes	74
3.13. Prinzip der Dynamisierung der Kritikalitätsmatrix	75
3.14. Dynamisierung der Kritikalitätsmatrix für Deutschland	77
4.2. Prinzip der Rückkopplungseffekte	81
4.3. Verzögerungsmechanismen	81
4.4. Formen von Rückkopplungseffekten	82
4.5. Formen dynamischen Systemverhaltens	83
4.6. Stufen der System Dynamics Modellentwicklung	84
4.7. Grundgedanke des Forschungsbereichs “Industrial Ecology”	86
4.8. Allgemeiner Rohstoffkreislauf	87
4.9. Veröffentlichungen zu dynamischen Stoffkreisläufen	88
4.10. Methodische Dimensionen von Stoffstrommodellen	88
4.11. Top-down und Bottom-up-Ansätze der Materialflussanalyse	89
4.12. Materialakkumulation über die Zeit	90
4.13. Prinzip der Aging Chain	91
4.14. Entwicklung der Rohstoffpreise seit 1980	92
4.15. Der klassische Schweinezyklus	93
4.16. Das “Cobweb-Theorem”	95
4.17. Periodische Preiszyklen	96
4.18. Globales GDP (Gross Domestic Product) und Primärbedarf an Industriemetallen	96
4.19. Investitionen in Bergbau und Exploration	97
4.20. Planungsphasen eines Minenprojekts	98
4.21. Dynamische Hypothesen für globale Rohstoffmarktmodelle	99
4.22. Grundprinzip der iterativen stochastischen Simulationsläufe zur Analyse verschiedener Un- sicherheiten bezüglich der Inputdaten auf die Modellergebnisse.	100
5.1. Kupferproduktion nach Ländern	105
5.2. Modell-Input Kupfer	106
5.3. Struktur des globalen Kupfermodells	109
5.4. Prinzip der geschlossenen Massenbilanz	110
5.5. Vollständiges Prinzip der geschlossenen Massenbilanz	111
5.6. Ergebnisse aus dem globalen Kupfermodell	112
5.7. Unterscheidung zwischen durchschnittlicher Verwendungsdauer und Alter der obsoleten Produkte	113
5.8. Sankey-Diagramm des globalen Kupfermodells	114
5.9. Sensitivität des globalen Kupfermodells hinsichtlich der Verwendungsdauerverteilungen . .	115
5.10. Ergebnisse der stochastischen Sensitivitätsanalyse	116
5.11. Boxplots aller berechneten Recyclingquoten für Kupfer auf globaler Ebene	117
5.12. Auswirkungen der stochastischen Simulation auf das Schrottaufkommen und die Bestands- mengen in Verwendung	118
5.13. Schematische Darstellung des europäischen Kupfermodells	119
5.14. Kupfer Handelsbilanz EU27	120

5.15. Sankey-Diagramm der europäischen Kupferströme für 2012	121
5.16. Infokarte Kobalt	122
5.17. Verwendungsstrukturen von Kobalt auf globaler Ebene	123
5.18. Struktur des globalen Kobaltmodells	127
5.19. Ergebnisse aus dem globalen Kobaltmodell	128
5.20. Struktur des europäischen Kobaltmodells	129
5.21. Europäische Verwendungsstruktur von Kobalt	130
5.22. Kobalt Handelsströme	131
5.23. Verkaufszahlen von Konsumelektronik in Europa	132
5.24. Recyclingpotenzial von Kobalt aus Elektroschrott	134
5.25. Die Elemente der Seltenen Erden im Periodensystem	136
5.26. Globale Seltenerd-Produktion nach Ländern	137
5.27. Globale Verteilung der Seltenerd-Produktion	138
5.28. Chinesische Abbaugebiete von Seltenen Erden	139
5.29. Entwicklung der Permanentmagnet-Technologien	141
5.30. Einfluss des Dysprosiumanteils auf die Magneteigenschaften	142
5.31. Globale Produktions- und Verwendungsstrukturen von NdFeB Magneten	144
5.32. Konzepte von Windkraftanlagen	146
5.33. Weltweit installierte Leistung von Windkraftanlagen	147
5.34. Globale Verwendungsmengen von Dysprosium	149
5.35. Vernetzung der Literaturlbasis zu Produktionsmengen von Seltenen Erden	150
5.36. Struktur des globalen Stoffstrommodells für Neodym und Dysprosium	151
5.37. Ergebnisse des globalen Stoffstrommodells für NdFeB-Magnete	152
5.38. Stoffstrommodell für Neodym und Dysprosium in Deutschland	154
5.39. Verkaufszahlen von Elektronikprodukten in Deutschland	156
5.40. Pkw Zulassungszahlen in Deutschland	159
5.41. WKA Marktanteile nach Hersteller	160
5.42. Pedelecs in Deutschland	162
5.43. Verbleib von Altautos in Deutschland	164
5.44. Recyclingpotenzial von NdFeB-Magneten	165
6.1. Trendanalysen Kupfer und Kobalt Bergbau	168
6.2. Korrelation der Halbzeuherstellung von Kupfer mit der Weltwirtschaftsentwicklung	169
6.3. Struktur des Kupfer-Marktmodells	170
6.4. Kalibrierung des Kupfer-Marktmodells	171
6.5. Kupfer Preisprognosen	172
6.6. Autoregressionsmodelle	173
6.7. Beispiel nachfragebasierter Prognosen	174
6.8. Struktur des globalen Flottenmodells (GloMo)	175
6.9. Szenarien zur Entwicklung alternativer Antriebe	176
6.10. Alternative Antriebskonzepte	177
6.11. Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen	180
6.12. Funktionsprinzip einer Li-Ionen-Zelle	182
6.13. Vergleich verschiedener Batterietechnologien	183
6.14. Vergleich unterschiedlicher Kathodenmaterialien	185
6.15. Marktanteile Kathodentechnologien für alternative Antriebe	186
6.16. Szenario starke Angebotsentwicklung von Kobalt, schwache Diffusion alternativer Antriebe	187

Abbildungsverzeichnis

6.17. Szenario starke Angebotsentwicklung von Kobalt, starke Diffusion alternativer Antriebe . . .	187
6.18. Szenario schwache Angebotsentwicklung von Kobalt, schwache Diffusion Elektromobilität .	188
6.19. Szenario schwache Angebotsentwicklung von Kobalt, starke Diffusion alternativer Antriebe	188
6.20. Gängige Elektromotor-Konzepte	192
6.21. Zusammenhang Motorleistung und Magnetgröße	196
6.22. Angebotsszenarien Dysprosium	198
6.23. Szenario starke Angebotsentwicklung Dysprosium, schwache Diffusion alternativer Antriebe.	199
6.24. Szenario schwache Angebotsentwicklung Dysprosium, schwache Diffusion Elektromobilität.	200
6.25. Szenario starke Angebotsentwicklung Dysprosium, starke Diffusion alternativer Antriebe. .	200
6.26. Szenario schwache Angebotsentwicklung Dysprosium, starke Diffusion alternativer Antriebe.	201
7.1. Auswirkungen einer schlagartigen Verknappung des Angebots auf dem Kupfermarkt	205
7.2. Auswirkungen einer schlagartigen Verknappung des Angebots von Kobalt	206
7.3. Auswirkungen einer schlagartigen Verknappung des Angebots von Dysprosium	207
7.4. Güterklassifikationen, Produktionsdaten, Input-Output Tabellen	210
A.1. Trägermetalle und geologisch vergesellschaftete Nebenprodukte	219
A.2. Akkumulation von Technologiemetallen in Recyclingprozessen	220
A.3. Kalibrier-Prozess nach Powell und Brent	223
A.4. Struktur der Handelsdatenbank	227
A.5. Vereinfachte Darstellung der Prozessrouten der Kupferproduktion	231
A.6. Lebensdauer-Verteilfunktionen und Ausfallwahrscheinlichkeiten	232
A.7. Herstellungsprozess von Kobalt nach dem Gécamines-Prozess	233
A.8. Aufbereitung der SE-Konzentrate (Bastnäsit, Monazit, Xenotim)	235
A.9. Aufbereitung der Tonminerale mit hohem Anteil an schweren SE	236
A.10. Trennung der Seltenen Erden durch Flüssigextraktion	236
A.11. Trennstufen der Seltenen Erden bei der Extraktion	236
A.12. Verwendungsstrukturen Seltene Erden	237
A.13. Marktanteile Windkrafthersteller	241

Tabellenverzeichnis

2.1.	In aktuellen Kritikalitätsbetrachtungen berücksichtigte Einflussgrößen	19
2.2.	Zentrale Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität	22
2.3.	Indikatoren der Kritikalitätsstudie des U.S. National Research Council (NRC)	24
2.4.	Berechnungsbeispiel zur Bestimmung der Vulnerabilität der U.S. Wirtschaft gegen Versorgungsstörungen	25
2.5.	Indikatoren des “US Department of Energy (DoE)” zur Quantifizierung der Wichtigkeit einzelner Rohstoffe für alternative Energietechnologien	26
2.6.	Indikatoren der “Ad hoc Working Group on defining critical raw materials” für die Kritikalitätsbewertung der EU.	28
2.7.	Indikatoren und deren Gewichtung in der KfW-Studie	31
2.8.	Ergebnis der Studie “Rohstoffe für Zukunftstechnologien”	47
3.1.	Herangezogene Indikatoren zentraler Studien zur Bewertung von Rohstoffrisiken	58
3.2.	Indikatoren für die statistischen Analysen	59
3.3.	Gängige Indikatoren zur Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit eines Landes bezüglich bestimmter Technologien (Warengruppen)	72
4.1.	Kategorisierung existierender Kreislaufmodelle	88
5.1.	Durchschnittliche Verwendungsdauern und Produktionseffizienzen der verschiedenen Bereiche im Kupferkreislauf	107
5.2.	Technische Recyclingeffizienzen für das globale Kupfermodell	108
5.3.	Durchschnittswerte der berechneten globalen Recyclingindikatoren	114
5.4.	Durchschnittliche Verwendungsdauern und aktuelle Recyclingraten wichtiger Anwendungsbereiche von Kobalt	126
5.5.	Aktuelle Kobaltgehalte durchschnittlicher Elektrokleingeräte sowie die Verweildauer in Verwendung	132
5.6.	Verwendungsbereiche Seltener Erden aufgeteilt nach Elementen	140
5.7.	Magnetgröße in Traktionsmotoren für Elektrofahrzeuge	145
5.8.	Verwendungsdauern der Magnet-Anwendungsbereiche	151
5.9.	Magnethersteller in Deutschland	153
5.10.	Annahmen zu Materialgehalten in Elektronikanwendungen	156
5.11.	Anteile NdFeB-Magnete in konventionellen Pkw	158
5.12.	Windkraftanlagen mit NdFeB-Permanentmagnet	161
6.1.	Kobaltgehalt nach Batterietechnologie	184
6.2.	Batteriekapazitäten in alternativen Antriebskonzepten nach Fahrzeug-Segmenten	185
A.1.	Datenbasis der Clusteranalyse	221
A.2.	HS Codes kritische Metalle	228
A.3.	HS Codes Kupfer	229

Tabellenverzeichnis

A.4. HS Codes Kobalt	230
A.5. HS Codes Seltene Erden	230
A.6. Prozesse zur Kobaltgewinnung	233
A.7. Qualitative Bewertung der in den kommenden 10 Jahren relevanten Kathodenmaterialien für Li-Ionen-Batterien	234
A.8. Typische elektrische Kleinmotoren in konventionellen PkW	239
A.9. Aktuelle Windkraftanlagen der für den deutschen Markt relevanten Hersteller	240
A.10. Aktuelle Windkraftanlagen chinesischer Hersteller	241

Formelzeichen

Lateinische Symbole:

c	Konzentration	$[\frac{mol}{m^3}]$
M	Molmasse	$[g/mol]$
Q	Elektrische Ladung	$[C]$
U	Zellspannung	$[V = \frac{J}{C}]$
I	Elektrische Strömstärke	$[A = \frac{C}{sec}]$
E	Spezifische Energie	$[Wh/kg]$
F	Faraday Konstante	$[C/mol]$
P	Spezifische Leistung	$[W/kg]$
T	Betriebstemperatur	$[^{\circ}C]$
H_C	Koerzitivfeldstärke	$[A/m]$
B_R	Remanenz	$[T]$
BH	Energiedichte	$[kJ/m^3]$

Griechische Symbole:

∂	Differenzialkoeffizient
Δ	Differenzenkoeffizient
μ	Erwartungswert
σ	Standardabweichung
λ	Ausfallrate

Tief gestellte Indizes:

i	Komponente i
j	Komponente j

Abkürzungen

AIME	American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers
BEV	Battery Electric Vehicle
BERR	Department for Business Enterprise & Regulatory Reform
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BGS	British Geological Survey
Bio.	Billionen
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BRICS	Brasilien, Russland, Indien, China und Südafrika
C&D	Construction and Demolition
CC	Copper Council
CD	Compact Disc
CNG	Compressed Natural Gas
Comtrade	Commodity Trade Statistics Database
CREIC	China Rare Earth Information Center
DD	Direct Drive
DKI	Deutsches Kupferinstitut
DRK	Demokratische Republik Kongo
DVD	Digital Video Disc
EC	European Commission
ECI	European Copper Institute
EDD	Energy Dissipation Device
ELV	End-of-Life Vehicles
EoL	End-of-Life
ERD	Entity-Relationship-Diagram
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle
FCC	Fluid Catalytic Cracking
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicles
FHEV	Full-Hybrid Electric Vehicle
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft
FTS	Fischer-Tropsch-Synthese
FzgKm	Fahrzeugkilometer
GDP	Gross Domestic Product (BIP)
GLOMO	Global Mobility Model
GWMG	Great Western Minerals Group
GWEC	Global Wind Energy Council
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HDD	Hard Disc Drive
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HREE	Heavy Rare Earth Elements

HTS	High Temperature Superconductor
HTSL	Hochtemperatursupraleiter
IC	Integrated Circuit
ICA	International Copper Association
ICE	Internal combustion engine
ICSG	International Cooper Study Group
IEW	Industrial Electrical Waste
IIED	International Institute for Environment and Development
IMCOA	Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd.
INEW	Industrial non Electrical Waste
ISI	Institut für System- und Innovationsforschung
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
JRC	Joint Research Centre
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
LNG	Liquified Natural Gas
LPG	Liquified Petroleum Gas
LREE	Light Rare Earth Elements
MFA	Material Flow Analysis
MGOe	Mega-Gauß-Oersted
MHEV	Micro Hybrid Electric Vehicle
MREE	Medium Rare Earth Element
Mio.	Millionen
MRI	Magnetresonanztomographie
MSW	Municipal Solid Waste
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCA	(Lithium)-Nickel-Kobalt-Aluminium-(Oxid)
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
NMC	(Lithium)-Nickel-Mangan-Kobalt-(Oxid)
OLED	Organic Light-Emitting Diode
OTA	Office of Technology Assessment, US Congress
PC	Personal Computer
PEM	Proton Exchange Membrane
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
Pkw	Personenkraftwagen
Prodcom	[Base de Données de] Production Communautaire
REEV	Range Extended Electric Vehicle
REPM	Rare earth permanent magnet
RFID	Radio-Frequency Identification
RMDb	Raw Materials Database
SEE	Seltenerdelement
SEO	Seltenerd-Oxide
SFA	Substance Flow Analysis
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SS	Sewage Sludge (Klärschlamm)
SSD	Solid State Drive

STP	Normbedingungen [Standard Temperature and Pressure]
SX-EW	Solvent Extraction and Electrowinning
TAB	Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag
TMS	The Minerals, Metals & Materials Society
UK	United Kingdom
UN(O)	United Nations (Organization)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UNSD	UN Statistics Division
US(A)	United States (of America)
USGS	United States Geological Survey
VBA	Visual Basic for Applications
WCO	World Customs Organization
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment
WLED	White Light Emitting Diode
WTO	World Trade Organization

Verwendete chemische Elementsymbole:

Ag	Silber	Al	Aluminium
As	Arsen	Au	Gold
Ba	Barium	Be	Beryllium
Bi	Bismut	Cd	Cadmium
Cu	Kupfer	Ce	Cer
Cr	Chrom	Co	Cobalt
Dy	Dysprosium	Fe	Eisen
Eu	Europium	Er	Erbium
Gd	Gadolinium	Ga	Gallium
Ge	Germanium	Hf	Hafnium
Hg	Quecksilber	Ho	Holmium
In	Indium	La	Lanthan
Li	Lithium	Lu	Lutetium
Mg	Magnesium	Mn	Mangan
Mo	Molybdän	Nd	Neodym
Ni	Nickel	Nb	Niob
Os	Osmium	Pb	Blei
Pd	Palladium	Pt	Platin
Pr	Praseodym	Rh	Rhodium
Re	Rhenium	Sb	Antimon
Sc	Scandium	Sn	Zinn
Si	Silicium	Ta	Tantal
Te	Tellur	Th	Thorium
Ti	Titan	V	Vanadium
W	Wolfram	Y	Yttrium
Yb	Ytterbium	Zn	Zink
Zr	Zirconium		

Abstract

The rapid economic development of emerging countries in combination with the fast dissemination of new technologies have caused an increasing demand for metallic raw materials in recent years regarding both the total material requirement and the diversity of elements used for the production of specific high-tech applications. Especially the markets for several minor metals which are often characterized by high concentration of raw material production at the country and company level and which are generally produced as a byproduct have been subject to turbulences since the beginning of the 21st century. This has led to growing concerns about the security of raw material supply, particularly in established western economies. As a result, numerous studies analyzing and quantifying supply risks and raw material criticality for different countries and regions have been conducted in the previous decade.

Building upon a review and analysis of current studies and scientific literature about the assessment of supply risks and raw material criticality, this thesis systematically develops concepts to supplement current approaches of criticality determination especially regarding the step towards a more dynamic view on raw material markets and supply systems. Therefore, in a first step, different concepts from the field of multivariate statistics and an approach of criticality determination analyzing time dependent indicators as a supplement to static screening methods of criticality assessment are introduced and tested on the example of Germany and Japan.

While the aforementioned screening methods are useful to analyze large numbers of raw materials and to identify those which are most critical for an economy, the key issue of this thesis is the development of dynamic global and regional material flow models for specific raw materials using a System Dynamics (SD) approach. Therefore, the anthropogenic material flows of copper, cobalt and the rare earth elements neodymium and dysprosium are analyzed.

The dynamic material flow models for copper and cobalt were realized at the global and European level whereas the rare earth elements neodymium and dysprosium which are relevant for the production of NdFeB magnets (Neodymium-Iron-Boron) were examined at the global level and for Germany. As demonstrated with the dynamic material flow models, copper as a classical industrial metal has a relatively well established recycling system reaching an end-of-life recycling rate (EoL RR) of around 50 % at the global level and over 60 % within the European Union. While cobalt in the form of an alloying element for super alloys and hard metals (in aircraft turbines or cutting and drilling tools) is recycled with high efficiencies reaching more than 70 % of EoL RR, the material flow models show a considerable potential for cobalt recycling from cathode materials of end-of-life lithium-ion batteries. Lithium-ion batteries for general electronic equipment have shown high growth rates in the past decade and formed the main demand driver for cobalt. However, due to

the lack of efficient collection systems for end-of-life lithium-ion batteries and WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) in general, the overall recycling rate of cobalt is currently decreasing and the material flow model shows a significant potential for material recovery from end-of-life batteries, particularly in Europe. The same is true for the recycling of NdFeB magnets which currently mainly occur in electronic waste such as obsolete hard disk drives (HDD) or CD and DVD players from which the recovery is technically challenging due to the high dispersion of the small magnets and therefore is economically not feasible based on current price levels. However, as simulated with the material flow model, in the nearby future increasing amounts of larger NdFeB magnets from obsolete synchronous electric motors contained in industrial machinery, general household appliances such as washing machines or heating pumps, magnets from smaller electric motors in conventional vehicles or from electric traction motors in hybrid and battery electric vehicles and large magnets from the generators of direct drive wind turbines (mainly in offshore turbines) are expected to enter waste management, for which a suitable collection system needs to be established in the coming years.

In a second step, the dynamic material flow models at the global level were supplemented by dynamic market behavior and feedback effects aiming at developing a tool for future scenario analysis taking into account both physical material flows and market dynamics. In contrast to simple market forecasts based on time series analysis, these models are capable to reproduce basic market behavior and to take into account market adjustment mechanisms both on the supply and the demand side. For copper as a classical industrial metal, a market tool was developed which is capable to roughly reproduce historic market developments and which particularly takes into account cyclical market behavior due to delayed adjustment of supply caused by long lead times for the construction and implementation of new mining capacities. On the basis of exogenous assumptions for global economic development, this model may be used as a forecasting tool for the copper market. Regarding the technology metals cobalt or neodymium and dysprosium respectively, the dynamic market models were used for analyzing the effect of the diffusion of alternative drives in the automotive market on the demand for these metals. Thereby, the demand development for cobalt as a cathode material for lithium-ion batteries as well as the demand for neodymium and dysprosium as magnet materials for electric traction motors were simulated. As shown with the models, the diffusion of alternative drives would particularly have a strong impact on the demand for dysprosium which is relevant for the heat resistance of NdFeB magnets and which is currently indispensable for the development of electro-mobility.

Subsequently, the dynamic market models are applied for a scenario based resilience test analyzing the adaptive capacity of the respective raw material markets in the case of supply disruptions which is related to the static raw material criticality assessments forming the starting point of this thesis.

Kurzfassung

Die rasante wirtschaftliche Entwicklung einiger Schwellenländer in Verbindung mit immer kürzeren technischen Innovationszyklen haben die Nachfrage nach mineralischen und metallischen Rohstoffen in den vergangenen Jahren getrieben. Insbesondere die Märkte verschiedener Technologiemetalle, die häufig nur als Neben- oder Kuppelprodukt gewonnen werden, deren Produktion eine hohe Konzentration auf Länder- und Unternehmensebene aufweist und deren Nachfrage durch ihre Verwendung in sich schnell verbreitenden Zukunftstechnologien stark angestiegen ist, waren seit Beginn des 21. Jahrhunderts vermehrt Spannungen ausgesetzt. Dies führte vor allem in den westlichen Industrieländern mit geringer heimischer Rohstoffproduktion, also nahezu vollständiger Importabhängigkeit, zu wachsender Besorgnis über die Sicherheit der Rohstoffversorgung.

Aufbauend auf einer Analyse aktueller Studien und wissenschaftlicher Literatur zur Bewertung von Versorgungsrisiken und Rohstoffkritikalität werden in der vorliegenden Arbeit systematisch Ansätze zur Ergänzung bestehender Bewertungsmethoden insbesondere bezüglich der dynamischen Betrachtung der Versorgungssysteme erarbeitet. Hierzu werden zunächst Methoden aus dem Bereich der Multivariaten Statistik als Ergänzung statischer Multiindikatoransätze zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken aufgeführt. Weiterhin werden erste indikatorbasierte Ansätze zur dynamischen Betrachtung der Kritikalitätsbewertung erarbeitet und am Beispiel von Deutschland und Japan als industriell hoch spezialisierte Volkswirtschaften erprobt.

Den Kern der vorliegenden Arbeit bilden rohstoffspezifische dynamische Materialflussmodelle auf globaler und regionaler Ebene, mit deren Hilfe für die ausgewählten Rohstoffe Kupfer, Kobalt sowie für die Seltenerd-Elemente Neodym und Dysprosium die Verwendungszyklen und Handelsströme simuliert werden sowie Recyclingpotenziale und weitere Möglichkeiten zur Steigerung der Ressourceneffizienz und zur Minderung von Rohstoffabhängigkeiten aufgezeigt werden.

Mit Hilfe der Stoffstrommodelle konnte gezeigt werden, dass Kupfer als klassisches Industriemetall bereits über ein vergleichsweise effizientes Kreislaufsystem mit Recyclingraten aus obsoleten Materialströmen von knapp 50 % auf globaler Ebene und über 60 % in Europa verfügt. Während Kobalt als Legierungselement in metallurgischen Anwendungen (z.B. in Hartmetallen wie Wolframcarbide für Bohr- und Schneidwerkzeuge oder Hochleistungslegierungen in Flugzeug- und Gasturbinen) innerhalb der etablierten Recyclingsysteme mit hohen Rückgewinnungsraten von über 70 % effizient im Kreis geführt wird, besteht vor allem durch die verstärkte Verwendung von Kobalt als Kathodenmaterial in Lithium-Ionen-Akkus für allgemeine Elektronikanwendungen seit der Jahrtausendwende und die bisher wenig effiziente Sammlung und Verwertung der Alttakus erhebliches Verbesserungspotenzial, was mit den hier vorgestellten Modellen quantifiziert

wurde und welches es in Europa in Zukunft besser auszuschöpfen gilt. Ähnliches gilt für die Wiederverwertung von NdFeB-Permanentmagneten (Neodym-Eisen-Bor), deren Verwendungsstrukturen hier auf globaler Ebene sowie für Deutschland untersucht wurden. Dabei wurde gezeigt, dass die Magnete im heutigen Schrottaufkommen hauptsächlich in Elektronikprodukten wie Festplatten, CD- und DVD-Playern enthalten sind, woraus eine Rückgewinnung aufgrund der starken Streuung und der geringen Magnetgröße wirtschaftlich kaum möglich erscheint und derzeit auch nicht praktiziert wird, während in Zukunft in obsoleten Produktströmen verstärkt mit größeren Magneten in elektrischen Synchron-Servomotoren aus dem Bereich allgemeiner Industriemotoren, Haushaltstechnik (Waschmaschinen, Heizungspumpen etc.), aus elektrischen Kleinmotoren in konventionellen Pkw, aus den Traktionsmotoren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen oder aus den Generatoren von Windkraftanlagen mit permanentmagnetischem Direktantrieb zu rechnen ist, für die in den kommenden Jahren ein geeignetes Sammelsystem etabliert werden sollte.

Basierend auf dem “System-Dynamics-Ansatz” wurden die Stoffstrommodelle auf globaler Ebene anschließend um einfache dynamische Marktanpassungsmechanismen erweitert, wobei Rückkopplungseffekte als Reaktionen auf vorübergehende Verknappung nach dem Prinzip des “Regelkreises der Rohstoffversorgung” sowohl auf Angebots- als auch auf Nachfrageseite berücksichtigt wurden. Derartige dynamischen Modelle eignen sich zur erweiterten Szenarioanalyse möglicher Entwicklungen an Rohstoffmärkten, die im Gegensatz zu den meisten bisherigen Analysen nicht die reine potenzielle Nachfrageentwicklung betrachten, sondern realitätsnahe Mechanismen der Angebotsanpassung, aber auch nachfrageseitige Substitutionseffekte in die dynamische Modellierung einbeziehen. So wurde für Kupfer als Vertreter eines weitläufig genutzten Industriemetalls mit eigener Produktionsinfrastruktur ein einfaches dynamisches Marktmodell entwickelt, welches die grundlegenden Mechanismen am Weltmarkt abbildet und auf Basis von Einschätzungen zur zukünftigen Entwicklung der Weltwirtschaft eine Vorausschau des Kupfermarktes ermöglicht. Hierbei wurde insbesondere auf die Problematik der verzögerten Angebotsanpassung aufgrund langer Vorlaufzeiten für die Planung und Umsetzung zusätzlicher Explorations- und Bergbauprojekte und das dadurch bedingte zyklische Marktverhalten eingegangen. Für die Technologiemetalle Kobalt sowie Neodym und Dysprosium wurde mit Hilfe der dynamischen Modelle die Auswirkung der Diffusion alternativer Antriebe in der Automobilindustrie auf die Nachfrage nach Kobalt als Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien bzw. die Nachfrage nach Neodym und Dysprosium als Magnetmaterialien für elektrische Traktionsmotoren analysiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass insbesondere für das geologisch gering vertretene Seltenerd-Element Dysprosium, welches für die Temperaturbeständigkeit der NdFeB-Magnete in den Traktionsmotoren von Elektrofahrzeugen unumgänglich ist, mit einem erheblichen Nachfrageimpuls im Falle einer verstärkten Diffusion der Elektromobilität zu rechnen ist.

Abschließend wird in dieser Arbeit erläutert, inwiefern derartige Rohstoffmodelle zu einem besseren Verständnis von Versorgungsrisiken und Kritikalitätsbewertungen beitragen können. Während die globalen Modelle in erster Linie als Werkzeug für erweiterte Szenarioanalysen verschiedener Marktentwicklungen geeignet sind, die eine Analyse der Widerstandsfähigkeit einzelner Rohstoffmärkte gegen Versorgungsstörungen beinhalten können, wird bezüglich der regionalen Stoffstrommodelle eine potenzielle Kopplung mit sektoralen ökonomischen Input-Output-Modellen diskutiert.

1. Einleitung

Eine sichere Versorgung mit Rohstoffen zu Preisen, die die Wettbewerbsfähigkeit des verarbeitenden Gewerbes erhalten, ist eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche industrielle Produktion und Vermarktung jeglicher Industriegüter und damit die Grundlage nachhaltiger wirtschaftlicher Entwicklung. Der steigende Wettbewerb um den globalen Rohstoffzugang, die wirtschaftspolitische Instrumentalisierung der Rohstoffkontrolle sowie politische Instabilitäten einiger Bergbauländer haben in Verbindung mit einem kontinuierlich ansteigenden Rohstoffbedarf vor allem in den westlichen Industrieländern zu einer wachsenden Besorgnis über die Versorgungssicherheit zahlreicher für verschiedene Technologien und Wirtschaftssektoren essenziellen metallischen und mineralischen Rohstoffen geführt.

Durch die geringen heimischen Lagerstätten sind viele westliche Industrieländer zudem nahezu vollständig von Importen der benötigten Metalle und zahlreicher Mineralien abhängig (Behrens et al., 2007). So verstärkt sich die Befürchtung, dass die Entwicklung, Nutzung und Vermarktung neuer Technologien durch Engpässe in der Rohstoffversorgung negativ beeinflusst bzw. verhindert werden (vergl. z.B. Andersson, 2001; Hoenderdaal et al., 2013; Ziemann et al., 2013; Roelich et al., 2014).

Aufgrund technischer Charakteristika ist die Substitution durch andere, weniger kritische Rohstoffe für viele Technologien nur sehr bedingt möglich (Ziemann und Schebek, 2010; Tercero Espinoza et al., 2013). Dabei lässt sich das Versorgungsrisiko mittelfristig nicht auf zur Neige gehende geologische Reserven zurückführen (Tilton und Lagos, 2007; Buchholz et al., 2010; Rosenau-Tornow et al., 2009). Die Rohstoffversorgung ist heute durch das Zusammenspiel zahlreicher technischer, ökonomischer, politischer sowie gesellschaftlicher Faktoren geprägt (Gandenberger, 2011). Die hohe Marktdynamik, getrieben durch das rasante Wirtschaftswachstum der Schwellenstaaten, allen voran Chinas (Humphreys, 2010a; Stürmer und Hagen, 2012), in Verbindung mit Nachfrageimpulsen, hervorgerufen durch die rasche Verbreitung neuer Technologien (Angerer, 2010), nicht zuletzt verstärkt durch klimapolitische Maßnahmen wie den Ausbau regenerativer Energiequellen (Exner et al., 2015), haben den Rohstoffbedarf seit Anfang dieses Jahrhunderts stark verändert.

Die Angebotsseite ist häufig charakterisiert durch eine hohe Konzentration der Produktion auf Länder- und Unternehmensebene (Sievers und Tercero, 2012). Bei zahlreichen mineralischen Rohstoffen sind der Bergbau und die Raffination auf wenige Länder begrenzt und werden oftmals von einer niedrigen Zahl an Unternehmen betrieben, die eine erhebliche Marktmacht in den oligopolistischen Märkten entwickeln. In diesem Zusammenhang bildet die durch Exportsteuern- und Exportrestriktionen einiger Schwellenländer hervorgerufene globale Wettbewerbsverzerrung eine ernstzunehmende Gefahr für verschiedene Industriezweige, die technologisch von bestimmten Materialien abhängig sind (vergl. z.B. Parthemore, 2011; Campbell, 2014;

1. Einleitung

Massari und Ruberti, 2013). Weiterhin leiden zahlreiche Bergbauländer der Dritten Welt unter politischen Instabilitäten. Mögliche Konflikte in diesen Ländern würden sich unmittelbar auf die Rohstoffversorgung auswirken, was ebenfalls eine latente Gefahr für verschiedene Industriezweige mit sich bringt (Le Billon, 2001). Nicht zuletzt sind in diesem Zusammenhang die hohen Investitionen von häufig staatlich geführten bzw. finanzierten Konzernen aus Schwellenländern in die Rohstoffförderung verschiedener Entwicklungsländer zu erwähnen, die durch diese aggressive Investitionspolitik ihre Kontrolle über die heimischen Rohstoffvorkommen hinaus sichern (Pflüger, 2010). So haben z.B. chinesische Investitionen in zahlreichen afrikanischen Staaten seit der Jahrtausendwende gravierend zugenommen.

Aus geologischer Sicht kommen die meisten Technologiemetalle vergesellschaftet mit den Erzen klassischer Industriemetalle vor (Verhoef et al., 2004; Faulstich, 2010, S.5). Daher verfügen diese Metalle meist nicht über eine eigenständige Produktionskette, sondern werden hauptsächlich als Nebenprodukte klassischer Industriemetalle oder in Verbindung mit weiteren geologisch vergesellschafteten Mineralien gewonnen (Peiró et al., 2013). Dies wird vor allem relevant, wenn durch die rasche Entwicklung und Verbreitung von neuen Technologien die Nachfrage nach bestimmten Technologiemetallen beschleunigt wird, das Angebot aber an die Produktionsmengen des Trägermetalls gebunden ist (Tercero, 2012; Nassar et al., 2015). In diesem Fall wird es kaum zu einer Angebotsanpassung an die stärkere Nachfrage kommen, was zu überproportional hohen Preisen führen kann (Fizaine, 2013; Peiró et al., 2013).

Neben politischen und wirtschaftlichen Faktoren gewinnen Nachhaltigkeitsaspekte, wie soziale und ökologische Gesichtspunkte des Rohstoffabbaus, zunehmend an Bedeutung. So geraten neben sozialen Aspekten, wie die Arbeitsbedingungen im Bergbau oder die Wohlstandsverteilung in Bergbauländern, die Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung und der Materialaufbereitung zunehmend in den Fokus öffentlicher Aufmerksamkeit (vergl. z.B. SRU, 2012, S.59 ff.). Sowohl verstärkte Umweltauflagen in Bergbauländern als auch Regulierungen und Zertifizierungen auf Verbrauchermärkten wirken sich auf die Rohstoffversorgung aus und müssen von den betroffenen Industrien in Zukunft verstärkt berücksichtigt werden (Norgate et al., 2007; Bleischwitz et al., 2012)¹.

Nicht zuletzt wird im Zuge eines näheren Zusammenrückens von Finanz- und Rohstoffmärkten die Volatilität² von Rohstoffpreisen durch Spekulationen in Form zahlreicher Finanzderivate getrieben (Tilton et al., 2011; Humphreys, 2010a). Insbesondere bei börsengehandelten Industrie- und Edelmetallen ist das Handelsvolumen weit höher als die letztendlich von Industrieunternehmen verarbeitete Rohstoffmenge³. Dies lässt darauf schließen, dass ein Großteil der Marktteilnehmer rein spekulativ handelt und an der physischen Verwendung der gehandelten Rohstoffe keinerlei Interesse hat. Ob derartige Spekulationen das absolute Preisniveau treiben ist umstritten (Irwin et al., 2009); dass die kurzfristige Volatilität der Märkte allerdings durch eine steigende Zahl an Spekulanten erhöht wird, erscheint naheliegend (Edwards, 1988).

¹So verabschiedete der Kongress der Vereinigten Staaten 2010 den sogenannten "Dodd Frank Act", ein Bundesgesetz zur Regulierung von Finanzmärkten, welches u.a. den Handel mit "Konfliktmineralien" verbietet und das in den U.S.A. agierende Unternehmen zur Offenlegung ihrer Lieferketten verpflichtet (IHK, 2013; Krainer, 2012).

²Volatilität beschreibt die allgemeine Schwankungsbreite von Zeitreihen.

³So werden derzeit ca. 20 Mio. t Raffinadekupfer mit einem Marktwert von knapp über 100 Mrd. US\$ gehandelt. Das Handelsvolumen von Kupfer-Kontrakten (Future Contracts), Zertifikaten und anderen Finanzderivaten auf Basis des Kupferpreises wird auf über 50 Bio. US\$, also des ca. 50-fachen Wertes des tatsächlich physisch gehandelten Kupfers geschätzt (Tilton et al., 2011).

Die zuvor erläuterten Einflüsse auf heutige Rohstoffmärkte sind in Abbildung 1.1 zusammengefasst.

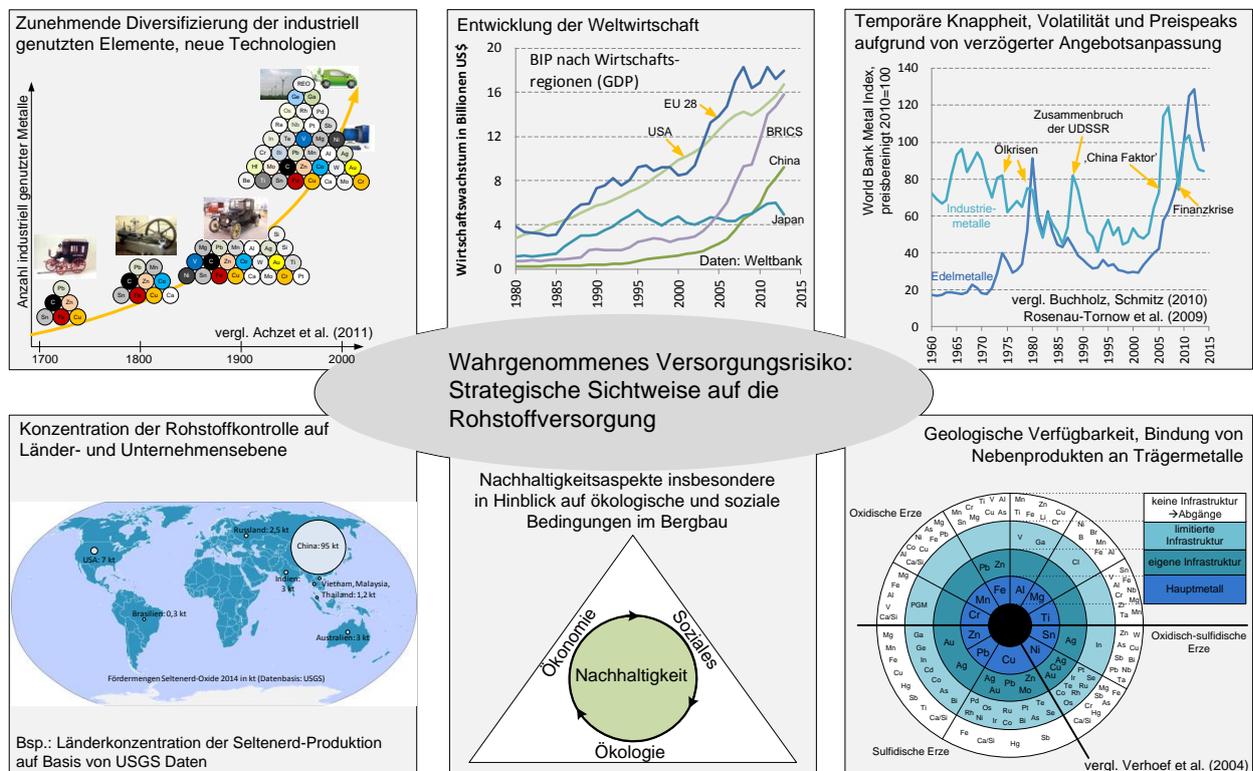


Abbildung 1.1. – Aktuelle Einflüsse auf die Versorgungssicherheit und das wahrgenommene Versorgungsrisiko von metallischen und mineralischen Rohstoffen (eigene Darstellung, vergl. einzelne Elemente: Melcher und Wilken, 2013; Achzet et al., 2011; Rosenau-Tornow et al., 2009; Verhoef et al., 2004; Gandenberger et al., 2012).

Für die Bewertung möglicher Maßnahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz und zur Schaffung alternativer Bezugsquellen, insbesondere in Hinblick auf die effizientere Nutzung von Recyclingpotenzialen oder Möglichkeiten der Materialsubstitution, fehlen häufig ganzheitliche Betrachtungen, die den gesamten "Lebenszyklus" eines Metalls abbilden (Weiser et al., 2015; Buchner et al., 2014). Dabei ist die gezielte Kreislaufführung insbesondere bei Metallen sinnvoll, da diese zwar meist im Verbund mit anderen Materialien oder als Legierungen verarbeitet werden, im Vergleich zu organischen Materialien aber über ihren gesamten Lebenszyklus in elementarer Form erhalten bleiben. Dies macht das Recycling auch aus Sicht der Energiebilanz sinnvoll, da der energieintensive Schritt der Reduktion von mineralischen Verbindungen zu elementarem Metall eingespart werden kann (vergl. z.B.: Ayres, 1997; Norgate et al., 2007; Johnson et al., 2008; Nuss et al., 2014).

Weiterhin fehlt es häufig an Modellen, die den gesamten Markt eines Metalls und nicht nur bestimmte Verwendungsbereiche wie einzelne Zukunftstechnologien betrachten. Zur Bewertung möglicher zukünftiger Versorgungsengpässe bzw. Knappheiten sind den gesamten Markt abbildende Modelle gefragt, die unter Berücksichtigung des begrenzten Angebots die Auswirkung von Nachfrageimpulsen darstellen können, hervorgerufen durch die rasche Verbreitung bestimmter Technologien oder durch unerwartet starke

1. Einleitung

wirtschaftliche Entwicklung (Angerer, 2010).

Die systematische Analyse und Bewertung von Versorgungsrisiken, Vulnerabilitäten und möglichen Konsequenzen von Versorgungsengpässen sowie die Erhöhung der Transparenz hinsichtlich der Verwendungsstrukturen und Recyclingpotenziale einzelner Metalle bilden folglich aktuelle Herausforderungen für die angewandte Wissenschaft. Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten.

1.1. Problemstellung und Zielsetzung

Im Zuge der aktuellen Debatte um die Sicherheit der Rohstoffversorgung wurden in den vergangenen Jahren zahlreiche Studien zur Bewertung von Versorgungsrisiken, Vulnerabilitäten, Kritikalität der Rohstoffversorgung sowie Abschätzungen zu zukünftigen Bedarfsmengen durchgeführt. Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt nicht darin, ein weiteres Screening potenziell kritischer Rohstoffe durchzuführen. Vielmehr werden in dieser Arbeit, aufbauend auf vorhandenen Studien zur Bewertung von Versorgungsrisiken und Kritikalität, Ergänzungen und Verbesserungsmöglichkeiten insbesondere in Hinblick auf eine Dynamisierung der bisher vorwiegend statischen Ansätze aufgezeigt und erläutert. Hierzu werden als Kern der Arbeit für ausgewählte Rohstoffe unterschiedlicher Marktcharakteristika⁴ dynamische Stoffstrom- und Marktmodelle entwickelt.

Das Ziel der entwickelten Stoffstrommodelle ist zunächst die Simulation der Rohstoffkreisläufe auf globaler und regionaler Ebene um die Verwendungszyklen, Handelsströme sowie den Stand des Recyclings darzustellen und mit Hilfe der simulierten Materialströme gezielte Aussagen über Verbesserungspotenziale in der Rückgewinnung von Sekundärmaterialien tätigen zu können sowie basierend auf historischen Verwendungsmengen in den jeweiligen technischen Anwendungsfeldern zukünftiges Schrottaufkommen zu quantifizieren, was als Grundlage für die frühzeitige Erarbeitung von Maßnahmen zur effizienten Rohstoffrückgewinnung bzw. für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen neuer Recyclingverfahren dienen kann.

In einem zweiten Schritt werden die globalen Stoffkreisläufe um Marktdynamiken ergänzt, mit dem Ziel ein Werkzeug zu schaffen, das in der Lage ist Anpassungsmechanismen und Rückkopplungseffekte auf Angebots- und Nachfrageseite darzustellen. Dabei sollen sowohl die Entwicklung der Weltwirtschaft als Nachfragetreiber für allgemeine Industrierohstoffe, hier durch das Beispiel des Kupfermarktes abgedeckt, als auch technologische Nachfrageimpulse, hier in Form der Diffusion der Elektromobilität und deren Auswirkung auf die Nachfrage nach Kobalt als Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien bzw. Neodym und Dysprosium als Magnetrohstoffe für elektrische Traktionsmotoren, berücksichtigt werden.

Insgesamt soll in dieser Arbeit anhand der betrachteten Beispielmodelle gezeigt werden, inwiefern die Kombination von physischen Materialflussmodellen und dynamischen Marktmodellen bisherige Betrachtungen zu Rohstoffmärkten und Rohstoffverfügbarkeiten ergänzen kann, insbesondere hinsichtlich der Analyse zukünftiger Bedarfsmengen und der Identifikation potenzieller Engpässe. Die erarbeiteten Modellierungsansätze sollen folglich als Grundlage für die dynamische Analyse weiterer Rohstoffsysteme unabhängig von den hier aufgezeigten Beispielrohstoffen dienen können.

⁴Kupfer, als Repräsentant eines klassischen Industriemetalls, Kobalt als Legierungs- und Technologiemetall, sowie die Seltenerd-Elemente Neodym und Dysprosium als Magnetrohstoffe.

1.2. Aufbau und Struktur

Zur Vermittlung eines raschen Überblickes zu den strukturellen Zusammenhängen zwischen den einzelnen Kapiteln zeigt Abbildung 1.2 den Aufbau der vorliegenden Arbeit. Dieser wird im Folgenden kurz erläutert.

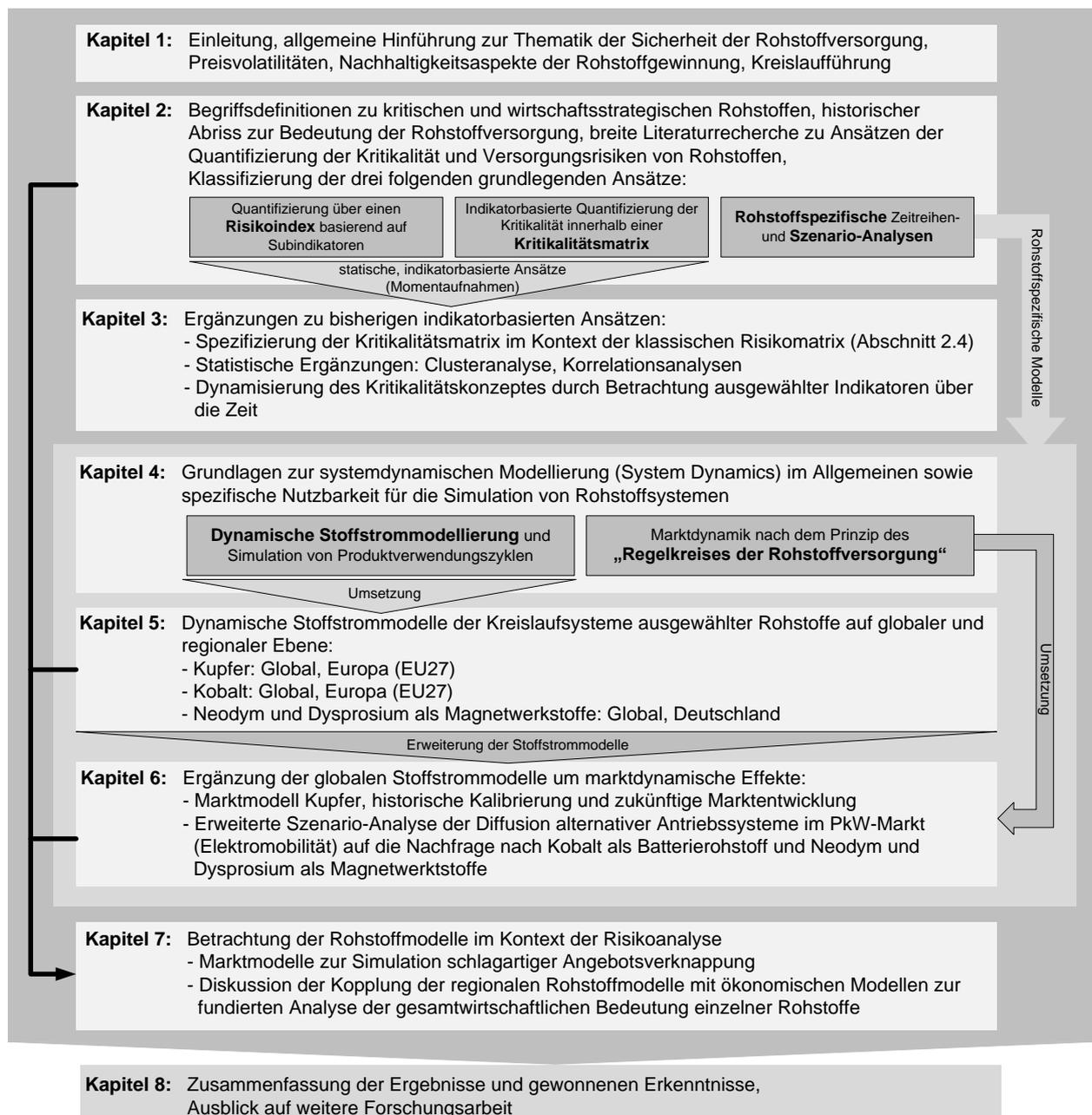


Abbildung 1.2. – Aufbau und Struktur der vorliegenden Arbeit. Die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kapiteln sind mit verschiedenen Pfeilen dargestellt.

Im nachfolgenden zweiten Kapitel erfolgt neben grundlegenden Begriffsdefinitionen eine systematische Li-

1. Einleitung

teraturrecherche mit dem Ziel, die Methoden und Vorgehensweisen in bisherigen Studien zur Bewertung von Versorgungsrisiken und Rohstoffkritikalität darzustellen. Dabei werden bereits erste methodische Verbesserungsvorschläge diskutiert, insbesondere hinsichtlich der Verwendung der Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der Risikobewertung in einer Risikomatrix.

Aufbauend auf dieser allgemeinen Einführung werden in Kapitel 3 erste Ergänzungen bisheriger Multiindikator-Ansätze durch statistische Verfahren analysiert. Dabei wird insbesondere auf dimensionsreduzierende Verfahren der Multivariaten Statistik eingegangen. Weiterhin werden einfache indikatorbasierte Ansätze zur Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes auf Basis historischer Zeitreihen aufgezeigt und an den Beispielen von Deutschland und Japan erprobt.

In Kapitel 4 folgen die methodischen Grundlagen zur dynamischen Modellierung, sowohl hinsichtlich der Modellierung dynamischer Rohstoffkreisläufe und der Simulation von Produkt-Lebenszyklen, als auch bezüglich der Entwicklung von dynamischen Marktmodellen. Hier werden auch stochastische Sensitivitätsanalysen und ökonometrische Ergänzungen zu den systemdynamischen Modellen diskutiert.

Die Ergebnisse der dynamischen auf historischen Daten basierenden (retrospektiv) Stoffstrommodelle für Kupfer, Kobalt sowie für die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium werden ausführlich in Kapitel 5 erläutert. Dabei wurden für die jeweiligen Rohstoffe sowohl globale Modelle zur Darstellung der weltweiten Verwendungsstrukturen, als auch regionale Modelle entwickelt. Das Kupfermodell und das Kobaltmodell wurden dabei auf globaler und europäischer Ebene (EU27) umgesetzt, das Stoffstrommodell für Neodym und Dysprosium auf globaler Ebene sowie für Deutschland.

In Kapitel 6 folgt die Ergänzung der physischen Stoffstrommodelle um Marktdynamiken sowie die Modellierung zukünftiger Szenarien (prospektiv). Für Kupfer wurde hierfür ein dynamisches Modell entwickelt, das basierend auf exogenem globalem Wirtschaftswachstum (globales BIP) den Kupfermarkt unter Berücksichtigung von Angebots- und Nachfrageentwicklung abbildet. Für die betrachteten Technologiemetalle (Kobalt, Neodym und Dysprosium) wird die Auswirkung der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Nachfrage nach Kobalt als Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien bzw. auf Neodym und Dysprosium als Magnetmaterialien für Traktionsmotoren untersucht. Hierfür wurden die Stoffstrommodelle mit einem bereits vorhandenen Flottenmodell zur Prognose des globalen Fahrzeugmarktes gekoppelt und um verschiedene Rückkopplungseffekte als Reaktion auf potenzielle Rohstoffengpässe erweitert.

Eine abschließende Betrachtung hinsichtlich des Beitrags der in dieser Arbeit entwickelten Modelle für die Risikobewertung auf der einen Seite, aber auch für die Identifizierung von Maßnahmen zur Reduktion von Versorgungsrisiken auf der anderen Seite, wird in Kapitel 7 gegeben. Dabei wird auch die mögliche Anbindung der regionalen Stoffstrommodelle an sektorale ökonomische Modelle wie z.B. Input-Output Modelle diskutiert.

Kapitel 8 bildet das Fazit sowie den Ausblick auf weitere Forschungsarbeit im Bereich der Kritikalitätsbewertung und der Stoffstrom- und Marktmodellierung.

2. Kritische Rohstoffe

Das folgende Kapitel behandelt grundlegende Aspekte der quantitativen Analyse von Versorgungsrisiken und Kritikalität metallischer und mineralischer Rohstoffe. Neben allgemeinen Definitionen wird die historische Bedeutung der Rohstoffversorgung in Politik und Wissenschaft skizziert. Zur Vermittlung eines Überblicks über den Stand der Forschung wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Zentrale Studien, auf die diese Arbeit aufbaut, werden im folgenden Kapitel zusammengefasst und insbesondere bezüglich der jeweils angewendeten Methoden und der erzielten Ergebnisse untersucht¹.

2.1. Begriffsabgrenzung

In der aktuellen Diskussion um die Sicherheit der Rohstoffversorgung, insbesondere in Hinblick auf die zuvor erwähnten Technologiemetalle², werden die Begriffe “kritisch”, “strategisch”, oder auch “wirtschaftsstrategisch” häufig recht undifferenziert verwendet und als Synonyme betrachtet. Trotz der in der Literatur regelmäßig zu findenden Überschneidungen werden diese Begriffe im Folgenden klarer abgegrenzt.

Aus historischer Sicht ließ sich die Versorgungssicherheit metallischer Rohstoffe im 20. Jahrhundert in erster Linie auf Konflikte wie die beiden Weltkriege oder den Kalten Krieg zurückführen und wurde häufig von der reinen Importabhängigkeit strategisch wichtiger Ressourcen bestimmt (David G Haglund, 1984; Gandenberger et al., 2012). So taucht der Begriff des kritischen Rohstoffs erstmals in einem amerikanischen Gesetzesentwurf zur Einlagerung von Sicherheitsbeständen verteidigungsrelevanter Rohstoffe aus dem Jahre 1939 auf (“Strategic and Critical Materials Stock Piling Act”, vergl. Legislative Council, 1939). Ähnliche Dokumente zur strategischen Rohstoffsicherung in Zusammenhang mit den beiden Weltkriegen gehen aus deutschen Archiven hervor (Burchardt, 1971). Während in der Vergangenheit keine klare Abgrenzung kritischer und strategischer Rohstoffe zu finden ist (Haglund, 1984; Anderson und Anderson, 1998), werden die Begriffe “strategisch” und “kritisch” in der aktuellen Debatte stärker differenziert, wobei Rohstoffe für militärische bzw. verteidigungsrelevante Technologien als “strategisch” klassifiziert werden (insbesondere im angloamerikanischen Sprachgebrauch, vergl. z.B. NRC, 2008; Evans, 2009, S.10 f.), während “kritische” Rohstoffe die gesamte industrielle Wertschöpfung betreffen und in der Diskussion um die Vulnerabilität

¹Ergebnisse aus diesem Kapitel wurden im Zuge der Dissertation als “Peer-Review” Journalbeitrag (Glöser et al., 2015) sowie als Konferenzbeitrag (Glöser und Faulstich, 2014) veröffentlicht.

²Der recht breit ausgelegte Begriff des Technologiemetalls steht im Gegensatz zum klassischen Industriemetall, das im Vergleich zum Technologiemetall über eine eigene Produktionsinfrastruktur verfügt und in großen Mengen zur Verfügung steht, während die meist hochpreisigen Technologiemetalle im Allgemeinen nur als Neben- bzw. Kuppelprodukte gewonnen werden und für spezielle technische Anwendungen unumgänglich sind. Daher hängt die Nachfrage nach Technologiemetallen stärker von der Entwicklung spezieller Technologien als von der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung ab (vergl. z.B. Angerer, 2010).

2. Kritische Rohstoffe

der Binnenwirtschaft eines Landes oder einer Region bezüglich der Versorgung mit bestimmten Rohstoffen verwendet werden. So werden Rohstoffe, die eine hohe wirtschaftliche Bedeutung haben, deren Versorgung aber gleichzeitig risikobehaftet ist, als kritische Rohstoffe bezeichnet (European Commission, 2010b, S.32):

“To qualify as critical, a raw material must face high risks with regard to access to it, i. e. high supply risks or high environmental risks, and be of high economic importance. In such a case, the likelihood that impediments to access occur is relatively high and impacts for the whole EU economy would be relatively significant.”

Da bezüglich kritischer Rohstoffe häufig von einer fixen, statischen Liste ausgegangen wird (z.B. die aktuell 20 kritischen Rohstoffe, bzw. Rohstoffgruppen der Europäischen Union, vergl. European Commission, 2014), wurde im deutschsprachigen Raum neuerdings der übergeordnete, flexibler auslegbare Begriff der “wirtschaftsstrategischen Rohstoffe” eingeführt (Wellmer, 2012; Kausch, 2014). Diese Bezeichnung hat den Vorteil einer breiteren Auslegung, die sowohl klassische Industriemetalle (Metalle wie Eisen, Kupfer, Aluminium, Zink, Nickel, Blei, die wegen ihrer Verbrauchsmengen eine eigene Industrie begründet haben) als auch Legierungs- und Technologiemetalle mit einschließen kann. Bei der quantitativen Betrachtung von Versorgungsrisiken in Zusammenhang mit wirtschaftlichen Abhängigkeiten und Vulnerabilitäten, was den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt, wird allerdings hauptsächlich von kritischen Rohstoffen gesprochen (vergl. Studien und Definitionen der Literaturrecherche in Abschnitt 2.3).

2.2. Historische Debatte um begrenzte Rohstoffverfügbarkeit und Versorgungsrisiken

In diesem Abschnitt wird ein kurzer historischer Abriss der Versorgungsproblematik mit metallischen und mineralischen Rohstoffen gegeben. Hierdurch soll verdeutlicht werden, dass trotz der derzeit verstärkt geführten Diskussion um die Versorgungssicherheit verschiedener Rohstoffe, dieses Thema keineswegs neuartig ist und die gesamte Menschheitsgeschichte bis hin zu frühesten Formen der Zivilisation durchläuft.

2.2.1. Entwicklung der anthropogenen Nutzung metallischer und mineralischer Rohstoffe

Bereits in frühesten menschlichen Zivilisationsformen spielte die Versorgung mit metallischen und mineralischen Werkstoffen eine entscheidende Rolle (Buijs et al., 2012). So sind ganze Epochen der frühen Menschheitsgeschichte nach den Metallen und Legierungen benannt, die die anthropogene Nutzung dominierten (Kupferzeit, Bronzezeit, Eisenzeit, vergl. z.B. Troitzsch, 1987; Stier und Aner, 1985). Erste Zeugnisse systematischen menschlichen Bergbaus stammen aus der Jungsteinzeit (Neolithikum), wobei die Rohstoffgewinnung sogenannten Feuersteinen galt, einer Gesteinsart, die härter ist als Stahl und scharfe Kanten bilden kann (Troitzsch, 1987, S.12). Diese Steine wurden zur Herstellung frühzeitlicher Werkzeuge (Messer, Speere, Äxte) verwendet (vergl. z.B. Edmonds, 1995). Eine umfangreich erforschte und bis heute begehbare

2.2. Historische Debatte um begrenzte Rohstoffverfügbarkeit und Versorgungsrisiken

Abbaustätte aus der Jungsteinzeit befindet sich im englischen “Grime’s Graves”, in der bereits vor über 5000 Jahren systematisch Feuersteine gewonnen wurden. Hierzu wurden bis zu 10 Meter tiefe Mulden gegraben, aus denen über Holzleitern die benötigten Steine gefördert wurden (vergl. Abbildung 2.1).

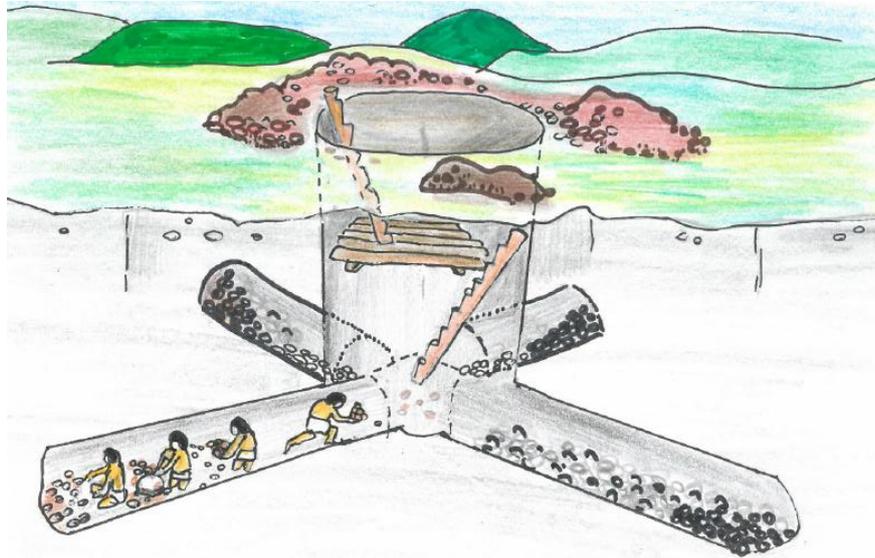


Abbildung 2.1. – Darstellung des jungsteinzeitlichen Abbaus von Feuersteinen im englischen “Grime’s Graves” (eigene Skizze angelehnt an: Troitzsch, 1987, S.12).

Durch die geologisch unterschiedlichen Vorkommen und Konzentrationen bestimmter Erze und Minerale entstanden in Europa bereits in prähistorischer Zeit Rohstoffabhängigkeiten und Handel. Die wichtigsten Handels- und Kulturströme sowie wichtige Abbaustätten von Kupfer, Gold und Silber im frühgeschichtlichen Europa sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Wie in Abbildung 2.2 zu erkennen, bestanden in Mitteleuropa bereits vor 4000 Jahren Rohstoffabhängigkeiten, die zwar in ihrer Diversität und Menge mit heutigen Rohstoffbedarfen nicht vergleichbar sind, deren Grundprinzip allerdings der heutigen Versorgungssituation sehr ähnlich ist.

Ein Zeugnis des Ausmaßes bronzzeitlichen Metallhandels ist das 1982 vor der türkischen Küste entdeckte, vor ca. 3300 Jahren gesunkene Schiffswrack “Uluburun”, das zehn Tonnen Kupfer und eine Tonne Zinkbarren aus Zypern geladen hatte (dies entspricht dem Verhältnis der Bronzeherstellung, vergl. Gale und Stos-Gale, 2005).

Auch frühgeschichtliche Konflikte um den Rohstoffzugang sind bekannt: So besetzte Pharao Djoser (2630-2611 v. Chr.) mit seinem Heer die Halbinsel Sinai, um die dortigen Kupfervorkommen zu sichern (Ward, 1991)³.

In der Antike trieben vor allem die Griechen und Römer den Bergbau in Europa und Kleinasien voran. So begannen die Griechen bereits im 5. Jahrhundert v. Chr. Metallvorkommen zu erschließen, die nicht mehr im Tagebau, sondern in Bergwerken unter Tage gewonnen wurden (Schneider, 2012). Im Gebiet um Lau-

³Dies geht aus einem Felsrelief hervor, welches im Tal “Wadi Maghara” auf der Sinai-Halbinsel entdeckt wurde (Gardiner und Peet, 1917, S.53 f.).

2. Kritische Rohstoffe

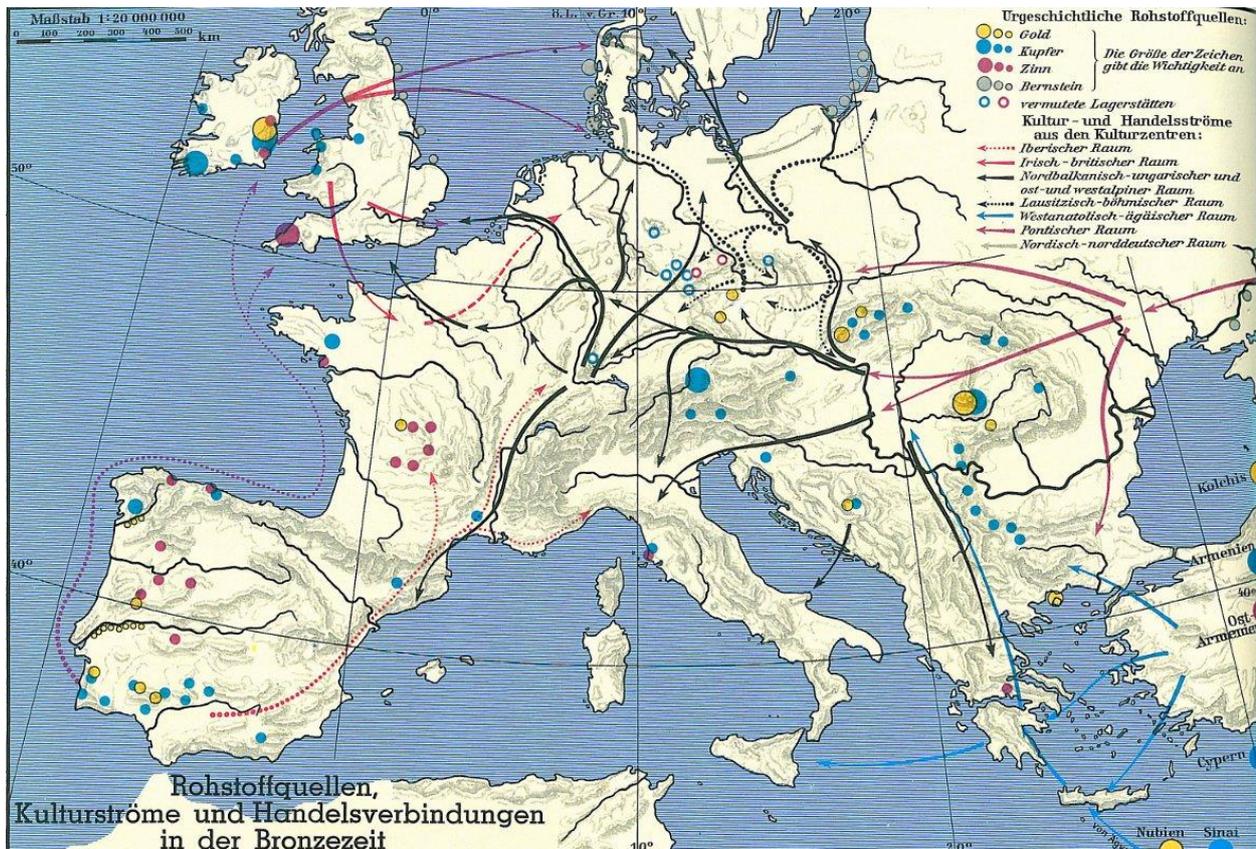


Abbildung 2.2. – Europäische Kultur- und Handelsströme in der Bronzezeit (bis ca. 1200 v. Chr.). Durch die unterschiedlichen Rohstoffvorkommen entstanden früh Rohstoffabhängigkeiten und Handelsbeziehungen (abgebildet mit Genehmigung des Westermann Verlages, entnommen aus: Stier und Aner, 1985; Troitzsch, 1987, S.13).

reion bei Athen wurden bis zu 55 m tiefe Schächte gegraben, von denen Stollen von bis zu 100 m Länge ausgingen (Rosumek, 1982). Die wichtigsten Metalle in der Antike waren Gold und Silber zur Herstellung von Schmuck und zur Münzprägung sowie Kupfer (bzw. Bronze als Legierung aus Zink, Kupfer und Blei) und Eisen zur Herstellung von Waffen, Rüstungen und zahlreichen sonstigen Werkzeugen und Gebrauchsgegenständen (Piersig, 2010).

Die wichtigsten Abbaugelände von Edelmetallen im Römischen Reich lagen in den spanischen Provinzen (Rosumek, 1982). Auf der Iberischen Halbinsel wurden seit dem 2. Jahrhundert v. Chr. systematisch die Fördermengen erhöht. So konnten von den Römern bereits Bergwerke unterhalb des Grundwasserspiegels betrieben werden. Das in die Schächte einlaufende Wasser wurde über Wasserhebeegeräte wie die Archimedische Schraube oder Schöpfräder an die Oberfläche gepumpt (Schneider, 2012). Ein erheblicher Teil der Edelmetallvorkommen Spaniens wurde auf diese Weise bereits in der Antike abgebaut. Im Bergbaugelände Rio Tinto in Südspanien förderten die Römer etwa 2 Millionen Tonnen Erz und hinterließen ca. 16 Mio. Tonnen an Schlacken, die bei der Metallaufbereitung in Rennöfen⁴ anfielen (Schneider, 2012).

⁴Der Rennofen war die erste Form der pyrometallurgischen Verhüttung, vergl. Prinzip des antiken Rennofens in Abbildung 2.3 unten links.

2.2. Historische Debatte um begrenzte Rohstoffverfügbarkeit und Versorgungsrisiken

Während das Mittelalter wie in den meisten Bereichen auch im Bergbau und der Metallaufbereitung technisch keine großen Entwicklungen brachte (vergl. auch Abbildung 2.3), war vor allem die Kolonialzeit, eingeleitet durch die spanische und portugiesische Expansion im 15. Jahrhundert, geprägt von einem Wettlauf nach Rohstoffen, insbesondere nach den Edelmetallen Gold und Silber (Renz, 2014).

Aber in erster Linie die gegen Mitte des 18. Jahrhunderts in Großbritannien einsetzende Industrialisierung durch die Erfindung der Dampfmaschine und die systematische Nutzung fossiler Energieträger ebnete den Weg hin zur Massenproduktion und ermöglichte die Verarbeitung von Rohstoffen in einem Ausmaß, das vorindustrielle Bedarfsmengen um ein Vielfaches übertraf (Renz, 2014).

So hat sich seit Beginn der Industrialisierung, forciert durch kontinuierliche technische Entwicklungen, sowohl die Absolutmenge an Metallverbräuchen als auch die Diversität der in industriellen Prozessen verwendeten metallischen Elemente enorm vergrößert. Diese exponentiellen Anstiege sind am Beispiel der Entwicklung der Roheisen- und Stahlverarbeitung in Abbildung 2.3 dargestellt.

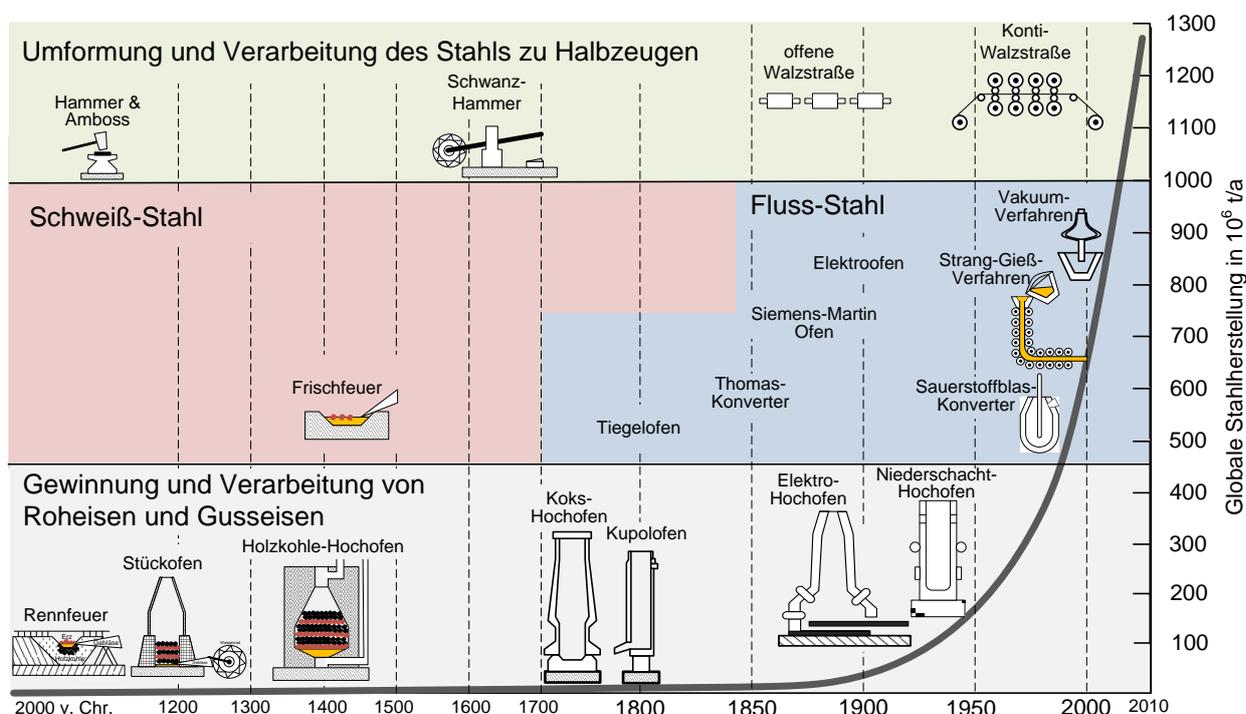


Abbildung 2.3. – Historische Entwicklung der Roheisen- und Stahlverarbeitung (eigene Darstellung basierend auf Degner, 2011).

Auch fällt der Beginn erster Ansätze der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit der Begrenztheit globaler Ressourcen und Rohstoffknappheit in die Zeit der industriellen Revolution (Christensen, 1989). Malthus (1798) stellte in seinem “Essay on the principle of population” das Problem der Überbevölkerung bei begrenzter Ressourcenverfügbarkeit dar. Ricardo (1821) stellte früh fest, dass Rohstoffknappheit mit Extraktionskosten in Verbindung steht. Diese Erkenntnis basierte darauf, dass die meisten Ressourcen in unterschiedlicher Qualität vorliegen, und dass Ressourcen niedriger Qualität einen höheren Aufwand zur Rohstoffgewinnung erfordern, was zu höheren Kosten führt. Somit hängt Verfügbarkeit von Rohstoffen

2. Kritische Rohstoffe

auch vom Preisniveau, also von der Frage ab, ob auch Ressourcen niedriger Qualität wirtschaftlich abgebaut werden können. Dieses Prinzip spielt in heutigen Marktmodellen eine entscheidende Rolle und beschreibt die in der Wirtschaftsgeologie getroffene Unterscheidung zwischen Ressourcen (gesamte Vorkommen) und Reserven (Lagerstätten, die auf Basis des aktuellen Preisniveaus wirtschaftlich abgebaut werden können, vergl. Abbildung 2.20).

Abbildung 2.4a zeigt qualitativ die Zunahme der für die Industrie relevanten Metalle. So werden heute ca. 90 verschiedene Elemente industriell genutzt (Faulstich, 2012), wovon ca. 60 zur Gruppe der Metalle gehören (Müller et al., 2014; Reuter et al., 2013b). Dies sind 80 % der im Periodensystem aufgeführten Elemente, wobei zu beachten ist, dass ein Großteil der heute nicht industriell verwendeten Elemente radioaktiv und instabil ist. Ein gutes Beispiel für die enorme technische Innovationsdynamik ist die Chipindustrie. So wurden zur Herstellung eines Computerchips in den 1980er Jahren lediglich 12 chemische Elemente benötigt, in den 1990er Jahren bereits 16 und inzwischen werden in den verschiedenen Chiptechnologien über 50 verschiedene Elemente verbaut (vergl. Abbildung 2.4b basierend auf NRC, 2008, S.58).

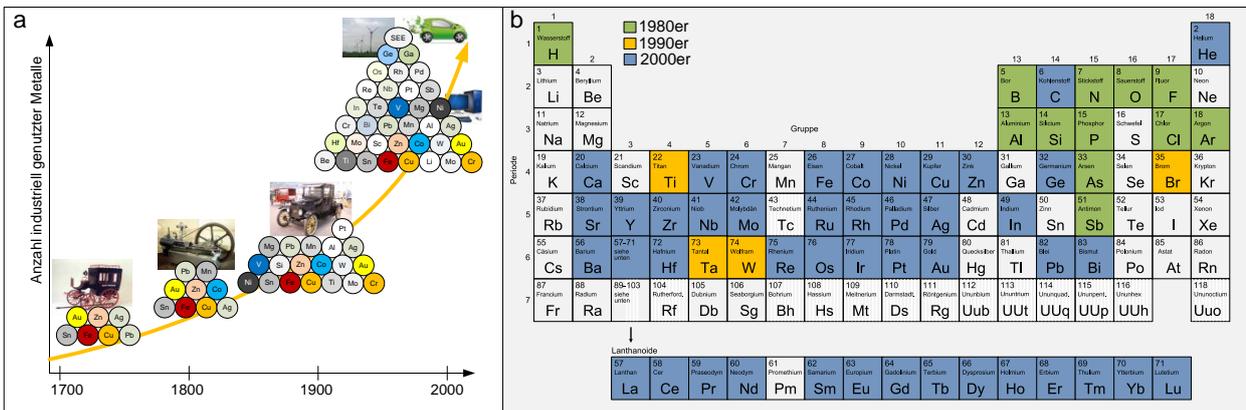


Abbildung 2.4. – a: Qualitative Darstellung der exponentiellen Zunahme der industriell verarbeiteten Metalle (eigene Darstellung basierend auf Achzet et al., 2011; Reuter et al., 2013b).
b: Entwicklung der Anzahl der für die Chipherstellung verwendeten Elemente (vergl. NRC, 2008, S.58 basierend auf Intel Corporation).

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, sind die in Abbildung 2.3 und 2.4 gezeigten Aspekte charakteristisch für die Entwicklung des Rohstoffbedarfs: Auf der einen Seite steigt die absolute Menge an Materialverbräuchen getrieben durch die Weltwirtschaft kontinuierlich, allen voran China und andere Schwellenländer, die noch einen erheblichen Bedarf am Aufbau ihrer Infrastrukturen haben, auf der anderen Seite wird durch immer kürzere Innovationszyklen und breiten technischen Fortschritt, getrieben durch den internationalen Wettbewerb, die Diversität der industriell genutzten Materialien und damit auch die Vielzahl der industriell verarbeiteten chemischen Elemente immer größer (Angerer et al., 2009; Rosenau-Tornow et al., 2009; Eller et al., 2010; Angerer, 2010).

2.2.2. Debatte um die Sicherheit der Rohstoffversorgung im 20. Jahrhundert

Für das 20. Jahrhundert wird im Folgenden aufgrund der Parallelen zur derzeitigen Situation eine detailliertere Betrachtung der politischen Debatte um die Rohstoffverfügbarkeiten und Versorgungsrisiken durchgeführt. Wie bereits erwähnt, waren die beiden Weltkriege Ausgangspunkt für die systematische Analyse und Bewertung von Versorgungsrisiken. Die Bezeichnung “kritischer Rohstoff” bzw. “critical raw material” tauchte erstmals im amerikanischen Sprachgebrauch nach dem Ersten Weltkrieg auf (NRC, 2008). Im Vorlauf des zweiten Weltkriegs legte der amerikanische Congress im “Strategic and Critical Materials Stock Piling Act” aus dem Jahre 1939 eine vorgeschriebene Lagermenge von verteidigungsrelevanten Metallen fest (vergl. Legislative Council, 1939).

Ähnliche strategische Überlegungen zur Rohstoffsicherung wurden auf deutscher Seite getätigt. Nach Ausbruch des Ersten Weltkrieges war die Rohstoffversorgung des Deutschen Reiches insbesondere durch britische Seeblockaden stark eingeschränkt. So wurde bereits im September 1914 die Kriegs-Rohstoff-Abteilung (KRA) im preußischen Kriegsministerium unter Leitung von Walter Rathenau⁵ gegründet, der als Aufsichtsratsvorsitzender der AEG⁶ bereits früh auf die mangelhafte Versorgungssicherheit mit strategisch wichtigen Rohstoffen aufmerksam gemacht hatte (Burchardt, 1971). Während die wirtschaftliche Isolation im Ersten Weltkrieg der deutschen Kriegswirtschaft noch große Probleme bereitete (Burchardt, 1971), wurde im nationalsozialistischen Deutschland der späten 1930er Jahre systematisch auf eine möglichst autarke industrielle Wertschöpfung mit einer vor allem von britisch und französisch kontrollierten Gebieten unabhängigen Rohstoffversorgung hingearbeitet (Eichholtz et al., 2003).

Auch nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs war die Debatte um die Sicherheit der Rohstoffversorgung weiterhin von politischen Konflikten geprägt. So ernannte US-Präsident Truman Anfang der 1950er Jahre aufgrund der unsicheren Rohstoffversorgung die “President’s Materials Policy Commission”, eine mit der Ausarbeitung von Maßnahmen zur Sicherung der Rohstoffversorgung (nicht nur für die U.S.A., sondern für den gesamten Westen) beauftragte Expertenkommission.

Aufgrund der relativ hohen Rohstoffpreise (Humphreys, 2010a), der beiden Ölkrisen 1973 und 1979 (Kecicki, 2010), der Kobaltkrise 1978 (Alonso et al., 2007)⁷ und nicht zuletzt wegen des Kalten Krieges (Humphreys, 2010b) war das Bewusstsein um die Vulnerabilität der Rohstoffversorgung in den 1970er und 1980er Jahren relativ hoch. Dies geht aus zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen aus dieser Zeit hervor (Haglund, 1984, 1986; Leamy, 1985; Robinson, 1986; Jacobson et al., 1988) und wird von Studien im Auftrag staatlicher Institutionen untermauert. Zentrale Studien aus dieser Zeit sind z.B. die Berichte des “U.S. Council on International Economic Policy” (U.S. Council on International Economic Policy, 1974), der Europäischen Kommission (Commission of the European Communities, 1975) oder des “U.S. Congressional Bud-

⁵Walther Rathenau war ein deutscher Industrieller, Schriftsteller und liberaler Politiker, der als Außenminister der Weimarer Republik 1921 einem Attentat zum Opfer fiel.

⁶AEG: Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft.

⁷Nach Ausbruch eines Bürgerkrieges in Zaire (heute Dem. Republik Kongo) Ende 1977 wurden Teile der für die Kobaltproduktion wichtigsten Provinz “Shaba” (vergl. Karte in Abbildung 5.16) von Rebellen eingenommen, was den Bergbau vorübergehend zum Stillstand brachte, insbesondere wegen der Ermordung und Flucht zahlreicher ausländischer Fachkräfte. Obwohl die Produktion recht schnell wieder aufgenommen werden konnte, kam es zwischen 1977 und 1979 zu einem Preisanstieg für Kobalt von ca. 400 % (vergl. Alonso et al., 2007; Humphreys, 2010b).

2. Kritische Rohstoffe

get Office” (Congressional Budget Office, 1983)). So identifizierte die Europäischen Kommission Mitte der 1970er Jahre in ihrem Bericht zur Rohstoffversorgungslage vor allem die Stahllegierungselemente Chrom, Mangan und Wolfram sowie Platin und Phosphat als kritisch (Commission of the European Communities, 1975). Dabei wurden neben der europäischen Exportabhängigkeit bereits zahlreiche weitere Faktoren, wie die Konzentration der Rohstoffgewinnung auf Länder- und Unternehmensebene, die politische Stabilität der Förderländer oder Substitutionspotenziale berücksichtigt. Auch mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der Versorgungsrisiken wie die Förderung des innereuropäischen Bergbaus oder effizienteres Recycling werden in diesem Bericht bereits diskutiert, was der aktuellen Debatte um die Sicherheit der Rohstoffversorgung sehr nahe kommt (vergl. Buijs et al., 2012). Auch in der Politik war das Thema der Rohstoffversorgung in den 1980er Jahren präsent. So wurde in den U.S.A. die Einrichtung eines Ausschusses zur Koordinierung der Rohstoffpolitik und der Etablierung von Forschungsprogrammen im Bereich der Materialwissenschaften zur Rohstoffsubstitution verabschiedet (vergl. “The National Critical Materials Act of 1984” Committee on Science, 1984; Leamy, 1985).

Seit dem Zusammenbruch der UdSSR und nicht zuletzt aufgrund dauerhaft niedriger Rohstoffpreise in den 1990er Jahren hat die Debatte um die Sicherheit der Rohstoffversorgung stark an Bedeutung verloren (Humphreys, 1995). Auch auf Unternehmensebene spielten Aspekte der Versorgungssicherheit kaum noch eine Rolle und die Rohstoffbeschaffung degradierte zu einem rein operativen Geschäft. Dies spiegelt sich auch in zahlreichen Verkäufen von Minenbeteiligungen großer Konzerne wieder, die sich im Folgenden als Technologieunternehmen auf ihr Kerngeschäft der Halbzeug- und Produktherstellung, bzw. Technologieentwicklung fokussierten⁸.

Aufgrund der einleitend erläuterten aktuellen Spannungen auf den Rohstoffmärkten und des steigenden Wettbewerbs um den Rohstoffzugang, getrieben durch den enormen Rohstoffhunger der Schwellenländer, insbesondere Chinas, ist die Debatte um die Sicherheit der Rohstoffversorgung seit einigen Jahren wieder in vollem Gange. Eine vor kurzem veröffentlichte breit angelegte Literaturstudie des UK Energy Research Centre (Speirs et al., 2013) zu wissenschaftlichen Publikationen der vergangenen 50 Jahre mit dem Fokus auf Versorgungssicherheiten verschiedener Rohstoffe unterstreicht die zuvor erläuterten Zusammenhänge (vergl. Abbildung 2.5).

Während zu Beginn des 20. Jahrhunderts in erster Linie reine Importabhängigkeiten als Kriterium zur Bewertung der Versorgungssicherheit herangezogen wurden (vergl. z.B: Haglund, 1984), werden inzwischen vielseitige Faktoren in die Risikobewertung einbezogen sowie der Zusammenhang zwischen Versorgungsrisiko und wirtschaftlicher Bedeutung eines Rohstoffes hervorgehoben (vergl. Tabelle 2.1).

Zur Quantifizierung dienen dabei z.B. die “Worldwide Governance Indicators” der Weltbank, die als Maß der politischen Stabilität der Förderländer verwendet werden, Konzentrationsmaße wie der Herfindahl-Hirschman-Index zur Bestimmung der Länderkonzentration der Rohstoffförderung, sowie Importquoten

⁸vergl. insbesondere in Deutschland z.B. den Verkauf von Bergbaubeteiligungen der Thyssen Krupp AG 2001 (vergl. Pilarsky, 2014, S.59 f.), Umstrukturierung der Deutschen Metallgesellschaft zum reinen Technologiekonzern (GEA Group AG) und Aufgabe des Auslandsbergbaus (Wellmer, 2008), Umstrukturierung der Preussag zum größten europäischen Tourismuskonzern TUI AG und Verkauf aller Bergbau- und Hüttenaktivitäten (vergl. Laufer, 2005), Rückzug der RAG (Ruhr AG) aus dem Steinkohleabbau (vergl. Fischer, 2014).

2.2. Historische Debatte um begrenzte Rohstoffverfügbarkeit und Versorgungsrisiken

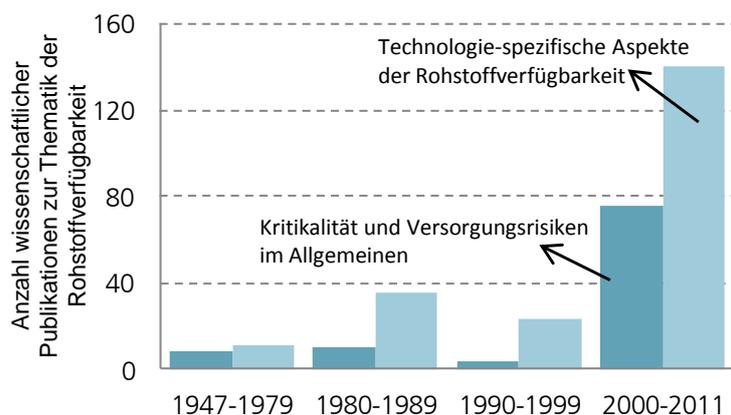


Abbildung 2.5. – Ergebnis einer vom UK Energy Research Centre (Speirs et al., 2013) veröffentlichten Literaturstudie zur Thematik der Rohstoffverfügbarkeit seit Ende des Zweiten Weltkriegs. Die technologiespezifischen Veröffentlichungen wurden im Vergleich zum Original aggregiert.

nach Herkunftsländern als Maß für die Diversifikation des inländischen Rohstoffbezugs. Auch lassen sich viele qualitative Faktoren nicht eindeutig quantifizieren und fließen als hierarchische Gewichtung in die Berechnungen mit ein. Insgesamt unterscheiden sich die in den verschiedenen Kritikalitätsstudien herangezogenen Faktoren und Indikatoren ebenso wie die Aggregation der einfließenden Größen, was erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Daher wird im folgenden Abschnitt eine genaue Analyse aktueller Ansätze zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen durchgeführt.

Tabelle 2.1. – In aktuellen Kritikalitätsbetrachtungen berücksichtigte Einflussgrößen (vergl. Achzet und Helbig, 2013; Glöser et al., 2015; Helbig et al., 2016).

Indikatoren zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken	Indikatoren zur Bestimmung der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes
<ul style="list-style-type: none"> • Konzentration der Produktion auf Länder- und Unternehmensebene • Importabhängigkeit, Importkonzentration • Politische und wirtschaftliche Stabilität der Förderländer • Umweltrisiko und Nachhaltigkeitsaspekte der Rohstoffförderung • Verfügbarkeit von Versorgungsalternativen • Recycling und Einsparpotenziale 	<ul style="list-style-type: none"> • Anteil betroffener Branchen an der Bruttowertschöpfung eines Landes • Substitutionspotenziale im Falle von Versorgungsengpässen • Relevanz für Zukunftstechnologien • Relevanz für wirtschafts- und umweltpolitische Strategien (z.B. Energiewende) • Verteidigungsrelevanz z.B. für Militärtechnik

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

Um einen grundlegenden Überblick über die Methoden und Ergebnisse aktueller Studien zur Bewertung von Rohstoffrisiken zu geben, wurde eine systematische Literaturrecherche mit dem Fokus auf Studien der vergangenen 10 Jahre (seit 2005) durchgeführt. Dabei lassen sich drei grundlegende Ansätze unterscheiden (vergl. Glöser et al., 2015; Erdmann et al., 2011):

1. Studien, deren Rohstoffscreening auf dem Prinzip der Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der klassischen Risikobetrachtung basiert (vergl. Abschnitt 2.3.1).
2. Studien, die über einen Risikoindex basierend auf verschiedenen Subindikatoren eine hierarchische Risikorangfolge verschiedener Rohstoffe liefern (vergl. Abschnitt 2.3.2).
3. Studien basierend auf Zeitreihen- sowie Szenarioanalysen zur Abbildung zukünftiger Trends auf Nachfrage- und Angebotsseite (vergl. Abschnitt 2.3.3).

Die Prinzipien der drei zuvor erläuterten grundlegenden Ansätze, die in der hierauf folgenden Literaturübersicht genauer betrachtet und analysiert werden, ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

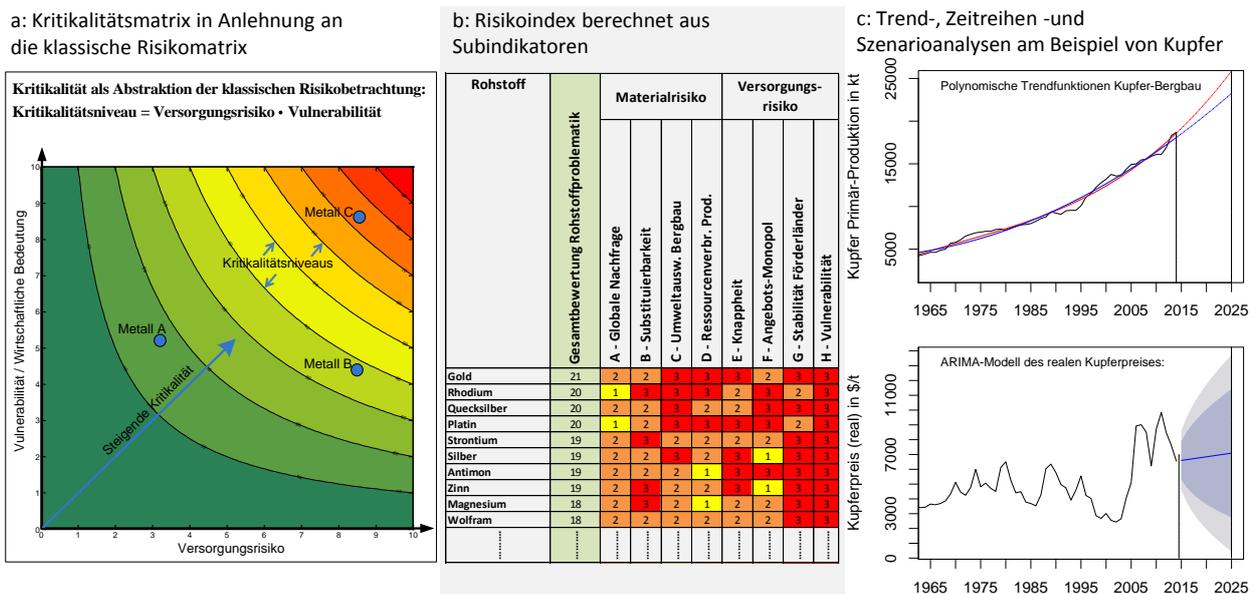


Abbildung 2.6. – Darstellung der 3 grundlegenden Ansätze zur Bewertung von Rohstoffrisiken.
a: Kritikalitätsmatrix (Punkt 1) nach dem Prinzip des Nationalen Forschungsrates der U.S.A (NRC, 2008, vergl. auch Abschnitt 2.3.1).
b: Risikoindex berechnet aus verschiedenen Subindikatoren (Punkt 2) am Beispiel von Morley und Eatherley (2008), vergl. auch Abschnitt 2.3.2.
c: Trendanalyse der Kupfer-Bergbauproduktion sowie Autoregressionsmodell des Kupferpreises (Punkt 3), vergl. Abschnitt 2.3.3.

Die Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der klassischen Risikobetrachtung in einer Risikomatrix (Punkt 1) bildet insbesondere für Risikoanalysen auf nationaler Ebene einen umfassenden Bewertungsansatz, da so-

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

wohl das Versorgungsrisiko im Sinne der Eintrittswahrscheinlichkeit von Versorgungsstörungen als auch deren Ausmaß in Bezug auf die wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes quantifiziert wird. In weiteren Studien wurde ein einheitlicher Risiko Index (oder Indizes) unter quantitativen und qualitativen Einflussgrößen entwickelt, was der Kritikalitätsbetrachtung nach dem Prinzip der Risiko Matrix zwar sehr nahe kommt, die wirtschaftliche Bedeutung der Rohstoffe allerdings nicht explizit analysiert (Punkt 2).

Während die Risikoindex- und Kritikalitätsbetrachtungen rein statische Erhebungen darstellen, wurden auch dynamische Methoden herangezogen, mit deren Hilfe meist in verschiedenen Szenarien oder durch ökonometrische Zeitreihenanalysen zukünftige Rohstoffbedarfe für unterschiedliche Märkte und Technologien dargestellt wurden. Ziel dieser Studien ist die Identifikation möglicher zukünftiger Versorgungsengpässe aufgrund starker technologiebasierter Nachfrageimpulse oder zu erwartender Änderungen der Angebotsituation. Dabei werden in diesen Ansätzen meist nur einzelne Rohstoffkandidaten bzw. Zukunftstechnologien untersucht. Ein direkter Bezug zur Quantifizierung der Versorgungsrisiken im Sinne einer Screening-Methode zur Analyse und zum Vergleich zahlreicher Rohstoffe besteht in diesen Ansätzen allerdings weniger (Punkt 3).

Wie in Tabelle 2.2 zusammengefasst, ist neben der Methodik der jeweiligen Studien (vergl. Abbildung 2.6) auch deren regionaler Fokus zu unterscheiden. Dabei können Rohstoffrisiken auf:

- Unternehmensebene (z.B. Duclos et al., 2008; Bensch et al., 2015; Kausch, 2014, S.13),
- regionaler Ebene (z.B. vbw, 2009; Faulstich et al., 2011b; Franke et al., 2014),
- nationaler Ebene (z.B. Erdmann et al., 2011; NRC, 2008),
- multinationaler Ebene (z.B. European Commission, 2010b, 2014),
- oder auch auf globaler Ebene (z.B. Graedel und Nassar, 2013)

betrachtet werden.

Weiterhin beziehen sich einige Studien auf technologiespezifische Rohstoffbedarfe insbesondere für Energietechnologien (siehe z.B. U. S. DoE, 2010; APS, 2011; U. S. DoE, 2011; Moss et al., 2011, 2013).

Während Tabelle 2.2 die wichtigsten Studien der vergangenen Jahre aufzeigt, werden im folgenden Abschnitt ausgewählte Studien bezüglich Methodik und Ergebnisse genauer untersucht. Dabei stehen diejenigen Studien im Vordergrund, auf die die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze aufbauen. Bezüglich der dynamischen Trendanalysen (Punkt 3) sind in Tabelle 2.2 speziell diejenigen Studien aufgeführt, die sich unmittelbar mit Entwicklungen der Angebots- und Nachfrageseite zur Identifikation von potenziellen Versorgungsengpässen befassen. Zeitreihenanalysen, die in erster Linie Preisentwicklungen aufzeigen und Preisrisiken bzw. Preisprognosen abgeben, sind relativ weit verbreitet und werden hier nicht explizit aufgeführt (vergl. z.B. Geman und Smith, 2013; Gleich et al., 2013; Stepanek et al., 2013).

2. Kritische Rohstoffe

Tabelle 2.2. – Zentrale Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität metallischer und mineralischer Rohstoffe seit 2005 (vgl. hierzu auch (Erdmann und Graedel, 2011; Glöser und Faulstich, 2012; Gandenberger et al., 2012; Speirs et al., 2013; Achzet und Helbig, 2013; Bustamante et al., 2014; Glöser et al., 2015; Olivetti et al., 2015)). Abkürzungen: BERR: Department for Business Enterprise & Regulatory Reform; UK EA: United Kingdom Environment Agency; JRC: Joint Research Council; SEPA: Scottish Environment Protection Agency; UNEP: United Nations Environment Programme; BGR: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; DERA: Deutsche Rohstoffagentur; BMWi: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Titel (Jahr)	Auftraggeber / Referenz
Prinzip der Kritikalitätsmatrix nach NRC (2008)	
“Minerals, Critical Minerals, And the U.S. Economy” (2008)	U.S. National Research Council (NRC, 2008)
“Design in an Era of Constrained Resources” (2008)	General Electric (Duclos et al., 2008)
“Critical raw materials for the EU” (2010, 2014)	Europäische Kommission (European Commission, 2010b, 2014)
“Critical Materials Strategy” (2010, 2011)	U.S. Department of Energy (U. S. DOE, 2010, 2011)
“Kritische Rohstoffe für Deutschland” (2011)	KfW bank group (Erdmann et al., 2011)
“Critically space” (Matrix erweitert um die dritte Dimension der Umwelteinwirkungen)	
“Criticality of the Geological Copper Family / Iron and its Principal Alloying Elements / Geological Zinc, Tin and Lead Family / Criticality of the Rare Earth Elements / The criticality of four nuclear energy metals (2012-2015)”	Graedel et al. Yale University (Nassar et al., 2012b; Graedel und Nassar, 2013; Nuss et al., 2014; Harper et al., 2014; Nassar et al., 2015; E.M. Harper et al., 2015; Panousi et al., 2015)
Risiko Index basierend auf verschiedenen Subindikatoren	
“Rohstoffsituation Bayern” (2009)	Vereinigung der bayerischen Wirtschaft (vbw) (vbw, 2009)
“Ensuring resource availability for the UK economy” (2008)	UK EA and BERR (Morley und Eatherley, 2008)
“Critical Metals in Strategic Energy Technologies” (2011, 2013)	JRC Europäische Kommission (Moss et al., 2011, 2013)
“Raw materials critical to the Scottish economy” (2011)	SEPA (AEA Technology, 2011)
“Risk list of the British Geological Survey (BGS)” (2012)	British Geological Survey (BGS) (BGS, 2012)
“Ressourcenstrategie für Hessen (2011), Bayern (2011), Baden-Württemberg (2014)”	Umweltministerien der jeweiligen Bundesländer (Faulstich et al., 2011b; Franke et al., 2014)
Dynamische statistisch-ökonomische / szenariobasierte Ansätze (in Kombination mit Risikobewertungen)	
“Metallic Mineral Resources in the Twenty-First Century: Historical Extraction Trends and Expected Demand” (2015)	University of Georgia (Patiño Douce, Alberto E., 2015)
“Measuring Criticality of Raw Materials: An Empirical Approach Assessing the Supply Risk Dimension of Commodity Criticality” (2015)	Universität Augsburg (Mayer und Gleich, 2015)
“Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus?” (2013)	ETH Zürich (Scholz und Wellmer, 2013)
“Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials” (2009)	Volkswagen AG / BGR Buchholz et al. (2010); Roseman-Tomow et al. (2009)
“Evaluating Supply Risk Patterns and Supply and Demand Trends” (2012)	UNEP (Buchert et al., 2009)
“Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential” (2009)	BMWi (Frondel et al., 2006)
“Trends in Angebot und Nachfrage mineralischer Rohstoffe” (2008)	BMWi, DERA (Angerer et al., 2009; Marscheider-Weidemann et al., 2016)
“Rohstoffe für Zukunftstechnologien” (2009, 2016)	

2.3.1. Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der klassischen Risikobetrachtung

Der vom Nationalen Forschungsrat der USA⁹ in einer Studie zur Vulnerabilität der amerikanischen Wirtschaft bezüglich der Rohstoffversorgung (NRC, 2008) eingeführte Ansatz zur Quantifizierung und Kommunikation der Rohstoff-Kritikalität in einer Kritikalitätsmatrix (vergl. Abschnitt 2.3.1), wurde in den folgenden Jahren von zahlreichen Wissenschaftlern aufgegriffen und ergänzt. Dieser Ansatz ist als Abwandlung einer klassischen Risikobetrachtung innerhalb einer Risikomatrix zu verstehen. Im Gegensatz zur Risikoanalyse technischer Anlagen, bei denen die Unfallwahrscheinlichkeit meist über Fehler- und Ereignisbaum-Analysen berechnet wird, wobei die Ausfall- und Fehlerwahrscheinlichkeiten einzelner Komponenten bekannt sind oder ermittelt werden können, ist die Quantifizierung des Versorgungsrisikos von Rohstoffen nur durch die sinnvolle Aggregation verschiedener quantifizierbarer Einflussfaktoren darstellbar. Dennoch lässt sich die Kritikalität eines Rohstoffes mit der in ISO 31000 (Risikomanagement - Grundsätze und Leitlinien, International Standards Organization, 2009) beschriebenen klassischen Risikobetrachtung aus der Ingenieurs- und Umweltwissenschaft herleiten. Risiko wird bei einfacher Betrachtung als Produkt aus Schadensausmaß eines bestimmten Szenarios und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit verstanden. Dieser Zusammenhang wird zur Visualisierung und Kommunikation häufig in einer Risikomatrix dargestellt (Abbildung 2.7 linke Seite).

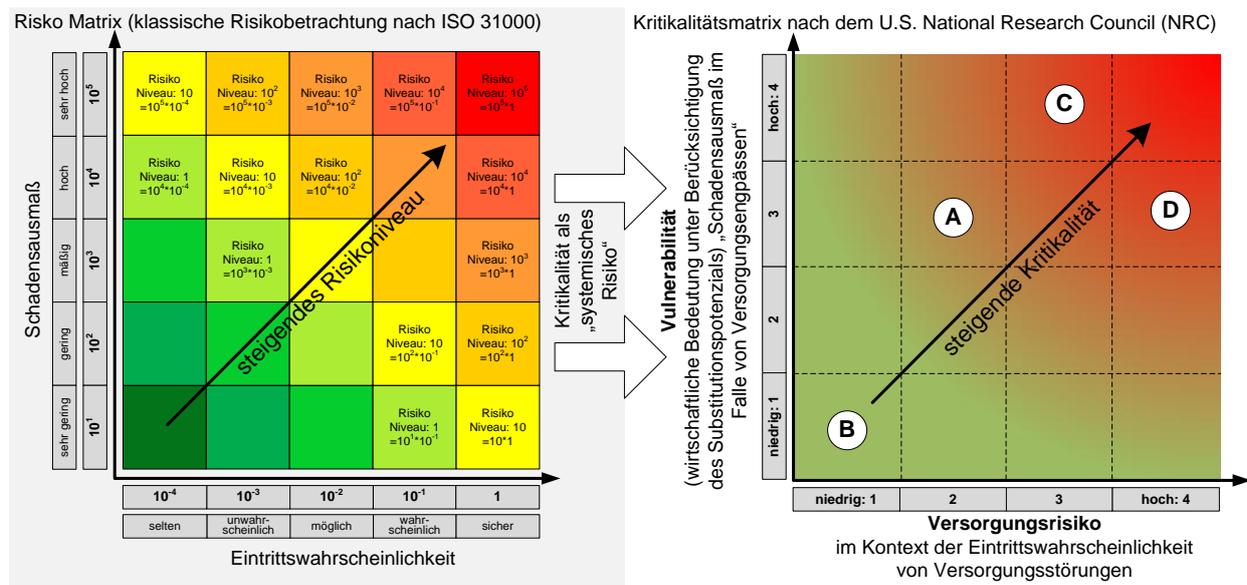


Abbildung 2.7. – Prinzip der Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der klassischen Risikobetrachtung in einer Risikomatrix (eigen Darstellung, Kritikalitätsmatrix nach NRC 2008, vergl. auch Glöser und Faulstich 2012, 2014).

Wie bei einer klassischen Risikobetrachtung wird bei der Kritikalitätserhebung die Vulnerabilität einer Volkswirtschaft gegenüber Störungen der Rohstoffversorgung (auch zu interpretieren als wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes unter Berücksichtigung von Substitutionspotenzialen, also das Schadensausmaß im Falle von Versorgungsstörungen) gegenüber dem Versorgungsrisiko im Sinne der Eintrittswahrschein-

⁹U.S. National Research Council (NRC)

2. Kritische Rohstoffe

lichkeit von Versorgungsstörungen analysiert. Analog zur Risikomatrix, wird bei der Kritikalitätsmatrix die Vulnerabilität gegen Versorgungsstörungen über das Versorgungsrisiko betrachtet (vergl. Abbildung 2.7 rechte Seite). Eine detailliertere Analyse des Kritikalitätskonzeptes als Abstraktion der klassischen Risikobetrachtung erfolgt in Abschnitt 2.4.1 im Zuge der Diskussion der im Folgenden vorgestellten zentralen Studien der vergangenen Jahre, die auf dem Matrixkonzept basieren (vergl. Abbildung 2.7).

USA 2008: Minerals, Critical Minerals and the US Economy

Diese Studie wurde von einem Ausschuss des Nationalen Forschungsrats der USA durchgeführt und Anfang 2008 veröffentlicht (NRC, 2008). Das “Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy” wurde innerhalb des NRC eingerichtet, da nach Ansicht mehrerer Mitglieder den Auswirkungen von Versorgungsengpässen einiger mineralischer und metallischer Rohstoffe auf die amerikanische Wirtschaft in der Öffentlichkeit zu wenig Rechnung getragen wird (vergl. auch Gandenberger et al., 2012).

In dieser Studie wurde erstmals die Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der Risikobetrachtung nach Abbildung 2.7 verwendet. Dabei basierte die Positionierung der 13 analysierten Rohstoffe innerhalb der Kritikalitätsmatrix auf Experteneinschätzungen:

Das Versorgungsrisiko eines Rohstoffes wurde unter Berücksichtigung verschiedener Indikatoren, wie die geologische Verfügbarkeit, die Importabhängigkeit, die Bindung an Kuppelproduktion und die Recyclingfähigkeit, nach dem Ermessen des Ausschusses auf einer Skala von 1 (niedriges Versorgungsrisiko) bis 4 (hohes Versorgungsrisiko) festgelegt.

Zur Bewertung der Vulnerabilität wurden die Auswirkungen von Versorgungsstörungen in den jeweiligen Anwendungsbereichen ebenfalls auf einer Skala von 1 bis 4 bewertet.

Tabelle 2.3 fasst die für die Bewertung der Koordinaten innerhalb der Kritikalitätsmatrix herangezogenen Indikatoren zusammen.

Tabelle 2.3. – Indikatoren, die vom “Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy” zur Quantifizierung der Vulnerabilität (vertikale Achse), bzw. des Versorgungsrisikos (horizontale Achse) herangezogen wurden (NRC, 2008).

Bestimmung der Vulnerabilität	Bestimmung des Versorgungsrisikos
<ul style="list-style-type: none"> • U.S. Verbrauch in Millionen U.S. \$ • Anteil des Verbrauchs in Sektoren in denen Substitution nur bedingt möglich ist • Relevanz für Zukunftstechnologien (qualitative Bewertung) 	<ul style="list-style-type: none"> • U.S. Importabhängigkeit • Statische Reservenreichweite • Anteil der Produktion als Nebenprodukt in % der Gesamtherstellung • U.S. Sekundärproduktion (Recycling Rate)

Da sich die Substituierbarkeit eines Rohstoffes innerhalb eines Industriesektors sowie die Größe der betroffenen Sektoren unterscheidet, wurden zur Berechnung der Vulnerabilität der amerikanischen Wirtschaft gegenüber Versorgungsengpässen der untersuchten Rohstoffe die Vulnerabilitätswerte der betroffenen Sek-

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

toren mit ihrem Anteil am Gesamtverbrauch des Rohstoffes in den USA gewichtet und aufsummiert (vergl. Beispielrechnung in Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4. – Berechnungsbeispiel zur Bestimmung der Vulnerabilität der amerikanischen Wirtschaft gegen Versorgungsstörungen (verticale Achse).

von Rohstoff x abhängiger Sektor	Anteil am U.S. Gesamtverbrauch	Auswirkungen von Versorgungsstörungen	Gewichtete Bewertung
Sektor A	0.5	3	1.5
Sektor B	0.25	4	1
Sektor C	0.25	1	0.25
Vulnerabilitätsbewertung Σ	1	—	2.75

Abbildung 2.8 zeigt die Ergebnisse der NRC Studie in Form der Positionierung der 13 untersuchten Rohstoffe innerhalb der Kritikalitätsmatrix.

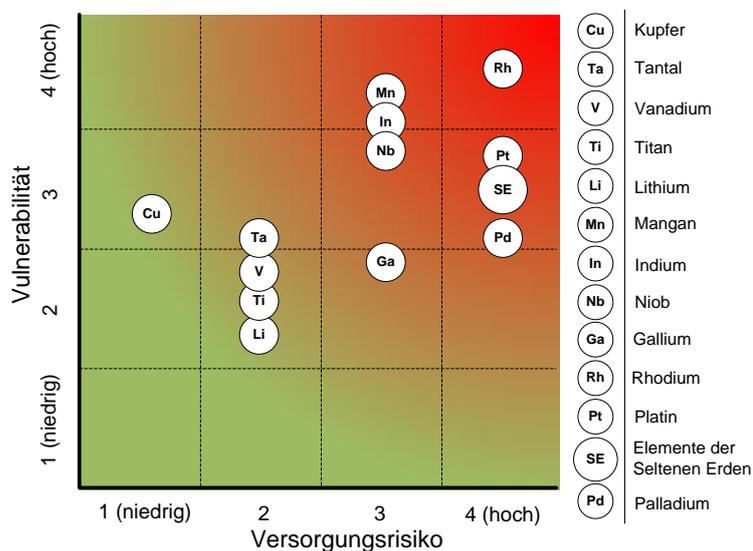


Abbildung 2.8. – Ergebnis der US Studie in Form der erarbeiteten Kritikalitätsmatrix (NRC, 2008, S.165).

2. Kritische Rohstoffe

USA 2010 & 2011: Critical Materials' Strategy

Das amerikanische Energieministerium (U.S. Department of Energy, kurz DoE) hat den vom Nationalen Forschungsrat eingeführten Matrixansatz zur Darstellung und Kommunikation von technologiespezifischen Rohstoffrisiken übernommen. Hierzu wurden eine Studie erstellt, die die Anfälligkeit alternativer Energietechnologien gegen Versorgungsengpässe analysierte und die für die Entwicklung und Verbreitung dieser Technologien besonders kritischen Rohstoffe identifizierte (U. S. DoE, 2010). Die Studie wurde Ende 2011 nochmals aktualisiert, die Methodik und die betrachteten Technologien blieben dabei identisch (U. S. DoE, 2011). Die Verwendung quantitativer Faktoren zur Unterstützung der Expertenbewertung in diesen Studien erfolgte Analog zum Ansatz des NRC. Hierzu wurden zunächst relevante Energietechnologien identifiziert (insbesondere aus den Bereichen Windenergie, Photovoltaik und Energiespeichersysteme) und die für die jeweiligen Technologien benötigten Rohstoffe aufgelistet. Für diese energierelevanten Rohstoffe wurden anschließend, unter Berücksichtigung der in Tabelle 2.5 aufgelisteten Faktoren, die Einschätzungen bezüglich ihrer Wichtigkeit für die betrachteten Technologien und ihres Versorgungsrisikos jeweils mit Werten von 1 bis 4 vergeben, die wiederum die Grundlage für die Skalierung innerhalb der Kritikalitätsmatrix bildeten.

Tabelle 2.5. – Indikatoren, die vom “US Department of Energy (DoE)” zur Quantifizierung der Wichtigkeit einzelner Rohstoffe für alternative Energietechnologien (horizontale Achse) bzw. ihres Versorgungsrisikos (vertikale Achse) herangezogen wurden (U. S. DoE, 2010, 2011).

Wichtigkeit für Energietechnologien	Bestimmung des Versorgungsrisikos
<ul style="list-style-type: none"> • Verwendungsanteil des jeweiligen Rohstoffes in den betrachteten alternativen Energietechnologien • Potenzielle Substituierbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittelfristige Verfügbarkeit durch erwartete Angebots- und Nachfrageentwicklung • Nachfrage in anderen Branchen (Nachfragekonflikte) • Anteil der Produktion als Neben- oder Kuppelprodukt • Stabilität der wichtigsten Bergbauländer • Konzentration der Produktion auf Unternehmensebene

Da die verschiedenen Rohstoffe technologiespezifisch betrachtet wurden, beinhaltet diese Studie im Gegensatz zur NRC Studie oder auch zu den EU Studien (vergl. nachfolgenden Abschnitt) keine Rohstoffgruppen wie Seltene Erden oder Platingruppenmetalle, sondern ausschließlich einzelne Elemente.

Weiterhin wurde in dieser Studie zwischen aktueller Kritikalität und mittelfristiger Kritikalität unterschieden, wobei für die Zukunftsbetrachtung in erster Linie Erwartungen bezüglich der Angebots- und Nachfrageentwicklung in die qualitative Bewertung mit einfließen. Die Ergebnisse der aktuellen Studie des amerikanischen Energieministeriums sind in Abbildung 2.9 dargestellt. Die Matrix wurde in 3 Bereiche unterteilt: Kritisch (rot), problematisch (gelb), unkritisch (grün).

Die Europäische Union stellte ähnliche Analysen “energiekritischer Rohstoffe” an (vergl. Moss et al., 2011, 2013). Der dabei verwendete Bewertungsansatz der Rohstoffrisiken basiert allerdings auf gewichteten Risikoindizes wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben.

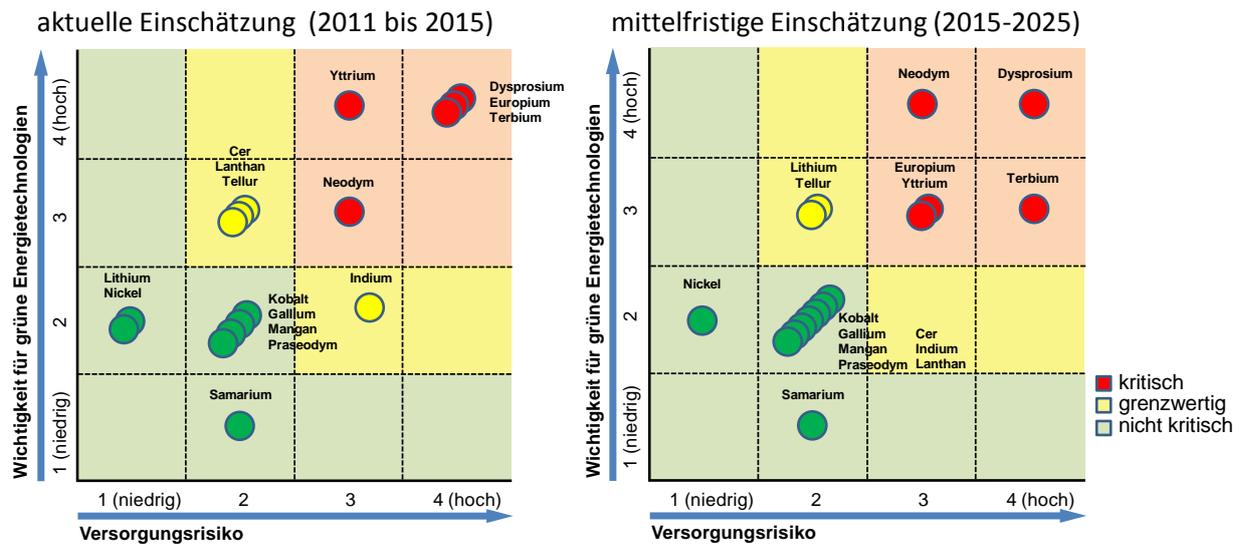


Abbildung 2.9. – Ergebnis der Kritikalitätsstudie des U.S. Department of Energy zur aktuellen Einschätzung der Rohstoffrisiken für alternative Energietechnologien sowie die mittel- bis langfristig erwartete Entwicklung der Versorgungssituation.

EU 2010 & 2014: Critical Minerals for the EU

Eine Methode zur Analyse kritischer Rohstoffe für die Europäische Union erarbeitete die “Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials”, eine von der Europäischen Kommission ernannte Expertengruppe (vergl. European Commission, 2010b). Wie in der Europäischen Rohstoffinitiative vorgesehen (European Commission, 2008), sollten kritische Rohstoffe für die europäische Industrie identifiziert werden. Hierzu untersuchte die Expertengruppe 41 Industriemineralien und -metalle auf potenzielle Versorgungsrisiken sowie auf ihre Bedeutung für die europäische Wirtschaft. In Anlehnung an die vom NRC entwickelte Kritikalitätsmatrix wird ein Rohstoff als kritisch bewertet, wenn das Versorgungsrisiko und die wirtschaftlichen Folgen einer Versorgungsstörung beide als hoch angesehen werden (vergl. auch Definition in Abschnitt 2.1). Die Quantifizierung der Koordinaten der einzelnen Rohstoffe innerhalb der Kritikalitätsmatrix (wirtschaftliche Bedeutung und Versorgungsrisiko) basierte auf den im Folgenden erläuterten Gleichungen. Dabei wurden vorwiegend rein quantitative Indikatoren herangezogen (vergl. Tabelle 2.6), was die Positionierung der Rohstoffe innerhalb der Kritikalitätsmatrix im Gegensatz zu dem eher qualitativen, auf Expertenschätzungen basierenden Ansatz des NRC nachvollziehbarer gestaltet. Dennoch bleibt die Wahl und die Gewichtung der zugrunde gelegten Indikatoren – wie bei allen Multiindikatoransätzen – offen für Diskussionen.

Gleichung 2.1 zeigt den in den EU-Studien verwendeten Ansatz zur Berechnung des Versorgungsrisikos. Dabei wurde der mit den World Governance Indicators der Weltbank (WGI)¹⁰ gewichtete Herfindahl-Hirschman-Index (HHI)¹¹ mit einem Maß für die Substituierbarkeit der Rohstoffe in den verschiedenen

¹⁰Die World Governance Indicators (WGI) werden seit 1996 von der Wissenschaftsabteilung der Weltbank veröffentlicht und bewerten die politische Stabilität der Staaten unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren wie die Rechtssicherheit, Korruptionsanfälligkeit, Gewaltfreiheit etc. (vergl. Kaufmann et al., 2013).

¹¹Der HHI ist ein Maß für die relative Konzentration und wird aus der Summe der quadrierten prozentualen Einzelanteile berechnet.

2. Kritische Rohstoffe

Anwendungsbereichen sowie mit den derzeitigen Recyclingraten verrechnet.

$$\text{Versorgungsrisiko}_i = \underbrace{(1 - \rho_i)}_{\text{Rezyklierbarkeit}} \cdot \underbrace{\sum_s (A_{is} \cdot \sigma_{is})}_{\text{Substituierbarkeit}} \cdot \underbrace{\sum_c (P_{ic}^2 \cdot [WGI_c \text{ oder } EPI_c])}_{\text{gewichteter HHI}} \quad (2.1)$$

Die Quantifizierung der wirtschaftlichen Bedeutung der jeweiligen Rohstoffe ist in Gleichung 2.2 dargestellt und basiert auf dem gewichteten Anteil der von Versorgungsstörungen betroffenen Sektoren an der gesamten Bruttowertschöpfung der EU.

$$\text{Wirtschaftliche Bedeutung}_i = \frac{\sum_s (S_{is} \cdot A_{is})}{GDP_{EU27}} \quad (2.2)$$

Eine Erklärung der einzelnen Elemente von Gleichungen 2.1 und 2.2 ist in Tabelle 2.6 gegeben.

Tabelle 2.6. – Indikatoren, die von der Expertengruppe der EU (“Ad hoc Working Group on defining critical raw materials”) zur Bestimmung der Koordinaten innerhalb der Kritikalitätsmatrix herangezogen wurden (vergl. Gleichung 2.1 und 2.2, bzw. European Commission, 2010b, 2014)

“Versorgungsrisiko”	“Wirtschaftliche Bedeutung”
ρ_i – Anteil Altschrott an der gesamten Metallproduktion (EoL Recycling Input Rate)	S_{is} – Bruttowertschöpfung des Sektors s , der von Rohstoff i abhängig ist.
A_{is} – Verwendungsanteil Rohstoff i durch Industriesektor s	A_{is} – Verwendungsanteil Rohstoff i durch Industriesektor s
σ_{is} – Substituierbarkeit Rohstoff i Industriesektor s	GDP_{EU27} – Gesamte Bruttowertschöpfung der EU27 (GDP)
P_{ic} – Anteil Land c an der globalen Produktion von Rohstoff i	
WGI_c – Wert der World Governance Indicators (Kaufmann et al., 2013) für Land c (normiert auf Werte von 1 bis 10)	
EPI_c – Wert des Environmental Performance Index (Yale Center for Environmental Law and Policy, 2014) für Land c (normiert auf Werte von 1 bis 10)	

Im Gegensatz zur zuvor beschriebenen Studie des NRC, in der lediglich die relativen Positionen der Rohstoffe innerhalb der Kritikalitätsmatrix zueinander dargestellt wurden, hatte die EU Studie das Ziel eine Liste kritischer Rohstoffe aufzustellen. Daher wurden für beide Achsen Grenzwerte festgelegt, wobei alle Rohstoffe oberhalb der Begrenzungen als kritisch eingestuft wurden¹². Die Ergebnisse der ersten Studie der Europäischen Union sowie die 14 als kritisch identifizierten Rohstoffe sind in Abbildung 2.10 dargestellt.

Eine Aktualisierung der EU Kritikalitätsmatrix wurde 2014 veröffentlicht (European Commission, 2014). Methodisch gab es dabei keine Unterschiede zur vorangegangenen Studie, sowohl die Quantifizierung der Koordinaten als auch die Begrenzungen innerhalb der Kritikalitätsmatrix blieben identisch. Lediglich die

¹²Inwiefern diese Begrenzungen im Widerspruch zur klassischen Risikobetrachtung stehen, wird in Abschnitt 2.4.1 diskutiert.

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

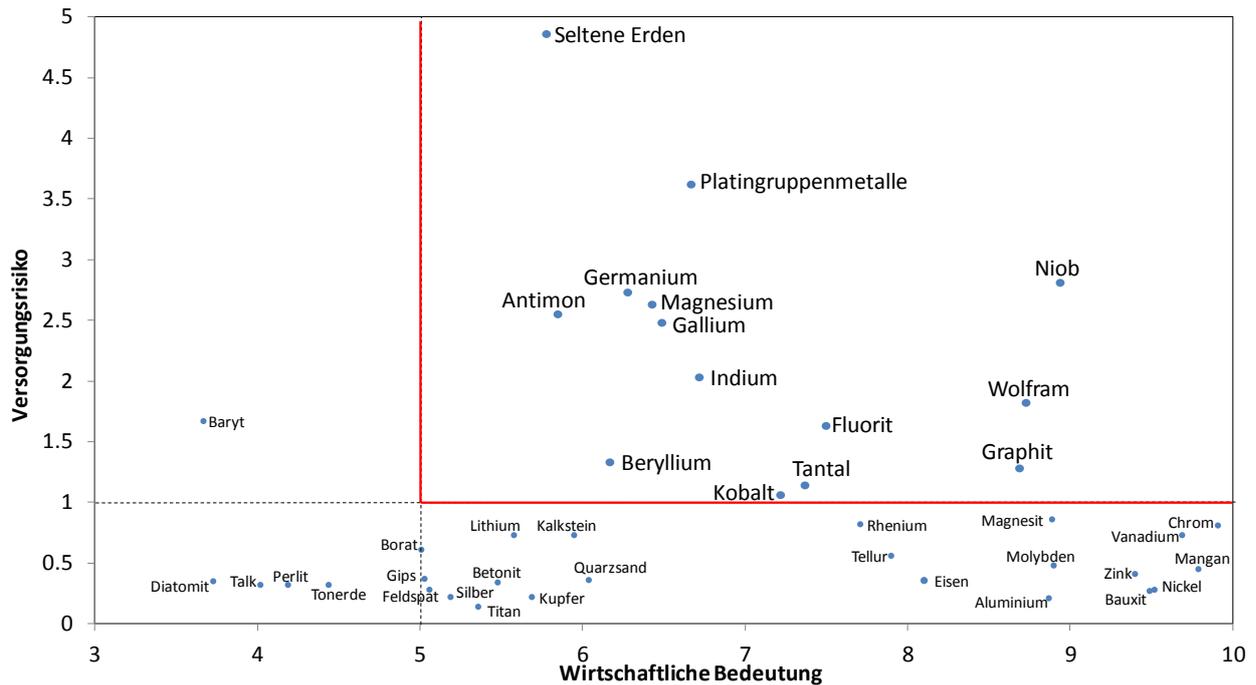


Abbildung 2.10. – Kritikalitätsmatrix der ersten EU Studie (European Commission, 2010b).

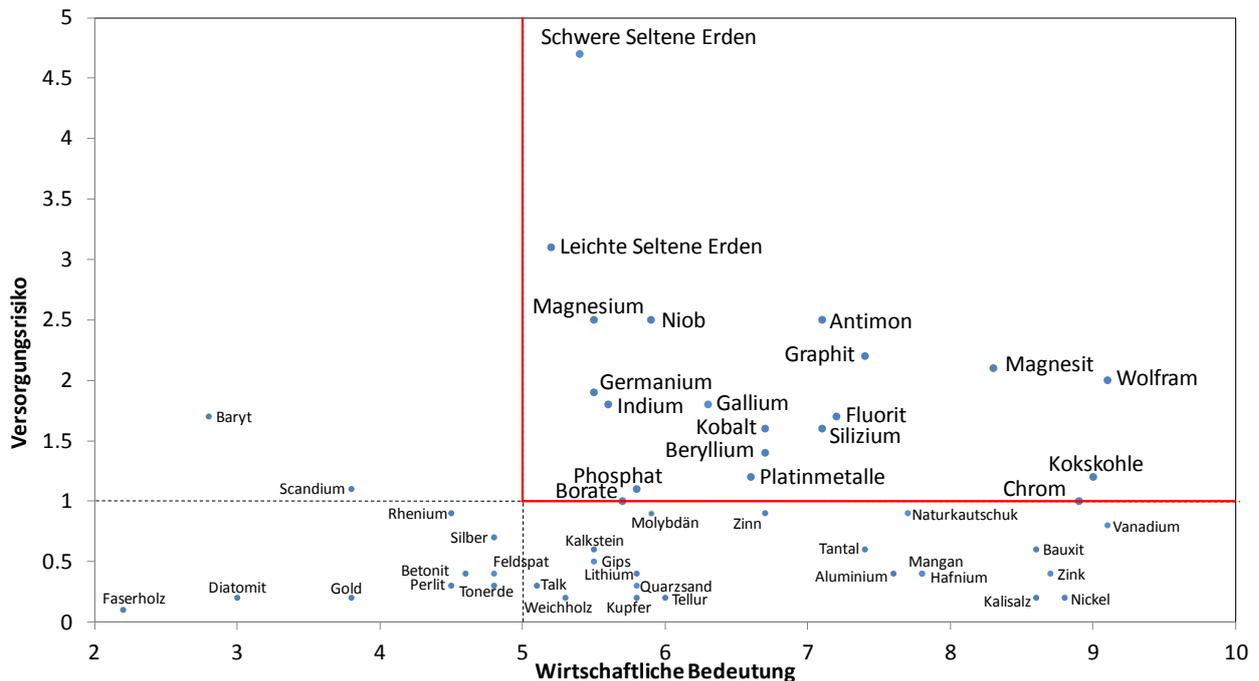


Abbildung 2.11. – Aktualisierte Kritikalitätsmatrix der Europäischen Union sowie die derzeit 20 kritischen Rohstoffe / Rohstoffgruppen nach Bewertung der EU (European Commission, 2014).

Anzahl der untersuchten Rohstoffe, bzw. Rohstoffgruppen wurde auf 54 erhöht. Hierzu wurde die Gruppe der Seltenen Erden in "leichte" und "schwere" Seltenerdelemente unterteilt (vergl. zur Spezifikation Seltener

2. Kritische Rohstoffe

Erden Kapitel 5.4) und es wurden einige organischen Rohstoffe, wie Naturkautschuk und Weichhölzer in die Analyse mit aufgenommen. Dabei wurden 20 Rohstoffe, bzw. Rohstoffgruppen, als kritisch identifiziert. Die aktuelle Kritikalitätsmatrix der Europäischen Union ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

Als Zusatz zur eigentlichen Kritikalitätserhebung wurde der aktualisierten Studie der EU ein Bericht mit alternativen Bewertungsansätzen sowie Verbesserungsvorschlägen für die Bestimmung der Koordinaten innerhalb der Kritikalitätsmatrix (nach Gleichung 2.1 und 2.2) beigelegt (Chapman et al., 2013). Dabei wurde auch eine weitere Version der Kritikalitätsmatrix mit alternativer Quantifizierung des Versorgungsrisikos dargestellt, indem in Gleichung 2.1 sowohl der World Governance Indicator (WGI_c) als auch der Environmental Performance Index (EPI_c)¹³ eingesetzt wurde, wobei für jeden Rohstoff der höhere resultierende Wert als Risikomaß diente. Dieser Ansatz entspricht der Überlegung, dass ein höheres Umweltrisiko auch ein höheres Versorgungsrisiko mit sich bringt. Weiterhin wurden von Chapman et al. (2013) einige Verbesserungsvorschläge für Gleichung 2.1 und 2.2 diskutiert, insbesondere die Berücksichtigung des Substitutionsindex in der Berechnung der wirtschaftlichen Bedeutung (Gleichung 2.2), was dem Risikogedanken näher käme: Ein höheres Substitutionspotenzial verringert das Schadensausmaß im Fall von Versorgungsstörungen, beeinflusst allerdings nicht direkt das Versorgungsrisiko im Sinne der Eintrittswahrscheinlichkeit von Versorgungsstörungen.

Deutschland 2011: Kritische Rohstoffe aus Sicht deutscher Unternehmen

Eine Studie zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen aus Sicht der deutschen Industrie wurde von der KfW Bankengruppe¹⁴ in Auftrag gegeben. Die Studie wurde von einem Konsortium aus dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) und adelphi durchgeführt und Ende 2011 veröffentlicht (vergl. Erdmann et al., 2011).

Als Ansatz zur Quantifizierung der Kritikalität wurde die von der NRC entwickelte Kritikalitätsmatrix gewählt. Wesentlicher Unterschied zu den Studien des NRC und der EU, ist die Methode zur Ermittlung der Koordinaten der einzelnen Rohstoffe innerhalb der Kritikalitätsmatrix, die auf der gewichteten Aggregation unterschiedlicher Indikatoren basiert.

Tabelle 2.7 fasst die in der KfW-Studie herangezogenen Indikatoren sowie deren Gewichtung zusammen. Dabei wurden jedem Indikator Werte zwischen 0 und 1 zugeordnet, wobei hauptsächlich auf quantitative Werte (Handels- und Produktionsstatistiken) zurückgegriffen wurde, einige qualitativen Aspekte wie die Sensitivität der betroffenen Wertschöpfungsketten oder die Substituierbarkeit wurden ebenfalls in die Bewertung aufgenommen.

Unterschieden wird zwischen kurzfristigen und mittel- bis langfristigen Faktoren, die sowohl für die Erhebung der Vulnerabilität als auch zur Quantifizierung des Versorgungsrisikos zum Tragen kommen. Die Kritikalitätsmatrix wurde im Gegensatz zu den EU-Studien (European Commission, 2010b, 2014), in fol-

¹³Der Environmental Performance Index (EPI) wird vom Fachbereich Environmental Sustainability der Yale Universität veröffentlicht und quantifiziert die ökologische Leistungsbilanz von Staaten und Unternehmen (vergl. Yale Center for Environmental Law and Policy, 2014).

¹⁴Kreditanstalt für Wiederaufbau

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

Tabelle 2.7. – Indikatoren und deren Gewichtung in der KfW-Studie (Erdmann et al., 2011).

Vulnerabilität	Zeitliche Relevanz	%	Versorgungsrisiko	Zeitliche Relevanz	%
Mengenrelevanz			Länderrisiko		
Anteil Deutschlands am Weltverbrauch (2008)	kurzfristig	25%	Länderrisiko deutsche Importpartner	kurzfristig	10%
Änderung des Anteils Deutschlands am Weltverbrauch (2004 - 2008)	kurzfristig	10%	Länderrisiko globale Produktion	kurzfristig	10%
Änderung der Importe Deutschlands (2004 - 2008)	kurzfristig	10%	Länderrisiko globale Reserven	kurzfristig	10%
Strategische Relevanz			Marktrisiko		
Sensitivität der Wertschöpfungskette in Deutschland	mittel- bis langfristig	25%	Unternehmenskonzentration der globalen Produktion	kurzfristig	25%
Globaler Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030)	mittel- bis langfristig	20%	Statische Reservenreichweite (2008)	mittel- bis langfristig	25%
Substituierbarkeit	mittel- bis langfristig	10%	Strukturrisiko		
		Σ 100%	Anteil Nebenprodukt an Gesamtproduktion	mittel- bis langfristig	10%
			Recyclingfähigkeit	mittel- bis langfristig	10%
				Σ	100%

gende 6 Bereiche unterteilt, wobei die Bereiche V und VI als kritisch einzustufen sind (vergl. auch Abbildung 2.12):

- I. Geringe Kritikalität (geringes Versorgungsrisiko, geringe Vulnerabilität)
- II. Geringes Versorgungsrisiko, hohe Vulnerabilität
- III. Hohes Versorgungsrisiko, geringe Vulnerabilität
- IV. Mittlere Kritikalität (mittleres Versorgungsrisiko, mittlere Vulnerabilität)
- V. Hohe Kritikalität (hohes Versorgungsrisiko, hohe Vulnerabilität)
- VI. Maximale Kritikalitätsstufe (höchstes Versorgungsrisiko, höchste Vulnerabilität)

Weiterhin wurden in der Studie verschiedene Sensitivitätsanalysen bezüglich der Auswirkungen der Gewichtung der betrachteten Indikatoren auf die Ergebnisse durchgeführt. Durch die unterschiedliche zeitliche Relevanz der Indikatoren (vergl. Tabelle 2.7) wurde auch die mittel bis langfristige Kritikalität dadurch ermittelt, dass nur diejenigen Indikatoren mit entsprechendem zeitlichen Bezug in die Bewertung aufgenommen wurden.

Dabei ist allerdings zu bemerken, dass hier ein zeitlicher Bezug in eine statische Analyse gebracht wird, ohne die Dimension der Zeit in die Analyse einzubeziehen. Folglich werden nicht alle herangezogenen Indikatoren über den Zeitverlauf betrachtet, sondern lediglich ausgewählte Indikatoren als zukunftsrelevant betrachtet. Inwiefern sich die Indikatoren in ihrer Gesamtheit über die Zeit verändern, wird nicht berücksichtigt. Durch die einheitliche Darstellung in einer Kritikalitätsmatrix wird eine gemeinsame Bemessungsgrundlage suggeriert, tatsächlich werden unterschiedliche Indikatoren miteinander verglichen. Weiterhin erscheint

2. Kritische Rohstoffe

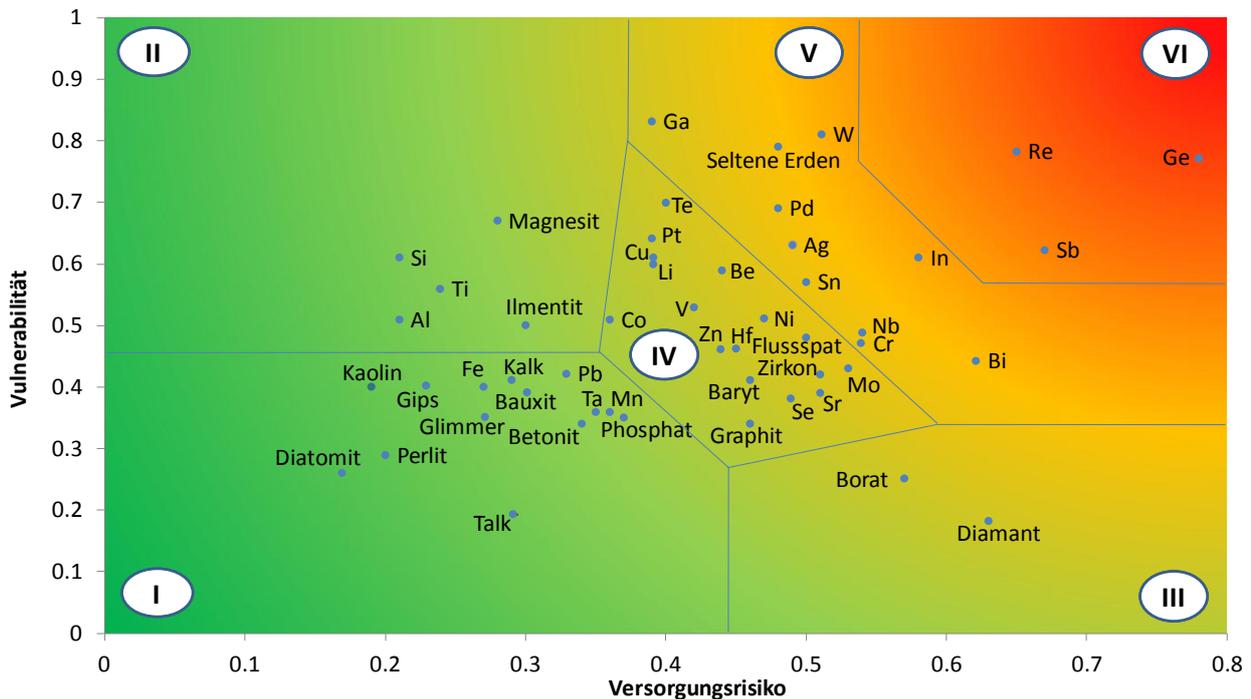


Abbildung 2.12. – Ergebnis der KfW Studie in Form der Kritikalitätsmatrix (Erdmann et al., 2011).

es insgesamt problematisch in eine statische Kritikalitätsanalyse Indikatoren mit unterschiedlichem Zeitbezug zu integrieren: Ein Rohstoff könnte aufgrund der aktuellen Versorgungssituation (die auf gegenwärtigen Fakten basiert) als kritisch identifiziert werden, während ein anderer Rohstoff aufgrund zukünftig erwarteter Entwicklungen (die mit einem erheblichen Maß an Unsicherheit verbunden sind) als kritisch bewertet wird.

Insgesamt erscheint es daher sinnvoll, auch für Indikatorbasierte Screeningmethoden den Verlauf jedes einzelnen Indikators über die Zeit zu betrachten (vergl. hierzu Kapitel 3.2) und nicht einzelnen Indikatoren verschiedene zeitliche Bezüge zuzuordnen, da hier die Gefahr besteht, nicht direkt vergleichbare Aspekte auf ein einheitliches Bewertungsniveau zu stellen.

Kritikalität in 3-dimensionaler Betrachtung: “Criticality Space” nach Graedel et al.

Graedel et al. (2012) entwickelten eine Methode zu Bestimmung der Kritikalität unter Einbezug einer dritten Dimension (neben den beiden Achsen der zuvor beschriebenen Kritikalitätsmatrix), die die Umweltauswirkungen des Bergbaus und der Rohstoffaufbereitung in die Betrachtung mit einbeziehen soll (Nassar et al., 2012a). Diese dritte Dimension quantifiziert Umwelteinträge schädlicher Substanzen sowie deren Auswirkungen auf das Ökosystem basierend auf Datenbanken aus dem Bereich der Ökobilanzierung¹⁵. Darüber hinaus werden in dem von Graedel et al. (2012) vorgestellten Ansatz zur Kritikalitätsbewertung weitere, von den zuvor beschriebenen Ansätzen abweichende, Indikatoren zur Bewertung des Versorgungsrisikos

¹⁵vergl. z.B. “Ecoinvent” (Swiss Center of Life Cycle Inventory, 2015), oder GaBi bzw. Umberto (Umberto, 2015)

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

bzw. der Vulnerabilität berücksichtigt.

Dabei wurden neben den in vorherigen Ansätzen herangezogenen “World Governance Indicators (WGI)” zur Bewertung der politischen Stabilität von Förderländern (vergl. Abschnitt 2.3.1) weitere von verschiedenen Institutionen veröffentlichte Indikatoren herangezogen. Berücksichtigt wurden die Attraktivität eines Landes für Investoren (“Policy Potential Index” (PPI) nach Wilson et al., 2013), die Achtung von Menschenrechten in Zusammenhang mit sozialen Aspekten der Nachhaltigkeit (Human Development Index (HDI) nach Malik, 2013) und die Innovationsfähigkeit eines Landes (Global Innovation Index (GII) nach Dutta, 2013) zur Bewertung der Anpassungsfähigkeit auf Veränderungen in der Rohstoffversorgung.

Weiterhin unterscheiden Graedel et al. (2012) zwischen der Kritikalitätsbewertung auf Unternehmensebene, nationaler Ebene sowie globaler Ebene. Während bei der Bewertung auf Unternehmensebene eher kurzfristige Versorgungsrisiken in den Vordergrund rücken, werden auf nationaler Ebene Indikatoren einbezogen, die die mittelfristige Versorgungssituation erfassen sollen. Die insgesamt in die Kritikalitätsbewertung einfließenden Faktoren sowie die Darstellung der Kritikalitätsvektoren im Raum sind in Abbildung 2.13 zusammengefasst.

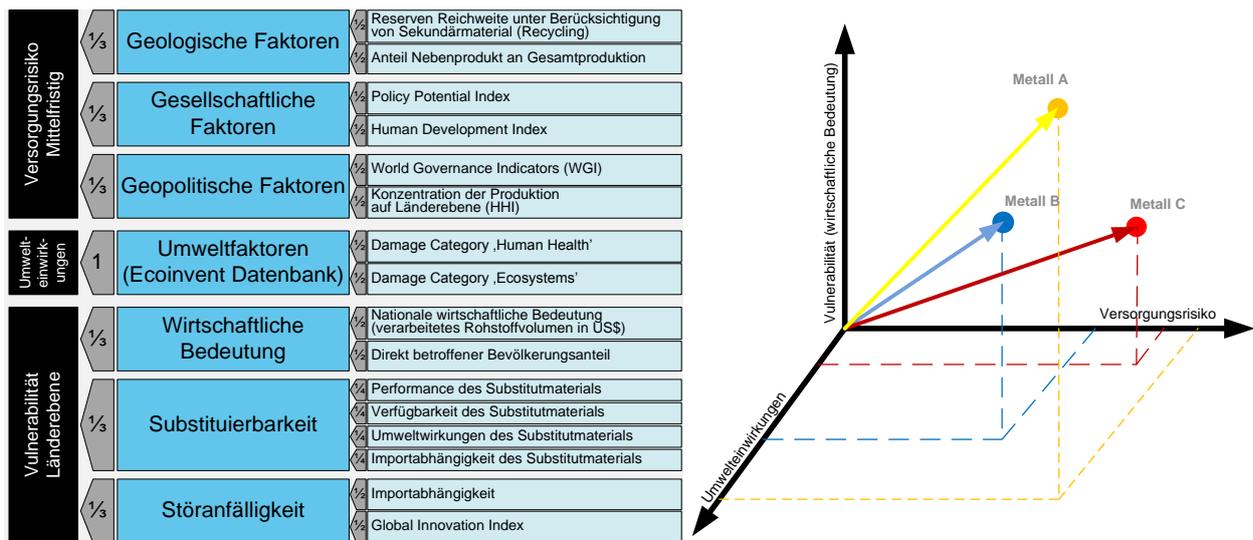


Abbildung 2.13. – Erhebung der Koordinaten im “Kritikalitätsraum” (criticality space) auf Basis verschiedener Indikatoren. Quantifizierung der Gesamtkritikalität für jeden Rohstoff über die Länge des Vektors, der durch die jeweilige Positionierung im Raum aufgespannt wird.

Die Kritikalitätsbewertung jedes einzelnen Rohstoffes erfolgt durch Berechnung der Länge des durch die Position des Datenpunktes im Raum aufgespannten Vektors (vergl. Gleichung 2.3).

$$\text{Kritikalität}_i = \sqrt{\text{Vulnerabilität}_i^2 + \text{Versorgungsrisiko}_i^2 + \text{Umwelteinwirkungen}_i^2} \quad (2.3)$$

Diese Methode zur Kritikalitätsbewertung wurde in den vergangenen Jahren auf verschiedene Rohstoffgruppen, wie die geologisch mit Kupfer vergesellschafteten Metalle (Graedel et al., 2012), Eisen und die wichtigsten Stahl-Legierungselemente (Nuss et al., 2014), die geologisch mit Zink, Zinn und Blei verwand-

2. Kritische Rohstoffe

ten Metalle (Harper et al., 2014), die Selten-Erd-Elemente (Nassar et al., 2015), sowie auf einige weiteren Technologiemetalle (E.M. Harper et al., 2015; Panousi et al., 2015) angewendet. Beispielhaft sind in Abbildung 2.14 die Ergebnisse der Kritikalitätsbewertung für die geologische Kupfer-Familie (auf nationaler Ebene der USA) dargestellt. Weiterhin wurden in den Studien stochastische Sensitivitätsanalysen hinsichtlich der Datenunsicherheit durchgeführt, was nicht zu einem diskreten Punkt im Raum, sondern zu einer wolkenähnlichen Kugel um den Durchschnittswert führt.

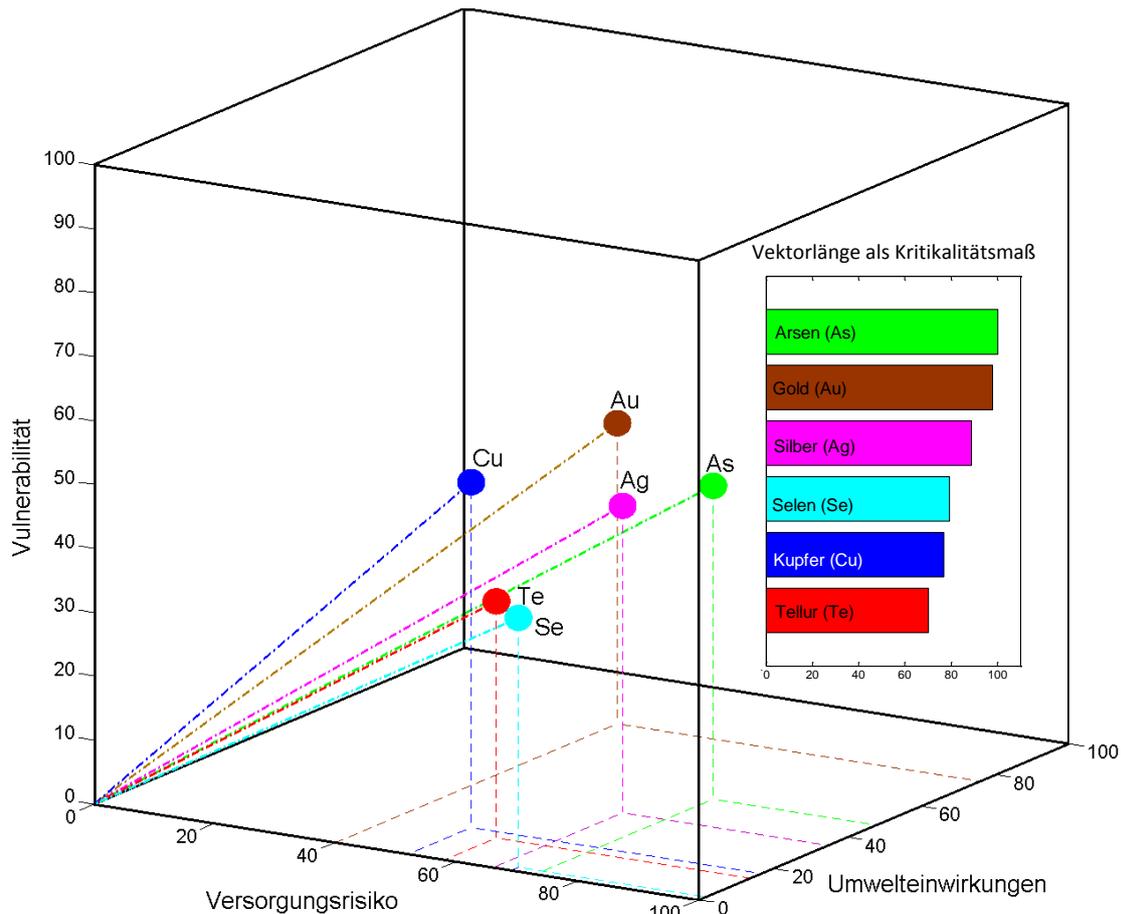


Abbildung 2.14. – “Criticality Space” auf nationaler Ebene (U.S.A.) für die geologische Kupferfamilie (siehe Nassar et al., 2012a).

Insgesamt ist bei der von Graedel et al. (2012) eingeführten Methode anzumerken, dass der Bezug zur klassischen Risikobetrachtung in einer Risikomatrix, in der das Risiko als Produkt aus Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit definiert ist, durch die Betrachtung im 3-dimensionalen Raum verloren geht. Analog zur Risikomatrix, die nicht einfach um eine dritte Dimension erweitert werden kann, verliert die Kritikalitätsmatrix durch die Definition der Kritikalität als Vektorlänge ihren ursprünglichen Risikobezug (vergl. hierzu Diskussion in Abschnitt 2.4.1).

2.3.2. Risikoindex als Multiindikatoransatz

Wie in Abschnitt 2.3 bereits erläutert und in Tabelle 2.2 zusammengefasst, verwenden einige Studien einen hierarchischen Risikoindex basierend auf unterschiedlichen Subindikatoren zur einfachen Bewertung und Kommunikation von Rohstoffrisiken. Einige ausgewählte Studien werden im Folgenden kurz dargestellt und insbesondere bezüglich der herangezogenen Indikatoren und deren Gewichtung untersucht. Dadurch soll ein methodischer Überblick und eine klare Abgrenzung zum Ansatz der Kritikalitätsmatrix gegeben werden.

Material Security - Ensuring resource availability for the UK economy (2008)

Die Studie wurde im Auftrag des britischen Wirtschaftsministeriums (Department for Business Enterprise & Regulatory Reform, BERR), der britischen Umweltagentur (UK Environment Agency) und des "Resource Efficiency Knowledge Transfer Network" durchgeführt. Ihr Ziel war die Identifikation kritischer Rohstoffe für die britische Wirtschaft.

Rohstoff	Gesamtbewertung Rohstoffproblematik	Materialrisiko				Versorgungs-risiko			
		A - Globale Nachfrage	B - Substituierbarkeit	C - Umweltausw. Bergbau (GWP)	D - Ressourcenverbr. Prod. (TMR)	E - Knappheit	F - Angebots-Monopol	G - Stabilität Förderländer	H - Vulnerabilität (Klimawandel)
Gold	21	2	2	3	3	3	2	3	3
Rhodium	20	1	3	3	3	2	3	2	3
Quecksilber	20	2	2	3	2	2	3	3	3
Platin	20	1	2	3	3	3	3	2	3
Strontium	19	2	3	2	2	2	2	3	3
Silber	19	2	2	3	2	3	1	3	3
Antimon	19	2	2	2	1	3	3	3	3
Zinn	19	2	3	2	2	3	1	3	3
Magnesium	18	2	3	2	1	2	2	3	3
Wolfram	18	2	2	2	2	2	2	3	3
.....

Abbildung 2.15. – Methodik und Ergebnisse der Studie "Material Security - Ensuring resource availability for the UK economy" für das Vereinigte Königreich (Morley und Eatherley, 2008).
Abkürzungen: Global Warming Potential (GWP), Total Material Requirement (TMR).

Die Risikobewertung der 69 untersuchten Rohstoffe basierte auf einem Risikoindex, der sich aus 8 verschiedenen Subindikatoren zusammensetzt (vergl. Abbildung 2.15). Die Quantifizierung der Subindikatoren erfolgte auf einer Skala von 1 (gering) bis 3 (hoch), wobei sowohl quantitative Daten als auch qualitative Ex-

2. Kritische Rohstoffe

pertenschätzungen in die Bewertung einfließen. Einige Indikatoren und deren Intention werden nachfolgend kurz erläutert:

Globale Nachfrage (A): Die Auswahl dieses Kriterium folgt der Annahme, dass die Abhängigkeit von einem Rohstoff und die ökonomischen Folgen von Versorgungsstörungen mit dem jährlichen Gesamtverbrauch zusammenhängen. Dies bedeutet, dass Massenrohstoffe wie Eisenerz, Aluminium, Kupfer oder Chrom die höchste Risikostufe erreichen.

Beitrag zum Klimawandel (C): Da Umweltrisiken zu strengeren Umweltauflagen und zu Restriktionen für den Abbau ökologisch besonders problematischer Rohstoffe führen können, wird der Beitrag des Rohstoffabbaus zum Klimawandel betrachtet. Die Daten für den Kohlendioxidausstoß pro kg extrahiertem und aufbereitetem Material wurden der Datenbank von Ecoinvent (Swiss Center of Life Cycle Inventory, 2015) entnommen.

Materialverbrauch beim Rohstoffabbau (D): Derselben Logik wie C folgend wird die Menge an Gestein, Gangart, bzw. Ressourcen wie Wasser betrachtet, die für den Abbau von einer Tonne Rohstoff (Konzentrate) bewegt, bzw. benötigt werden.

Vulnerabilität durch die Folgen des Klimawandels (H): Da die Auswirkungen des Klimawandels die Rohstoffproduktion negativ beeinflussen können, z.B. infolge lokaler Konflikte um Wasser, wurden Prognosen zu den regionalen Auswirkungen des Klimawandels mit der Bedeutung dieser Regionen für die weltweite Rohstoffproduktion in Beziehung gesetzt.

Die nach dieser Methode als besonders kritisch für die englische Wirtschaft eingestufteten Metalle sowie das Bewertungsprinzip sind in Abbildung 2.15 zusammengefasst. Durch die starke Gewichtung von Indikatoren, die sich auf Umweltaspekte der Rohstoffgewinnung beziehen (Auswirkungen auf den Klimawandel, Materialverbrauch), weichen die Ergebnisse dieser Studie von anderen Studien ab, die vor allem Konzentrationsmaße der Produktion und Importabhängigkeiten als Bewertungsgrundlage nehmen (vergl. z.B. Gold und Quecksilber als kritische Rohstoffe). Dies verdeutlicht nochmals, wie sehr die Studienergebnisse von der Wahl und Gewichtung der jeweiligen Indikatoren und damit von der individuellen Einschätzung der Autoren abhängen.

Studien der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft (vbw) zur Versorgungssicherheit

Die Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft (vbw) hat 2009 eine Studie in Auftrag geben, um die Kritikalität von Rohstoffen für die bayerische Industrie zu untersuchen und die Sensibilität bei Politik und Unternehmen für dieses Thema zu steigern (vbw, 2009). Eine Aktualisierung der 2009 veröffentlichten Liste kritischer Rohstoffe für die Bayerische Wirtschaft erfolgte 2012 (vbw, 2012).

In der Studie wurden 37 Rohstoffe unter Verwendung eines Rohstoff-Risiko-Index bewertet, der sich aus qualitativen und quantitativen Kriterien zusammensetzt (vergl. Abbildung 2.16, der Rohstoff-Risiko-Index basiert auf einem Ansatz des Instituts der deutschen Wirtschaft (IW Consult). Die Gesamtbewertung des Rohstoffrisikos erfolgt dabei über die gewichtete Summe der einzelnen Kriterien. Die für die Bewertung

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

des Versorgungsrisikos herangezogenen Indikatoren entsprechen weitestgehend denen aus anderen Studien. Lediglich der qualitative Indikator “strategische Industriepolitik” wurde für die spezifische Relevanz von Rohstoffen für wirtschaftspolitische Ziele wie den Ausbau der alternativen Energieversorgung herangezogen. Die für die bayerische Industrie als besonders problematisch identifizierten Rohstoffe sind in Abbildung 2.16 dargestellt.

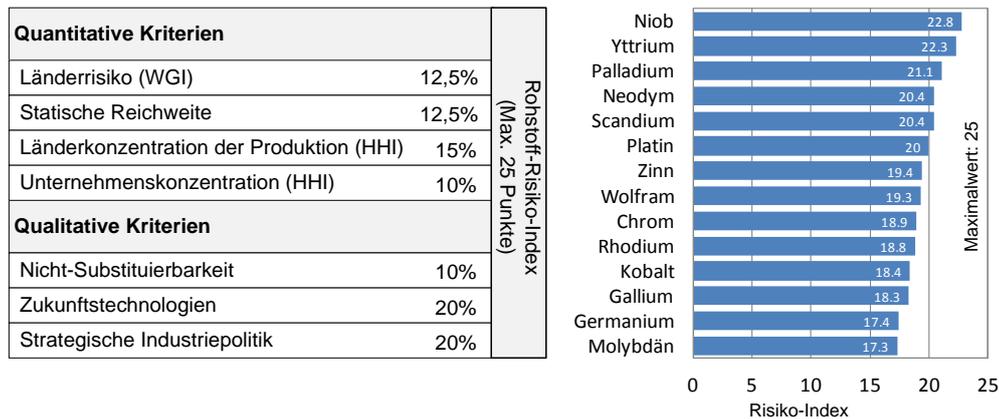


Abbildung 2.16. – Grundlegende Methodik und Ergebnisse der Studie “Rohstoffe langfristig sichern” (vbw, 2012), die als Aktualisierung der 2009 veröffentlichten Studie (vbw, 2009) durchgeführt wurde. Der Rohstoff-Risiko-Index basiert auf einem Ansatz des Instituts der deutschen Wirtschaft (IW Consult).

Landesstudien Hessen, Bayern und Baden-Württemberg (2011-2014)

Weitere Studien zur Rohstoff-Versorgungssituation wurden auf Bundeslandebene für Hessen (vergl. Faulstich et al., 2011b), Bayern (vergl. Faulstich et al., 2011a) und Baden-Württemberg (vergl. Franke et al., 2014) von den jeweiligen Umweltministerien in Auftrag gegeben. Vor dem Hintergrund des weltweit steigenden Rohstoffbedarfs sollten potenzielle Mangelressourcen für die Industrie identifiziert und insbesondere bezüglich ihrer wirtschaftlichen Bedeutung bewertet werden. Weiterhin beinhalten die Studien Analysen des Recyclingpotenzials ausgewählter Rohstoffe sowie weitere Möglichkeiten der Steigerung der Ressourceneffizienz, was allerdings mit der hierarchischen Risikobewertung nicht unmittelbar zusammenhängt und daher für die hier durchgeführte Betrachtung weniger relevant ist.

Die Auswahl der zu untersuchenden Rohstoffe erfolgte auf Literaturbasis (hauptsächlich basierend auf: Erdmann et al., 2011; European Commission, 2010b; Angerer et al., 2009; Buchert et al., 2009), wobei neben den Energierohstoffen Erdöl und Erdgas alle betrachteten Ressourcen der Gruppe der metallischen und mineralischen Rohstoffe zuzuordnen sind. Die hierarchische Rohstoffbewertung wurde auf Basis von drei Indices berechnet (vergl. Abbildung 2.17 links):

1. Der Wirtschaftliche Gewichtungindex (WGI), der die Wichtigkeit eines Rohstoffes auf Bundesebene (basierend auf Erdmann et al., 2011, vergl. auch Abschnitt 2.3.1) gewichtet mit dem Anteil am Umsatz einer bestimmten Branche auf Landesebene,

2. Kritische Rohstoffe

2. ein Mengenindex, der den Verbrauch bestimmter Rohstoffe auf Landesebene ins Verhältnis setzt zum Bundesweiten Rohstoffverbrauch,
3. sowie ein Risikoindex, der hauptsächlich auf verschiedenen vorhandenen Studien zur Risikobewertung der Rohstoffversorgung basiert.

Hierzu wurden die jeweiligen Landesindustrien zunächst eingehend analysiert, die zentralen Wirtschaftszweige (Industriesparten) definiert und die in den jeweiligen Industriesparten benötigten Rohstoffe identifiziert.

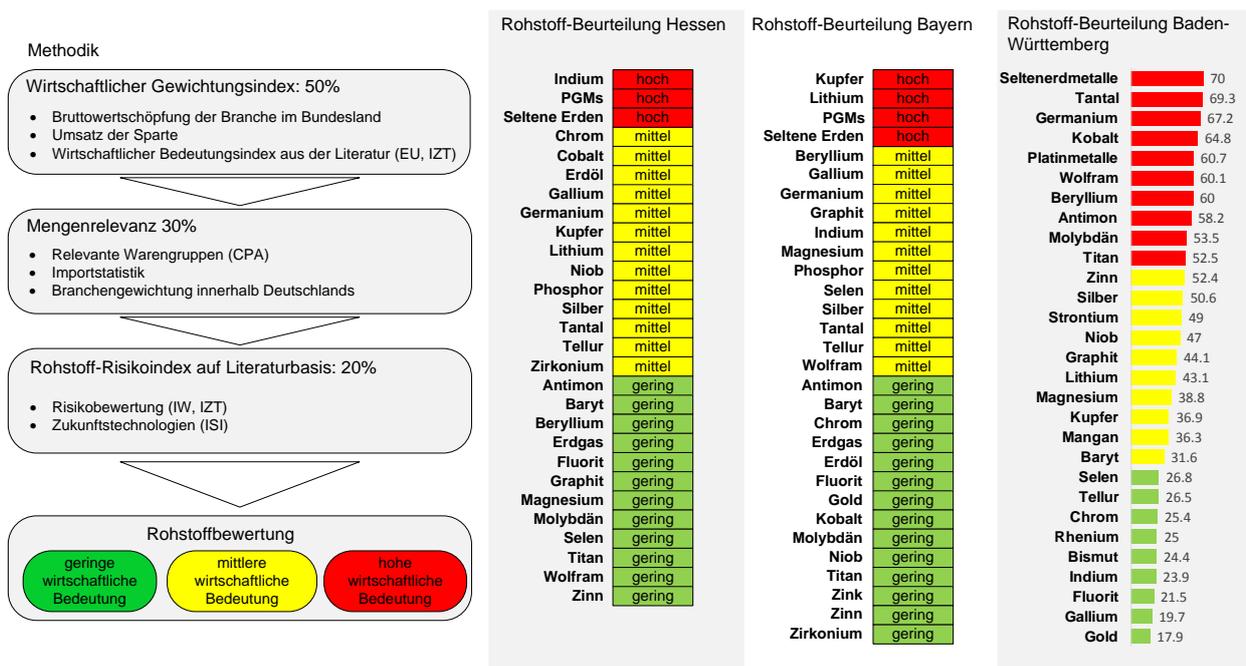


Abbildung 2.17. – Ergebnisse der Studien zur Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung verschiedener, hauptsächlich metallischer Rohstoffe für Hessen (vergl. Faulstich et al., 2011b), Bayern (vergl. Faulstich et al., 2011a) und Baden-Württemberg (vergl. Franke et al., 2014).

Die Berechnung des wirtschaftlichen Gewichtungszindex (WGI_i) für Rohstoff $_i$ erfolgte zunächst über eine Gewichtung des Spartenumsatzes am Umsatz der gesamten Branche. Dieser Term wurde weiterhin gewichtet mit der wirtschaftlichen Bedeutung des jeweiligen Rohstoffes auf Bundesebene ($Vul_{i,Bund}$ vergl. Vulnerabilitätsindex nach Erdmann et al., 2011, siehe auch Abschnitt 2.3.1) unter Berücksichtigung des Verhältnisses der Bruttowertschöpfung der betroffenen Branche auf Landesebene bezüglich der bundesweiten Wertschöpfung. Durch Aufsummierung dieses Branchenindex über alle betroffenen Industriesparten wurde der wirtschaftliche Gewichtungszindex eines Rohstoffes für das jeweilige Bundesland berechnet.

$$WGI_i = \sum_s \frac{\text{Umsatz Sparte}_s}{\text{Umsatz Branche}_{Land}} \cdot \frac{\text{Bruttowertschöpfung Branche}_{Land}}{\text{Bruttowertschöpfung Branche}_{Bund}} \cdot Vul_{i,Bund} \quad (2.4)$$

Der Gesamtrohstoffbedarf nach Industriezweig ist aufgrund der geringen Datenverfügbarkeit und des Wissensdefizits eines Großteils der Industrieverbände nicht eindeutig zu identifizieren. Die Mengenelevanz der

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

Rohstoffe (Mengenindex) wurde daher über spezifische Warenimporte in das jeweilige Bundesland quantifiziert. Hierzu wurde der Quotient der Importe der jeweiligen Rohstoffe in das betrachtete Bundesland und der Importe nach ganz Deutschland (vergl. Handelsstatistik Destatis) gewichtet mit dem Anteil des Bruttoinlandsprodukts des jeweiligen Bundeslandes am Bundesweiten BIP. Demnach wurde zur Bestimmung des Mengenindex untersucht, ob bestimmte Rohstoffe am BIP des betrachteten Bundeslandes einen höheren Anteil haben als im Bundesdurchschnitt.

$$\text{Mengenindex}_i = \frac{\frac{\text{Importe Rohstoff } i_{Land}}{\text{Importe Rohstoff } i_{Bund}}}{\frac{\text{BIP}_{Land}}{\text{BIP}_{Bund}}} = \frac{\frac{\text{Importe Rohstoff } i_{Land}}{\text{BIP}_{Land}}}{\frac{\text{Importe Rohstoff } i_{Bund}}{\text{BIP}_{Bund}}} \quad (2.5)$$

Die Bestimmung des Rohstoff-Risikoindex erfolgte auf Literaturbasis. Hierzu wurde vor allem auf den Risikoindex nach Bardt (2008) zurückgegriffen, der bereits in die Studie der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft einfluss (vergl. Abschnitt 2.3.2). Die Ergebnisse der hierarchischen Bewertung der Rohstoffbedeutung für Baden-Württemberg, Bayern und Hessen sowie eine Übersicht der Indikatoraggregation sind in Abbildung 2.17 zusammengefasst.

2.3.3. Zeitreihenanalysen, statistische Trends und Szenarien

Neben den zuvor erläuterten statischen Screeningmethoden, in denen größere Mengen verschiedener Rohstoffe bezüglich ihres Versorgungsrisikos (einfacher Risikoindex, vergl. Abschnitt 2.3.2), bzw. bezüglich ihrer Kritikalität (Kritikalitätsmatrix, vergl. Abschnitt 2.3.1) bewertet werden, wurden in den vergangenen Jahren auch zahlreiche Studien durchgeführt, die potenzielle Versorgungsengpässe durch die Analyse zukünftiger Entwicklungen auf Angebots- und Nachfrageseite untersuchen. Einige zentrale Studien, für welche die in dieser Arbeit vorgestellten systemdynamischen Modellierungsansätze als Ergänzung aufgefasst werden können (vergl. Kapitel 6), werden im Folgenden hinsichtlich der verwendeten Methoden und Ergebnisse vorgestellt.

Der Ansatz der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Dieser Ansatz wurde von Mitarbeitern der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Zusammenarbeit mit der Volkswagen Konzernforschung (Bereich "Umwelt Produkt") erarbeitet und mit einer Analyse des Kupfermarktes erstmals vorgestellt (Rosenau-Tornow et al., 2009). Weitere Studien für ausgewählte Industrierohstoffe wie z.B. Zink (Buchholz et al., 2010) folgten. Im Gegensatz zu den zuvor untersuchten Ansätzen, die als statische Screeningmethoden eine breite Masse an Rohstoffen untersuchen, bildet dieser Ansatz eine sehr detaillierte, rohstoffspezifische Untersuchung, in den sowohl historische Verläufe des Marktes als auch zukünftige Entwicklungserwartungen auf Angebots- und Nachfrageseite einfließen. Dabei werden bewusst auch kurz bis mittelfristige Entwicklungen (5 bis maximal 15 Jahre) betrachtet, da die Versorgungsproblematik, wie von den Geologen betont, derzeit noch nicht auf zu Neige gehenden Ressourcen basiert (vergl. hierzu auch Abbildung 2.20), sondern auf mittelfristige Diskrepanzen zwischen

2. Kritische Rohstoffe

Angebot- und Nachfrage, was in erster Linie darauf zurückzuführen ist, dass Bergbauprojekte sehr lange Vorlaufzeiten für Exploration, Genehmigungsverfahren, Planung und Bau von Infrastruktursystemen benötigen. Dies macht eine rasche Anpassung des Angebots bei unerwartet hoher Nachfrage unmöglich, was unvermeidlich zu zyklischem Marktverhalten führt (vergl. hierzu auch Kapitel 6).

	Indikator	Erläuterung	Legende	Auswertung								
				1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aktuelle Marktlage auf Angebots- und Nachfrageseite	Marktbilanz $Mb_{i\Delta t} = \frac{P_{it} - Con_{it}}{P_{it}} \times 100$	$Mb_{i\Delta t}$ Marktbilanz P_{it} Produktion (primär und sekundär) Con_{it} Konsum (Gesamtverbrauch)	Aktuelle Marktsituation ↓									
	Marktbilanz mit Lagerständen $Mbs_{i\Delta t} = \frac{P_{it} - \Delta S_{it} - Con_{it}}{P_{it}} \times 100$	$Mbs_{i\Delta t}$ Marktbilanz unter Berücksichtigung der Lagerhaltung P_{it} Produktion (primär und sekundär) Con_{it} Konsum (Gesamtverbrauch) ΔS_{it} Änderung des Lagerbestands (LME)										
	Lagerbestandsindikator $Sk_{i\Delta t} = \frac{S_{it}}{P_{it}} \times 100$	$Sk_{i\Delta t}$ Lagerbestand (stock keeping) P_{it} Produktion (primär und sekundär)										
	Kapazitätsauslastung $RP_{i\Delta t} = \frac{P_{it}}{PC_{it}} \times 100$	$RP_{i\Delta t}$ Produktionsauslastung P_{it} Produktion (primär und sekundär) PC_{it} Produktionskapazität										
Produktionskosten	Gewinnungskosten $CC_{i\Delta t} = \frac{\emptyset CC_{it}}{kg_{it}}$	CC_{it} Cash-Kosten (Herstellkosten ohne Abschreibungen auf Investitionen)	Längerfristige Vergangenheit (<5 Jahre) ↓									
Geostrategische Risiken	Produktionsländerkonzentration $HHI_{Cc} = \sum_c \left(\frac{P_{itc}}{P_{it\text{global}}} \right)^2$	HHI_{Cc} Herfindahl-Hirschmann-Index P_{itc} Produktion Land c $P_{it\text{global}}$ Weltproduktion ($\sum_c P_{itc}$)	Längerfristige Vergangenheit (10 Jahre) ↓									
	Länderbezogene Risiken $CR = \sum_c \left(\frac{P_{itc}}{P_{it\text{global}}} \right) \times WGI_c$	CR Länderrisiko (Country risk) P_{itc} Produktion Land c $P_{it\text{global}}$ Weltproduktion ($\sum_c P_{itc}$) WGI_c World Governance Indicators (Weltbank)	Nähere Zukunft (bis +5 Jahre) ↓									
Marktmacht	Unternehmenskonzentration $HHI_{Ccomp} = \sum_c \left(\frac{P_{it\text{comp}}}{P_{it\text{global}}} \right)^2$	HHI_{Ccomp} Herfindahl-Hirschmann-Index $P_{it\text{comp}}$ Produktion Unternehmen _{comp} (company level) $P_{it\text{global}}$ Weltproduktion ($\sum_c P_{itc}$)	Längerfristige Zukunft (bis +15 Jahre) ↓									
Zukünftige Trends der Angebots- und Nachfrageseite	Zukünftige Marktdeckung $McF_{i\Delta t} = \frac{Dem_{it} \times (1+r)^{\Delta t}}{P_{it} + aPC_{i\Delta t}}$	$McF_{i\Delta t}$ Zukünftige Marktdeckung Dem_{it} Nachfrage zum Zeitpunkt t r jährliche Nachfragesteigerung P_{it} Produktion zum Zeitpunkt t (primär + sekundär) $aPC_{i\Delta t}$ Zusätzliche Produktionskapazität im Zeitraum Δt	Längerfristige Zukunft (bis +15 Jahre) ↓									
	Reservenreichweite $RW_{it} = \frac{R_{it}}{MP_{it}}$	RW_{it} Reservenreichweite R_{it} Reserven zum Zeitpunkt i Con_{it} Konsum (Gesamtverbrauch)										
	Explorationsausgaben $IEx_{i\Delta t} = \frac{ExB_{it}}{MP_{it}}$	$IEx_{i\Delta t}$ Investitionen in Exploration pro t MP_{it} Minenproduktion (Primärproduktion) ExB_{it} Explorationsbudget										
	Attraktivität Mineninvestitionen $IM_{i\Delta t} = \frac{CapC_{it}}{MP_{it}}$	$IM_{i\Delta t}$ Kapitalkosten pro t $CapC_{it}$ Kapitalkosten (Investitionen + Zinsen) MP_{it} Minenproduktion										

Abbildung 2.18. – Ansatz der Bundesanstalt für Geowissenschaft und Rohstoffe (BGR) sowie der Volkswagen Konzernforschung (Bereich “Umwelt Produkt”) zur Bewertung mittelfristiger Versorgungsrisiken metallischer Rohstoffe (vergl. z.B.: Rosenau-Tornow et al., 2009; Buchholz et al., 2010). Die Position der Pfeile zur Auswertung des jeweiligen Indikators dient lediglich als Darstellungsbeispiel. Abkürzungen: LME - London Metal Exchange.

Zur Bewertung der betrachteten Rohstoffmärkte werden in der “BGR-VW-Methode” die Angebots- und Nachfragesituation separat unter Berücksichtigung verschiedener, zum Teil sehr marktspezifischer Indikatoren untersucht. Abbildung 2.18 fasst die für die Bewertung der verschiedenen Bereiche herangezogenen

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

Indikatoren, sowie den auf historischen Vergleichswerten basierenden Bewertungsansatz zusammen. Weiterhin werden gezielt problematische Versorgungslagen in der Vergangenheit untersucht, um ähnliche Situationen in Zukunft frühzeitig erkennen zu können. Folgende Bereiche wurden berücksichtigt:

1. Ausgeglichenheit des aktuellen Marktes unter Berücksichtigung von Lagerbeständen und Kapazitätsausnutzung der Produktion;
2. Minen-Produktionskosten im Verhältnis zum aktuellen Marktpreis;
3. Geostrategisches Risiko unter Berücksichtigung der Produktionskonzentration auf Länderebene und der politischen Stabilität der Förderländer;
4. Marktmacht einzelner Unternehmen durch Analyse der Produktionskonzentration auf Unternehmensebene;
5. Gegenüberstellung von Trends der Angebots- und Nachfrageentwicklung;

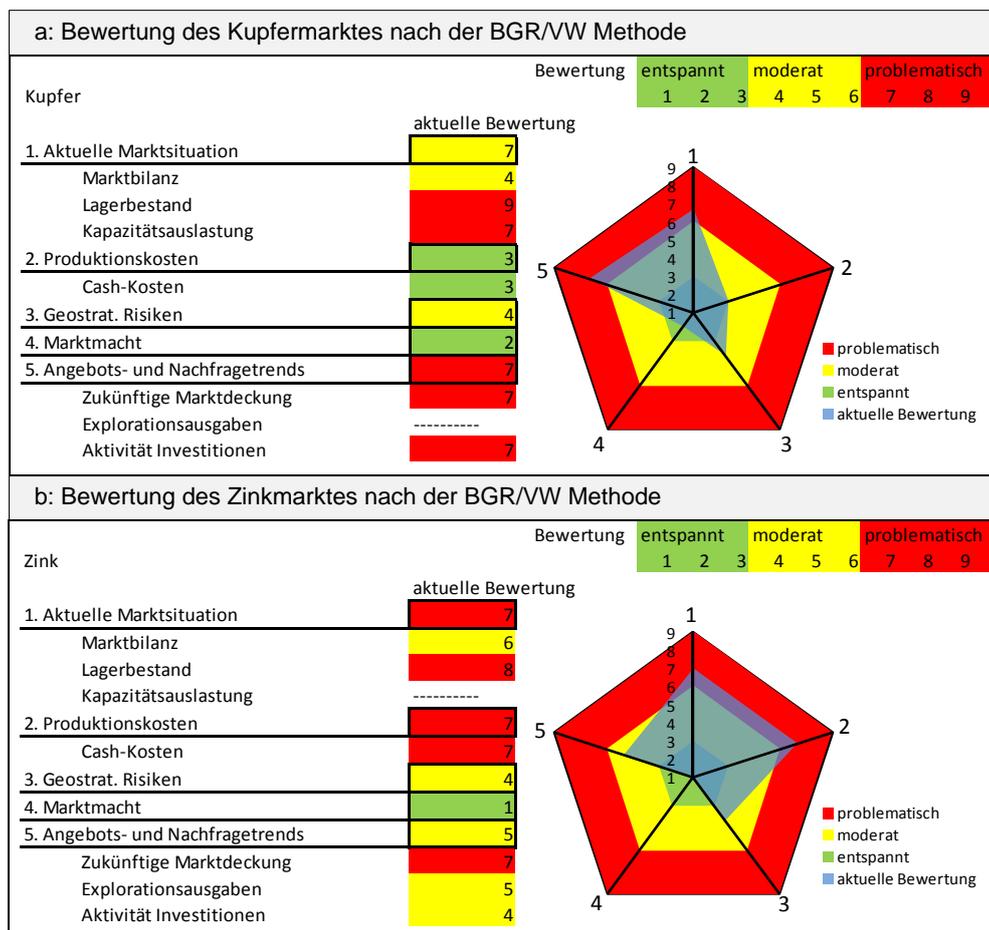


Abbildung 2.19. – Ergebnisse des VW-BGR Ansatzes am Beispiel von Kupfer und Zink:
a: Ergebnisse der oben beschriebenen Bewertung für den Rohstoff Kupfer im Jahr 2008 (vergl. Rosenau-Tornow et al., 2009).
b: Ergebnisse der oben beschriebenen Bewertung für den Rohstoff Zink im Jahr 2010 (vergl. Buchholz et al., 2010).

2. Kritische Rohstoffe

Wie in Abbildung 2.18 zusammengefasst, beinhaltet dieser Ansatz neben klassischen Risikoindikatoren wie Konzentrationsmaße der Produktion (vergl. sonstige Studien in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2) auch sehr marktspezifische Indikatoren, die ein gewisses Maß an Insiderwissen voraussetzen. Dazu gehören z.B. die Analyse der Produktionskostenstruktur des Bergbausektors, oder genauere Kenntnis der Lagerentwicklung, die nicht immer leicht zugänglich ist. Auf Basis einer individuellen Bewertung für die betrachteten Rohstoffe werden jedem Indikator unter Berücksichtigung historischer Entwicklungen Werte zwischen 1 und 9 zugeordnet, wobei die Werte 1-3 als unproblematisch, 4-6 als moderat und 7-9 als angespannt bewertet werden (vergl. Abbildung 2.18 rechte Seite). Schließlich werden die Indikatoren in ihrer jeweiligen Kategorie zusammengefasst, wodurch für jeden Rohstoff eine Bewertung der fünf obengenannten Punkte erfolgt. Beispielhaft ist in Abbildung 2.19 das Ergebnis der Bewertung des Kupfermarktes (vergl. Rosenau-Tornow et al., 2009) sowie des Zinkmarktes (vergl. Buchholz et al., 2010) dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich festgehalten, dass in diesem Ansatz zwar erwartete Entwicklungen von Angebot und Nachfrage gegenübergestellt werden, beide Seiten aber getrennt betrachtet werden. Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten dynamischen Marktmodelle (vergl. Kapitel 6), in denen verschiedene Anpassungseffekte an Rohstoffmärkten in Form von Rückkopplungen unter simultaner Modellierung der Angebots- und Nachfrageentwicklung simuliert werden, können folglich als Ergänzung derartiger Risikobetrachtungen herangezogen werden.

Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen (2006)

Diese 2006 veröffentlichte Studie (Frondelet et al., 2006) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft (BM-WI) in Auftrag gegeben und von Wissenschaftlern des RWI Essen¹⁶, Fraunhofer ISI¹⁷ und der BGR¹⁸ durchgeführt. Die Studie wurde im Zuge des starken Preisanstiegs bei metallischen und mineralischen Rohstoffen seit Beginn des Jahrtausends (vergl. Abbildung 1.1 oben rechts) ausgeschrieben und hatte das Kernziel, eine Einschätzung der langfristigen Versorgung der deutschen Wirtschaft mit nichtenergetischen Rohstoffen zu liefern.

Neben grundsätzlichen Aspekten der derzeitigen Versorgung mit mineralischen Rohstoffen, wie der Umstand, dass vorübergehende Preisanstiege nicht auf zu Neige gehende Reserven zurückzuführen sind (vergl. Verlauf der Kupferreserven in Abbildung 2.20), sondern das Ergebnis von vorübergehenden Diskrepanzen zwischen Angebot und Nachfrage darstellen, wurden vor allem statistisch-ökonomische Trends der Angebots-, Nachfrage- und Preisentwicklung bei ausgewählten Rohstoffen untersucht. Hierzu wurde neben einfachen Trendanalysen (polynomische Regressionen) vor allem die Verwendung von ARMA (Autoregressive Moving Average) Modellen zur Vorausschau der Preisentwicklungen diskutiert, mit dem Ergebnis, dass nahezu alle Preisreihen metallischer Rohstoffe nicht trendstationär sind (also nicht zufällig um einen konstanten Mittelwert schwanken), sondern einem differenzstationären¹⁹ "Random Walk mit Drift" entspre-

¹⁶Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung

¹⁷Institut für System- und Innovationsforschung

¹⁸Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

¹⁹Wenn eine nichtstationäre Zeitreihe nach einfacher Differenzierung (Betrachtung der Änderungsraten) einen stationären Verlauf bekommt, also zufällig um einen konstanten Mittelwert schwankt, wird von differenzstationären Prozessen gesprochen.

chen.

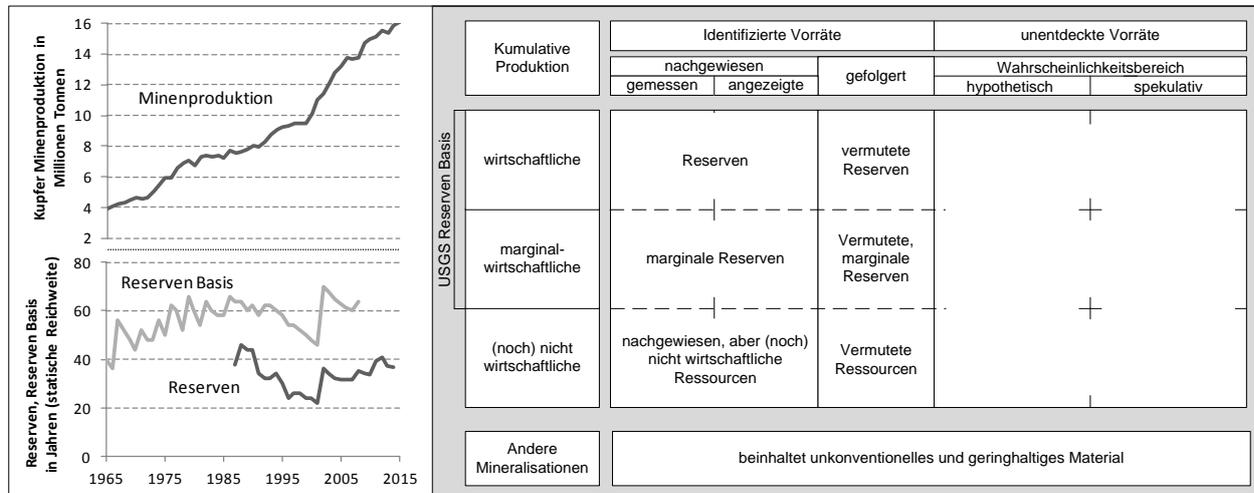


Abbildung 2.20. – Entwicklung der statischen Reichweite (Quotient aus Reserven und heutiger Produktionsmengen) von Kupfer über die Zeit (vergl. Frondel et al., 2006; Buchholz et al., 2010). Durch einen Preisanstieg steigen auch die Reserven (der Anteil der Ressourcen, der auf Basis des aktuellen Preisniveaus wirtschaftlich abgebaut werden kann), was neben der Exploration neuer Vorkommen dazu führt, dass sich die statische Reichweite trotz kontinuierlichen Produktionswachstums im Verlauf der vergangenen 30 Jahre kaum verändert hat.

Da ökonometrische Zeitreihenanalysen nachfolgend nochmals aufgegriffen werden, insbesondere bei der Diskussion der dynamischen Marktmodelle (vergl. Kapitel 6), wird hier deren Prinzip am Beispiel von Preis- und Produktionstrends von Kupfer kurz dargestellt.

Wie aus der Bezeichnung ARMA (Autoregressive Moving Average) bereits zu entnehmen ist, besteht das ökonometrische Modell zur Beschreibung des Zeitreihenverlaufes aus einem Autoregressionsteil, der die zeitversetzte Korrelation der Zeitreihe mit sich selbst abbilden kann und einem gleitenden Durchschnittsterm, um den die um den periodischen Trend bereinigte Zeitreihe zufällig mit konstanter Standardabweichung schwankt, was auch als “weißes Rauschen” bezeichnet wird (siehe Gleichung 2.6).

$$y_t = \underbrace{\left(\varepsilon_t + \sum_{i=1}^n a_i \cdot y_{t-i} \right)}_{\text{Autoregressionsterm}} + \underbrace{\left(\sum_{j=1}^m b_j \cdot \varepsilon_{t-j} \right)}_{\text{Gleitender Durchschnitt}} \quad (2.6)$$

mit:

- a_i – Regressionskoeffizient
- ε_t – Stochastische Abweichung
- b_j – Durchschnittswert in j

Sollte die um den periodischen Trend bereinigte Zeitreihe nicht um einen konstanten Mittelwert schwanken, wird die Zeitreihe in der Praxis so lange differenziert, bis Trendstationarität vorliegt. Die differen-

2. Kritische Rohstoffe

zierte Zeitreihe wird dann wieder integriert, was dann einem ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) Modell entspricht. Ein ARIMA(n,d,m)-Modell ist über n Zeitschritte versetzt mit sich selbst korreliert, wurde d-mal differenziert und bildet über die vergangenen m Zeitschritte einen gleitenden Durchschnitt. Die Vorausschau einer Zeitreihe basierend auf ARIMA Modellen berücksichtigt folglich eine Autokorrelation der Zeitreihe (Korrelation mit sich selbst um eine gewisse Periode versetzt), wie sie bei periodisch zyklischen Zeitreihen zu erkennen ist (vergl. Abbildung 2.21c) und die stochastische Schwankung um einen Mittelwert, deren Standardabweichung aus vergangenen Werten berechnet wird. Durch Projektion des Trends in Verbindung mit den zufälligen Abweichungen von der Trendfunktion entstehen trichterförmige Konfidenzintervalle. Das Grundprinzip dieser Zeitreihenanalysen wird in Abbildung 2.21 an Hand verschiedener Zeitreihenverläufe verdeutlicht.

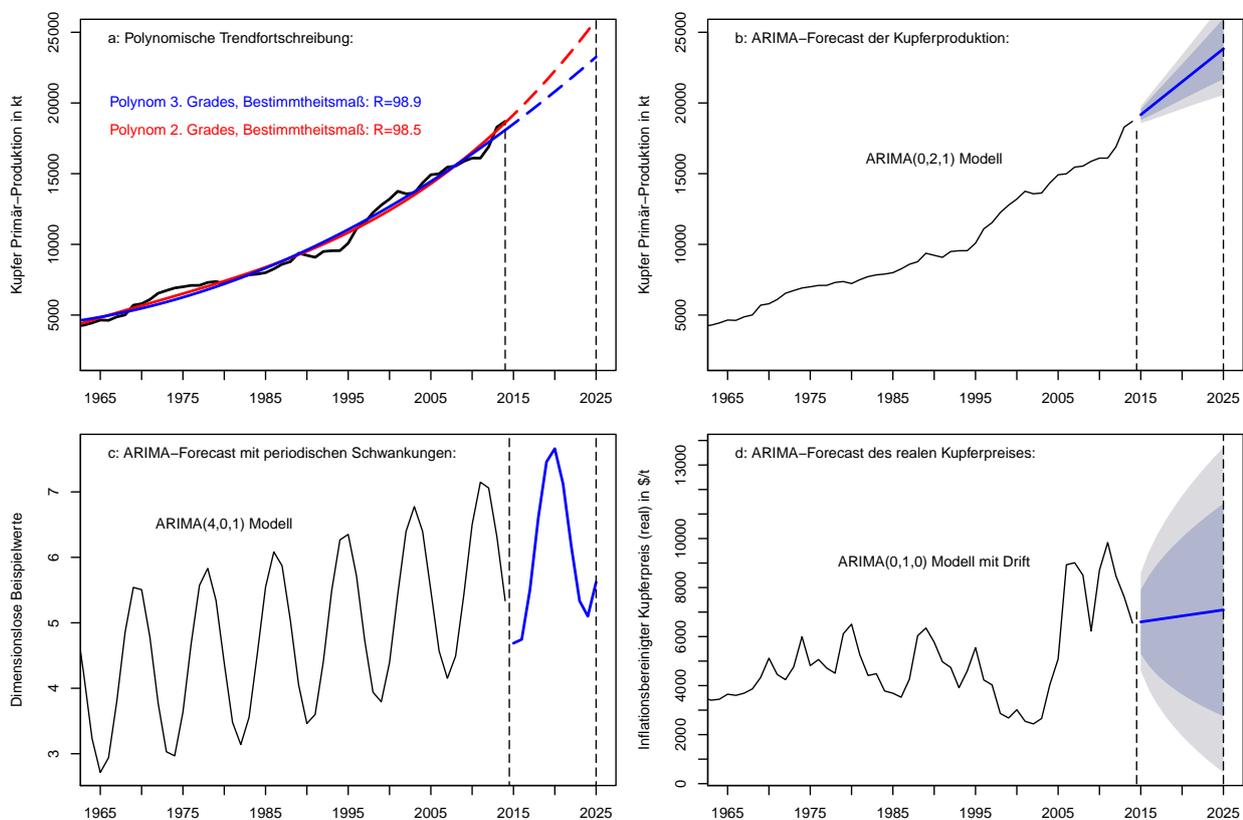


Abbildung 2.21. – Trend- und Autoregressionsmodelle im Vergleich und ihre praktische Verwendbarkeit als einfaches Prognose-Werkzeug (eigene Darstellungen).

a: Polynomische Trendfortschreibung zur Vorausschau auf die zukünftige Kupfer-Minenproduktion.

b: ARIMA-Modell zur Prognose der Primärkupferproduktion durch mehrfache Differenzierung der Zeitreihe.

c: ARIMA-Modell einer periodisch schwankenden Zeitreihe zur Verdeutlichung des Autoregressionsterms.

d: ARIMA-Modell zur Darstellung des zukünftigen Entwicklungsspektrums des Kupferpreises.

Wie in Abbildung 2.21 klar zu erkennen ist, eignet sich die reine Zeitreihenanalyse vor allem zur Pro-

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

gnose von Modellen mit geringen Abweichung von einem deterministischen Trend. Während der Autoregressionsterm eines AR(I)MA-Modells noch in der Lage ist, periodische Schwankungen abzubilden (vergl. Abbildung 2.21c), sind nicht periodische Zyklen, wie sie bei Rohstoffpreisen regelmäßig auftauchen, wie hier am Beispiel des Kupferpreises gezeigt, durch ARIMA-Modelle nur sehr begrenzt abbildbar. Dies zeigt sich an den sehr breiten Verläufen der Konfidenzintervalle (vergl. Trichter in Abbildung 2.21d). Ähnliche Zeitreihenanalysen werden in weiteren aktuellen Untersuchungen zu Angebots- und Nachfrageentwicklungen mineralischer Rohstoffe angesetzt (vergl. z.B. Patiño Douce, Alberto E., 2015).

Weiterhin wurden in dieser Studie Schätzungen zu zukünftiger Rohstoffnachfrage aufgrund technologischer Entwicklungen nach dem in den Gleichungen 2.7 und 2.8 beschriebenen Prinzip durchgeführt. Da diese aus dem Bereich der Energieprognose stammende Methode in der im Folgenden beschriebenen Studie "Rohstoffe für Zukunftstechnologien" übernommen und ergänzt wurde, wird dieser Ansatz im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

Rohstoffe für Zukunftstechnologien (2009, 2016)

Diese ebenfalls vom Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi), bzw. der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Auftrag gegebene Studie wurde von Wissenschaftlern des Fraunhofer ISI sowie des Instituts für Zukunftstechnologien (IZT) durchgeführt und im Jahre 2009 veröffentlicht (Angerer et al., 2009). Ziel dieser Studie war die systematische Analyse der Auswirkung von Zukunftstechnologien auf die Nachfrage nach bestimmten Rohstoffen. Der Zeithorizont wurde dabei zunächst bis in das Jahr 2030 gelegt. Eine Aktualisierung der Studie mit einem Zeithorizont von 2013 bis 2035 erfolgte im Auftrag der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) im Jahr 2016 (Marscheider-Weidemann et al., 2016).

Die Auswahl der zu untersuchenden Rohstoffe sowie der Zukunftstechnologien basierte auf einem wechselseitigen Prozess: Auf der einen Seite wurden Rohstoffe gewählt, deren Versorgungslage als problematisch eingestuft wurde und es wurden systematisch die wichtigsten technischen Verwendungsfelder dieser Rohstoffe identifiziert, auf der anderen Seite wurden Technologien gewählt, die einen hohen Nutzen in absehbarer Zukunft versprachen bzw. von denen ein starkes Wachstum erwartet wurde und es wurden systematisch die Rohstoffe identifiziert, die für die jeweiligen Technologien relevant waren.

Die Vorausschau des Rohstoffbedarfs für die betrachteten Technologien erfolgte dabei über einen technologiebasierten Bottom-up-Ansatz. Dieser Ansatz stammt ursprünglich aus dem Bereich der Prognose zukünftiger Energiebedarfsmengen und berücksichtigt neben der erwarteten durchschnittlichen Wachstumsrate eine Effizienzsteigerung, was sich in Form geringerer spezifischer Rohstoffbedarfe auswirkt.

2. Kritische Rohstoffe

Dabei berechnet sich der spezifische Rohstoffbedarf wie folgt (Gleichung 2.7):

$$R_i = \text{spez Bed}_{i,Tech} \cdot AR_{Tech}$$

mit R_i = Bedarf Rohstoff i in t/a

$$\text{spez Bed}_{i,Tech} = \text{spezifischer Bedarf Rohstoff } i \text{ für Technologie Tech} \quad (2.7)$$

$$AR_{Tech} = \text{Aktivitätsrate der Technologie Tech}$$

Die Aktivitätsrate folgt einer einfachen exponentiellen Wachstumsfunktion und berechnet sich mit Hilfe des Referenzwertes im Basisjahr (hier 2006) nach (Gleichung 2.8):

$$AR_{Tech,2030} = AR_{Tech,2006} \cdot (1 + r)^{24}$$

mit r = geschätzte durchschnittliche Wachstumsrate (2.8)

Hieraus ergibt sich der zukünftige Bedarf aus dem aktuellen Bedarf und der Aktivitätsrate unter Berücksichtigung der Effizienzsteigerung (Gleichung 2.9):

$$R_{i,2030} = R_{i,2006} \cdot \frac{\text{spez Bed}_{i,Tech,2030}}{\text{spez Bed}_{i,Tech,2006}} \cdot (1 + r)^{24} \quad (2.9)$$

Auf diese Weise wurden aus einer Vorauswahl von ca. 100 Zukunftstechnologien 32 Technologien identifiziert, deren Entwicklungen starke Impulse auf die jeweiligen Rohstoffmärkte erwarten ließen. Die Ergebnisse dieser Analyse für insgesamt 19 verschiedene Rohstoffe sind in Tabelle 2.8 dargestellt. Dabei wird der Anteil der heute für die betrachteten Technologien verwendeten Rohstoffmenge an der globalen Produktion (Basisjahr 2006) verglichen mit dem im Jahr 2030 erwarteten Anteil des Bedarfs für die betrachteten Technologien an der aktuellen Produktionsmenge des jeweiligen Metalls (ebenfalls bezogen auf 2006). Für Gallium ergibt sich folglich für das Jahr 2030 ein Bedarf, der mehr als der 6-fachen Menge der heutigen Weltproduktion entspricht (siehe erste Spalte Tabelle 2.8).

Zusammenfassend ist hier anzumerken, dass dieser Ansatz eine extrem vereinfachte, rein nachfragebasierte Vorausschau auf zukünftige Bedarfsmengen darstellt. Dies scheint zur Prognose zukünftiger Energiemengen, auf einem Abstraktionsniveau, das genaue Energieformen und Energiequellen nicht berücksichtigt, sinnvoll. Für die Vorausschau technologiespezifischer Rohstoffbedarfe erscheint dieser Ansatz eher problematisch: Ein Großteil der in Tabelle 2.8 dargestellten Rohstoffe kommen geologisch nur vergesellschaftet mit klassischen Industriemetallen vor und werden aus wirtschaftlichen Gründen auch nur als Neben- oder Kuppelprodukte hergestellt (vergl. Anhang A.1). Eine Technologie, deren Rohstoffversorgung nicht gesichert ist, wird sich kaum am Markt durchsetzen. Entsprechend sind die hier angestellten Prognosen zukünftiger Bedarfsmengen eher aus theoretischer Sicht zu betrachten. Wie nachfolgend erläutert und im Laufe dieser Arbeit gezeigt (vergl. insbesondere Kapitel 4), sind zur Identifikation zukünftiger Versorgungsg-

2.3. Aktuelle Studien zur Quantifizierung von Versorgungsrisiken und Kritikalität

Tabelle 2.8. – Ergebnis der Studie “Rohstoffe für Zukunftstechnologien” (Angerer et al., 2009) in Form der geschätzten Bedarfe einzelner Rohstoffe bezüglich der betrachteten Technologien. Abkürzungen: IC (Integrated Circuit) , WLED (White Light Emitting Diode), SOFC (Solid Oxide Fuel Cell), RFID (Radio-Frequency Identification), FTS (Fischer-Tropsch-Synthese), IR (Infrarot), ATO (Antimon-Tin-Oxide).

Rohstoff	Anteil 2006	Anteil 2030	Betrachtete Zukunftstechnologien
Gallium	0,28	6,9	Dünnschicht-Photovoltaik, IC, WLED
Neodym	0,55	3,82	Permanentmagnete, Lasertechnik
Indium	0,4	3,29	Displays, Dünnschicht-Photovoltaik
Germanium	0,31	2,44	Glasfaser, IR optische Technologien
Scandium	gering	2,28	SOFC Brennstoffzellen, Al-Legierungselement
Platin	gering	1,56	Brennstoffzellen, Katalyse
Tantal	0,39	1,01	Mikrokondensatoren, Medizintechnik
Silber	0,26	0,78	RFID, Bleifreie Weichlote
Zinn	0,62	0,77	Bleifreie Weichlote, transparente Elektroden
Kobalt	0,19	0,4	Lithium-Ionen-Akku, Katalysator für FTS
Palladium	0,1	0,34	Katalyse, Meerwasserentsalzung
Titan	0,08	0,29	Meerwasserentsalzung, Implantate
Kupfer	0,09	0,24	Effiziente Elektromotoren, RFID
Selen	gering	0,11	Dünnschicht-Photovoltaik, Legierungselement
Niob	0,01	0,03	Mikrokondensatoren, Ferrolegierungen
Ruthenium	0	0,03	Farbstoffsolarzellen, Ti-Legierungselement
Yttrium	gering	0,01	Hochtemperatursupraleitung, Lasertechnik
Antimon	gering	gering	ATO, Mikrokondensatoren
Chrom	gering	gering	Meerwasserentsalzung, marine Technik

pässe Modelle gefragt, die die technologische Entwicklung unter Berücksichtigung der beschränkten Rohstoffverfügbarkeit in Verbindung mit möglichen Substitutionsformen (materiell und funktional) betrachten. Nur in den Bereichen, in denen es weder adäquate Alternativtechnologien noch die Möglichkeit der Materialsubstitution gibt, wird es wirklich zu Engpässen kommen. Dies scheint bei vielen der hier betrachteten Technologien nicht der Fall zu sein (siehe z.B. Dünnschichtphotovoltaik, Meerwasserentsalzung etc.).

2.4. Zusammenfassung, Vergleich und Ergänzungen zu den betrachteten aktuellen Studien

Im Anschluss an die Erläuterungen zu den unterschiedlichen Bewertungsansätzen von Rohstoffrisiken und Kritikalität in aktuellen Studien werden im Folgenden einige methodische Ergänzungen und Schlussfolgerungen zu den unterschiedlichen Ansätzen gegeben. Dies soll die Motivation hinter den in dieser Arbeit gewählten Ansätzen verdeutlichen und deren Beitrag zur aktuellen Forschung hervorheben.

2.4.1. Die Kritikalitätsmatrix im Kontext der Risikodefinition

Wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, bildet die Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der Risikobetrachtung in einer Risikomatrix ein passendes Werkzeug zur Quantifizierung von Kritikalität im Sinne des Zusammenspiels aus Vulnerabilität einer Volkswirtschaft bezüglich Versorgungsempässen mit essenziellen Rohstoffen und der Eintrittswahrscheinlichkeit von Versorgungsstörungen. Dennoch gibt es in bisherigen Studien, insbesondere im Ansatz der Europäischen Union (vergl. Abschnitt 2.3.1 European Commission, 2010b, 2014), einige Inkonsistenzen, die im Folgenden diskutiert werden.

Die Verwendung der klassischen Risikomatrix ist in verschiedensten Bereichen verbreitet, so z.B. bei der Bewertung von Klimarisiken (vergl. Smith, 2013), im Bereich der Sicherheitstechnik (e.g. Salvi und Debray, 2006), oder zur Risikoanalyse im Projektmanagement (e.g. Smith et al., 2014). Im vereinfachten binären Fall einer Schadenssituation oder keiner Schadenssituation ist das Risiko definiert als Produkt aus Schadensausmaß und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit (vergl. Gleichung 2.10, sowie z.B. International Standards Organization, 2009; Webster, 2011; Kaplan und Garrick, 1981). Folglich kann das Risiko in diesem Fall als Erwartungswert eines Schadensfalles interpretiert werden.

$$\text{Risiko} = \text{Schadensausmaß} \cdot \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \quad (2.10)$$

Im Falle der Kritikalitätsbetrachtung wird die Vulnerabilität (Schadensausmaß bei Versorgungsstörungen) über das Versorgungsrisiko im Sinne der Eintrittswahrscheinlichkeit von Versorgungsstörungen betrachtet.

$$\text{Rohstoff-Kritikalität} = \text{Vulnerabilität} \cdot \text{Versorgungsrisiko} \quad (2.11)$$

Nach der in Gleichung 2.11 gegebenen Definition lässt sich folglich eine Kritikalitätsmatrix analog zur Risikomatrix definieren (vergl. Abbildung 2.22). Zu beachten ist hierbei allerdings, dass in klassischen Risikomatrizen meist eine logarithmische Skalierung verwendet wird, was zu parallelen Risikoniveaus führt (vergl. Kästchen einheitlicher Farbe in der Risikomatrix in Abbildung 2.22). Da für die indikatorbasierten Ansätze zur Quantifizierung der Koordinaten eines Rohstoffes innerhalb der Kritikalitätsmatrix (Vulnerabilität und Versorgungsrisiko) in den zuvor betrachteten Studien von linearen Zusammenhängen ausgegangen wird, ergeben sich die Niveaus einheitlicher Kritikalität (Isolinien) als konvexe Kurven, wie in Abbildung 2.22

2.4. Zusammenfassung, Vergleich und Ergänzungen zu den betrachteten aktuellen Studien

unten dargestellt.

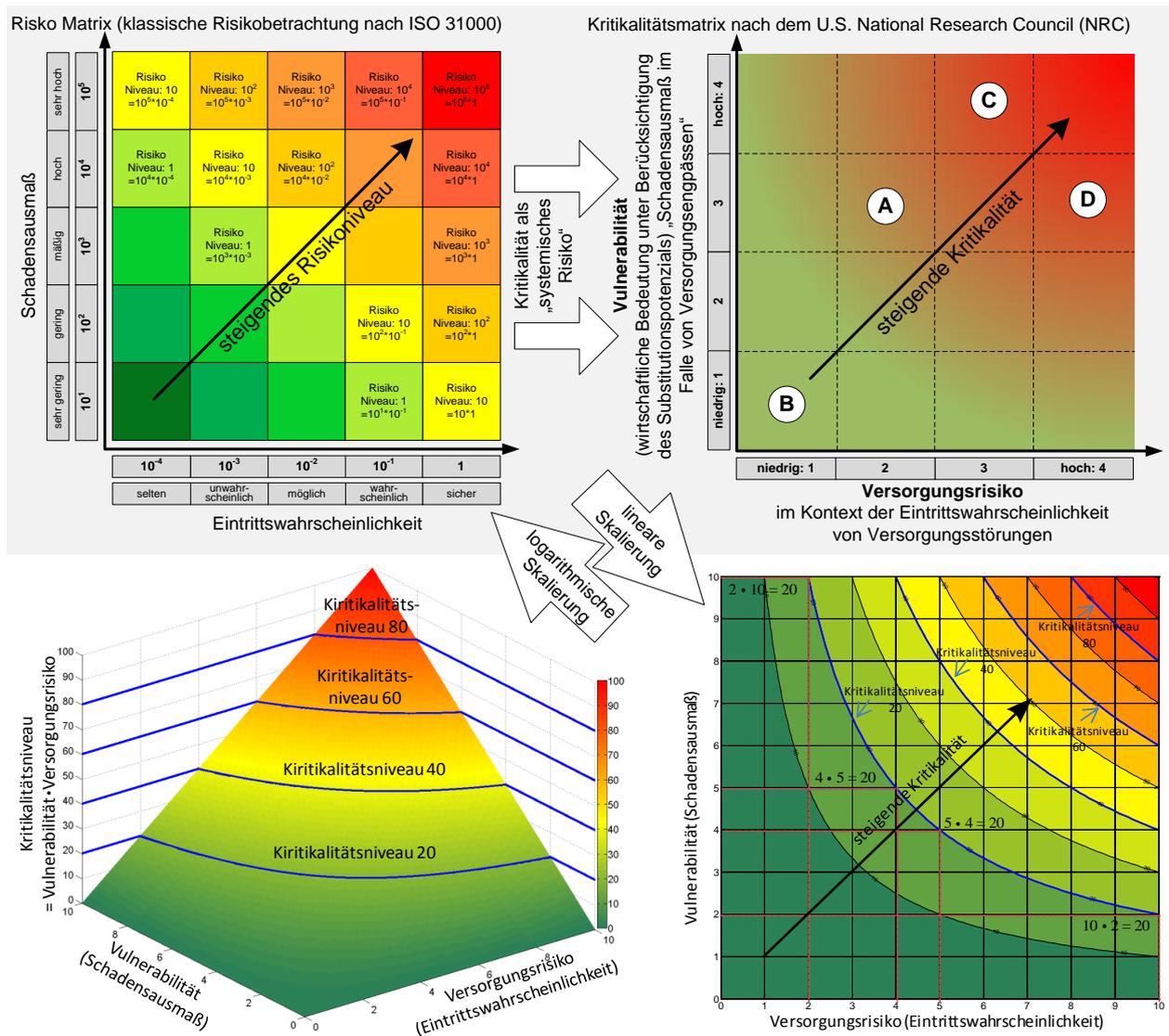


Abbildung 2.22. – Kritikalität im Kontext der klassischen Risikodefinition. Da Risikomatrizen meist logarithmisch skaliert sind, verlaufen die Risikoniveaus parallel (vergl. Risikomatrix links oben). Im Falle der linear skalierten Kritikalitätsmatrix verlaufen die Höhenlinien einheitlichen Kritikalitätsniveaus allerdings konvex (vergl. Kritikalitätsmatrix unten rechts).

Diese quantitativen Aspekte der Kritikalitätsmatrix wurden in den meisten bisherigen Studien nicht ausreichend berücksichtigt. Während der Nationale Forschungsrat der USA (NRC, 2008, vergl. auch Abschnitt 2.3.1) die Kritikalitätsmatrix noch eher als qualitatives Werkzeug zur Darstellung und Kommunikation von Versorgungsrisiken und Vulnerabilitäten nutzte, ist der Ansatz der EU (European Commission, 2010b, 2014, vergl. auch Abschnitt 2.3.1) ein rein quantitativer. Die Wahl der Begrenzung zwischen kritischen und nicht kritischen Elementen, die pauschal festgelegt wurde und parallel zu den Achsen verläuft, widerspricht dem Prinzip der Risikodefinition. Dies wird deutlich, wenn eine direkte Projektion der Er-

2.4. Zusammenfassung, Vergleich und Ergänzungen zu den betrachteten aktuellen Studien

Dies wird insbesondere bei der Betrachtung der Rohstoffe “Borat” und “Chrom” klar, die beide genau auf der Begrenzung zwischen kritischen und nicht kritischen Rohstoffen liegen, also gerade noch als kritisch eingestuft werden (vergl. Abbildung 2.23 a). De facto haben beide Rohstoffe denselben Wert bezüglich des Versorgungsrisikos, aber Chrom wird als einem zentralen Stahl-Legierungselement eine weit höhere wirtschaftliche Bedeutung zugewiesen. Die wirtschaftliche Bedeutung von Vanadium (ebenfalls sehr wichtig für die Stahlindustrie) wird sogar noch höher eingestuft, aber wegen des minimal geringeren Versorgungsrisikos wird Vanadium nicht als kritisch betrachtet. Bei Betrachtung der Kritikalitätsniveaus in Abbildung 2.23 b, fällt allerdings sofort auf, dass auch Vanadium weit kritischer einzustufen wäre als Borat. Neben der Diskussion um die richtige Wahl und Gewichtung der Indikatoren zur Quantifizierung der Koordinaten eines Rohstoffes innerhalb der Kritikalitätsmatrix, ist wie in Abbildung 2.23 klar zu erkennen, auch die Interpretation der jeweiligen Position innerhalb der Matrix entscheidend für die Studienergebnisse. Hier besteht nicht nur im Ansatz der EU Verbesserungspotenzial (vergl. Glöser et al., 2015). Im Gegensatz zur Definition einer fixen Liste von kritischen Rohstoffen ermöglicht die Betrachtung der Kritikalität in einer Matrix mit Isolinien zusätzlich eine hierarchische Gewichtung der Ergebnisse in einem Histogramm an Hand des Kritikalitätsniveaus ähnlich zu den Ergebnissen einer reinen Risiko-Index-Betrachtung (vergl. Abschnitt 2.3.2). Dies wird bei der Übertragung der Ergebnisse aus bisherigen Studien in eine einheitliche Kritikalitätsmatrix deutlich. Weiterhin lassen sich durch die einheitliche Skalierung der Achsen die Ergebnisse aus verschiedenen Studien vergleichen. Abbildung 2.24 zeigt am Beispiel der Studie des Nationalen Forschungsrats der USA (vergl. Abschnitt 2.3.1) das Prinzip der Übertragung der Ergebnisse aus verschiedenen Studien in eine einheitliche Matrix durch Normierung der Koordinaten auf pauschal festgelegte Werte zwischen 1 und 10.

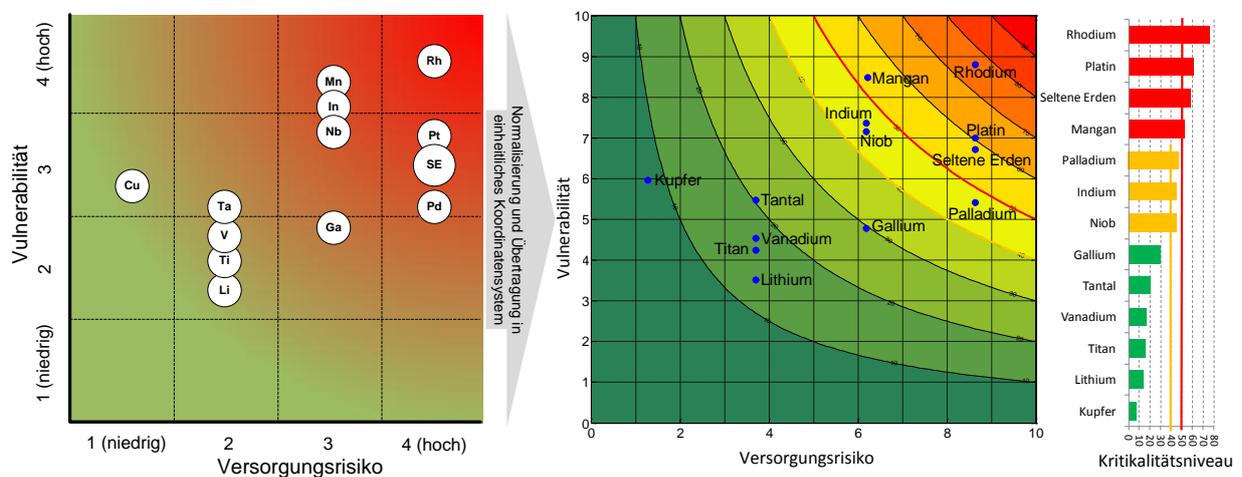


Abbildung 2.24. – Prinzip der Skalierung in einheitlicher Kritikalitätsmatrix am Beispiel der NRC Studie. Die Kritikalitätsniveaus ermöglichen zusätzlich eine hierarchische Darstellung der analysierten Rohstoffe in einem Histogramm analog zu den reinen Risiko-Index-Analysen (vergl. Abschnitt 2.3.2).

2. Kritische Rohstoffe

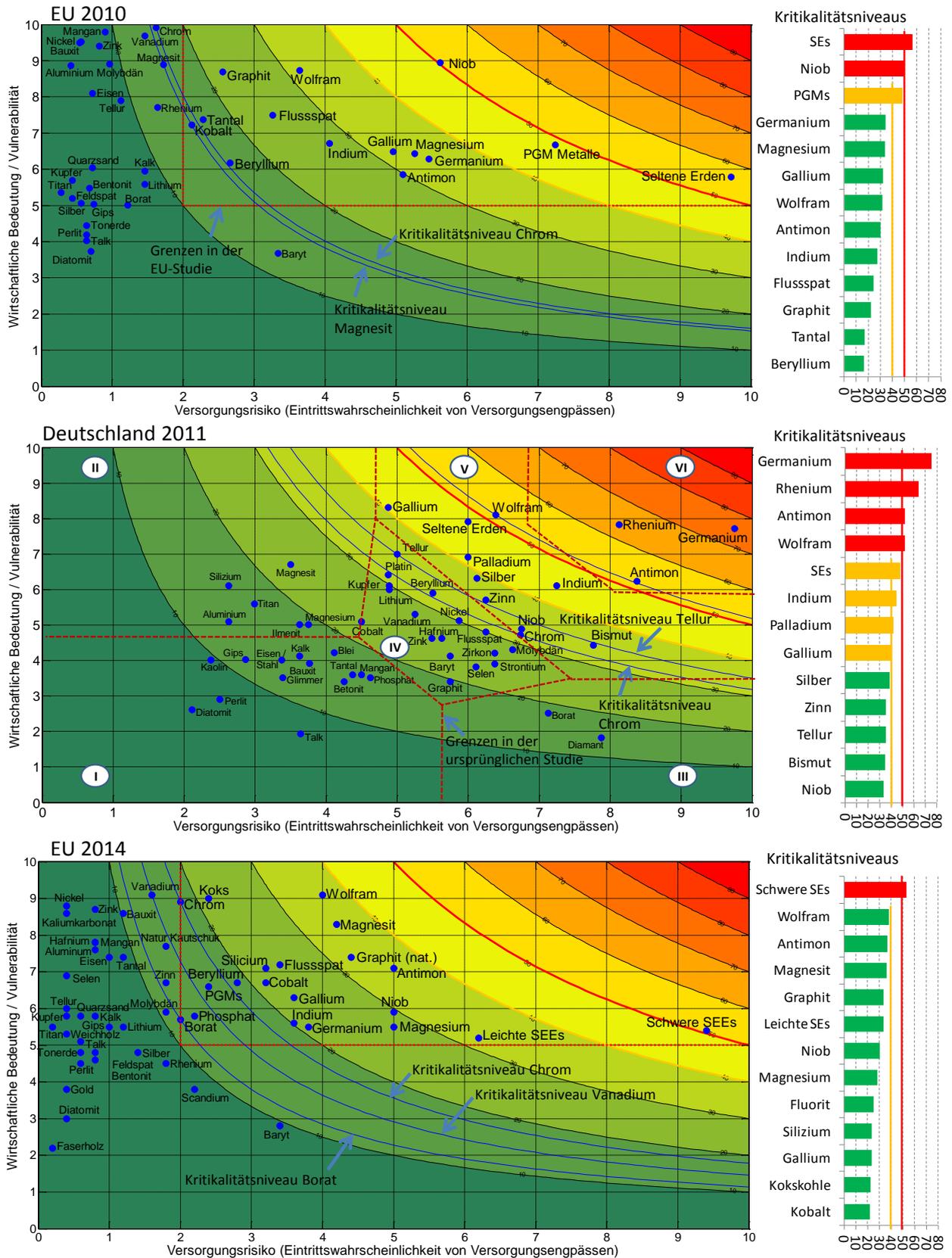


Abbildung 2.25. – Einheitliche Skalierung der EU-Studien (European Commission, 2010b, 2014), sowie der KfW Studie für Deutschland (Erdmann et al., 2011).

2.4. Zusammenfassung, Vergleich und Ergänzungen zu den betrachteten aktuellen Studien

Die Ergebnisse der Übertragung der beiden EU Studien (vergl. auch Abschnitt 2.3.1 European Commission, 2010b, 2014) sowie der KfW Studie (siehe Abschnitt 2.3.1 Erdmann et al., 2011) in eine einheitliche Matrix mit Kritikalitätsniveaus nach dem zuvor beschriebenen Prinzip sind in Abbildung 2.25 dargestellt. Weiterhin zeigt Abbildung 2.25 die Abweichungen zwischen den in diesen Studien gewählten Begrenzungen und den Isolinien der Kritikalitätsmatrix nach Abbildung 2.22.

Auch ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Erweiterung der Kritikalitätsmatrix um die 3. Dimension der Umwelteinwirkungen der Rohstoffgewinnung und die Definition der Kritikalität als Vektorlänge der durch die Punkte im Raum aufgespannten Vektoren (Graedel et al., 2012, vergl. auch Abschnitt 2.3.1) mit der Definition der Kritikalität als Abstraktion der Risikobetrachtung nicht unmittelbar vereinbar ist. Die Länge eines Vektors im 3-dimensionalen Raum berechnet sich wie Gleichung 2.12 zeigt durch Aufsummierung der quadrierten Koordinaten und anschließender Wurzelbildung.

$$\text{Vektorlänge}_i = \sqrt{\text{Vulnerabilität}_i^2 + \text{Versorgungsrisiko}_i^2 + \text{Umwelteinwirkungen}_i^2} \quad (2.12)$$

Dies entspricht eher der Aggregation von Subindikatoren zu einem Gesamtindex und steht im Gegensatz zur multiplikativen Definition der Kritikalität nach Gleichung 2.11. Das soll nicht heißen, dass eine mehrdimensionale Betrachtung zur Visualisierung verschiedener Dimensionen der Rohstoffgewinnung (z.B. eine Nachhaltigkeitsbetrachtung unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte der Rohstoffgewinnung) nicht sinnvoll ist. Jedoch ist eine derartige Erweiterung der Kritikalitätsmatrix um eine 3. Dimension und die Bestimmung der Gesamtkritikalität als Vektorlänge nicht mit der klassischen Risikodefinition vereinbar.

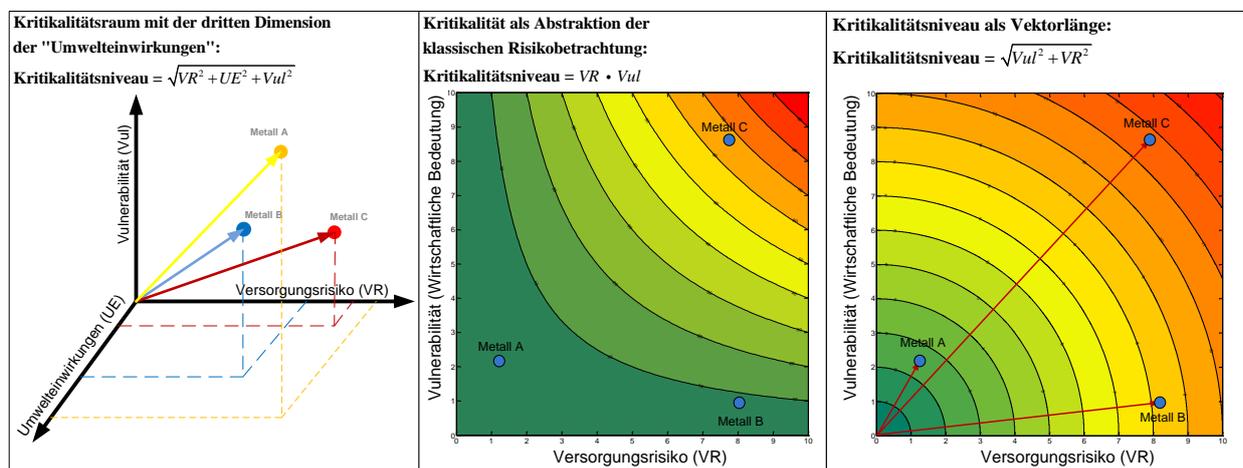


Abbildung 2.26. – Darstellung des Unterschieds zwischen dem Kritikalitätskonzept als Abstraktion der Risikobetrachtung (konvexe Kritikalitätsniveaus) und der Erhebung der Kritikalität als Vektorlänge (konkave Kritikalitätsniveaus). Die Vektorbetrachtung entspricht einer additiven Aggregation der Koordinaten und ist von der Risikobetrachtung als Produkt aus Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit zu unterscheiden.

In diesem Fall erscheint es sinnvoller, nach dem Ansatz der EU (vergl. Abschnitt 2.3.1), die Umweltauswirkungen der Rohstoffgewinnung in die Betrachtung des Versorgungsrisikos mit einzubeziehen. Dies wirkt

2. Kritische Rohstoffe

auch aus der Risikoperspektive sinnvoll, da Rohstoffe, deren Abbau und Aufbereitung mit erheblichen Umweltbelastungen zusammenhängen, im Allgemeinen auch zusätzlichen Versorgungsrisiken ausgesetzt sind. So können sich sowohl höhere Umweltauflagen in den Bergbauländern, als auch Regulierungsmaßnahmen in den Verbraucherländern (z.B. durch Zertifizierung) auf die Versorgung mit bestimmten Rohstoffen auswirken. Der Unterschied zwischen den Kritikalitätsniveaus bei multiplikativer Risikobetrachtung und additiver Vektorlänge wird in Abbildung 2.26 nochmals verdeutlicht.

2.4.2. Multiindikatorsysteme zur Risikobewertung

Wie in Abschnitt 2.3.2 gezeigt, ist das Prinzip des Aufaggregierens verschiedener Subindikatoren zu einem übergeordneten Risikoindikator ein einfacher, pragmatischer Ansatz, der als erstes Screening einer größeren Menge von Rohstoffen zur Identifikation potenzieller Risikokandidaten durchaus sinnvoll erscheint. Allerdings wirken sich die Wahl und die Gewichtung der Indikatoren wie bei allen Multiindikatoransätzen stark auf die Ergebnisse aus. Hier erscheint es sinnvoll, über statistische Ansätze zusätzliche Einblicke in Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Zusammenhänge zwischen einzelnen quantitativen Subindikatoren zu liefern. Erste statistisch-ökonomische Ansätze zur Kritikalitätsbewertung anhand von multiplen Regressionsanalysen wurden in jüngster Vergangenheit bereits vorgestellt (vergl. Gleich et al., 2013; Mayer und Gleich, 2015). Eine beispielhafte Analyse verschiedener Rohstoffmerkmale auf Basis von passenden Methoden aus dem Bereich der Multivariaten Statistik wird im folgenden Kapitel als potenzielle Ergänzung zu statischen Multiindikatoransätzen durchgeführt.

2.4.3. Zeitreihen- und Trendanalysen

Im Gegensatz zu den zuvor genannten Screening Methoden innerhalb einer Kritikalitätsmatrix oder als Risikoindex durch Multiindikatoraggregation werden “dynamische”²⁰ Ansätze im Allgemeinen nicht als Screening größerer Rohstoffmengen, sondern sehr stoffspezifisch für ausgewählte Rohstoffe durchgeführt. Was alle zuvor beschriebenen Ansätze gemeinsam haben, ist die getrennte Betrachtung von Angebot und Nachfrage. Teilweise werden sogar ausschließlich nachfrageseitige Betrachtungen durchgeführt, die suggerieren, dass ein ausreichendes Angebot zur Verfügung steht. Faktisch ist allerdings ein Rohstoffmarkt als dynamisches System zu verstehen, dessen Komponenten in Beziehungen zueinander stehen. Eine Knappheit, sei sie hervorgerufen durch starkes Nachfragewachstum oder durch Angebotsrestriktionen, führt zu steigenden Preisen, was sich wiederum auf Änderungen in der Nachfrage, z.B. durch Substitution, und auf Anpassungsreaktionen des Angebots, z.B. in Form von Kapazitätserweiterungen oder Investitionen in neue Produktionsanlagen, auswirkt. Diese Rückkopplungseffekte sind allerdings häufig zeitverzögert (insbesondere aufgrund von Vorlaufzeiten für Planung und Bau neuer Produktionsanlagen oder wegen der Entwicklungsdauer alternativer Werkstoffe zur Substitution knapper Ressourcen), was zu einer entsprechenden Komplexität führt.

²⁰An dieser Stelle werden diejenigen Ansätze, die die zeitliche Dimension berücksichtigen, also Entwicklungen über die Zeit aufzeigen, unabhängig von der Betrachtung der sich ändernden Wechselwirkungen und Rückkopplungseffekten als dynamisch bezeichnet.

2.4. Zusammenfassung, Vergleich und Ergänzungen zu den betrachteten aktuellen Studien

Dieses Zusammenspiel aus Angebot und Nachfrage, bzw. die Nachfrageentwicklung unter einer entsprechenden Angebotsbeschränkung wird in diesen Studien nicht ausreichend betrachtet. So wird in Tabelle 2.8 suggeriert, dass sich die Nachfrage nach bestimmten Technologiemetallen bis 2030 vervielfältigen wird, ohne die Tatsache zu berücksichtigen, dass die meisten dieser Metalle keine eigene Produktionsinfrastruktur besitzen und an die Produktion ihrer Trägermetalle gebunden sind. Auch bei einer Vervielfachung der Preise lohnt sich allein der Mengen wegen eine vom Hauptmetall unabhängige Produktion häufig nicht. So wird sich eine Technologie, deren Rohstoffverfügbarkeit nicht gesichert ist, am Markt auch nicht durchsetzen, es sei denn in anderen Bereichen wird Material eingespart.

2.4.4. Aus der Literaturrecherche abgeleiteter Forschungsbedarf

Wie bereits eingangs erwähnt, ist es nicht das Ziel der vorliegenden Arbeit eine weitere Studie zur Risikobewertung der Rohstoffversorgung vorzulegen. Vielmehr werden basierend auf den zuvor erbrachten Erläuterungen, Ergänzungen zu bisherigen Ansätzen vorgestellt und diskutiert.

Bezüglich der statischen Multiindikatoransätze werden statistische Cluster- und Skalierungsmethoden untersucht, die als Ergänzung zu den Risikobewertungen gewisse Zusammenhänge und Ähnlichkeiten bezüglich der Markteigenschaften verschiedener metallischer und mineralischer Rohstoffe aufzeigen können.

Während die Screeningmethoden innerhalb einer Kritikalitätsmatrix (vergl. Abschnitt 2.3.1) bisher rein statische Analysen darstellen (Momentaufnahmen), werden im folgenden Kapitel indikatorbasierte Ansätze zur retrospektiven Modellierung der Kritikalität über die Zeit basierend auf historischen Zeitreihen vorgestellt und an Hand verschiedener Rohstoffe erprobt.

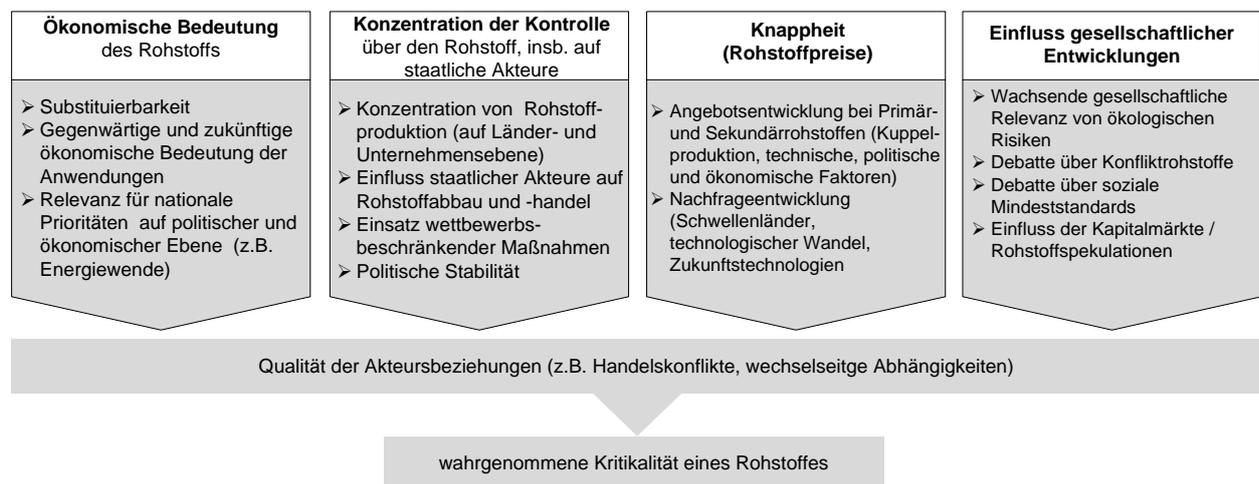


Abbildung 2.27. – Kritikalitätskonzept unter Berücksichtigung zentraler politischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Einflussfaktoren (vergl. Gandenberger et al., 2012, S.59).

Wichtigster Bestandteil dieser Arbeit ist Konzipierung und Umsetzung systemdynamischer Rohstoffmodelle, die die Verwendungsstruktur der betrachteten Metalle von der Gewinnung, über die Verarbeitung und Produktverwendung bis hin zur Verschrottung und möglichem Recycling abbilden und die physischen Ma-

2. Kritische Rohstoffe

terialflüsse auf globaler und regionaler Ebene simulieren sowie quantifizieren. Eine Erweiterung dieser Modelle um Rückkopplungseffekte auf Angebots- und Nachfrageseite ermöglicht eine detailliertere Abbildung des dynamischen Marktverhaltens als es in den zuvor beschriebenen Studien realisiert wurde.

Wie von Gandenberger et al. (2012) erläutert, ist die wahrgenommene Kritikalität der Rohstoffversorgung ein komplexes Zusammenspiel aus zahlreichen sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren, die durch vereinfachende quantitative Ansätze nur bedingt abgebildet werden können (vergl. Abbildung 2.27).

Dennoch sollen die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden und Modelle einen gewissen Beitrag zur Darstellung der dynamischen Zusammenhänge an Rohstoffmärkten sowie zur Erhöhung der Transparenz von Materialverwendungsstrukturen leisten, was als Grundlage für die Entwicklung und Bewertung von Maßnahmen zur Reduzierung von Versorgungsrisiken, z.B. durch eine effizientere Nutzung von Recyclingpotenzialen, dienen kann.

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

Im folgenden Kapitel werden verschiedene methodische Ergänzungen zu den indikatorbasierten Bewertungsansätzen der Kritikalität bzw. des Versorgungsrisikos diskutiert. Hierzu werden sowohl strukturgebende, dimensionsreduzierende Analysen aus dem Bereich der Multivariaten Statistik als auch erste indikatorbasierte Ansätze zur Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes über historische Zeitreihen dargestellt und diskutiert¹.

3.1. Analyse von Rohstoffeigenschaften durch Methoden der Multivariaten Statistik

Zur Untersuchung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden, bzw. strukturellen Zusammenhängen der für die Kritikalitätsbewertung relevanten Eigenschaften, wurden verschiedene Methoden der Multivariaten Statistik verwendet. Diese Methoden sollen keineswegs die Quantifizierung der Kritikalität in der Kritikalitätsmatrix oder Risikobewertung als Multiindikatoransatz ersetzen, sondern zusätzliche Erkenntnisse über Ähnlichkeiten zwischen einzelnen Rohstoffen hinsichtlich ihrer Markteigenschaften, bzw. gemeinsam auftretende Merkmale aufzeigen. Die hier vorgestellten Verfahren sind folglich als Ergänzung zur Kategorisierung und zum Clustern der Rohstoffe hinsichtlich verschiedener Merkmalsausprägungen zu verstehen. Neben den als kritisch eingestuften Rohstoffen aus den zuvor vorgestellten Studien wurden in die Betrachtung weitere “klassische” Industriemetalle wie Kupfer, Aluminium, Nickel und Blei aufgenommen, um eine gewisse Referenz zu kritischen Rohstoffen zu bekommen. Dies soll den Unterschied zwischen diesen klassischen Industriemetallen mit eigener Produktionsinfrastruktur und typischen “Technologiemetallen” hervorheben, die häufig nur als Kuppelprodukt gewonnen werden, deren Nachfrage oft von wenigen, sich schnell verbreitenden Technologien abhängt und deren Märkte in der Vergangenheit relativ hohe Volatilitäten aufwiesen.

3.1.1. Identifikation relevanter Eigenschaften aus bisherigen Studien

Die im folgenden Abschnitt durchgeführten statistischen Analysen bauen auf den in Kapitel 2 beschriebenen indikatorbasierten, statischen Screening-Methoden zur Kritikalitätsbewertungen auf. Dabei wurden

¹Ergebnisse aus diesem Kapitel wurden im Zuge der Dissertation als Konferenzbeitrag (Glöser und Faulstich, 2014) veröffentlicht.

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

sowohl diejenigen Studien, die auf dem Prinzip der Kritikalitätsmatrix basieren (vergl. Abschnitt 2.3.1), als auch Multiindikatoransätze zur Bestimmung eines Risiko-Index (vergl. Abschnitt 2.3.2) berücksichtigt. Tabelle 3.1 fasst die verschiedenen Studien, die jeweils herangezogenen Indikatoren sowie die als kritisch identifizierten Rohstoffe zusammen.

Tabelle 3.1. – Herangezogene Indikatoren zentraler Studien zur Bewertung von Rohstoffrisiken und Kritikalität (vergl. Achzet und Helbig, 2013). Die Indikatoren sind nach ihrer Häufigkeit absteigend von links nach rechts sortiert.

Studie	Indikatoren											Als kritisch identifizierte Rohstoffe	
	Produktionskonzentration Länder	Statische Reichweite	Anteil Nebenprodukt	Konzentration Unternehmen	Nachfragewachstum	Recyclingrate	Substituierbarkeit	Importabhängigkeit	Preisniveau	Preisvolatilität	Häufigkeit Erdkruste		Entwicklung Primärproduktion
“Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy” (NRC, 2008)		⊗	⊗			⊗		⊗					Rh, Re, Mn, Sb, Ga, In, Pt, Pd, SEE
“Design in an Era of Constrained Resources” (Duclos et al., 2008)	⊗		⊗		⊗		⊗		⊗	⊗	⊗		SEE, Ga, In, Pt, Pd
“Critical raw materials for the EU” (European Commission, 2010b, 2014)	⊗					⊗	⊗						SEE, Mg, Nb, Ge, In, Ga, Co, Be, PGM, Si, Sb, W
“Critical Materials Strategy” (U. S. DoE, 2010, 2011)	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗								Dy, Eu, Tb, Y, Nd
“Kritische Rohstoffe für Deutschland” (Erdmann et al., 2011)	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗							Re, Ge, Sb, W, In, Bi, SEE, Ga, Pd, Ag, Sn, Nb
“Methodology of criticality determination” (Nassar et al., 2012b)	⊗	⊗	⊗										kein direktes Screening
“Rohstoffsituation Bayern” (vbw, 2009)	⊗	⊗		⊗	⊗		⊗						Nb, Y, Pd, Nd, Sc, Pt, Sn, W, Cr, Rh, Co, Ga, Ge
“Ensuring resource availability for the UK economy” (Morley und Eatherley, 2008)	⊗	⊗											Ag, Rh, Hg, Pt, Sr, Ag, Sb, Sn, Mg, W
“Critical Metals in Strategic Energy Technologies” (Moss et al., 2011, 2013)	⊗		⊗		⊗								Nd, Dy, Ge, Ga, In, Pt, Pd, Y, Tb
“Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials” (Rosenau-Tornow et al., 2009)	⊗	⊗		⊗								⊗	kein direktes Screening
“Critical Metals for Future Sustainable Technologies” (Buchert et al., 2009)	⊗	⊗	⊗										SEE, Ga, In, Pt, Pd
“Trends in Angebot und Nachfrage mineralischer Rohstoffe” (Frondel et al., 2006)	⊗							⊗					kein direktes Screening
“Rohstoffe für Zukunftstechnologien” (Angerer et al., 2009)					⊗								Ga, Nd, In, Ge, Sc, Pt, Ta, Ag
Häufigkeit des verwendeten Indikators	11	8	7	4	5	3	3	2	1	1	1	1	

Neben den in Tabelle 2.2 aufgezeigten Eigenschaften wurden zusätzliche Merkmale zur Beschreibung von Rohstoffmärkten auf globaler Ebene in die statistische Betrachtung einbezogen. Dabei lag der Fokus auf einer Berücksichtigung möglichst vieler eindeutig quantifizierbarer Merkmale, die bei der Bewertung von Versorgungs- und Preisrisiken eine Rolle spielen könnten. Aufgeteilt in die übergeordneten Kategorien Nachfrage, Angebot, Preis und Handel werden die nachfolgend aufgelisteten 16 Rohstoffmerkmale berücksichtigt:

3.1. Analyse von Rohstoffeigenschaften durch Methoden der Multivariaten Statistik

Eigenschaften Nachfrageseite:

- Anzahl der technischen Anwendungsbereiche, die die ersten 50% der Nachfrage ausmachen
- Korrelationskoeffizient weltweite Nachfrage, globales BIP
- Relevanz für Zukunftstechnologien (vergl. Angerer et al., 2009)
- Substituierbarkeit (Substitutionskoeffizient der EU, vergl. Tercero Espinoza et al., 2013)

Eigenschaften Angebotsseite:

- Globale Primärproduktion (Bergbau)
- Globale Recyclingrate (End-of-Life Recycling Rate)
- Konzentration der Produktion auf Länderebene
- Wachstum der Produktion in den vergangenen 10 Jahren
- Anteil der Produktion als Nebenprodukt
- Reservenreichweite (statische Reichweite der Reserven)
- Häufigkeit des Elements in der Lithosphäre

Preis-Eigenschaften:

- Durchschnittspreis der vergangenen 5 Jahre
- Preisvolatilität über die letzten 5 Jahre
- Handel an Börsen möglich?

Handel:

- Weltweite physische Handelsströme des Rohstoffs
- Globale Konzentration der Rohstoffexporte

Die für die betrachteten Markteigenschaften herangezogenen Quellen und weitere Erläuterungen zur Quantifizierung der Merkmale sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2. – Erläuterungen zu den herangezogenen Indikatoren und der jeweiligen Datenbasis. Abkürzungen: USGS: US Geological Survey, LME: London Metal Exchange (Rohstoffbörse London), BGR: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, UNEP: UN Environmental Programme.

Eigenschaft	Erläuterung	Datenbasis
A1: Durchschnittspreis	jährlicher Durchschnitt (2008-2013)	Metal Bulletin, USGS
A2: Preisvolatilität	Standardabweichung der Preise (2008-2013)	Metal Bulletin, USGS
A3: Börsengehandelt?	bezieht sich auf die London Metal Exchange (LME)	LME
A4: Minenproduktion	globales Primärproduktionsniveau	USGS, BGR
A5: Länderkonzentration	Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) auf Länderebene	USGS, BGR
A6: Produktionswachstum	relatives Wachstum der vergangenen 10 Jahre	USGS, BGR
A7: Neben-/ Hauptprodukt	1, wenn hauptsächlich eigene Infrastruktur	Ullmann's Enzyklop. (UEIC, 2003)
A8: Häufigkeit	Häufigkeit in der kontinentalen Erdkruste in ppmw	CRC Handbook (Haynes, 1913)
A9: Reserven	statische Reichweite in Jahren	USGS
A10.: EoL Recycling Rate	Schätzwert der EoL RR	UNEP (Graedel et al., 2011a)
A11.: Welthandel	Summe der globalen Handelsströme von Rohstoff _i in t	UN Comtrade
A12: Handelskonzentration	HHI der globalen Exporte von Rohstoff _i	UN Comtrade
A13.: Technologien	Anzahl der techn. Anwendungen, die die ersten 50% der Nachfrage ausmachen	EU Berichte (Tercero Espinoza et al., 2013)
A14.: Korrelation	Korrelationskoeffizient (nach Bravais/Pearson) der Nachfrageentwicklung mit der Weltwirtschaft	World Bank
A15.: Zukunftstechnologien	Index basierend auf der Studie "Rohstoffe für Zukunftstechnologien", 0 wenn kein Wert in der Studie	Angerer et al. (2009)
A16: Substitution	Index für "Nichtsubstituierbarkeit": 1, wenn nicht substituierbar	EU Berichte (Tercero Espinoza et al., 2013)

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

Die Absolutwerte der jeweiligen Merkmalsausprägungen der verschiedenen Rohstoffe in Tabellenform sowie Ergänzungen zur Datenerhebung, wie z.B. die verwendeten Produktklassifikationen² zur Erhebung der Handelsströme werden im Anhang A.4 zur Verfügung gestellt. Abbildung 3.1 zeigt die verschiedenen Merkmalsausprägungen aus Tabelle 3.2 für die herangezogenen Rohstoffe in Form eines Netzdiagramms.

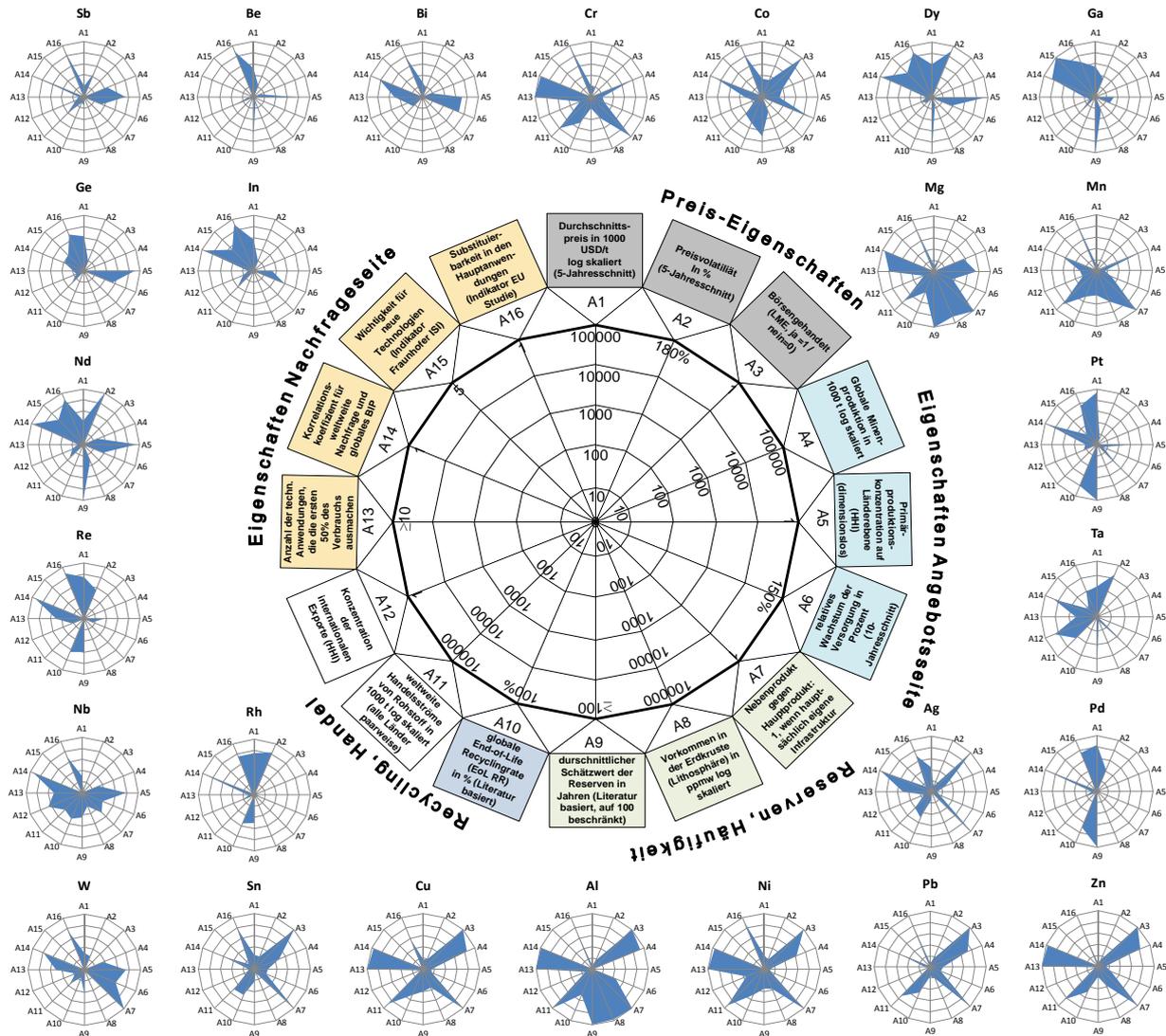


Abbildung 3.1. – Darstellung der jeweiligen Merkmalsausprägungen aus Tabelle 3.2 für die betrachteten Rohstoffe.

Diese auch teilweise als Windrosen- oder Stern-Diagramme (engl. Windrose oder Starplot) bezeichneten Graphen entsprechen der klassischen Darstellungsform für den Vergleich mehrdimensionaler Merkmalsausprägungen. Bei einer größeren Anzahl an Merkmalsträgern, wie dies hier der Fall ist, entsteht allerdings ein Problem der Übersichtlichkeit: Egal, ob in tabellarischer Form (siehe Anhang A.2.1) oder in Netzdiagrammen wie in Abbildung 3.1, aufgrund der Menge der Werte fällt es schwer, eine strukturelle Übersicht

²basierend auf dem HS-System (vergl. Anhang A.4).

3.1. Analyse von Rohstoffeigenschaften durch Methoden der Multivariaten Statistik

über Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Merkmalsausprägungen zu erlangen. Daher erscheinen an dieser Stelle Verfahren zur Dimensionsreduzierung für die Aufbereitung und Analyse der Daten sinnvoll. Dies kann neben den reinen Indikatoraggregationen, wie sie in bisherigen Studien durchgeführt wurden, zusätzliche Einblicke geben, die basierend auf den jeweils erhobenen Daten mit verhältnismäßig geringem Aufwand durchgeführt werden können.

3.1.2. Multidimensionale Skalierung

Die Multidimensionale Skalierung (MDS) ist ein dimensionsreduzierendes Verfahren der Multivariaten Statistik. Ziel dieses Verfahrens ist es, die betrachteten Variablen entsprechend ihrer Ähnlichkeit (bezogen auf die betrachteten Merkmalsausprägungen) räumlich so anzuordnen, dass diejenigen Variablen mit hoher Ähnlichkeit möglichst nah beieinander liegen, während die Variablen die sich unähnlich sind möglichst weit voneinander entfernt positioniert werden. So lassen sich komplexe, unübersichtliche Datensätze optisch vereinfacht darstellen und gewisse grundlegende Strukturen herausarbeiten. Dabei werden die einzelnen Variablen (hier die verschiedenen Rohstoffe) in der Fläche so angeordnet, dass ähnliche Rohstoffe möglichst nah beieinander liegen, wobei die genauen Koordinaten nicht entscheidend sind, sondern lediglich die Distanzen zwischen den jeweiligen Positionen relevant sind. Eine Rotation der dargestellten Fläche würde für das Ergebnis folglich keinen Unterschied machen, da bei einer linearen Skalierung das Verhältnis der Abstände der Punkte zueinander nicht verändert wird, sondern lediglich die einzelnen Koordinaten (Backhaus et al., 2011b, S.218).

Die ursprüngliche Datentabelle mit den normierten Merkmalsausprägungen (vergl. Tabelle im Anhang A.2.1) wird bei der Multidimensionalen Skalierung über eine geeignete Distanzmetrik in eine Distanzmatrix überführt. Die Überführung einer Datentabelle mit verschiedenen Merkmalsausprägungen in eine Distanzmatrix basierend auf der Euklidischen Distanzmetrik³ ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

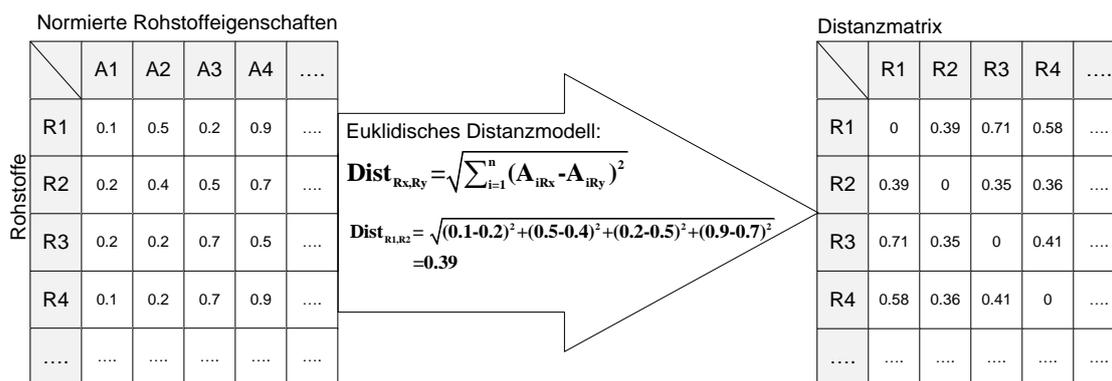


Abbildung 3.2. – Beispiel der Überführung einer Kreuztabelle mit normierten Materialeigenschaften in eine Distanzmatrix.

Diese Distanzmatrix wird dann über einen iterativen Optimierungsprozess auf die Ebene projiziert, wobei

³Die Euklidische Distanz ist die kürzeste direkte Verbindung zwischen zwei Datenpunkten und berechnet sich aus der Quadratwurzel der Summe der quadrierten Differenzen der Koordinaten zweier Punkte (vergl. Abbildung 3.2).

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

die in der Matrix angegebenen Distanzen möglichst genau durch die Distanzen in der Ebene wiedergegeben werden (vergl. Backhaus et al., 2011b, S.253). Diese rechenintensive Projektion der Distanzmatrix auf die Ebene erfolgt über entsprechende Statistik-Software, in diesem Fall mit Hilfe der frei zugänglichen Statistik-Umgebung “R”⁴.

Genau genommen ist die Multidimensionale Skalierung ein Überbegriff für ein ganzes Bündel von statistischen Verfahren zur Ähnlichkeitsstrukturanalyse, die sich bezüglich der Wahl des Distanzmodells und der Darstellungsform (Projektion in der Fläche, d.h. Reduktion auf 2 Dimensionen oder im Raum, d.h. 3-dimensionale Darstellung) unterscheiden (Backhaus et al., 2011b, S.217 ff.). Für die hier durchgeführten Analysen werden die Ergebnisse unter Verwendung eines Euklidischen Distanzmodells auf 2 Dimensionen reduziert. Das Ergebnis der MDS bezüglich der in Abbildung 3.1 dargestellten Daten ist in Abbildung 3.3 wiedergegeben.

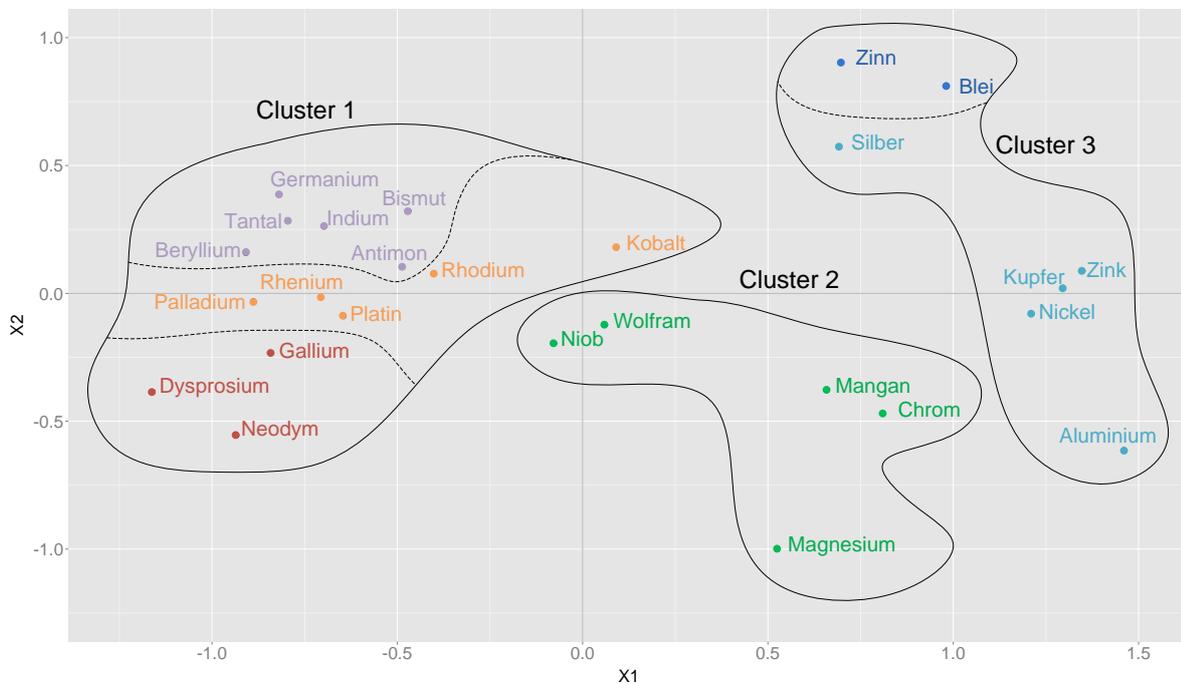


Abbildung 3.3. – Ergebnis der Multidimensionalen Skalierung. Je näher die Rohstoffe zueinander positioniert sind, desto ähnlicher sind sie sich bezüglich der betrachteten Eigenschaften auf Abbildung 3.1. Die eingezeichneten Cluster (auch farblich unterlegt) beziehen sich auf des Ergebnis der korrespondierenden hierarchischen Clusteranalyse aus Abbildung 3.4.

Zu erkennen ist eine klare Abgrenzung der “Technologiemetalle”, die auch am häufigsten als kritisch eingestuft werden, von den klassischen Industriemetallen um Kupfer und Aluminium. Dazwischen liegen typische Legierungsmetalle, die zwar teilweise auch im Hightech-Bereich eingesetzt werden, aber in erster Linie als hochwertige Legierungselemente für Stähle oder Aluminiumlegierungen verwendet werden (z.B.

⁴R ist eine freie Programmiersprache und Entwicklungsumgebung für statistische Datenauswertung- und Aufbereitung. R wurde durch die open-source Strategie rasant um zahlreiche Funktionen ergänzt, ist inzwischen weit verbreitet und gilt zunehmend als die Standardumgebung für die Bearbeitung statistischer Problemstellungen (vergl. Inchiosa und Jacobs, 2015).

Mangan, Chrom, Wolfram, Magnesium). Die in Abbildung 3.3 dargestellten Gruppen (eingekreiste Rohstoffe) entsprechen den Ergebnissen der im Folgenden erläuterten hierarchischen Clusteranalyse, wobei die gestrichelten Linien die weitere Unterteilung zwischen 3 und 6 Clustern darstellen.

3.1.3. Hierarchische Clusteranalyse

Die hierarchische Clusteranalyse ist analog zur MDS ein auf Distanzmatrizen basierendes Verfahren der Multivariaten Statistik. Bei Wahl einer einheitlich Distanzmetrik liefern beide Verfahren sehr ähnlich Ergebnisse (vergl. eingezeichnete Cluster in Abbildung 3.3).

Es handelt sich ebenfalls um einen iterativen, stufenweise ausgeführten Algorithmus, bei dem im Ausgangspunkt jede Variable ein eigenes Cluster bildet. In jeder Iteration werden die beiden Cluster zusammengefügt, die in der Distanzmatrix die höchste Ähnlichkeit aufweisen, wobei das zusammengeführte Cluster die durchschnittlichen Werte seiner Bestandteile übernimmt (vergl. z.B. Backhaus et al., 2011a, S.415 ff.).

Bei der agglomerativen Clusteranalyse wird systematisch ein Dendrogramm (Ähnlichkeits-Baumstruktur) aufgebaut, wie in Abbildung 3.4 dargestellt.

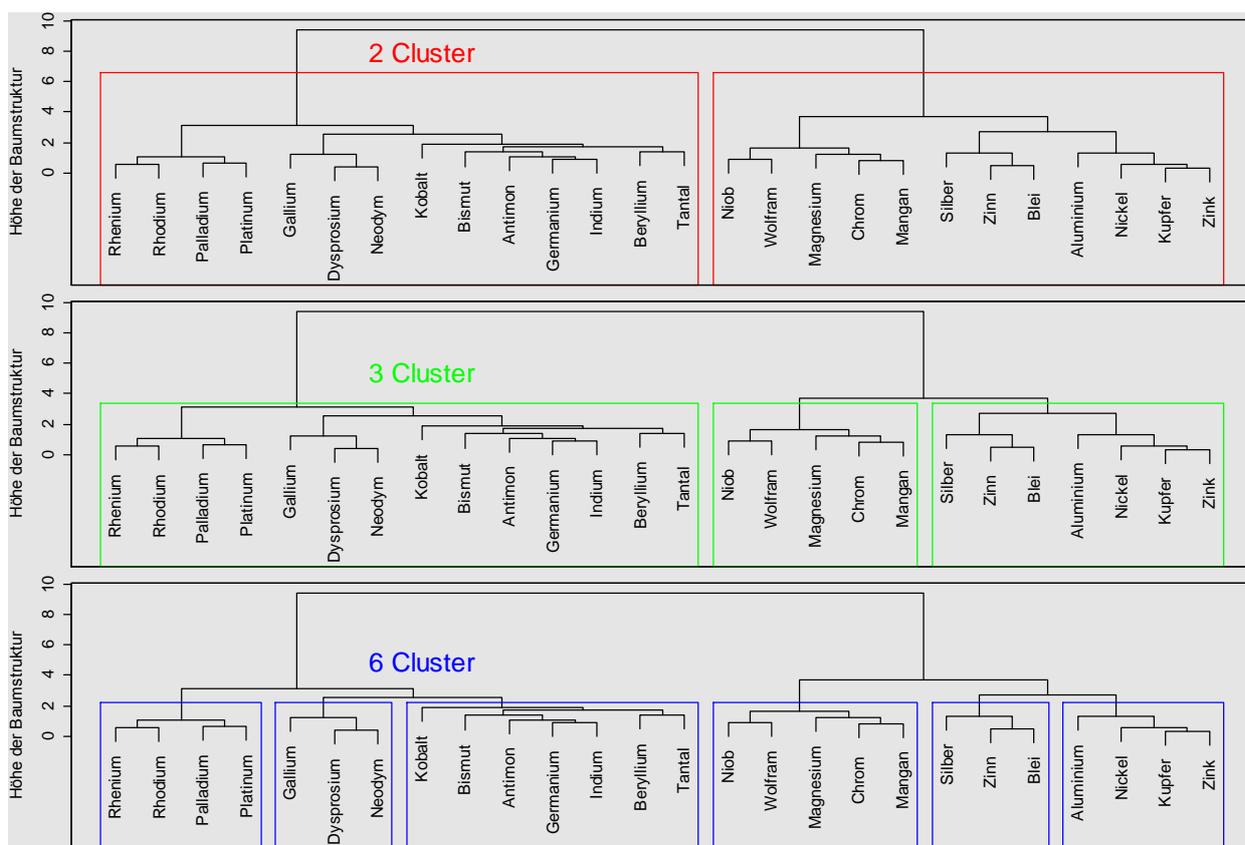


Abbildung 3.4. – Ergebnis der agglomerativen hierarchischen Clusteranalyse. Analog zu der zuvor vorgestellten Multidimensionalen Skalierung wurde eine Euklidische Distanzmetrik verwendet.

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

Durch die Festlegung der Clusteranzahl wird das Dendrogramm so unterteilt, dass die internen Elemente jedes Clusters möglichst homogen sind (siehe Kästchen in Abbildung 3.4) und sich nach außen von den anderen Clustern unterscheiden. Mit den identischen Daten und ebenfalls auf der Euklidischen Distanzmetrik basierend wurde eine agglomerative hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Hierzu wurde ebenfalls die Statistik-Umgebung “R” herangezogen. Die Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse sind direkt vergleichbar mit der Multidimensionalen Skalierung (siehe eingezeichnete Cluster in Abbildung 3.3). Interessant ist weiterhin der Vergleich zwischen der Einteilung in drei und der Einteilung in sechs verschiedene Cluster. Während die Gruppe der klassischen Legierungsmetalle (Mangan, Chrom, Magnesium, Wolfram, Niob) in beiden Betrachtungen gleich bleibt, werden bei den Hightechmetallen die Platingruppe zusammen mit Rhenium und die Seltenerdelemente (Neodym & Dysprosium) sowie Gallium separat gruppiert. Kobalt wird am Rand der Hightechmetalle angeordnet, obwohl eine unmittelbare Nähe zu den Legierungsmetallen besteht (vergl. MDS in Abbildung 3.3). Die einzelnen Verfahren der hierarchischen Clusteranalyse unterscheiden sich analog zur Multidimensionalen Skalierung bezüglich des gewählten Distanzmaßes und bezüglich des Fusionierungsalgorithmus, der den Zusammenschluss zu einzelnen Clustern regelt (vergl. Backhaus et al., 2011a, S. 395 ff.).

3.1.4. Korrelationsmatrizen und Streudiagramme

Während die hierarchische Clusteranalyse sowie die Multidimensionale Skalierung Ähnlichkeiten der Merkmalsträger (in diesem Fall verschiedener Rohstoffe) darstellen, erscheint es darüber hinaus sinnvoll, Gemeinsamkeiten und Korrelationen der Merkmalsausprägungen (Rohstoffeigenschaften) zu untersuchen. Zur Analyse linear-proportionaler Abhängigkeiten zwischen den Merkmalsausprägungen, also Aussagen hinsichtlich der Korrelationen der betrachteten Eigenschaften unter verschiedenen Rohstoffen, eignen sich zunächst sogenannte Streudiagramm-Matrizen (engl. scatterplot matrix), in denen alle Merkmale einmal gegeneinander aufgetragen werden. Abbildung 3.5 zeigt eine solche Streudiagramm-Matrix für die betrachteten Rohstoffmerkmale aus Tabelle 3.1, wobei die Größen, die lediglich die Werte 0 oder 1 annehmen (A3 und A7) herausgenommen wurden. In der oberen Hälfte von Abbildung 3.5 sind die Korrelationskoeffizienten der Merkmalspaare aufgetragen. Dabei werden die Zahlen mit höherer Korrelation größer dargestellt. In der unteren Hälfte werden die Streudiagramme mit gewichteter polynomischer Regression (engl. LOWESS für **L**ocally **W**eighted **S**catterplot **S**moothering, vergl. z.B. Cleveland, 1981) dargestellt.

Wie in Abbildung 3.5 aufgezeigt, sind signifikante Korrelationen der Merkmalsausprägungen untereinander wenig vorhanden. Dass das weltweite Handelsvolumen (auf die Masse bezogen) mit der globalen Produktionsmenge des Metalls insgesamt stark korreliert erscheint sehr naheliegend. Interessant ist lediglich, dass unter den betrachteten Metallen ein relativ klarer Zusammenhang zwischen Produktionsvolumina und Preisniveaus, sowie zwischen der Häufigkeit in der Erdkruste und dem Produktionsvolumen besteht. Das Grundprinzip “je seltener (knapper), desto teurer” kann folglich bestätigt werden, obwohl auch hier eindeutig Ausnahmen bestehen⁵. Wie diese Betrachtung zeigt, ist es über die genannten Aspekte hinaus kaum möglich, klare lineare Zusammenhänge zwischen einzelnen für die Kritikalitätsbewertung relevanten Eigenschaften

⁵Bismut z.B. ist in der Erdkruste weniger häufig vertreten als Gold, liegt aber auf einem Preisniveau mit Blei.

3.1. Analyse von Rohstoffeigenschaften durch Methoden der Multivariaten Statistik

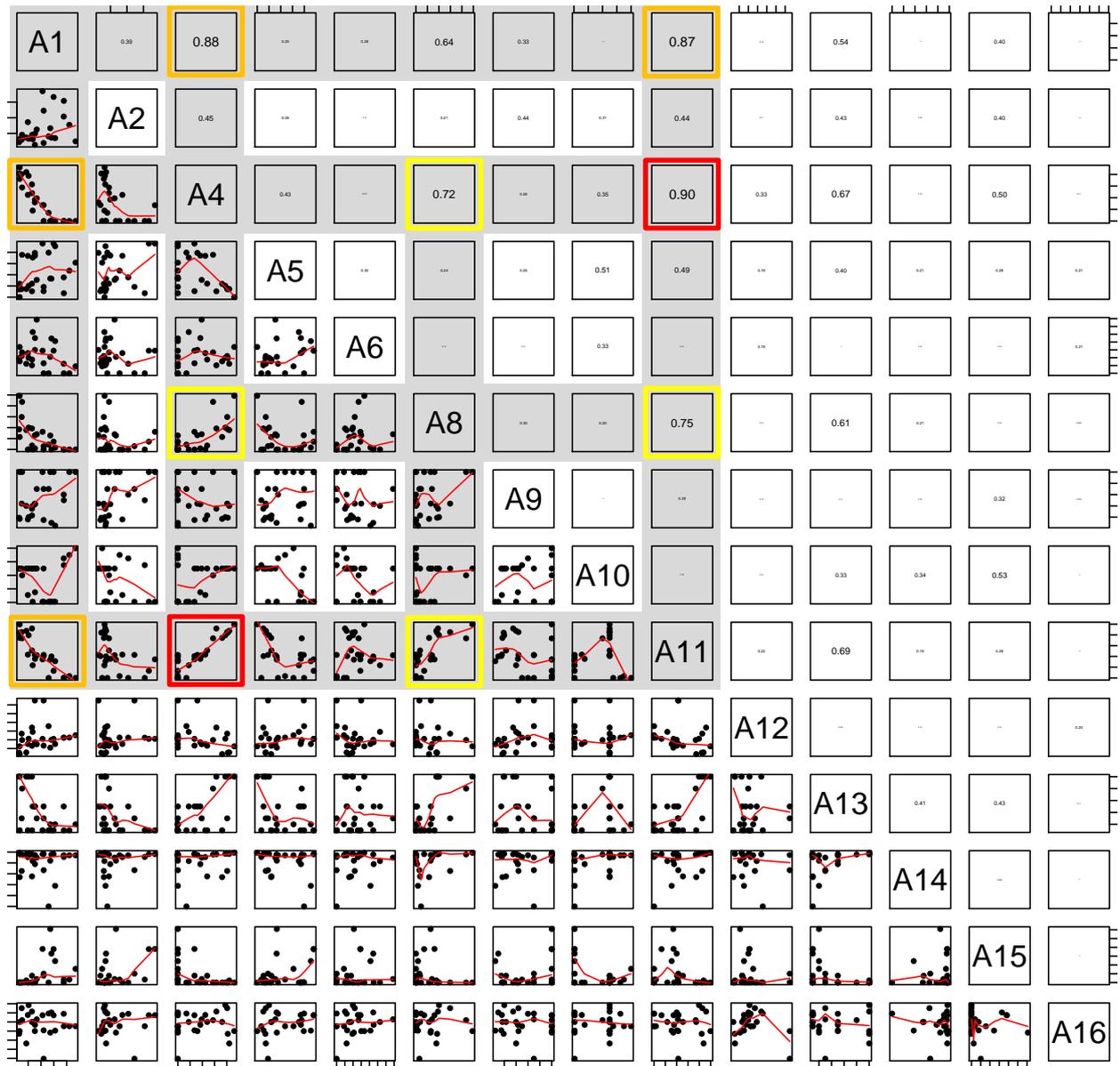


Abbildung 3.5. – Streudiagramm der Merkmalsausprägungen aus Abbildung 3.1 bzw. Tabelle 3.2. Die obere Hälfte der Matrix zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Merkmalsausprägungen (je höher die Korrelation, desto größer die Darstellung des Korrelationskoeffizienten), der untere Teil zeigt die gewichteten Regressionsfunktionen. Hohe Korrelationswerte, die einen systematischen Zusammenhang zwischen den betrachteten Merkmalsausprägungen vermuten lassen, wurden farbig hervorgehoben.

aufzustellen. Dies erklärt auch, weshalb aktuelle ökonometrische Ansätze zur einheitlichen Beschreibung von Strukturen an Rohstoffmärkten über Regressionsanalysen nur verhältnismäßig niedrige Bestimmtheitsmaße aufzeigen (vergl. z.B. Gleich et al., 2013; Mayer und Gleich, 2015). Während die Korrelationsanalyse wenig eindeutige Zusammenhänge aufzeigt, bietet die Korrespondenzanalyse eine Möglichkeit der Darstellung von qualitativen (nicht metrischen) Strukturen, was im Folgenden aufgezeigt wird.

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

3.1.5. Multiple Korrespondenzanalyse

Im Gegensatz zu den zuvor betrachteten Analysemethoden bietet die Multiple Korrespondenzanalyse die Möglichkeit, qualitative Aspekte in die Analyse einfließen zu lassen. Dabei wird untersucht, welche Merkmalsausprägungen häufig gemeinsam vorkommen. Im Falle der hier untersuchten Rohstoffe wurde jedem Rohstoff bezüglich der jeweiligen Eigenschaft in Abbildung 3.1 das Attribut “hoch”, “mittel” oder “niedrig” zugeordnet, wobei die Skala im Netzdiagramm (vergl. Abbildung 3.1) für jede Eigenschaft in drei gleichgroße Teile unterteilt wurde. Im Fokus steht bei dieser Analyse nicht der Rohstoff selbst, sondern die Kombination der Ausprägungen untereinander. Die Multidimensionale Skalierung wird im Bereich der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften häufig zur Analyse nicht metrischer, also nicht eindeutig quantifizierter Zusammenhänge herangezogen⁶.

Wie in Abbildung 3.6 gezeigt, werden für die MCA (Multiple Correspondence Analysis) die einzelnen Merkmalsausprägungen in einer speziellen Kontingenztabelle, der sogenannten “Burt-Matrix” zusammengestellt.

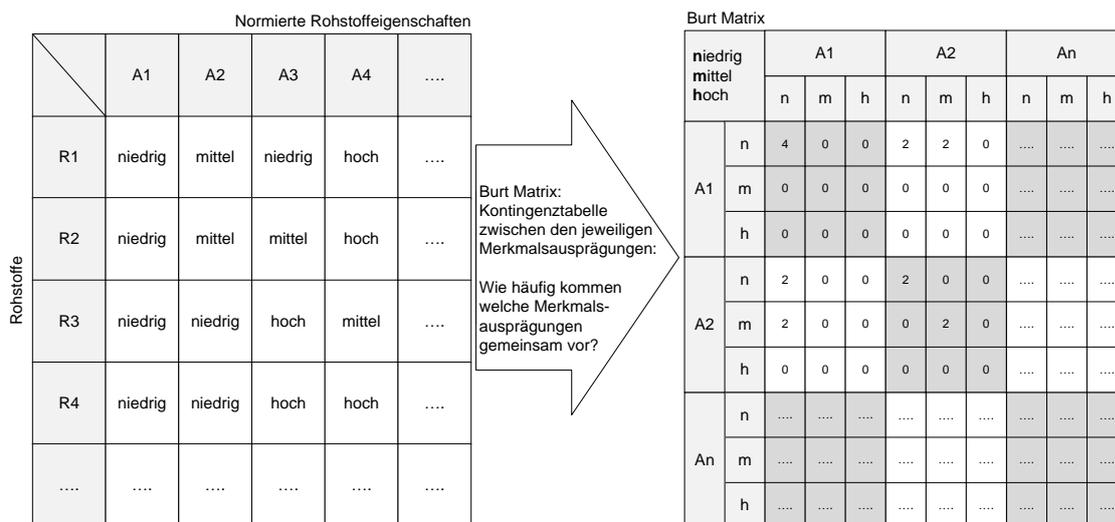


Abbildung 3.6. – Das Prinzip der Kontingenztabelle (Burt-Matrix) (vergl. z.B. Blasius und Greenacre, 2006, S.25).

Diese Matrix ist die Grundlage der anschließenden Skalierung, die ähnlich zum Verfahren der MDS als iterative Optimierung verläuft, wobei diejenigen Ausprägungen der jeweiligen Variablen, die häufig gemeinsam auftreten, näher zueinander skaliert werden (vergl. z.B. Backhaus et al., 2011a, S.272). Dabei basiert die Korrespondenzanalyse nicht auf der Euklidischen Distanzmetrik, sondern auf der sogenannten Chi-Quadrat-Metrik (χ^2): Die Kombinationen der einzelnen Merkmalsausprägungen werden systematisch mit der zu erwartenden zufälligen Verteilungshäufigkeit verglichen. Kommen gewisse Kombinationen klar häufiger vor als bei einer zufälligen Verteilung, werden diese näher zueinander positioniert, während Paare,

⁶So sind typische Anwendungsgebiete der Korrespondenzanalyse die Untersuchung und Darstellung von Zusammenhängen des Geschlechts, des Einkommensniveaus, des Bildungsgrades etc. (vergl. z.B. Lüdtkke, 1995) oder auch ganz einfache Zusammenhänge zwischen Haar- und Augenfarbe (Mortensen, 2009).

3.1. Analyse von Rohstoffeigenschaften durch Methoden der Multivariaten Statistik

die weit seltener als die zufällige Verteilung vorkommen, einen höheren Abstand bekommen⁷.

Auf diese Weise lassen sich Zusammenhänge aus relativ komplexen, nicht metrischen Datenstrukturen übersichtlich darstellen. Für die hier durchgeführte MCA wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht alle betrachteten Eigenschaften aufgenommen, sondern nur diejenigen, zwischen denen ein Zusammenhang zu erwarten wäre (vergl. Abbildung 3.7). Dabei lassen sich in Abbildung 3.7 gewisse Strukturen erkennen. Offensichtlich besteht ein relativer Zusammenhang zwischen der Produktionskonzentration und der Preisvolatilität (rot markiert).

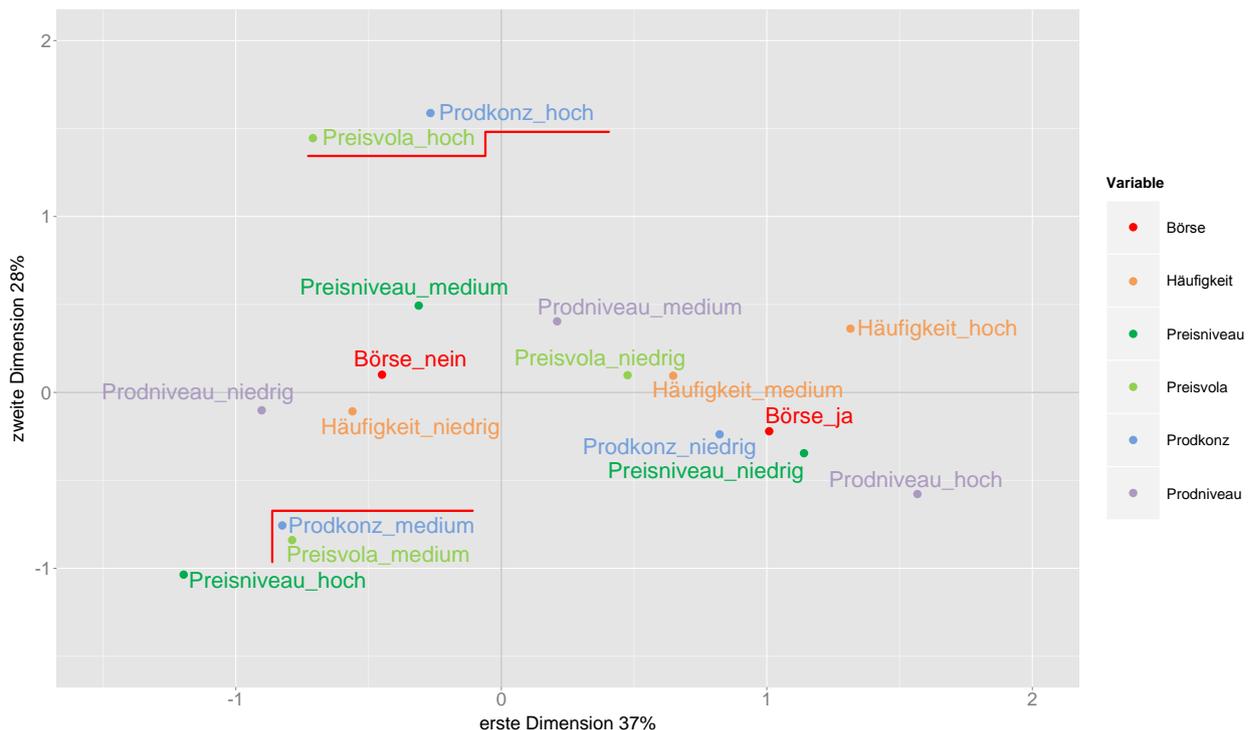


Abbildung 3.7. – Ergebnis der Multiplen Korrespondenzanalyse (MCA) der Merkmalsausprägungen über die betrachteten Rohstoffe. Je näher die Ausprägungen zueinander positioniert sind, desto häufiger tauchen sie bei den betrachteten Rohstoffen gemeinsam auf. Zu beachten ist allerdings, dass bei der MCA durch die Dimensionsreduzierung Informationen verloren gehen, die die Aussagekraft der Darstellung beeinträchtigen (vergl. prozentuale Angaben zum Informationsgehalt der Dimensionen an den Achsen).

Zu beachten ist, dass die hier betrachtete Volatilität als die Standardabweichung vom Jahresdurchschnittspreis über die vergangenen 10 Jahre berechnet wurde (vergl. Tabelle 3.2), also keine kurzfristigen Schwankungen sondern extreme Schwankungen über die Jahre hinweg abbildet. Weiterhin lässt sich in Abbildung 3.7 ein Zusammenhang zwischen dem Produktionsniveau und der Frage, ob der Rohstoff an der Börse (hier nur LME betrachtet) gehandelt wird, erkennen. Auch haben die börsengehandelten Rohstoffe mit ho-

⁷Wenn die betrachteten Merkmalsträger 3 verschiedene Merkmalsausprägungen (hoch, mittel, niedrig) annehmen können, dann sind für jedes Paar an betrachteten Merkmalen 3x3, also 9 verschiedene Kombinationen (hoch-hoch, hoch-mittel, hoch-niedrig, mittel-hoch, mittel-mittel, mittel-niedrig, niedrig-hoch, niedrig-mittel, niedrig-niedrig) der Merkmalsausprägungen möglich. Würden z.B. 90 Merkmalsträger untersucht, dann käme bei zufälliger Verteilung der Merkmalsausprägungen jede der oben genannten Kombinationen ca. 10 mal vor.

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

hem Produktionsniveau tendenziell ein niedrigeres Preisniveau, was im Vergleich klassischer Industriemetalle mit Hightechmetallen zu erwarten ist.

Dennoch ist bei der Multiplen Korrespondenzanalyse eine gewisse Vorsicht hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse zu wahren. Während die einfache Korrespondenzanalyse (Betrachtung von lediglich zwei Merkmalsträgern, also z.B. Augen- und Haarfarbe) auch eindeutige Ergebnisse bei der Darstellung im 2-dimensionalen Raum (Fläche) liefert, gehen bei der Multiplen Korrespondenzanalyse im Zuge der Dimensionsreduzierung Informationen verloren⁸. Die in Abbildung 3.7 dargestellten Dimensionen erklären somit nur noch ca. 65% der ursprünglichen Zusammenhänge. Weiterhin ist zu beachten, dass die Anzahl der hier betrachteten Rohstoffe eine sehr geringe Stichprobenzahl darstellt, was die Signifikanz der Ergebnisse ebenfalls einschränkt. Somit erscheinen agglomerative hierarchische Clusteranalysen und die Multidimensionale Skalierung (vergl. Abschnitte 3.1.2 und 3.1.3) als Ergänzung zu Multiindikatorbewertungen passender.

3.1.6. Weitere Verwendungspotenziale dimensionsreduzierender Verfahren bei der Analyse von Rohstoffen

Die hier vorgestellten Methoden der Multivariaten Statistik lassen sich zur Identifikation und Darstellung verschiedenster Zusammenhänge in der Analyse von Rohstoffeigenschaften, bzw. Markteigenschaften heranziehen. Beispielhaft ist in Abbildung 3.8 eine Multidimensionale Skalierung bezüglich der jährlichen Preisänderungsraten (Jahresdurchschnittspreise) zwischen 2001 und 2012 dargestellt.

Weiterhin wurde der Metallpreisindex der Weltbank aufgenommen. Gut zu erkennen ist die extreme Abweichung vieler Technologiemetalle von der breiten Masse um den Preisindex herum. Auf diese Weise lassen sich Unterschiede im Preisverlauf einiger Technologiemetalle, bzw. die zufällig erscheinenden Preispeaks (vergl. Abbildung 3.8 unten), darstellen. Die unterschiedlichen Farben der Punkte basieren auf dem Abstand der jeweiligen Positionen zum Metallpreisindex.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die hier vorgestellten dimensionsreduzierenden Ansätze als sinnvolle Ergänzung zu statischen, indikatorbasierten Analysen herangezogen werden können. Da die Datenerhebung für Multiindikatoransätze meist recht umfangreich und zeitintensiv ausfällt, erscheint es sinnvoll, zusätzliche Erkenntnisse über Gemeinsamkeiten und Unterschiede in der Datenstruktur herauszuarbeiten, was – wie hier gezeigt wurde – mit verhältnismäßig geringem Arbeitsaufwand möglich ist. Erste Ansätze zur Nutzung der in Abschnitt 3.1.3 vorgestellten hierarchischen agglomerativen Clusteranalysen als Ergänzung zur indikatorbasierten Kritikalitätsbewertung (vergl. auch Glöser und Faulstich, 2014) wurden in aktuellen Forschungsarbeiten bereits implementiert (Graedel et al., 2015).

Wie allerdings auch gezeigt werden konnte, sind eindeutige Korrelationen in den für die Kritikalitätsbewertung relevanten Eigenschaften kaum vorhanden (vergl. Abschnitt 3.1.4). Dies bekräftigt den Bedarf rohstoffspezifischer Modelle zur Erhöhung der Transparenz von Verwendungs- und Verarbeitungsstrukturen, zur Simulation möglicher Marktentwicklungen und Identifikation potenzieller Versorgungsengpässe, oder zur

⁸Die Dimensionsreduzierung erfolgt anhand der Eigenwerte der Chi-Quadrat-Differenz-Matrizen. Dabei wird diejenige Dimension gestrichen, deren Matrix den geringsten Eigenwert aufweist, also am wenigsten zu den Unterschieden in der Datenstruktur beiträgt.

3.1. Analyse von Rohstoffeigenschaften durch Methoden der Multivariaten Statistik

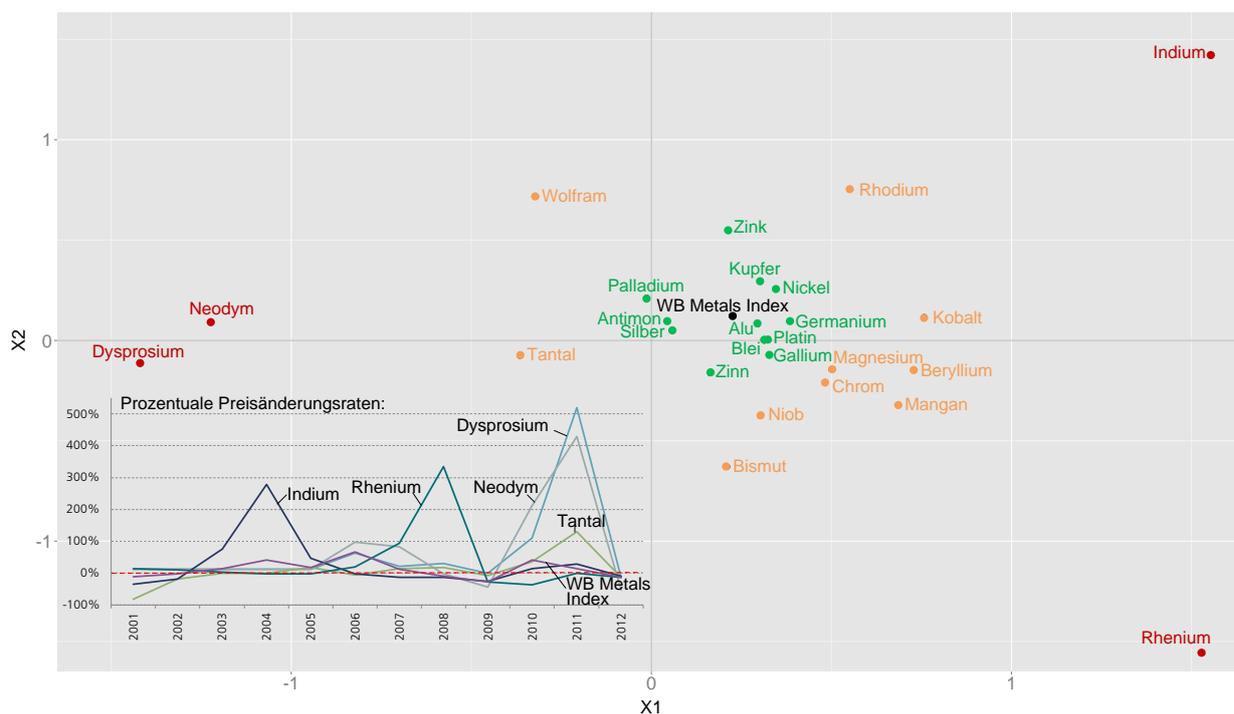


Abbildung 3.8. – Ergebnis einer Multidimensionalen Skalierung bezüglich der Preisänderungsraten der betrachteten Metalle zwischen 2001 und 2012. Gut zu erkennen sind die Ausnahmeentwicklungen verschiedener Technologiemetalle, deren Preisverlauf sich unabhängig von der allgemeinen Marktentwicklung der Industriemetalle entwickelt hat.

Unterstützung bei der Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung von Versorgungsrisiken.

3.2. Indikatoren basierend auf Zeitreihen als erste Ansätze zur Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes

Die in Kapitel 2 erläuterten Screeningmethoden zur Risikobewertung zahlreicher Rohstoffe sind rein statische Analysen, welche die aktuelle Versorgungssituation widerspiegeln. Zwar werden in bisherigen Kritikalitätsstudien teilweise entsprechende Indikatoren für mittel- bis langfristige Entwicklungen in die heutige Kritikalitätsanalyse einbezogen (vergl. Kapitel 2), methodisch ist es allerdings durchaus problematisch, in eine statische Analyse ohne Berücksichtigung der zeitlichen Dimension Werte für unterschiedliche Zeitpunkte einfließen zu lassen. Dieses Vorgehen kann zur Verwässerung der Darstellung der aktuellen Versorgungssituation führen, da einige Rohstoffe aufgrund der aktuellen Versorgungssituation als kritisch eingestuft werden (tatsachenbasiert), während andere Rohstoffe aufgrund erwarteter zukünftiger Entwicklungen als kritisch bewertet werden (mit Unsicherheit behaftete Einschätzung zukünftiger Szenarien). Daher erscheint eine Untersuchung der Entwicklung von Rohstoffabhängigkeiten über die Zeit zur Identifikation gewisser Trends durchaus sinnvoll. Wie die Abbildungen 3.9 und 3.10 zeigen, besteht sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite eine nicht vernachlässigbare Dynamik. Dabei bildet Abbildung 3.9 die Konzentration der Produktion auf Länderebene (Herfindahl-Hirschman-Index) über die letzten 50 Jahre ab.

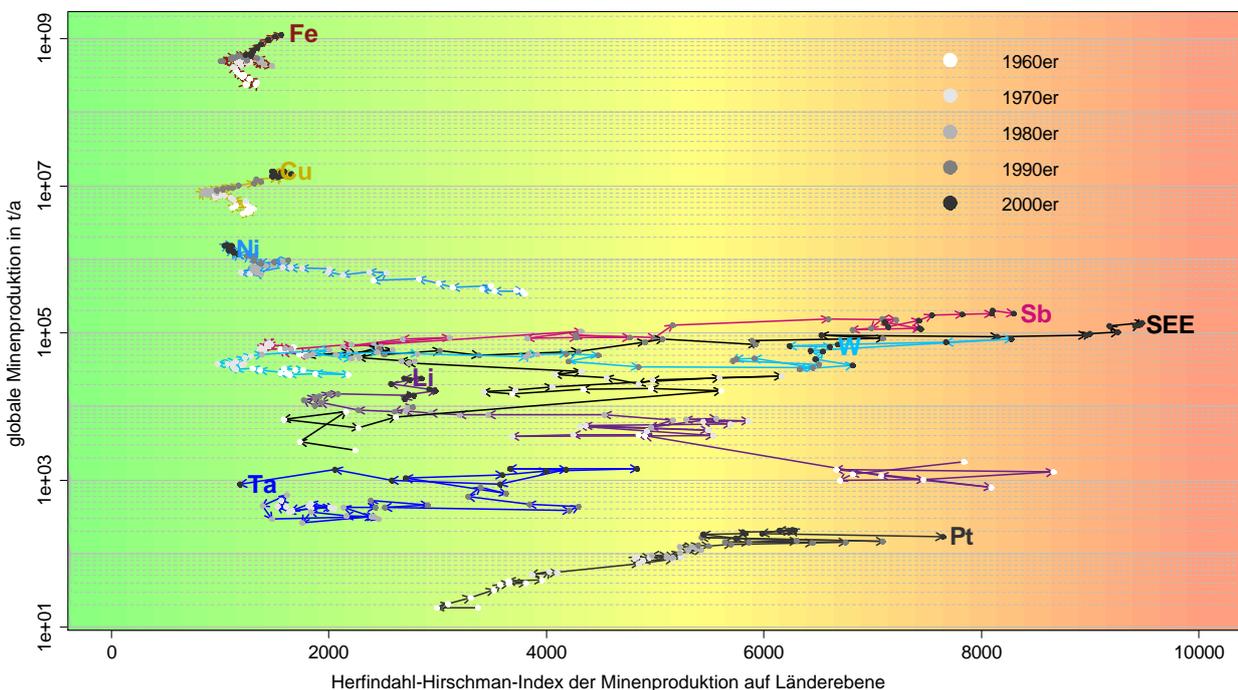


Abbildung 3.9. – Entwicklung des HHI auf Länderebene für ausgewählte Rohstoffe über die vergangenen 5 Jahrzehnte (vergl. Buijs et al., 2012). Der HHI (Herfindahl-Hirschman-Index) wurde hier auf Werte zwischen 0-10000 skaliert.

Eine verstärkte Dynamik bei den Technologierohstoffen, die verhältnismäßig geringe Produktionsmengen aufweisen, ist klar ersichtlich und ist auch zu erwarten, da die Eröffnung einer neuen Produktionsstätte bei

3.2. Indikatoren basierend auf Zeitreihen als erste Ansätze zur Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes

insgesamt niedrigem Produktionsniveau meist eine stärkere Veränderung der prozentualen Produktionsverteilung mit sich bringt. Insbesondere bei den im unteren Bereich von Abbildungen 3.9 dargestellten Technologiemetallen muss in Zukunft von einem verstärkten Bedarf für Zukunftstechnologien ausgegangen werden (vergl. z.B. Angerer et al., 2009; Tercero, 2012). Die Kombination des aktuellen Bedarfs der jeweiligen Rohstoffe in bestimmten Technologien und des erwarteten Bedarfs 2030 (basierend auf der Studie "Rohstoffe für Zukunftstechnologien", siehe Angerer et al., 2009) mit der von der Europäischen Kommission veröffentlichten Einschätzung des Versorgungsrisikos (vergl. Abschnitt 2.3.1 bzw. European Commission, 2014) ist in Abbildung 3.10 dargestellt.

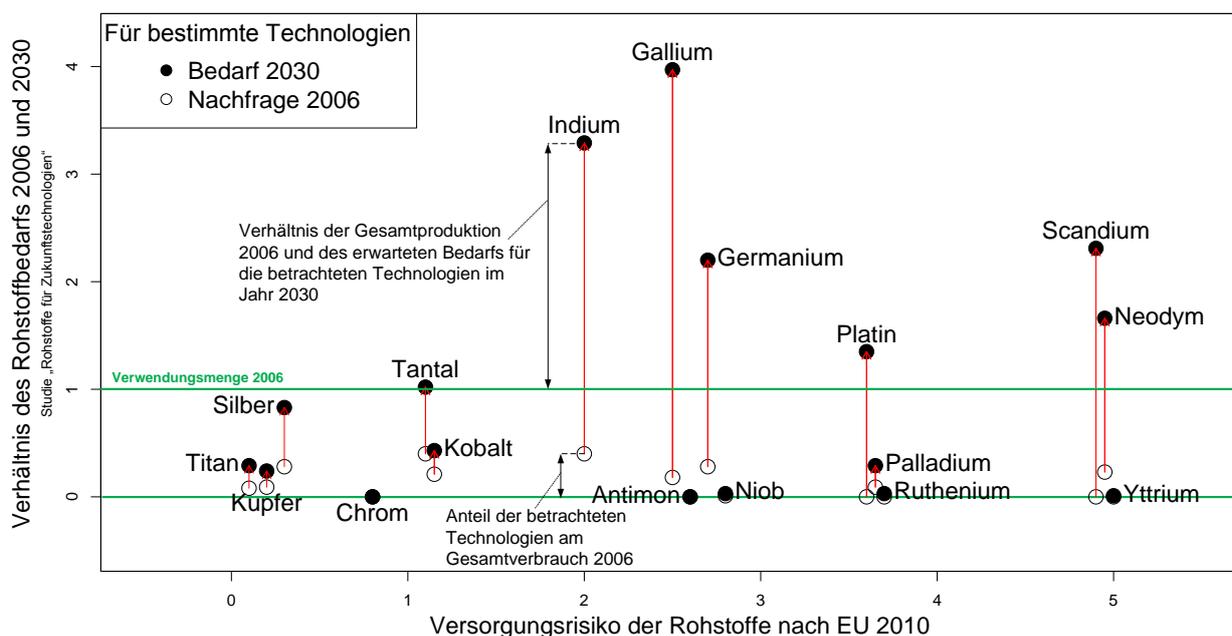


Abbildung 3.10. – Vergleich der Bewertung des Versorgungsrisikos (vergl. European Commission, 2010b) und der Bedarfserwartungen für Zukunftstechnologien (vergl. Angerer et al., 2009). Darstellung angelehnt an (Tercero, 2012).

Für die indikatorbasierte Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes erscheint in erster Linie die Bewertung der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes über die Zeit problematisch, da hier häufig qualitative Faktoren wie die Sensitivität der Wertschöpfungskette oder die Substituierbarkeit eines Rohstoffes im entsprechenden Anwendungsbereich einfließen (vergl. Kapitel 2). Ein verhältnismäßig einfacher aber aussagekräftiger Ansatz zur Quantifizierung der relativen wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes liegt dabei in der Fokussierung auf Mengenverhältnisse des Rohstoffverbrauchs unter Verwendung historischer Zeitreihen. Wie im Folgenden erläutert, lassen sich über bestimmte Quotienten von Produktions- und Handelsdaten, angelehnt an Indikatoren aus dem Bereich der Innovationsökonomik (siehe Walz und Marscheider-Weidemann, 2011, vergl. auch Tabelle 3.3), verhältnismäßig einfach landesspezifische Rohstoffabhängigkeiten aufzeigen und bewerten.

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

Tabelle 3.3. – Gängige Indikatoren zur Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit eines Landes bezüglich bestimmter Technologien (Warengruppen) basierend auf Außenhandelsstatistiken (vergl. z.B. Bowen, 1983; Grupp, 1997, S. 211 ff.). Ähnliche Indikatoren lassen sich aus Patentstatistiken ableiten.

<p>RXA (Land L_i Warengruppe W_j):</p> $\frac{\frac{Ex_{W_j}^{L_i}}{\sum_j Ex_{W_j}^{L_i}}}{\frac{\sum_i Ex_{W_j}^{L_i}}{\sum_{i,j} Ex_{W_j}^{L_i}}}$	<p>Der RXA (Relative Export Activity) ist ein Indikator, der zeigt, wie stark der Export eines Landes auf die betrachtete Warengruppe konzentriert ist. Der Indikator setzt den Anteil einer bestimmten Warengruppe an den gesamten Ausfuhren eines Landes ins Verhältnis zum Anteil der Weltausfuhr in dieser Warengruppe an den gesamten Weltexporten. Ein RXA-Wert > 1 zeigt daher an, dass in einem Land die betrachtete Warengruppe einen größeren Anteil an den gesamten Ausfuhren hat, als es im globalen Durchschnitt der Fall ist. Der Indikator lässt sich in gleicher Weise auch für die Einfuhr berechnen.</p>
<p>RCA (Land L_i Warengruppe W_j):</p> $\frac{\frac{Ex_{W_j}^{L_i}}{Im_{W_j}^{L_i}}}{\frac{\sum_j Ex_{W_j}^{L_i}}{\sum_j Im_{W_j}^{L_i}}}$	<p>Der RCA (Revealed Competitive Advantage) gibt Auskunft über die Spezialisierung eines Landes im internationalen Handel bei Einbeziehung der Importe. Ermittelt wird die Export-Import-Relation eines Landes in einer bestimmten Warengruppe im Verhältnis zur gesamten Export-Import-Relation dieses Landes. Der Indikator berücksichtigt damit auch, in welchem Umfang es der heimischen Industrie gelingt, sich auf dem Inlandmarkt gegen die ausländische Konkurrenz durchzusetzen. Ein RCA-Wert > 1 deutet auf einen komparativen Vorteil eines Landes bei der betreffenden Warengruppe hin.</p>

So könnte z.B. aus dem Quotienten des Anteils eines Landes am Weltverbrauch eines Rohstoffes und des Anteils des jeweiligen Landes an der Weltwirtschaft ein einfacher Indikator gebildet werden, der indiziert, ob ein Rohstoff innerhalb eines Landes stärker verbraucht wird als im globalen Durchschnitt. Der mit der Wirtschaftsleistung des jeweiligen Landes gewichtete Anteil am Weltverbrauch bestimmter Rohstoffe ermöglicht unmittelbar Rückschlüsse auf das Maß der Spezialisierung der Industrie im betrachteten Land, die einen überdurchschnittlichen Bedarf bestimmter Rohstoffe mit sich bringt. Die grundsätzliche Annahme hinter diesem Ansatz beruht darauf, dass wenn die globale Industrielandschaft homogen wäre, auch eine homogene Verteilung des Rohstoffverbrauchs vorhanden wäre. Durch die Spezialisierung bestimmter Länder auf konkrete Industriezweige entstehen für unterschiedliche Regionen verschiedene Gewichtungen der Rohstoffverarbeitung. Die relative Gewichtung der Rohstoffverwendung bezüglich der Wirtschaftsleistung der betrachteten Region kann als erster Ansatz für die relative wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes für die Region herangezogen werden (vergl. Gleichung 3.1).

$$\text{Indikator}_1 = \frac{\text{Anteil am Weltverbrauch Land}_i}{\text{Anteil an der Weltwirtschaft Land}_i} = \frac{\frac{Im_{M_j}^{L_i} - Ex_{M_j}^{L_i} + EP_{M_j}^{L_i}}{\text{Weltproduktion}_{M_j}}}{\frac{BIP_{L_i}}{\text{Global GDP}}} \quad (3.1)$$

mit:

Im – Importe,

Ex – Exporte,

EP – Eigenproduktion.

3.2. Indikatoren basierend auf Zeitreihen als erste Ansätze zur Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes

Der Anteil eines Landes am Weltverbrauch kann vereinfacht werden durch den Anteil der Importe eines bestimmten Rohstoffes an der Summe aller globalen Importe dieses Rohstoffes, also am Welthandel. Da Gleichung 3.1 das Berechnen von Rohstoffgehalten verschiedener Produktklassifikationen (z.B. Erze, Konzentrate, Oxide, Carbonate etc.) zur Vergleichbarkeit mit der Primärrohstoffproduktion voraussetzt, was mit gewissen Unsicherheiten bezüglich der Stoffgehalte verbunden ist, lässt sich eine einfache Variation von Gleichung 3.1 definieren, die sich ausschließlich auf Handelszahlen (nach HS Klassifikation, vergl. Anhang A.4) bezieht. Dabei wird der Anteil am Welthandel eines Rohstoffes nach Gleichung 3.2 betrachtet (Importe $Land_i$ bezogen auf weltweite Importmengen von $Metall_j$).

$$\text{Indikator}_2 = \frac{\text{Anteil am Welthandel } Land_i}{\text{Anteil an der Weltwirtschaft } Land_i} = \frac{\frac{\text{Im}_{M_j}^{L_i}}{\text{Welthandel}_{M_j} = \sum_i \text{Im}_{M_j}^{L_i}}}{\frac{\text{BIP}_{L_i}}{\text{Global GDP}}} \quad (3.2)$$

Weiterhin scheint ein Indikator sinnvoll, der den Anteil eines bestimmten Rohstoffes am Gesamtrohstoffimport eines Landes ins Verhältnis setzt mit dem Anteil dieses Rohstoffes am Welthandel aller betrachteten Rohstoffe. Dieser weitere Indikator, der für die Betrachtung der relativen wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes relevant erscheint, lehnt sich direkt an den RXA an (vergl. Tabelle 3.3). Dabei wird, wie in Gleichung 3.3 dargestellt, der Importanteil eines bestimmten Rohstoffes am Gesamtimport aller Rohstoffe der Rohstoffgruppe (z.B. Metalle) ins Verhältnis gesetzt zum Anteil des Rohstoffes am Welthandel der Rohstoffgruppe.

$$\text{Indikator}_3 = \frac{\text{Anteil am Import Metall}_j \text{ bzgl. aller Metallimporte in } Land_i}{\text{Anteil am Welthandel Metall}_j \text{ bzgl. aller Metalle}} = \frac{\frac{\text{Im}_{M_j}^{L_i}}{\sum_j \text{Im}_{M_j}^{L_i}}}{\frac{\sum_i \text{Im}_{M_j}^{L_i}}{\sum_{i,j} \text{Im}_{M_j}^{L_i}}} \quad (3.3)$$

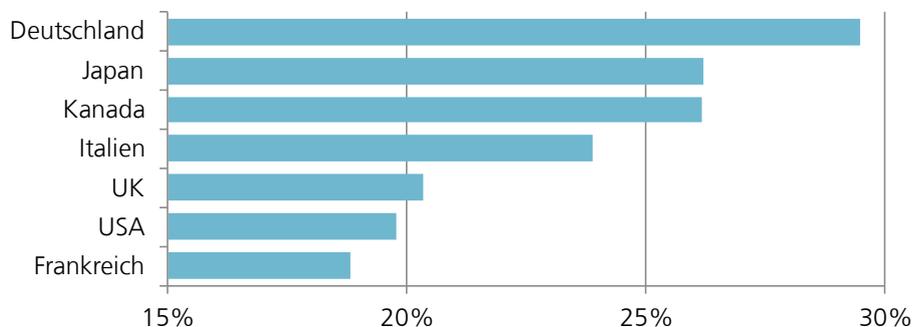


Abbildung 3.11. – Anteil des verarbeitenden Gewerbes an der Bruttowertschöpfung der G7 Staaten im Jahr 2013 (vergl. World Bank Economic Indicators: Industry, value added in % of GDP).

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

Da sowohl Deutschland als auch Japan unter den G7 Staaten einen sehr hohen Anteil des verarbeitenden Gewerbes an der Bruttowertschöpfung haben (vergl. Abbildung 3.11) und gleichzeitig technisch sehr spezialisierte Industrien besitzen, erscheint eine Erprobung des zuvor beschriebenen Ansatzes anhand dieser beiden Länder sinnvoll.

Der Verlauf der Indikatoren zur Beschreibung der relativen wirtschaftlichen Bedeutung (vergl. Gleichung 3.1 bis 3.3) derjenigen Rohstoffe, welche die jeweils höchsten Werte für Deutschland und Japan annehmen ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Zu erkennen sind bei vielen Rohstoffen klar steigende Tendenzen. Obwohl der Anteil Deutschlands an der Weltwirtschaft abnimmt (wegen des schnelleren Wachstums der Schwellenländer), bleibt die Rolle bestimmter Industriesektoren (Maschinenbau, Automobilindustrie, Chemische Industrie etc.) in Deutschland stark, was sich unmittelbar auf den Bedarf entsprechender Rohstoffe auswirkt.

Hinsichtlich der Handelsdaten wurden für jeden Rohstoff basierend auf der UN Comtrade Datenbank die Güterklassifikationen (HS Codes) für Erze, chemische Zwischenprodukte (Oxide, Chloride, Carbonate etc.), sowie reine Metalle berücksichtigt (vergl. Tabelle Anhang A.2.1).

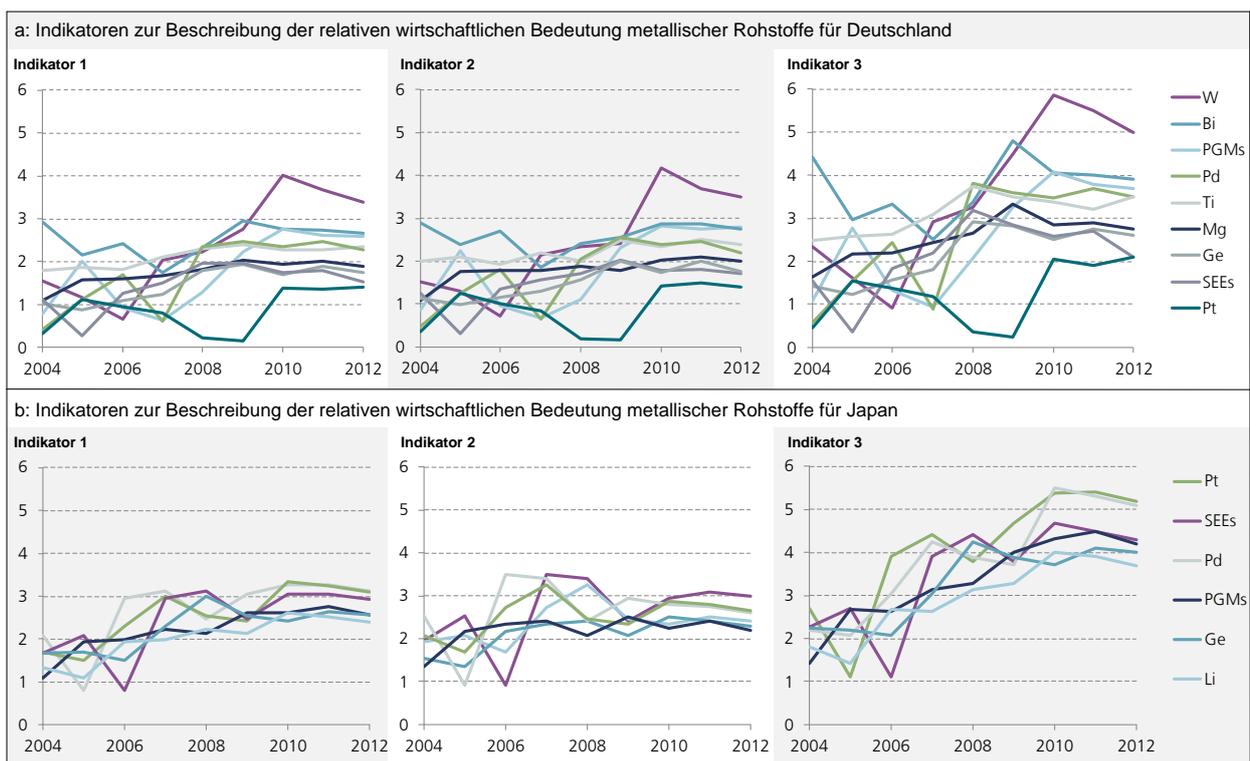


Abbildung 3.12. – Indikatoren für die relative wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes für Deutschland und Japan. Daten basieren auf UN Comtrade, USGS sowie Weltbank (vergl. Abschnitt A.2.1 im Anhang).

Während in Japan die Seltenen Erden sowie Platin und Palladium die Rohstoffe mit der höchsten relativen Gewichtung darstellen, liegen in Deutschland Wolfram, Bismut und sonstige Platingruppenmetalle ganz oben. Die Aussage, die auf Basis der Indikatoren getroffen werden kann, ist z.B., dass Deutschland, obwohl

3.2. Indikatoren basierend auf Zeitreihen als erste Ansätze zur Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes

es nur ca. 5% der Weltwirtschaft ausmacht, für ca. 20% aller Importe von Wolfram verantwortlich ist. Folglich verbraucht Deutschland viermal mehr Wolfram, als man es aufgrund der Wirtschaftsleistung erwarten würde, d.h. es kann davon ausgegangen werden, dass Wolfram für die deutsche Industrie besonders bedeutend ist. Dies sind natürlich Aussagen auf einer gewissen Abstraktionsebene und es ist in weiteren Schritten notwendig, die inländische Wertschöpfung basierend auf den jeweiligen Rohstoffen genauer zu analysieren. Für eine erste Screening-Methode über den Zeitverlauf erscheint dieser Ansatz allerdings nützlich. So lässt sich für Deutschland z.B. erkennen, dass Platin, Palladium und sonstige PGMs (Platingruppenmetalle) stark an Wichtigkeit gewonnen haben, was wohl in erster Linie auf die Verwendung in Autokatalysatoren zurückzuführen ist. Wolfram für Hochleistungslegierungen (Wolframcarbide) ist als Werkstoff in vielen Bereichen des Maschinenbaus wichtig (Bohr-, Fräs- und Schneidwerkzeuge etc.).

Die hier entwickelten Indikatoren ziehen lediglich die gewichtete Mengenrelevanz in Betracht. Qualitative Aspekte wie die Substituierbarkeit, die Sensitivität der Wertschöpfungsketten, oder das Recyclingpotenzial werden hier nicht betrachtet. Dies verhindert aber gleichzeitig eine Verwässerung der mengenbezogenen Abhängigkeiten, was für ein erstes Screening nicht von Nachteil erscheint. Da die genannten Indikatoren ausschließlich auf Handels- und Produktionsdaten basieren, die in Form von Zeitreihen vorliegen, lassen sich zeitliche Entwicklungen auf Basis historischer Daten aufzeigen. Werden zusätzlich Konzentrationsmaße (Herfindahl-Hirschman-Index) der Produktions- sowie der Importabhängigkeiten nach Ländern als Indikator für das Versorgungsrisiko herangezogen, wird auch eine zeitliche Betrachtung innerhalb der Kritikalitätsmatrix ermöglicht. Dabei wird die Position jedes Rohstoffes innerhalb der Kritikalitätsmatrix in jedem Jahr neu berechnet, was einer Erweiterung der Matrix um die zeitliche Dimension entspricht (vergl. Abbildung 3.13).

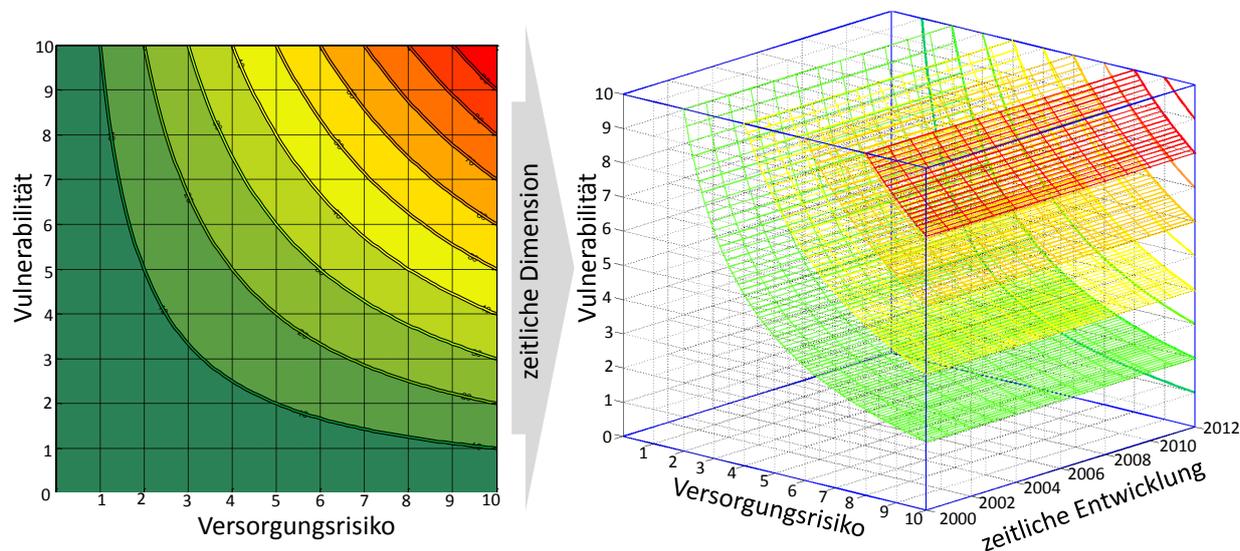


Abbildung 3.13. – Ergänzung der Kritikalitätsmatrix um die zeitliche Dimension als erster Ansatz zur Dynamisierung der Kritikalitätsbetrachtung auf Basis historischer Entwicklungen. Siehe Abbildung 3.14 für die zeitlichen Verläufe der Kritikalitätswerte in Deutschland.

Die Berechnungen der beiden Dimension “relative wirtschaftliche Bedeutung (RWB)” und “Versorgungsri-

3. Statistische Analysen und indikatorbasierte Vorüberlegungen

siko (VR)“ werden in den Gleichungen 3.4 und 3.5 nochmals zusammengefasst.

$$\text{RWB} = \frac{\text{Indikator}_1 + \text{Indikator}_2 + \text{Indikator}_3}{3} \quad (3.4)$$

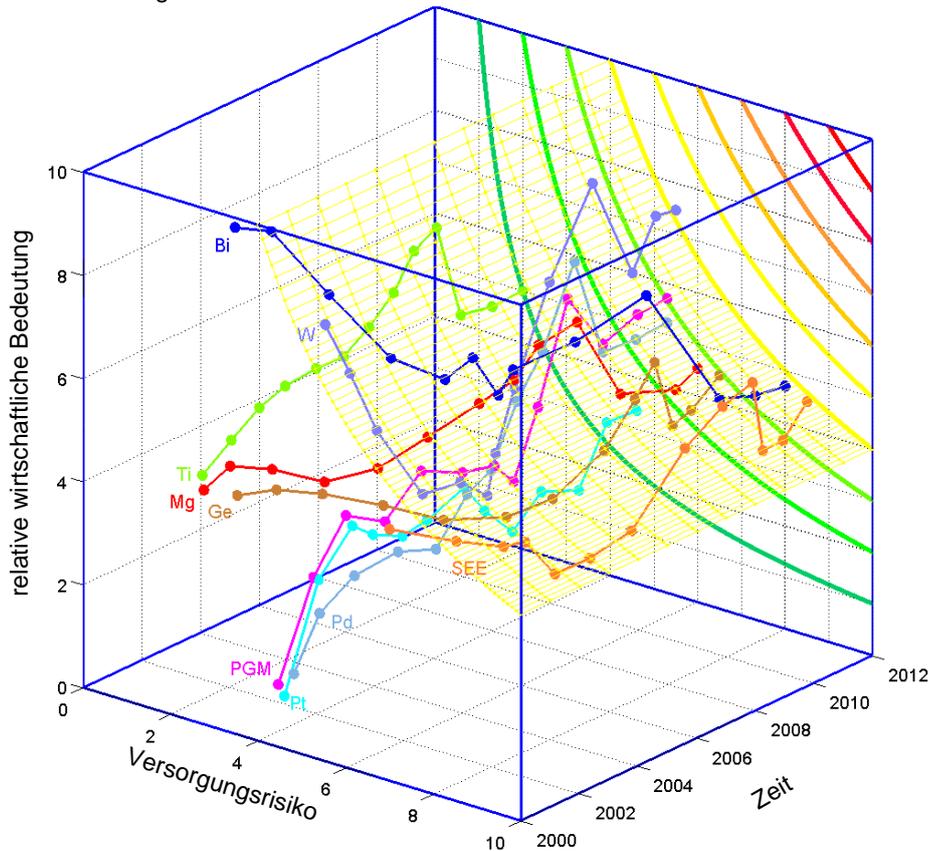
$$\text{VR} = \frac{\text{HHI}_{\text{Produktion Länderebene}} + \text{HHI}_{\text{Importe}}}{2} \quad (3.5)$$

Zur Darstellung der Kritikalitätsmatrix über die Zeit wurden die berechneten Werte für das Versorgungsrisiko (VR) bzw. für die relative wirtschaftliche Bedeutung (RWB) eines Rohstoffes auf eine einheitliche Skala von 1 bis 10 skaliert. Die Ergebnisse dieses recht einfachen, exemplarischen Ansatzes für Deutschland sind in Abbildung 3.14 dargestellt. Zu erkennen ist eine insgesamt recht hohe Dynamik, was auch auf die Größe der Märkte und die schwankenden Handelsströme zurückzuführen ist. In Deutschland zeigen die Seltenen Erden zwar nach wie vor ein sehr hohes Versorgungsrisiko, die relative wirtschaftliche Bedeutung ist aber im Vergleich zu Wolfram und Bismut niedriger. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass es sich bei den Seltenen Erden um eine ganze Stoffgruppe handelt und dass einzelne Elemente dieser Gruppe durchaus eine höhere relative wirtschaftliche Bedeutung haben können. Hier stößt die Analyse von Handelsdaten an ihre Grenzen, da eine stoffspezifische Nachverfolgung aufgrund des Aggregationsniveaus der Güterklassifikation (HS bzw. CN Codes) nicht möglich ist.

Dieser relativ einfache Ansatz zur Ergänzung der Kritikalitätsmatrix um die Dimension der Zeit erscheint durchaus sinnvoll, um mit geringem Aufwand eine grobe Vorstellung von Rohstoffabhängigkeiten und Versorgungsrisiken auf nationaler Ebene zu bekommen. Auch lassen sich auf diese Weise länderspezifische Unterschiede im Rohstoffbedarf relativ einfach herausarbeiten. Dennoch ist dies nach wie vor eine Screening-Methode zur Identifikation potenziell kritischer Rohstoffkandidaten aus einem größeren Portfolio an untersuchten Rohstoffen. Zur Ableitung konkreter Maßnahmen zur Reduzierung von Versorgungsrisiken, z.B. durch eine effizientere Nutzung von Sekundärmaterial (Steigerung der Recyclingeffizienz) sind rohstoffspezifische dynamische Stoffstrommodelle, idealer Weise auf globaler und regionaler Ebene, notwendig. Konzepte zur Entwicklung derartiger Modelle basierend auf dem System Dynamics Ansatz werden im Folgenden vorgestellt und anhand unterschiedlicher Rohstoffkandidaten erprobt.

3.2. Indikatoren basierend auf Zeitreihen als erste Ansätze zur Dynamisierung des Kritikalitätskonzeptes

a: Verlauf der Positionierung innerhalb der Kritikalitätsmatrix über die Zeit



b: Darstellung der Verläufe aus a in 2 Dimensionen (Matrixform)

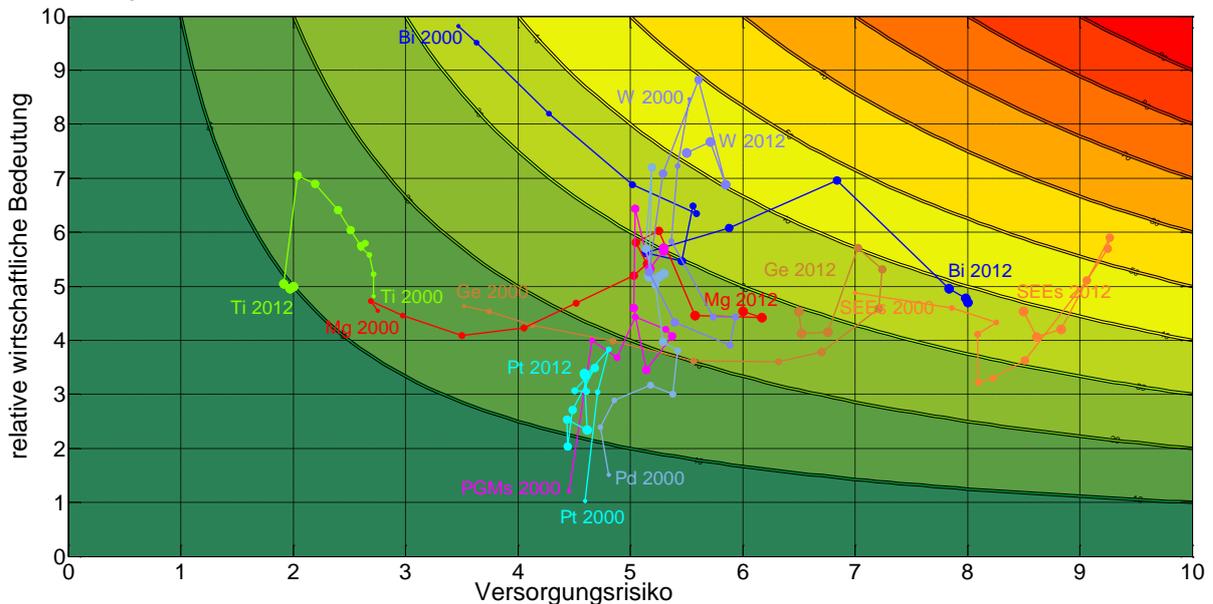


Abbildung 3.14. – Ergänzung der Kritikalitätsmatrix um die zeitliche Dimension als erster Ansatz zur Dynamisierung der Kritikalitätsbetrachtung auf Basis historischer Entwicklungen in Deutschland. Je größer die Punkte in b werden, desto näher liegt der Zeitpunkt am Endjahr 2012 (siehe auch Beschriftung in der unteren Matrix).

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

Die methodischen Grundlagen zur systemdynamischen Modellierung sowie die theoretischen Erläuterungen zur Entwicklung von dynamischen Stoffkreislauf-Modellen werden in diesem Kapitel behandelt. Aufbauend auf die Stoffkreisläufe werden die Grundlagen zur Ergänzung der Modelle um marktdynamische Effekte erörtert¹.

4.1. Der System Dynamics Ansatz

System Dynamics ist eine auf der allgemeinen Systemtheorie und Kybernetik (Steuerungs- und Regelungstheorie) aufbauende Methodik zur Modellierung und Simulation komplexer, dynamischer Systeme. Dabei stehen einzelne Modellelemente über Ursache-Wirkungs-Beziehungen sowie verzögerte Rückkopplungseffekte miteinander im Verhältnis (Bossel, 1989, S.25 f.). Der System Dynamics Ansatz wurde in den 1950er Jahren von Jay W. Forrester am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt (Forrester, 1961). Dabei lag die wissenschaftliche Neuerung nicht in der grundlegenden Simulation dynamischer Systeme über numerische Lösungsverfahren von Differenzialgleichungssystemen – diese Ansätze waren in der Mess- und Regeltechnik kontinuierlicher industrieller Prozesse schon seit längerem im Einsatz – sondern in der Übertragung dieser Systeme auf sozio-ökonomische und ökologische Fragestellungen. Bekannt wurde der System Dynamics Ansatz vor allem durch die 1972 vom Club of Rome veröffentlichte Studie “The Limits to Growth - Grenzen des Wachstums” (Meadows, 1972). In dieser Studie wurde versucht, mit Hilfe des System Dynamics Ansatzes den komplexen Zusammenhang von Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum auf Basis der Einflussfaktoren Nahrung, Ausbeutung fossiler Rohstoffe und resultierenden Umweltproblemen zu erfassen und durch das Bestimmen gegenseitiger Abhängigkeiten die Grenzen des globalen Wachstums zu ermitteln.

Der System Dynamics Ansatz basiert, wie nachfolgend erläutert, auf dem Zusammenspiel von Bestands- und Flussvariablen und deren gegenseitigen Abhängigkeiten. Bestandsänderungen ergeben sich aus der Differenz der mit dem Bestand in Beziehung stehenden Flussvariablen und werden über jeden diskreten Zeitschritt aufsummiert, was mathematisch der Näherung eines Integrals entspricht. Bildlich lässt sich dieser Zusammenhang einfach als Badewanne darstellen, wobei sich die Änderung des Wasserstands in der Wanne

¹Elemente aus diesem Kapitel, insbesondere zur Dynamik von Rohstoffmärkten wurden im Zuge der Dissertation als Konferenzbeitrag (Glöser und Hartwig, 2015) veröffentlicht, sowie als “peer-reviewed” Journalbeitrag eingereicht.

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

(Bestand) zu jedem Zeitpunkt aus der Differenz von Zufluss und Abfluss ergibt (vergl. Abbildung 4.1 links). Da das Prinzip von System Dynamics der allgemeinen Regelungstechnik entspricht, ist die Darstellungsform ähnlich zu Prozessfließbildern: Flussvariablen werden durch das Symbol eines einfachen Handventils dargestellt, Bestandsvariablen durch Kästchen (vergl. Abbildung 4.1 rechts). Neben den typischen Fluss- und Bestandsvariablen enthalten System Dynamics Modelle zahlreiche Hilfsvariablen, wie z.B. Wachstumsraten, Kalibrier-Parameter etc.

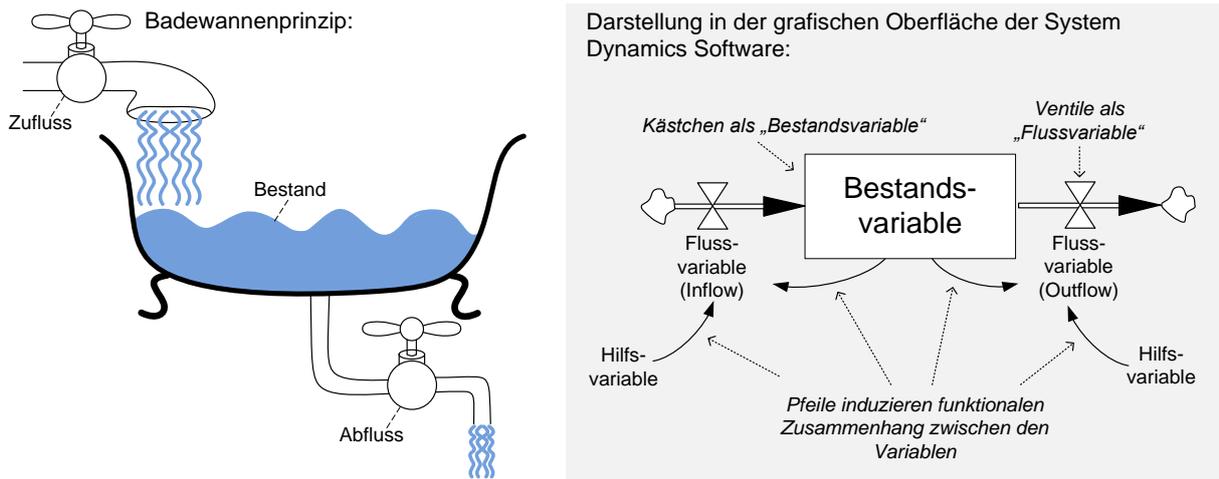


Abbildung 4.1. – Das Badewannenprinzip zur Veranschaulichung von Bestands- und Flussvariablen sowie die Darstellung der verschiedenen Variablentypen innerhalb der System Dynamics Entwicklungsumgebung (vergl. Sterman, 2000, S.52).

4.1.1. Rückkopplungseffekte und zeitliche Verzögerungen

Der zentrale Bestandteil von System Dynamics Modellen ist die Verbindung von Verzögerungseffekten (Delays) und Rückkopplungsschleifen (Feedbacks). In der allgemeinen Regelungstechnik wird in Zusammenhang mit verzögerten Rückkopplungseffekten auch häufig von Totzeiten gesprochen (vergl. z.B. Schneider, 2008, S.331). Rückkopplungen entstehen dadurch, dass die Änderung einer Bestandsvariablen vom Bestand selbst abhängig ist. Mathematisch entspricht dies einer Differenzialgleichung. Systeme aus Differenzialgleichungen, insbesondere wenn zeitliche Verzögerungen enthalten sind, lassen sich meist nicht explizit lösen (durch Berechnung einer expliziten Lösungsfunktion), sondern nur näherungsweise über zeitdiskrete numerische Verfahren. Inzwischen existieren zahlreiche Softwareangebote zur Formulierung, Lösung und Simulation dynamischer Systeme basierend auf numerischen Lösungsverfahren der zugrunde liegenden Differenzialgleichungen (vergl. Abschnitt A.3 Anhang, siehe auch Ford, 1999, S.32 ff.). Das einfachste Verfahren zur numerischen Lösung von Differenzialgleichungen ist das explizite Eulerverfahren, das durch Untersummenbildung berechnet wird (vergl. Abbildung 4.2)².

Das in Abbildung 4.2 auf der linken Seite gezeigte einfache Beispiel der inflationsbedingten Preissteigerung

²weitere gängige Methoden zur numerischen Lösung von gewöhnlichen Differenzialgleichungssystemen werden im Anhang A.3.3 vorgestellt.

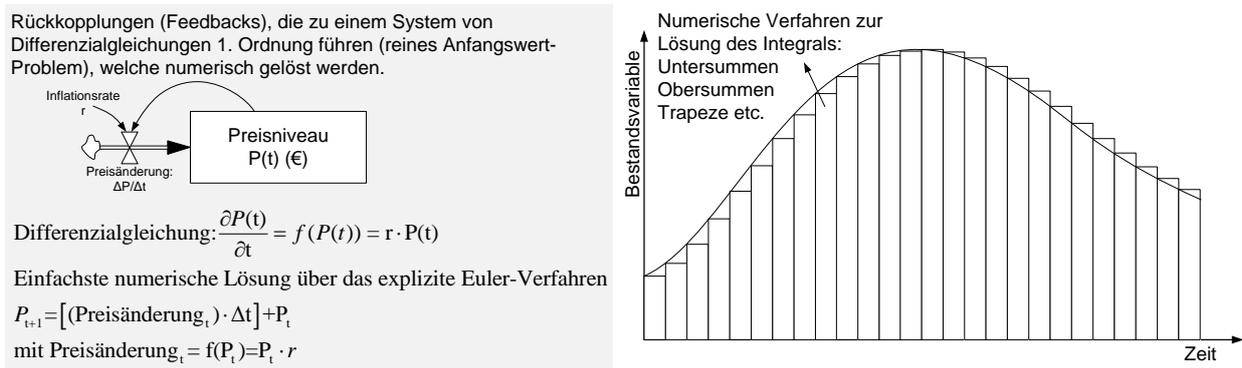


Abbildung 4.2. – Rückkopplungen, die zu einem System aus Differentialgleichungen 1.Ordnung führen, welches dann als reines Anfangswertproblem numerische gelöst wird. Zu beachten ist, dass durch die Näherungsverfahren Fehler entstehen, die sich über die Zeit aufsummieren und zu nicht unerheblichen Unterschieden zwischen expliziten Lösungsfunktionen (wenn diese berechnet werden können) und Simulationsergebnissen führen.

entspricht im Falle einer konstanten Wachstumsrate einer exponentiellen Wachstumsfunktion. Die zusätzliche Implementierung von Verzögerungsfunktionen ermöglicht die Formulierung vielseitiger dynamischer Zusammenhänge. So entstehen z.B. durch verzögerte Angebotsanpassung aufgrund von Planungs- und Bauphasen neuer Produktionskapazitäten Preiszyklen (vergl. Abbildung 4.3), die mit Hilfe des System Dynamics Ansatzes darstellbar sind (siehe hierzu Abschnitt 4.3).

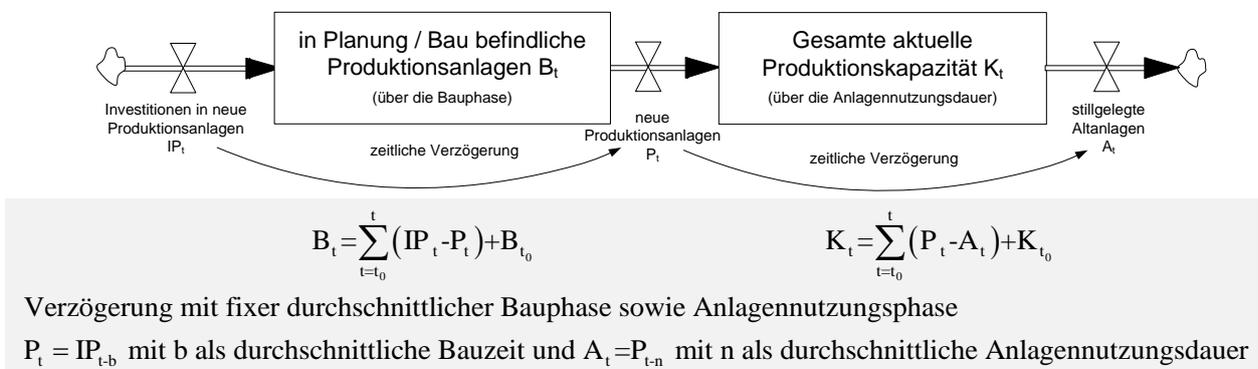


Abbildung 4.3. – Verzögerungsmechanismen innerhalb eines System Dynamics Modells am Beispiel einer verzögerten Kapazitätsanpassung durch Planungs- und Bauphase neuer Produktionsanlagen.

Wie zuvor erläutert, bildet die Formulierung von Kausalzusammenhängen unter Berücksichtigung von Rückkopplungseffekten (Feedback Loops) die Basis der systemdynamischen Modellierung. Grundsätzlich wird zwischen positiven und negativen Rückkopplungseffekten unterschieden. Positive “Feedback Loops” verstärken sich gegenseitig und sorgen dadurch für Wachstums- oder Schrumpfungsprozesse (vergl. Abbildung 4.4a, bzw. Abbildung 4.5).

Negative “Feedback Loops” dagegen sind Ziel suchend und streben nach Gleichgewicht und Statik (vergl. z.B. Rothengatter, 2008, S.170). Sie orientieren sich an einem festgelegten Ziel, vergleichen dieses mit

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

dem aktuellen Zustand und leiten gegebenenfalls Korrekturmaßnahmen ein, um dieses Ziel zu erreichen. Abbildung 4.4b zeigt die negative Rückkopplung von Angebot und Nachfrage, die über den Faktor Preis dazu führt, dass sich nach einem anfänglichen Angebotsüberschuss ein Marktgleichgewicht mit einem festen Preis p^* einstellt.

Eine besondere Ausprägung der negativen “Feedback Loops” und damit eine dritte grundlegende Form dynamischen Verhaltens ist die Oszillation (vergl. Abbildung 4.4c). Der oszillierende Charakter eines Systems wird durch Verzögerungen innerhalb der negativen Rückkopplungsschleifen hervorgerufen. So werden die Elemente eines Systems zwar in Richtung der Zielvorgabe hin korrigiert, die Korrektur schießt jedoch regelmäßig über diese Vorgabe hinaus, so dass eine erneute Korrektur in die entgegengesetzte Richtung ausgelöst wird. Derartig oszillierende Funktionen können auch dadurch entstehen, dass die Zielgröße nicht konstant ist, sondern vom Systemzustand abhängt. In technischen Regelungssystemen entstehen nach demselben Prinzip entsprechende Oszillationen, wenn der Regler falsch eingestellt ist, d.h. der Regelkreis zu langsam ist. So kommt es z.B. zu ungedämpften Temperaturschwankungen im Reaktor, wenn aufgrund einer positiven Abweichung von der Solltemperatur (Führungsgröße) die Kühlwassermenge (Stellgröße) zu stark erhöht wird, so dass die Solltemperatur im Reaktor unterschritten wird, was wiederum zu einer Überkorrektur in die andere Richtung führt (vergl. z.B. Schneider, 2008, S.335 ff).

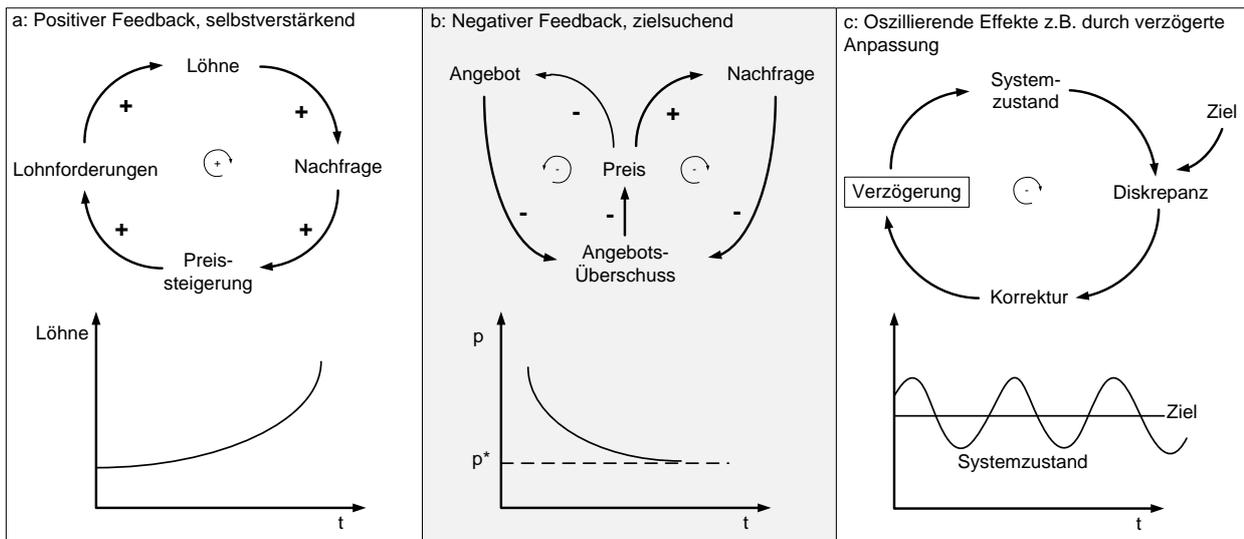


Abbildung 4.4. – Beispiel einer positiven Rückkopplung und sich verstärkende Effekte (a), einer negativen Rückkopplung und des Zielsuchens (b, vergl. Rothengatter, 2008, S.170) sowie Beispiel einer negativen Rückkopplung mit durch Verzögerung hervorgerufener Oszillation (c, vergl. Sterman, 2000, S.114).

Durch Kombination der in Abbildung 4.4 beschriebenen Rückkopplungseffekte, lassen sich grundlegende Formen dynamischen Verhaltens, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, modellieren. Diese “Archetypen” dynamischen Verhaltens wurden von Senge und Klostermann (2006) detailliert beschrieben.

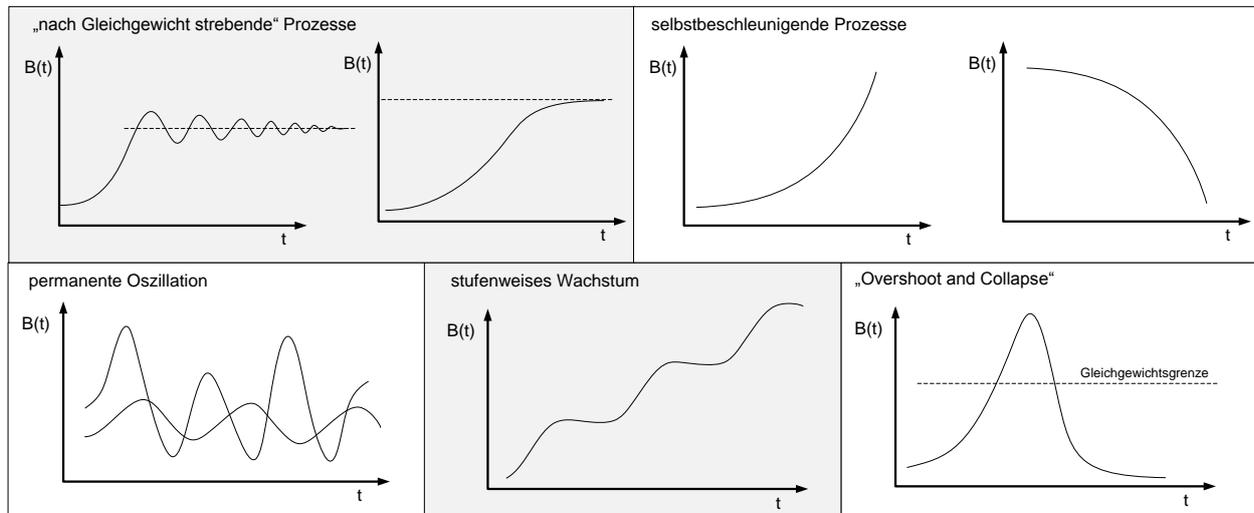


Abbildung 4.5. – Klassische Formen dynamischen Systemverhaltens (vergl. Senge und Klostermann, 2006, S.122 ff), siehe auch (Kappmeier, 1999, Anhang, S.8).

4.1.2. Grundsätzliches Vorgehen bei der Modellentwicklung

Ein kurzer Überblick zur generellen Vorgehensweise bei der Entwicklung eines System Dynamics Modells basierend auf grundlegender Fachliteratur wird nachfolgend gegeben (vergl. hierzu Sterman, 2000; Ford, 1999; Bossel, 1989). Zur strukturierten Vorgehensweise sind die folgenden Punkte zu nennen:

1. Formulierung der Problemstellung und der Systemgrenzen: Was genau soll modelliert werden? Wie steht das Modell in Verbindung mit exogenen Variablen?
2. Formulierung der dynamischen Hypothesen in einem Kausaldiagramm (Causal loop diagram): Wie sehen die Beziehungen zwischen den Modellvariablen aus (vergl. hierzu z.B. Abbildung 4.21)?
3. Übertragung der Kausalzusammenhänge in ein System aus Bestands- und Flussvariablen (“Stocks & Flows”) sowie Implementierung des Modells in die Software: Welche Variablen gehen als Bestände (Stocks) in das Modell ein, welche Variablen sind Flussvariablen (Flows), welche zusätzlichen Parameter und Hilfsvariablen werden benötigt (siehe z.B. Abbildung 6.3)?
4. Simulation, Optimierung, Anpassung, Überprüfung: Grundsätzlich ist der Modellierungsprozess als iterativer Prozess zu verstehen, der immer wieder überprüft und angepasst werden muss. Das liegt vor allem daran, dass mit Hilfe von System Dynamics Modellen meist qualitative Zusammenhänge quantitativ dargestellt werden. Dass die einzelnen Rückkopplungseffekte im System existieren ist durch Recherche, Expertenbefragung, logische Überlegungen oder reine Hypothesen zunächst als gegeben hinzunehmen. Die Intensität der Rückkopplungseffekt steht aber nicht von vornherein fest, sondern muss durch ständiges Überprüfen der Plausibilität der Simulationsergebnisse angepasst werden. Auch werden in diesem Zusammenhang oft iterative heuristische Optimierungsprozesse zur Kalibrierung des Modells anhand vorhandener Daten eingesetzt (siehe z.B. Kupfer-Marktmodell in Kapitel 6.2).

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

Eine grafische Übersicht zum Modellierungsprozess ist in Abbildung 4.6 gegeben. Entscheidend ist dabei vor allem der iterative Charakter der Modellentwicklung. Im Gegensatz zu statistisch-ökonomischen Ansätzen, bei denen nach der Wahl des Modells (z.B. polynomische Regression) lediglich die Optimierung (Parameteranpassung an Vergangenheitsdaten) durchzuführen ist, findet bei Anpassung eines System Dynamics Modells an historische Daten häufig auch eine Änderung der Modellstruktur statt. Dabei wird die Modellstruktur dadurch gerechtfertigt, dass basierend auf den zuvor aufgestellten dynamischen Hypothesen eine Reproduzierbarkeit historischer Entwicklungen ermöglicht wird. Aus diesem Grund ist der Prozess der Modellentwicklung als iterativer Prozess zu verstehen (vergl. Abbildung 4.6, siehe auch Sterman, 2000, S.86).

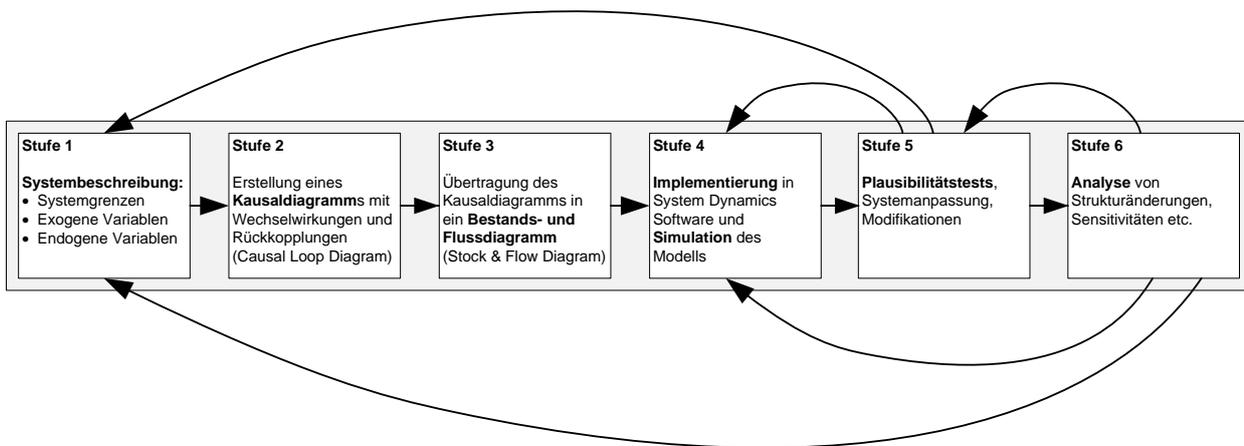


Abbildung 4.6. – Stufen der Entwicklung eines System Dynamics Modells (vergl. Forrester, 1994; Sterman, 2000, S.86 f.).

Software-Angebote zur Implementierung von System Dynamics Modellen und tiefere Aspekte der numerischen Lösung von Systemen aus gewöhnlichen Differenzialgleichungen werden im Anhang A.3 gegeben.

In der vorliegenden Arbeit wird der System Dynamics Ansatz zur Modellierung von Rohstoffsystemen verwendet. Dabei liegt der Fokus einerseits auf der Simulation von physischen Stoffströmen über den gesamten Verwendungszyklus des Metalls, andererseits auf der Modellierung von Marktdynamiken und Rückkopplungseffekten auf Angebots- und Nachfrageseite. Die methodischen Grundlagen zur Verwendung von System Dynamics für die im Anschluss vorgestellten Rohstoffmodelle, aufgeteilt in die Stoffstrommodellierung und die Modellierung von Marktdynamiken, werden in den folgenden beiden Unterkapiteln erläutert und spezifiziert.

4.2. Dynamische Stoffstrommodellierung

Im folgenden Abschnitt werden grundlegende Aspekte und Methoden der dynamischen Stoffstrommodellierung vorgestellt. Hierzu wird zunächst auf die Grundprinzipien der Material- und Stoffstromanalyse eingegangen und die Notwendigkeit der dynamischen Modellierung hervorgehoben. Anschließend folgen die methodischen Erläuterungen zur dynamischen Stoffstrommodellierung mit Hilfe des System Dynamics Ansatzes³.

4.2.1. Industrial Ecology, Material- und Stoffflussanalysen

Der stetig steigende globale Ressourcenverbrauch und die damit verbundenen Umweltauswirkungen, aber auch die zunehmende Konkurrenz um den Rohstoffzugang erfordern ganzheitliche Betrachtungen der im industriellen Produktionsprozess eingesetzten Materialien. Diese oftmals unter dem Begriff “Industrial Ecology” zusammengefassten Ansätze tragen erheblich zur Transparenz der Ressourcennutzung und zur Quantifizierung von Verbesserungspotenzialen der Ressourceneffizienz bei.

Dabei sollen analog zum natürlichen Ökosystem Ressourcen möglichst effizient genutzt werden und in einer Kreislaufwirtschaft so wiederverwendet werden, dass Abfallströme als Ausgangsmaterialien weiterer Prozesse genutzt werden, wodurch dauerhafte Materialverluste minimiert werden. Häufig wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff des “industriellen Metabolismus” genannt (vergl. Abbildung 4.7, sowie Ayres und Simonis, 1994; Baccini und Brunner, 2012). Im deutschsprachigen Raum wird der Forschungsbereich “Industrial Ecology” als Teildisziplin der Umweltwissenschaften auch häufig als Stoffstrommanagement bezeichnet (von Gleich und Gößling-Reisemann, 2008), oder auch allgemeiner als industrieller Stoffhaushalt (Baccini und Bader, 1996).

Ein wichtiges Werkzeug ist dabei die Stoffstromanalyse, die als Spezialisierung der breiter gefassten Materialflussanalyse angesehen werden kann. Während bei Materialflussanalysen meist alle im betrachteten System (z.B. ein Produktionsprozess, eine Region etc.) ein- und austretenden, bzw. verarbeiteten Materialströme quantifiziert und auch häufig grob zu Stoffgruppen aggregiert werden, konzentrieren sich Stoffstromanalysen auf eine bestimmte Substanz (z.B. ein Metall) die über verschiedene Wertschöpfungsstufen hinweg verfolgt wird (vergl. z.B. Brunner und Ma, 2009). Dabei werden systematisch Verwendungsstrukturen, Verarbeitungseffizienzen, Wiederverwendungsquoten, Einträge in die Umwelt sowie die Akkumulation von Stoffmengen quantifiziert und bilanziert. Hauptergebnisse ganzheitlicher Stoffflussanalysen sind u.a. Bestandsmengen aktuell verwendeten Materials, weitere anthropogene Lagerstätten in Form von Deponien oder Halden, jährliche Stoffströme wie z.B. Verwendungsmengen in verschiedenen Industriesektoren, aber auch Produktions- und obsolete Produktströme sowie deren derzeitige Wiederverwendungsquoten (vergl. z.B. Chen und Graedel, 2012; Glöser et al., 2014).

Für die Bewertung möglicher Maßnahmen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz und zur Analyse alternativer Bezugsquellen, z.B. durch effizientere Kreislaufführung und die bessere Nutzung von Recyclingpo-

³Inhalte aus diesem Abschnitt wurden im Zuge der Dissertation als Konferenzbeiträge (vergl. Glöser et al., 2013b, 2014) sowie als Beitrag in einem Fachmagazin (Glöser et al., 2013a) veröffentlicht.

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

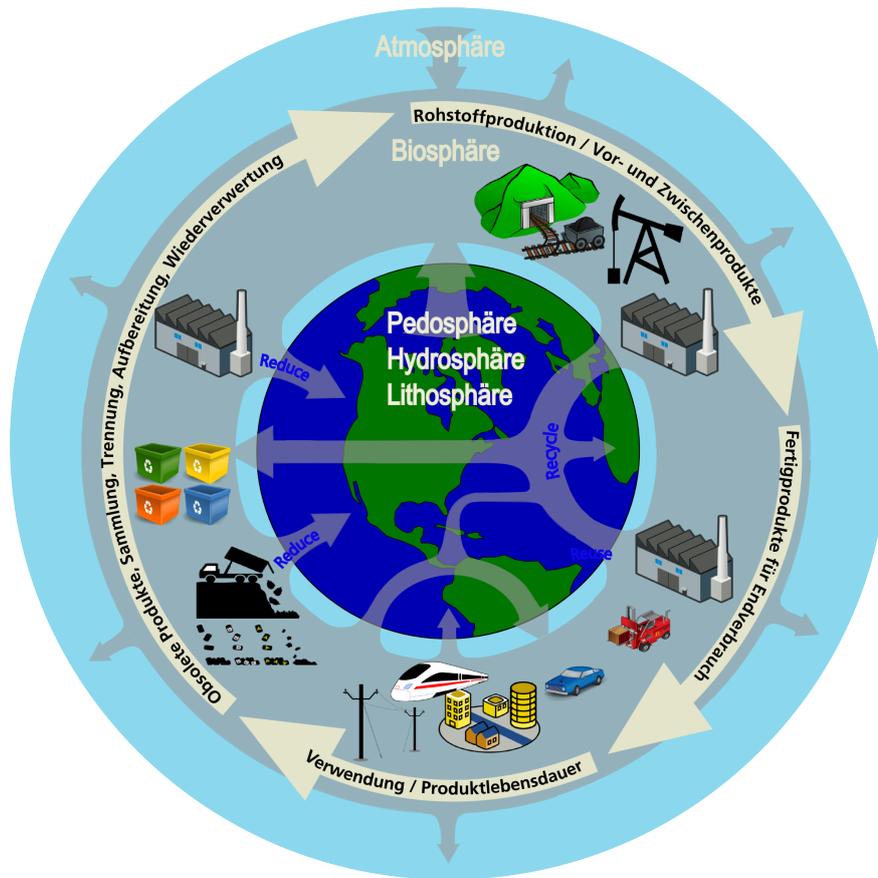


Abbildung 4.7. – Grundgedanke des Forschungsbereichs “Industrial Ecology” ist die Analyse und Offenlegung des industriellen Metabolismus (eigene Darstellung, Clipart entnommen aus: www.openclipart.org).

tenzialen (Goldmann, 2010; Rotter, 2012) oder durch Möglichkeiten der Materialsubstitution (Ziemann und Schebek, 2010), fehlen häufig ganzheitliche Betrachtungen, die den gesamten “Lebenszyklus” eines Metalls abbilden (Weiser et al., 2015). Dabei ist die gezielte Kreislaufführung insbesondere bei Metallen sinnvoll, da diese zwar meist im Verbund mit anderen Materialien oder als Legierungen verarbeitet werden, im Vergleich zu organischen Materialien über ihren gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung (Reduktion der meist oxidischen oder sulfidischen Erz-Mineralen), über die Verarbeitung bis hin zum Einsatz in Produkten und der anschließenden Beseitigung bzw. Wiederverwertung in ihrer elementaren Form erhalten bleiben. Dies macht das Recycling auch aus Sicht der Energiebilanz sinnvoll, da der energieintensive Schritt der Reduktion von mineralischen Verbindungen zu elementarem Metall eingespart werden kann (Ayres, 1997; Norgate et al., 2007; Johnson et al., 2008; Nuss et al., 2014).

Eine klare Quantifizierung von Materialmengen in Abfallströmen ist Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung neuer Recyclingverfahren und dient der Identifikation und Bewertung alternativer Bezugsquellen. Dabei bilden die immer komplexeren Verbundmaterialien in Konsum- und Investitionsgütern mit hoher Diversität an verschiedenen Technologiemetallen neue Herausforderungen für die Recyclingindustrie, wobei die meisten Technologiemetalle (abgesehen von einigen Edelmetallen) aus wirtschaftlichen Gründen

derzeit nicht zurückgewonnen werden, sondern als Verunreinigungen in den Schrottfractionen klassischer Industriemetalle landen und bei der weiteren Verarbeitung in den Schlacken und Aschen verloren gehen (vergl. z.B. Hagelüken, 2010; Graedel et al., 2011a; Faulstich, 2012). In den folgenden Abschnitten werden Konzepte und Möglichkeiten der Umsetzung dynamischer Material- und Stoffflussmodelle mit Hilfe des System Dynamics Ansatzes vorgestellt, die aufgrund ihrer flexiblen Anwendbarkeit auf verschiedene Weise ganzheitliche Betrachtung von Rohstoff-Kreislaufsystemen ergänzen können.

4.2.2. Statische und dynamische Ansätze zur Stoffstromanalyse

Abbildung 4.8 zeigt ein allgemeines, vereinfachtes Kreislaufsystem eines metallischen Rohstoffes. Grundsätzlich ist bei der Betrachtung derartiger Kreislaufsysteme zwischen dynamischen und statischen Modellen zu unterscheiden. Statische Modelle betrachten in der Regel die Stoffströme und Bestände eines Referenzjahres, während sich dynamische Modelle auf eine in diskrete Zeitschritte unterteilte Zeitspanne beziehen.

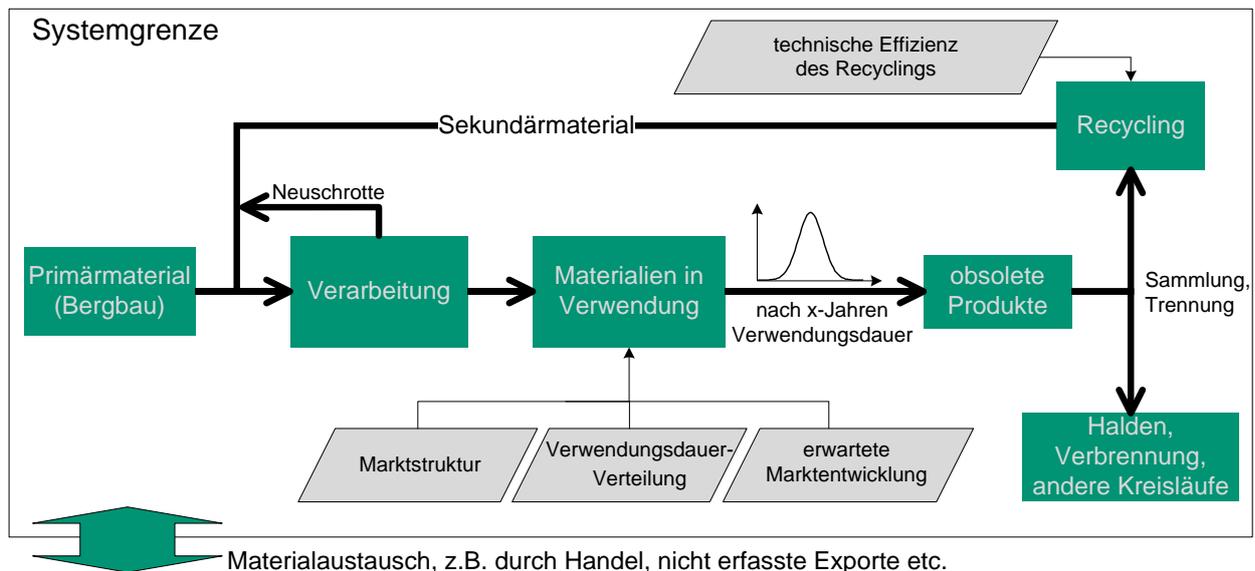


Abbildung 4.8. – Allgemeiner Kreislauf eines Industriemetalls (vergl. z.B. Graedel et al., 2011b).

Gegenüber statischen Modellen weist der dynamische Ansatz eine Reihe von Vorteilen auf: Da sämtliche Jahre innerhalb des betrachteten Zeitraums herangezogen und verglichen werden können, sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass Einmaleffekte, die bei nur einem Referenzjahr eventuell unentdeckt bleiben, die Modellergebnisse verfälschen. Weiterhin ermöglichen dynamische Modelle die detaillierte Simulation zeitabhängiger Entwicklungen, wie z.B. Materialakkumulationen in Verwendung, Produkt-Alterungsprozesse, sowie die zeitliche Entwicklung des Schrottaufkommens basierend auf vergangenen Produktions- und Verkaufszahlen. Vorteilhaft ist weiterhin, dass die Massenbilanzen auch über die Zeit geschlossen sein müssen, wodurch Inkonsistenzen von Inputdaten oder Modellparametern eher erkannt werden (Reuter, 1998). Dadurch können Unsicherheiten verringert und die Modellqualität gesteigert werden.

Wie aktuelle Literaturanalysen zeigen, waren statische Modelle in bisherigen Studien deutlich überreprä-

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

sentiert (siehe Tabelle 4.1). Dies ist wohl vor allem auf den ungleich höheren Aufwand der Modellierung (Chen und Graedel, 2012) sowie auf den benötigten Umfang an Inputdaten zurückzuführen (Müller et al., 2014).

Tabelle 4.1. – Kategorisierung existierender Kreislaufmodelle nach Chen und Graedel (2012).

Modelldimension	global	regional	national	Summe
statisch	47	105	791	943
dynamisch	9	7	60	76
Summe	56	112	851	1019

Dennoch gibt es eine klar steigende Tendenz von Studien und Veröffentlichungen zu dynamischen Stoffstrommodellen und Rohstoffkreisläufen (vergl. Abbildung 4.9), was auf methodische Weiterentwicklung dieser relativ jungen Teildisziplin der Umweltwissenschaften zurückgeführt werden kann und nicht zuletzt mit den klaren Vorteilen dynamischer Ansätze gegenüber statischen Betrachtungen begründbar ist (Müller et al., 2014).

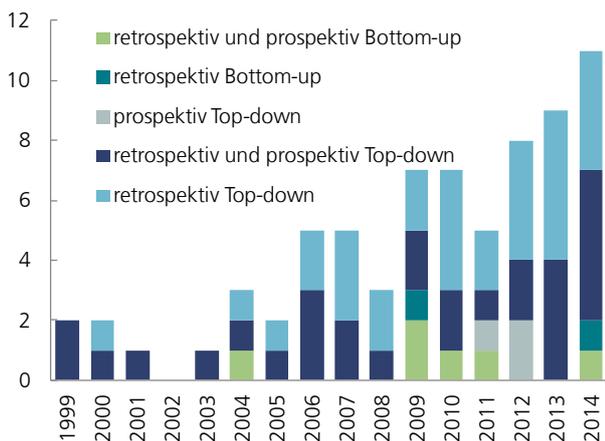


Abbildung 4.9. – Veröffentlichungen zu dynamischen Stoffstrommodellen (Müller et al., 2014).

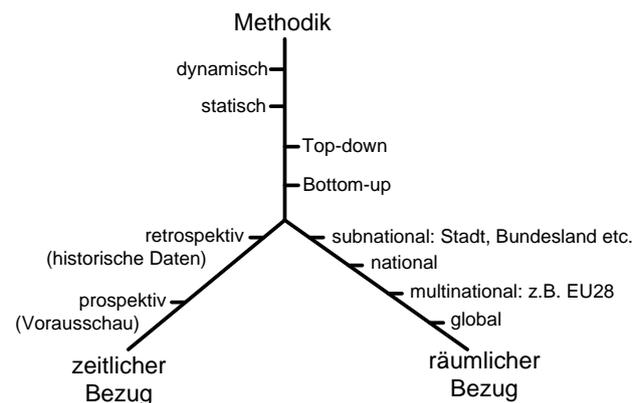


Abbildung 4.10. – Methodische Unterscheidungen von Stoffstrommodellen (vergl. Glöser et al., 2014).

Weiterhin lassen sich Stoffstrommodelle nach Faktoren wie dem zeitlichen Betrachtungsrahmen (prospektiv, retrospektiv), oder des geographischen Bezugsraums unterscheiden (vergl. Abbildung 4.10).

Darüber hinaus wird methodisch zwischen Bottom-up-Aggregationen von Rohstoffgehalten über die Gesamtheit der hergestellten oder verkauften Produkte bzw. einer Top-down-Verteilung der insgesamt verfügbaren Rohstoffmenge (Rohstoffproduktion + Importe - Exporte) auf einzelne Verwendungsbereiche unterschieden. Das Prinzip beider Ansätze ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Tendenziell eignen sich für globale und geographisch weitläufigere Analysen (bis hin zur Länderebene) Top-down-Ansätze (Pauliuk et al., 2013), da meist Produktions- und Handelsdaten sowie Verwendungsstrukturen durch Behörden (z.B. Zollämter) und Industrieverbände festgehalten werden, während für kleinere räumliche Dimensionen (z.B. Städte, Landkreise, Bundesländer) aufgrund der schlechten Datenlage hauptsächlich auf Bottom-up-Ansätze

zurückgegriffen wird (vergl. z.B. Bergbäck et al., 2001). Auch sind Bottom-up-Ansätze bei der Stoffstromanalyse von Technologiemetallen häufig notwendig, da die Datenlage zu Produktionsmengen und Verwendungsstrukturen oft unvollständig erscheint und der Stoffaustausch über die Systemgrenzen aufgrund von unzureichendem Detailgrad der Güterklassifikationen (z.B. HS Codes zur Bestimmung von Handelsdaten) möglicherweise nicht eindeutig nachvollzogen werden kann. Zu beachten ist, dass durch die pauschale Abschätzung von Materialgehalten pro Produkteinheit (z.B. kg Kupfer pro Laptop, Mobiltelefon, Pkw etc.) bereits bei geringen Schätzfehlern durch die Aufsummierung großer Stückzahlen erhebliche Gesamtabweichungen entstehen können. Daher sind, wenn es die Datenlage ermöglicht, Top-down und Bottom-up Vergleiche zur Ergebnisvalidierung sehr sinnvoll (Hirato et al., 2009).

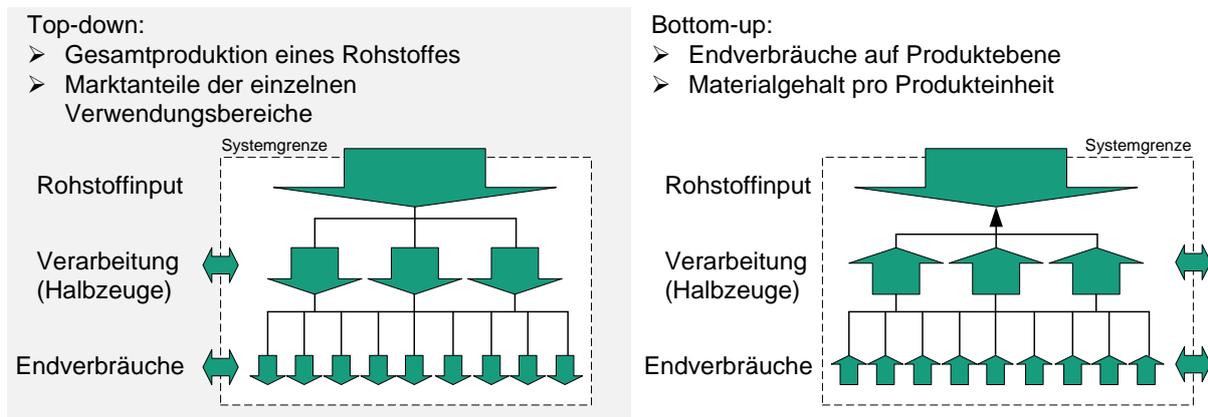


Abbildung 4.11. – Top-down- und Bottom-up-Ansätze zur Modellierung von Materialflüssen.

4.2.3. Dynamische Stoffkreisläufe und Produktlebenszyklen

Wie im folgenden Abschnitt erläutert, eignet sich der System Dynamics Ansatz auf vielseitige Weise zur Entwicklung und Simulation von Materialkreisläufen und Stoffflussmodellen. Dies ist vor allem auf die vielseitigen Möglichkeiten der Modellierung von Materialakkumulationen über Produkt-Verwendungsdauern durch verschiedene Verzögerungsfunktionen sowie auf das Prinzip der Bestands- und Flussvariablen zurückzuführen. Weiterhin ermöglicht der flexible Modellaufbau eine individuelle Anpassung an die Eigenschaften einzelner Kreislaufsysteme.

Produktlebensdauern und “Aging Chains”

Bei der Bewertung von Recycling-Effizienzen für Industriemetalle stellt sich regelmäßig das Problem, dass zwar recht gute Produktionsstatistiken vorhanden sind, das genaue Schrottaufkommen aber nur in sehr begrenztem Umfang erfasst wird.

Die Gesamtproduktionsmengen ebenso wie die Produktion aus primären Quellen (Erzverarbeitung im Bergbau) werden meist dokumentiert. So kann die Recyclingmenge aus der Differenz aus Gesamtproduktion und Primärproduktion errechnet werden. Aus diesem Zusammenhang lässt sich allerdings nicht bestimmen

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

wie viel von der theoretisch vorhandenen Schrottmenge tatsächlich recycelt wird, also wie hoch die Recyclingeffizienz der Altschrotte ist. Hierzu können Lebenszyklus-Modelle nach dem in Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13 beschriebenen Prinzip herangezogen werden. Die Abschätzung des Schrottaufkommens erfolgt dabei als Verzögerungsfunktion historischer Produktionszahlen (vergl. Abbildung 4.12).

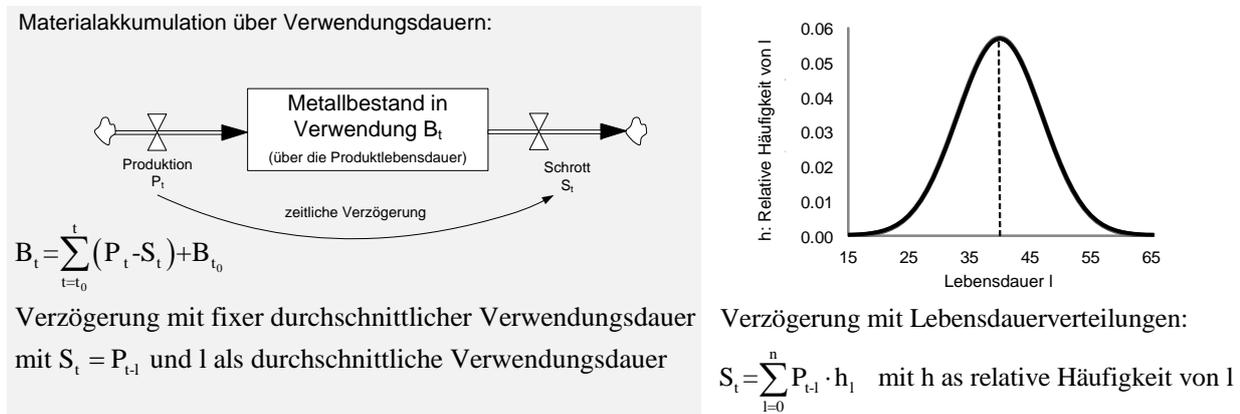


Abbildung 4.12. – Akkumulation von Produkten und Materialien über die Verwendungsdauern mit Hilfe von fixen durchschnittlichen Verwendungsdauern bzw. Verteilfunktionen.

Gelangen obsoletere Produkte (alte Elektroware, Altfahrzeuge etc.) in falsche Abfallkanäle (z.B. alte Mobiltelefone in den Hausmüll und dann in Müllverbrennungsanlagen), oder werden als Gebrauchsgüter deklariert und exportiert, um auf ineffiziente Weise unter hoher Umweltbelastung in Entwicklungsländern “recycelt” zu werden, ist dies als Ressourcenverlust zu bewerten und ist weder aus ökologischer noch aus ökonomischer Sicht sinnvoll (Hagelüken, 2010). Weiterhin wird das Recycling von Elektroschrotten wegen der immer kürzeren Produkt- und Innovationszyklen und der zahlreichen verschiedenen Materialien, die in den Produkten verarbeitet sind, auch technisch zu einer immer größeren Herausforderung (Goldmann, 2010; Graedel et al., 2011b; Reuter et al., 2013b). So unterscheidet sich z.B. ein modernes Smartphone bezüglich der verwendeten Materialien massiv von konventionellen Mobiltelefonen, die noch vor wenigen Jahren Marktführer waren. Dies fängt bei der Batterietechnologie an und geht über die Bildschirme (Displays), Gehäuse und Gläser bis hin zu den Mikrocondensatoren auf den Leiterplatten (Gantner et al., 2013). In diesem Zusammenhang ist es für die Recyclingindustrie oft wichtig, eine genauere Vorstellung von der Zusammensetzung der Schrotte, deren Alter usw. zu bekommen. Hierzu kann die in Abbildung 4.13 beschriebene “Aging Chain” herangezogen werden.

Auf Basis historischer Produktions- und Verkaufszahlen werden die Materialien (bzw. Produktbestände) für jeden Zeitschritt simuliert, wobei am Ende des Zeitschrittes die Materialien entweder der Verschrottung zugeführt werden, oder in den Bestand nächst höheren Alters fließen. Die jeweiligen Ausfallraten lassen sich aus den angesetzten Verteilfunktionen nach dem in Abbildung 4.13 dargestellten Prinzip berechnen. Während in Abbildung 4.13 die Beispiele der Gaußschen Normalverteilung sowie einer rechtsschiefen Log-Normalverteilung aufgeführt sind, werden im Anhang (Abbildung A.6) weitere typische rechts- und linksschiefe Verteilfunktionen aus den Bereichen des Qualitätsmanagements und der Sicherheitstechnik zur Beschreibung von Lebensdauerlverteilungen gegeben. Im Bereich der Bewertung der Sicherheit und Qua-

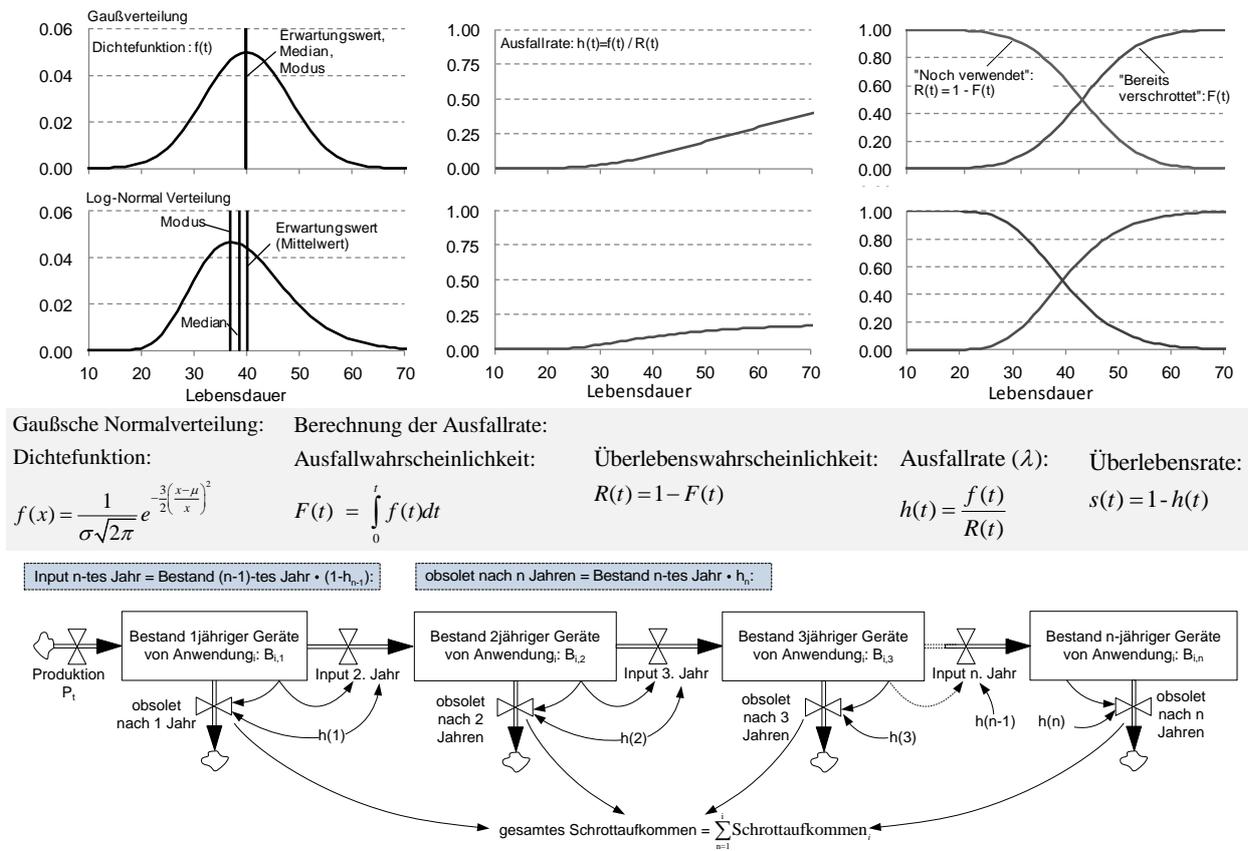


Abbildung 4.13. – Detaillierte Simulation von Produktlebenszyklen und Alterungsprozessen über sogenannte “Aging Chains” und korrespondierende Ausfallwahrscheinlichkeiten.

lität technischer Anlagen ist das Prinzip der Ausfallwahrscheinlichkeiten seit langem verbreitet und in der Fachliteratur zugänglich (vergl. z.B. Kahle und Liebscher, 2013). Mit Hilfe von System Dynamics Software lassen sich nach diesem Ansatz mit relativ geringem Arbeitsaufwand verhältnismäßig genaue Stoffstrommodelle entwickeln. Auch lassen sich in der “Aging Chain” einmalige, die Lebensdauer beeinflussende Effekte abbilden. So könnte z.B. eine politische Einflussnahme wie die Abwrackprämie bei Altfahrzeugen als Einmal-effekt in Form einer höheren Ausfallwahrscheinlichkeit in die Modellierung aufgenommen werden, wobei anschließend wieder auf die ursprünglichen Ausfallwahrscheinlichkeiten zurückgegriffen wird.

Wie in Abschnitt 5.2 (vergl. Abbildung 5.9) anhand des Kupfermodells erläutert wird, ist für die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich der angesetzten Verteilfunktion in erster Linie der Erwartungswert der Verteilung (durchschnittliche Lebensdauer) und weniger die Form oder die Standardabweichung der Verteilfunktion relevant. Daher wurde in der vorliegenden Arbeit, auch aufgrund mangelnder Informationen zu genauen Lebensdauerverteilungen⁴ in erster Linie mit Gaußschen Normalverteilungen gearbeitet.

⁴In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass bei Gaußschen Normalverteilungen der Mittelwert (Durchschnitt), der Median (erste 50% der gesamten Verteilungsbreite) und der Modus (Peak der Verteilfunktion) den selben Wert haben. Bei Expertenbefragungen werden diese Werte häufig vermischt: Wird ein Schrotthändler nach dem durchschnittlichen Alter seiner Altfahrzeuge gefragt, nennt er meist das Alter, das unter den Schrottautos am häufigsten vorkommt, also den Modus der Verteilung. Durch die linksschiefe Verteilfunktion liegt der Durchschnitt aber ca. 2 Jahre links vom Modus. So kann es trotz Einbindens

4.3. Modellierung von Marktdynamik

Die hohe Preisvolatilität an Rohstoffmärkten (vergl. Abbildung 4.14a) der vergangenen 10 Jahre und die damit verbundenen Planungsunsicherheiten bezüglich der Rohstoffbeschaffung und der Materialkosten, stellte erhebliche Herausforderungen für zahlreiche Industriezweige dar.

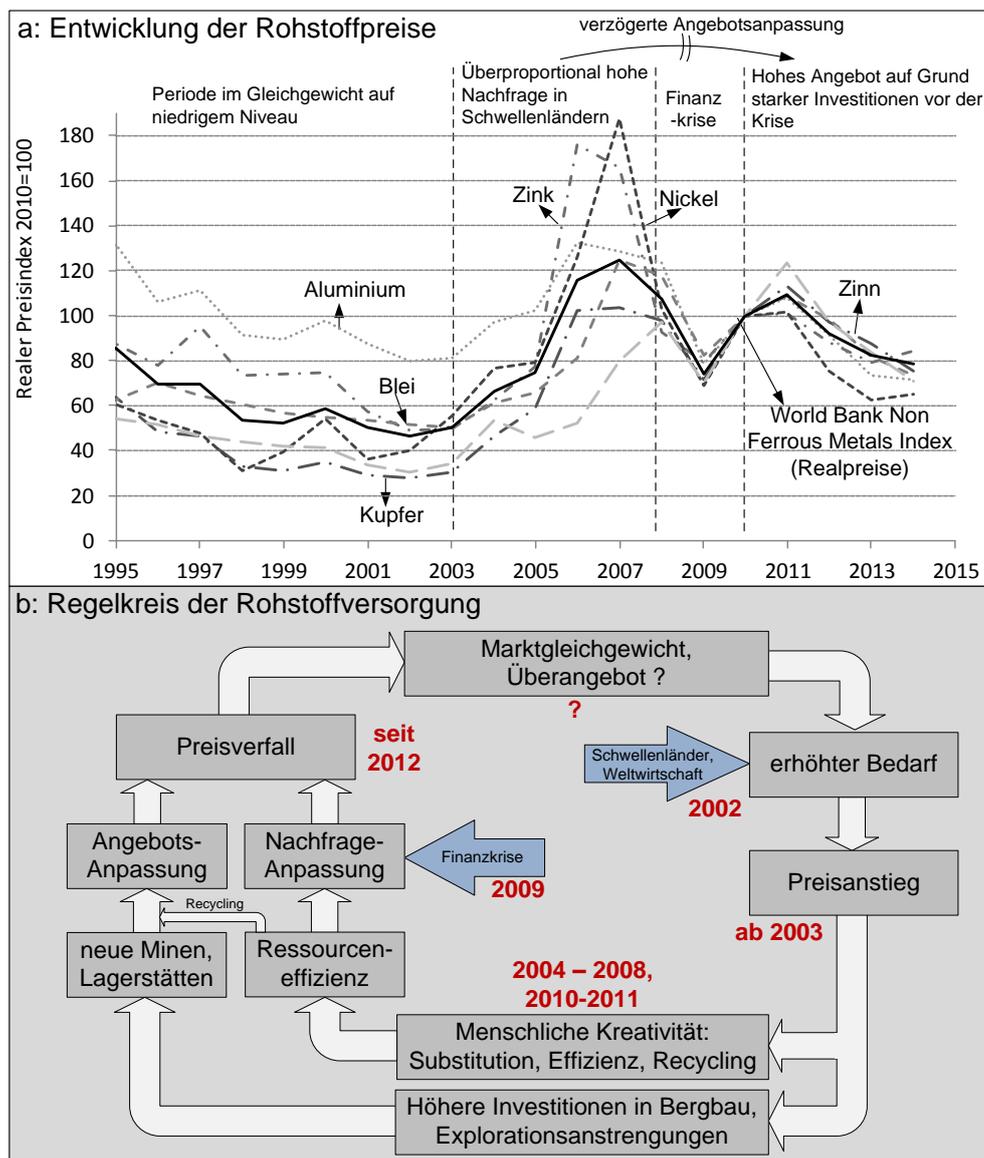


Abbildung 4.14. – Entwicklungen an Rohstoffmärkten.

a: Entwicklung der Rohstoffpreise wichtiger Nicht-Eisen-Metalle.

b: Der qualitativ beschriebene Regelkreis der Rohstoffversorgung (vergl. z.B. Wellmer und Dalheimer, 2012; Schmitz et al., 2012; Buchholz und Schmitz, 2010, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)).

Dies ist nicht zuletzt auf den sehr hohen Anteil der Materialkosten (43% im Schnitt, vergl. Angerer et al., von Fachleuten zu Fehlinterpretationen kommen.

2009, S.2) in der Kostenstruktur des verarbeitenden Gewerbes zurückzuführen. Die Ursache für den starken Preisanstieg seit 2004 wird in erster Linie auf das sehr starke Wachstum der Schwellenstaaten, insbesondere Chinas zurückgeführt. Dabei spielt vor allem die verzögerte Angebotsanpassung als Reaktion auf Nachfrageimpulse eine entscheidende Rolle: Bergbauprojekte benötigen für Zulassungsverfahren, Planung, Bau, Installation von Infrastruktur etc. sehr lange Vorlaufzeiten von 5 bis 10 Jahren (vergl. Abbildung 4.20). Dies führt zu zyklischem Marktverhalten, das zwar nicht so periodisch ausfällt wie der Anfang des 20. Jahrhunderts beschriebene Schweinezyklus (vergl. Abbildung 4.15), dennoch mit einem einfachen Regelkreis qualitativ beschreibbar ist (vergl. Abbildung 4.14b). Dieses verzögerte Anpassungsverhalten an Rohstoffmärkten lässt sich, wie im Folgenden beschrieben, auf bereits relativ einfache Weise in System Dynamics Modellen darstellen. Aber vor allem die Erweiterung von physischen Materialflussmodellen um gewisse Marktdynamiken ermöglicht eine detaillierte Simulation von bisher vorwiegend qualitativ beschriebenen Zusammenhängen an Rohstoffmärkten (vergl. hierzu Abbildung 4.14).

Marktgleichgewicht und verzögerte Angebotsanpassung - Das "Cobweb-Theorem"

Erste Ansätze der systematischen Beschreibung und Analyse von Preiszyklen auf Rohstoffmärkten wurden gegen Ende des 19. bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts für Agrarrohstoffe durchgeführt (Benner, 1876; Hanau, 1928).

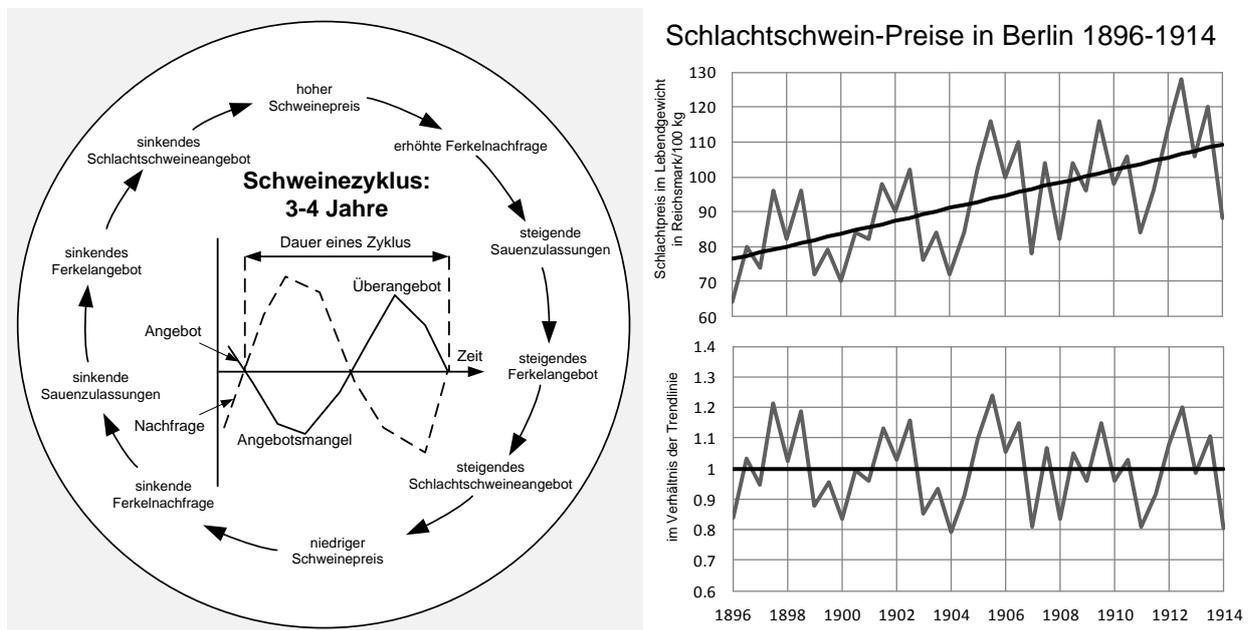


Abbildung 4.15. – Der klassische Schweinezyklus nach Hanau (1928). Hanau untersuchte die Preise für Schweinefleisch in Berlin im frühen 20. Jahrhundert und stellte periodische Schwankungen von 3-4 Jahren fest.

Aus dieser Zeit stammt auch der heute noch gängige Begriff des "Schweinezyklus" für die Beschreibung von Preiszyklen aufgrund verzögerter Angebotsanpassung: Arthur Hanau untersuchte in seiner Dissertation

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

den Preis für Schweinefleisch in Berlin im frühen 20. Jahrhundert und beschrieb, wie in Abbildung 4.15 dargestellt, periodische Preiszyklen von 3-4 Jahren. Als Grund für die nahezu periodischen Preiszyklen identifizierte Hanau die Tatsache, dass sich die Landwirte bei ihrer Entscheidung der Investition in neue Zuchtsäue am aktuellen Marktpreis orientierten. Bis die Säue allerdings ferkeln und die Ferkel zu Schlachtschweinen heranwachsen, vergeht einige Zeit, in der Knappheit am Markt herrscht (Hochpreisphase). Die hohen Investitionen während dieser Hochpreisphase wirken sich allerdings verzögert auf das Angebot aus, was vorübergehend zu einem Überangebot und fallenden Preisen führt, die sich wiederum auf die Investitionen auswirken, was den Zyklus abermals beginnen lässt.

Dieses Phänomen der verzögerten Angebotsanpassung ist aufgrund der hohen Vorlaufzeiten für Planung und Umsetzung neuer Bergbauprojekte, wie nachfolgend gezeigt, auch an heutigen Metallmärkten zu erkennen.

Die mikroökonomische Erklärung von Preisfluktuationen aufgrund verzögerter Angebotsanpassung wurde als "Cobweb-Theorem", bzw. "Spinnenweb-Theorem" bekannt (Ezekiel, 1938), was wie in Abbildung 4.16a dargestellt, auf den Verlauf der Kombinationen aus Angebot- und Nachfrage zurückzuführen ist, die einem Spinnennetz ähneln. Dabei reagiert die Nachfrage unmittelbar auf Preisänderungen, während das Angebot um eine Zeitperiode verzögert der Nachfrage hinterherläuft.

Bei diesem Theorem wird von verschiedenen Fällen der Verläufe der Angebots- und Nachfragefunktion ausgegangen, die nach einer Gleichgewichtsstörung zu

1. kontinuierlicher Fluktuation,
2. divergierendem Verhalten
3. oder konvergierenden Schwingungen führen (vergl. z.B. Ezekiel, 1938).

Dieses theoretische Marktverhalten lässt sich bereits mit einem sehr einfachen, auf einer Bestandsvariablen und einer Verzögerungsfunktion basierenden System Dynamics Modell abbilden (siehe Abbildung 4.16b). Dieses Modell beschreibt zwar das Prinzip von Preisschwankungen aufgrund verzögerter Angebotsanpassung, reales Marktverhalten lässt sich damit aber nicht wiedergeben. Wie in Abbildung 4.16c gezeigt, sind die erzielten Fluktuationen aus dem klassischen Cobweb-Modell als rein theoretische Betrachtung zu verstehen.

Allerdings lassen sich bereits mit einer einfachen Erweiterung des Modells relativ realistische Preiszyklen, wie sie z.B. in Abbildung 4.15 in Form des klassischen Schweinezyklus beschrieben wurden, erzielen. Das in Abbildung 4.17 gezeigte Modell basiert auf einer exogenen, kontinuierlich steigenden Nachfragefunktion sowie auf einer verzögerten Angebotsanpassung (mit Gaußscher Normalverteilung der Dauer von Planungs- und Bauphase), wobei sich die Höhe neu projektierter Angebotskapazität aus dem aktuellen Preisniveau ergibt, welches wiederum aus der relativen Abweichung zwischen Angebot und Nachfrage berechnet wird. In diesem vereinfachten Modell entspricht die Produktionskapazität dem tatsächlichen Angebot.

Wie in Kapitel 6 gezeigt wird, lassen sich auf sehr ähnliche Weise mittelfristige Marktentwicklungen von Industriemetallen basierend auf exogenen Erwartungen zur Entwicklung der Weltwirtschaft mit Hilfe von System Dynamics Modellen abschätzen. Hierzu werden im Folgenden noch einige Grundlagen zu den Ei-

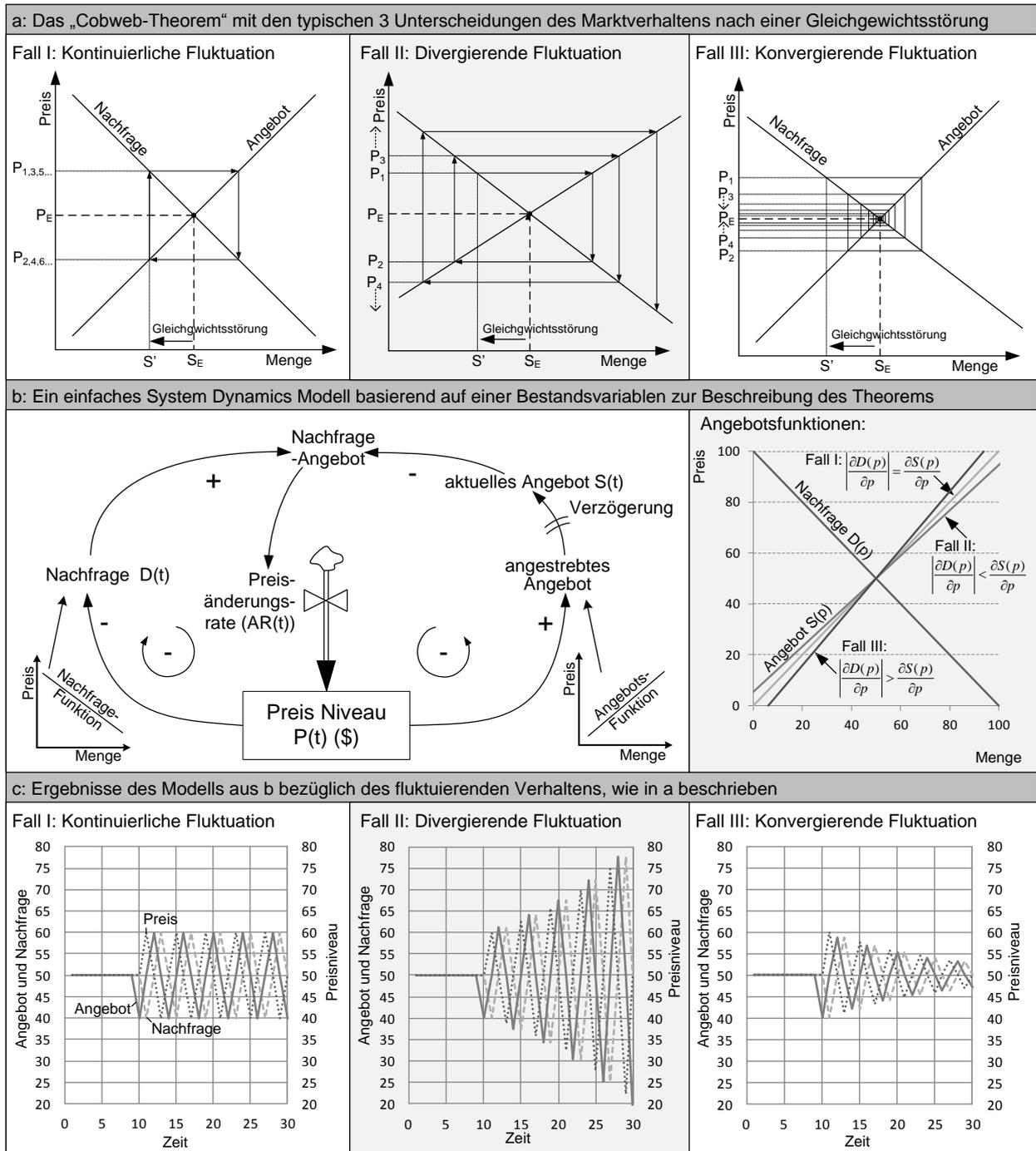


Abbildung 4.16. – Die mikroökonomische Erklärung periodischer Preisschwankungen ist als “Cobweb” bzw. “Spinnenweb-Thorem” bekannt, was auf den Verlauf der Kombinationen von Angebot und Nachfrage zurückgeht (a). Ein einfaches SD-Modell mit einer Bestandsvariablen und einer Verzögerungsfunktion (b) ist bereits in der Lage, dieses Marktverhalten abzubilden (c).

genschaften der Märkte von Industriemetallen erläutert.

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

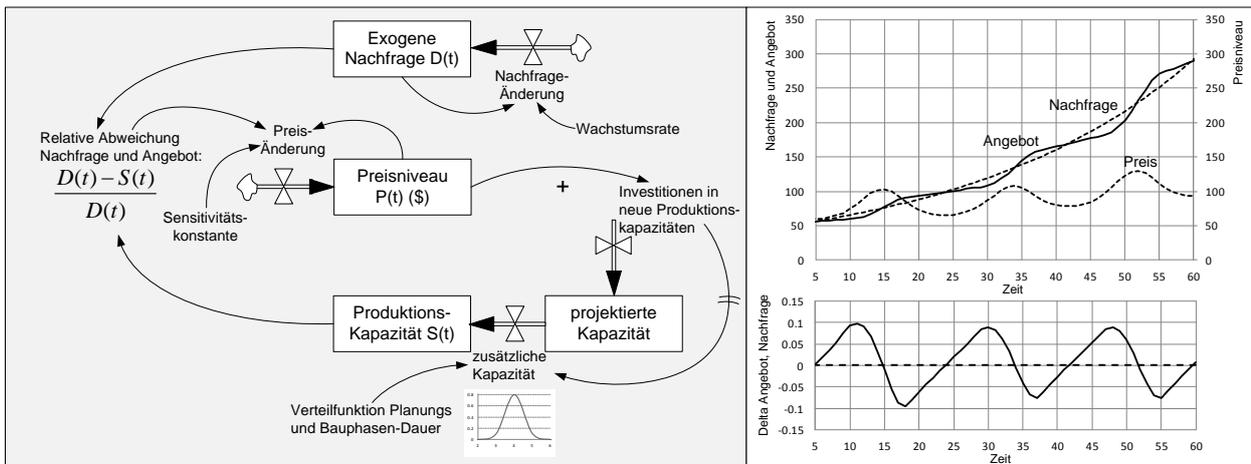


Abbildung 4.17. – Einfaches Marktmodell zur Beschreibung der Ursache periodischer Preisschwankungen aufgrund verzögerter Angebotsanpassung.

Eigenschaften realer Rohstoffmärkte

Während die Nachfrage nach “Hightechmetallen” in erster Linie von der Entwicklung bestimmter Technologien getrieben ist (vergl. z.B.: Angerer, 2010), hängt der Bedarf an klassischen Industriemetallen wie Kupfer, Aluminium oder Eisen hauptsächlich von der Entwicklung der Weltwirtschaft ab. Durch den enormen “Rohstoffhunger” verschiedener Schwellenstaaten, allen voran Chinas, die für den Aufbau ihrer Infrastruktur nach wie vor große Materialmengen benötigen, ist im vergangenen Jahrzehnt sogar der Effekt zu erkennen, dass die Rohstoffproduktion stärker gestiegen ist als die globale Realwirtschaft (inflationbereinigtes, globales Bruttosozialprodukt).

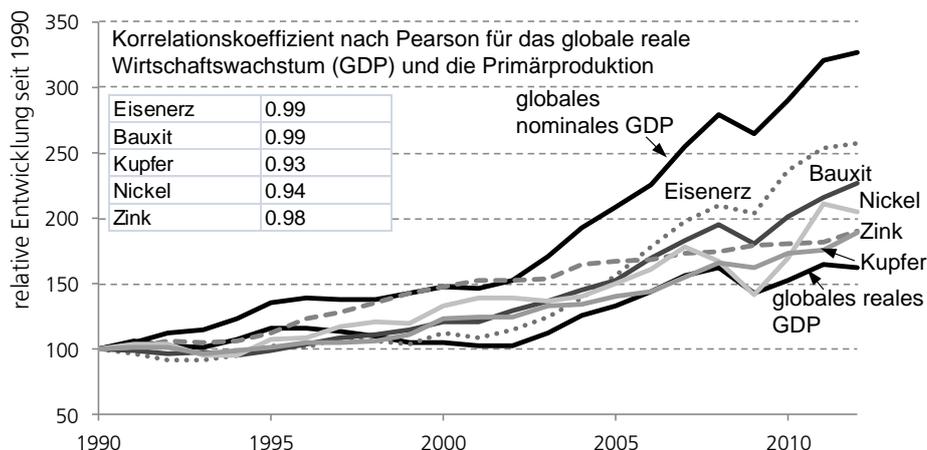


Abbildung 4.18. – Zusammenhang zwischen der globalen wirtschaftlichen Entwicklung und dem Bedarf an Industriemetallen. Eine Entkopplung der wirtschaftlichen Entwicklung vom Ressourcenverbrauch ist hier nicht zu erkennen. Bezogen auf das reale Wirtschaftswachstum steigt der Primärbedarf an metallischen Rohstoffen sogar überproportional. Datengrundlage: USGS und Weltbank.

Das globale Investitionsvolumen in Bergbauprojekte und Explorationsarbeiten ist, wie in Abbildung 4.19 dargestellt, erheblich vom aktuellen Preisniveau abhängig.

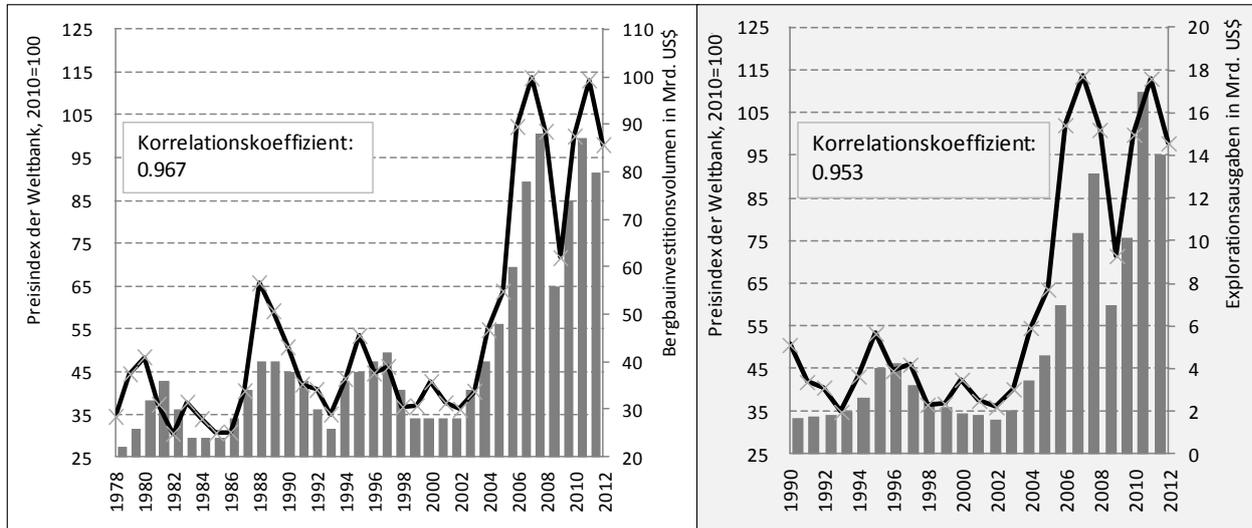


Abbildung 4.19. – Investitionen in Bergbau und Exploration von Nichteisenmetallen in Abhängigkeit der Preisentwicklung (vergl. Humphreys, 2012a,b; Schmitz et al., 2012, nach Daten von SNL Metals).

So zeigen Bergbaukonzerne eine eindeutig adaptive Erwartungshaltung: In Zeiten von hohen Preisen wird die Erwartung der zukünftigen Nachfrage ebenfalls hoch angesetzt, was zu höheren Investitionen führt, während in Tiefpreisphasen vorsichtig agiert wird und aufgrund geringerer Erwartung zukünftiger Nachfragemengen werden die Investitionen zurückgefahren. Effekte der schwierigeren Finanzierung von neuen Produktionsstätten in Zeiten niedriger Rohstoffpreise spielen bei dieser Entwicklung sicherlich auch eine Rolle.

Dieses relativ naheliegende, allerdings nicht rationale Verhalten (da die aktuelle Versorgungssituation ausschlaggebend für die zukünftige Markterwartung ist) kann aufgrund der verzögerten Angebotsanpassung durch lange Planungs- und Bauphasen neuer Bergbauprojekte zu Preiszyklen führen. Insgesamt befindet sich der Markt wegen der verzögerten Angebotsanpassung folglich selten im Gleichgewicht, d.h. es kommt zu permanenten Anpassungseffekten aufgrund von Diskrepanzen zwischen Angebot und Nachfrage.

Wie in Abbildung 4.20 dargestellt, benötigt die reine Bauphase für die Installation der notwendigen Infrastruktur und das Ausheben der Grube einer Kupfermine ca. 7 Jahre. Wird das Genehmigungs- und Planungsverfahren hinzugerechnet ergeben sich Verzögerungen von 8 bis 10 Jahren (vergl. hierzu auch Rosenau-Tornow et al., 2009; Buchholz und Schmitz, 2010) zwischen der Investitionsentscheidung und dem Beginn der Kupferproduktion. Diese langen Vorlaufzeiten bilden eine erhebliche Herausforderung für Rohstoffkonzerne.

Während bisher die Angebotsseite betrachtet wurde, finden auch auf Seite der Rohstoffnachfrage kontinuierliche Anpassungseffekte statt. Dabei geht die Spanne der Anpassung der Nachfrage von einer reinen Effizienzsteigerung (d.h. einer Reduzierung des Rohstoffverbrauchs pro Produkteinheit) bis hin zu verschie-

4. System Dynamics als Methode zur Modellierung von Rohstoffsystemen

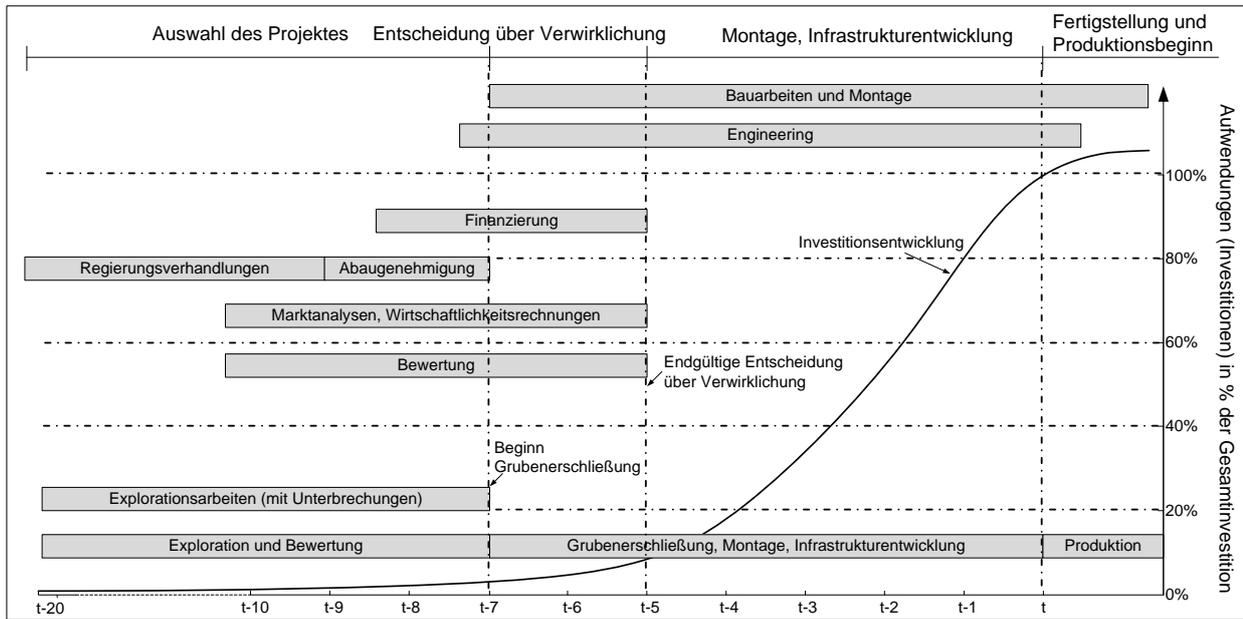


Abbildung 4.20. – Vorlaufzeiten (jährliche Zeitintervalle) für die Planung, Finanzierung und Umsetzung eines Bergbauprojekts (modifiziert nach Gocht, 1983, S.17).

denen Formen der Substitution (vergl. z.B: Ziemann und Schebek, 2010):

Effizienzsteigerung: Eine Technologie / ein Materialsystem erreicht die gleiche Funktionalität mit geringerem Verbrauch eines bestimmten Rohstoffes.

Rohstoff-Substitution: Einzelne Elemente werden durch andere Elemente bei weitgehend gleichbleibender Funktionalität des Materialsystems ersetzt.

Material-Substitution: Ein anderes, optimiertes Materialsystem, das auf der gleichen Funktionalität beruht, ersetzt ein konventionelles Materialsystem.

Funktionale Substitution: Eine alternative Technologie ersetzt die Funktion einer anderen Technologie, was sich direkt auf den Material- und Rohstoffbedarf auswirkt.

Auch ist in Zeiten hoher Rohstoffpreise eine effizientere Sammlung und Trennung von Schrotten zu beobachten (vergl. hierzu z.B. Abbildung 5.11). Insgesamt lassen sich aus der Literatur die in Abbildung 4.21a zusammengefassten Kausalitäten formulieren. Dabei stellt Abbildung 4.21a eine Erweiterung des in Abbildung 4.14b dargestellten Regelkreises der Rohstoffversorgung dar, während Abbildung 4.21b ein Kausaldiagramm dieses erweiterten Regelkreises an Rohstoffmärkten zeigt.

Auf Basis dieser Zusammenhänge und Rückkopplungseffekte werden die im folgenden Kapitel (Kapitel 5) vorgestellten Stoffstrommodelle in Kapitel 6 um marktdynamische Effekte ergänzt. Diese Kombination aus physischen Stoffstrommodellen und Marktdynamiken ermöglicht eine verhältnismäßig realistische und auf verschiedenste Problemstellungen anwendbare Modellierung von Rohstoffsystemen.

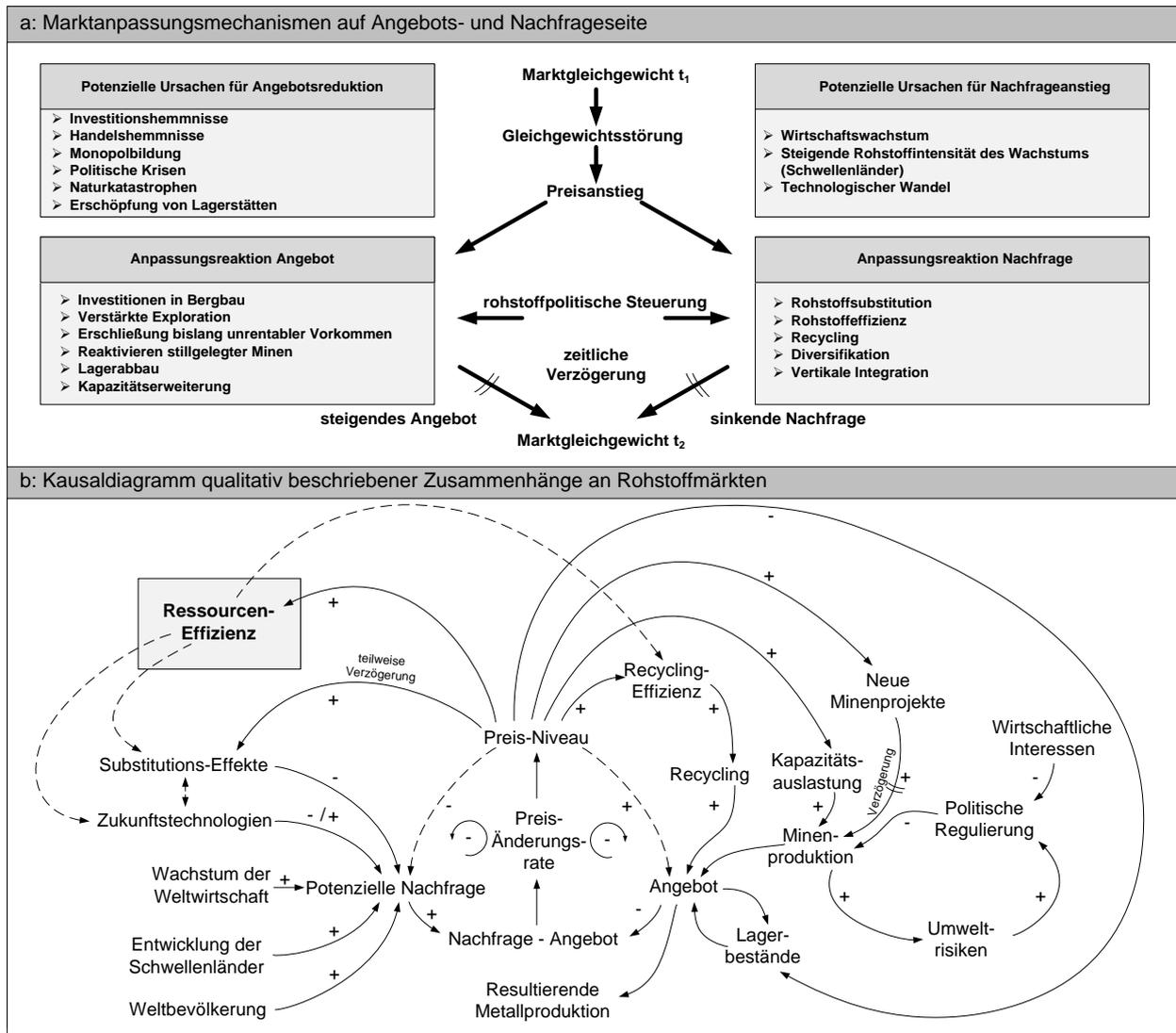


Abbildung 4.21. – Anpassungseffekte an Rohstoffmärkten.

a: Erweiterter Regelkreis der Rohstoffversorgung nach Solar et al. (2009), vergl. auch Wellmer und Dalheimer (2012); Gandenberger et al. (2012, S.25).

b: Kausaldiagramm verschiedener Rückkopplungseffekte auf globalen Rohstoffmärkten Glöser und Faulstich (2012), siehe auch Sverdrup et al. (2014); Olivetti et al. (2015).

4.4. Unsicherheiten und stochastische Simulationen

Zur Analyse von Unsicherheiten in der Datengrundlage, die sich aufgrund der Vielzahl der Input-Parameter kaum vermeiden lassen, aber auch zur Darstellung potenzieller zukünftiger Entwicklungen, die zwingend mit Unsicherheiten belegt sind, haben sich bei der System Dynamics Modellierung stochastische Simulationen, angelehnt an das Monte-Carlo-Prinzip⁵, bewährt.

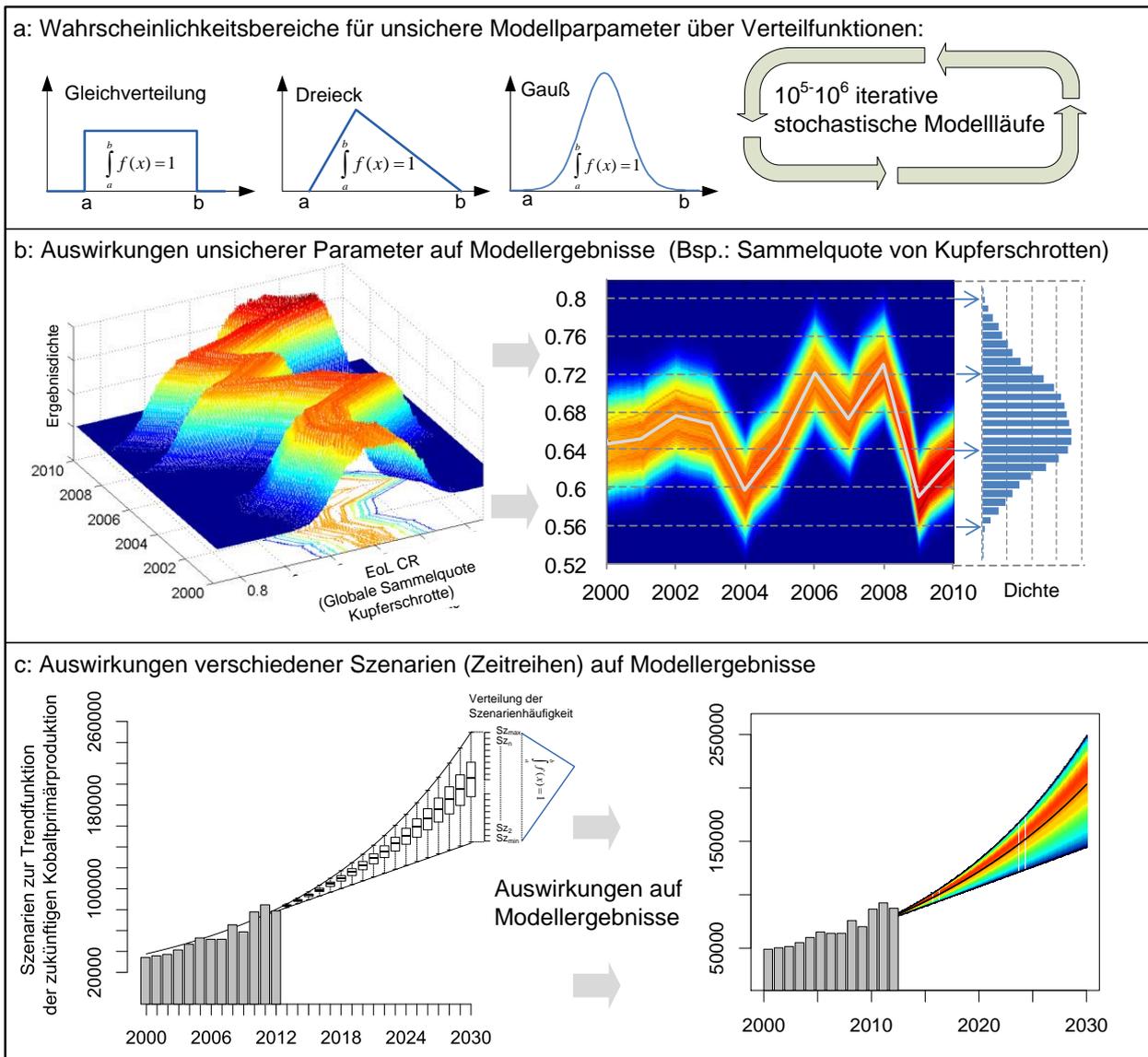


Abbildung 4.22. – Grundprinzip der iterativen stochastischen Simulationsläufe zur Analyse verschiedener Unsicherheiten bezüglich der Inputdaten auf die Modellergebnisse. Dabei lassen sich sowohl einzelne Faktoren (vergl. b) als auch ganze Zeitreihen nach dem in c beschriebenen Prinzip in die iterativen Sensitivitätsanalysen einbinden.

⁵Die Monte Carlo Simulation ist ein Verfahren aus dem Bereich der Stochastik, dem eine sehr große Zahl gleichzeitig ablaufender Zufallsexperimente zugrunde liegt. Über derartige Verfahren können mathematisch aufwendig zu lösende Probleme nach dem Gesetz der großen Zahlen approximiert werden (Brémaud, 1999, S.63 ff.).

Hierzu werden den mit Unsicherheit belegten Variablen keine festen Schätzwerte, sondern Wahrscheinlichkeitsbereiche zugeordnet. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung über den Unsicherheitsbereich kann dabei frei gewählt werden (d.h. Gleichverteilung, Dreiecksverteilung etc., vergl. Abbildung 4.22a). Durch iterative Simulation des Modells mit entsprechender Verarbeitung der Zufallswerte aus verschiedenen Variablen lässt sich auf einfache Weise die Auswirkung der verschiedenen Unsicherheitsfaktoren darstellen. Dieser pragmatische Ansatz liefert zusätzliche Informationen über die Verteilungswahrscheinlichkeit der Zielgröße innerhalb des Lösungsraums (vergl. Abbildung 4.22b), was mit einfachen Minimal- Maximal-Szenarien nicht erreicht wird. Dennoch sollten die Ergebnisse derartiger Simulationen nicht als statistische Konfidenzintervalle, sondern viel mehr als das Produkt individueller Unsicherheitsbewertung gesehen werden. Wie Abbildung 4.22c zeigt, können derartige Zufallssimulationen auch zur erweiterten Szenarioanalyse verwendet werden: Anstelle eines Maximal- und Minimal-Szenarios wird eine Verteilung zwischen den Szenarien vorgegeben, wodurch für die Ergebnisgrößen ebenfalls Dichtefunktionen über die Zeit ausgegeben werden. So können individuelle Einschätzungen in die Simulation aufgenommen werden⁶. Dies erscheint insbesondere bei Nutzung der Modelle zur Vorausschau möglicher zukünftiger Entwicklungen sinnvoll (vergl. hierzu z.B. Marktmodelle in Abschnitt 6.2). Ähnliche Vorgehensweisen haben sich bei der Stoffstrommodellierung zur Analyse von Umwelteinträgen (siehe z.B. Gottschalk et al., 2010; Laner et al., 2015), aber auch beim Umgang mit Unsicherheiten in allgemeinen System Dynamics Modellen bewährt (vergl. z.B. Pruyt, 2007; Auping et al., 2012).

⁶Dies könnte z.B. bei der Einschätzung der zukünftigen Entwicklung der Primärproduktion eines Metalls so aussehen, dass eine individuelle Experten-Einschätzung wie: “Die Entwicklung liegt zwischen einer linearen und einer exponentiellen Trendfunktion, tendenziell aber eher in Richtung des exponentiellen Trends” in den Simulationsläufen berücksichtigt wird.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Das in Abschnitt 4.2 vorgestellte Konzept zur Modellierung von Rohstoffkreisläufen mit Hilfe des System Dynamics Ansatzes wird im folgenden Kapitel auf verschiedene Rohstoffkandidaten angewendet. Ziel dieses Kapitels ist es, die Vielseitigkeit der Modellierungsmöglichkeiten auf globaler und regionaler Ebene unter Verwendung von Top-down und Bottom-up-Ansätzen hervorzuheben. Dabei werden die Stoffstrommodelle in diesem Kapitel zunächst vorwiegend retrospektiv (auf Basis historischer Daten) betrachtet. Eine Erweiterung der rein physischen Stoffstrommodelle um marktdynamische Aspekte (vergl. theoretische Beschreibung in Abschnitt 4.3), sowie die prospektive Modellierung zur Abschätzung zukünftiger Bedarfsmengen bzw. zur Identifikation möglicher Versorgungsengpässe oder zur Prognose zukünftiger Marktentwicklungen erfolgt aufbauend auf den hier vorgestellten Stoffstrommodellen im nachfolgenden Kapitel.

5.1. Identifikation der relevanten Rohstoffkandidaten für die weitere Analyse

Da die im Folgenden vorgestellten Modelle eines erheblichen Rechercheaufwands für die Datenerhebung und die Festlegung der Modellstruktur bzw. der gewählten Methodik bedürfen, was im Gegensatz zu den in Kapitel 2 vorgestellten breit angelegten, indikatorbasierten Screening-Ansätzen steht, ist eine Vorauswahl der Rohstoffe für die individuelle Modellierung einzelner Rohstoffsysteme notwendig. Dabei erscheint es naheliegend, Ergebnisse bisheriger Screening-Studien (vergl. Kapitel 2) sowie die in dieser Arbeit durchgeführten statistischen Untersuchungen (vergl. Kapitel 3) heranzuziehen. Da das Ziel dieser Arbeit nicht darin liegt, ausschließlich die in bisherigen Studien als besonders kritisch eingestuften Rohstoffe zu analysieren, sondern vielmehr die Möglichkeiten und methodischen Vorteile der systemdynamischen Modellierung zu untersuchen, wurden für die rohstoffspezifischen Modelle möglichst unterschiedliche Kandidaten gewählt. Dies ermöglicht eine breite Anwendung und Analyse des System Dynamics Ansatzes für verschiedene Problemstellungen in der Modellierung von Rohstoffsystemen.

Aus dem Bereich der klassischen Industriemetalle mit hohen Verbrauchsmengen und eigener Produktionsinfrastruktur, die insgesamt als recht unkritisch einzustufen sind, wurde Kupfer gewählt. Kupfer ist nach Aluminium und Eisen (Stahl) hinsichtlich der Produktionsmengen das dritthäufigste Industriemetal (USGS, 2012b). Im Gegensatz zu Aluminium und Eisen weist Kupfer eine relativ hohe Konzentration der Produktion auf Länderebene auf (ca. 30 % der Primärproduktion aus Chile, vergl. auch Abbildung 5.1) und wurde in

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

bisherigen Kritikalitätsbetrachtungen im Vergleich zu anderen Industriemetallen als leicht kritischer eingestuft (vergl. z.B. deutsche Kritikalitätsbewertung in Abschnitt 2.3.1 nach Erdmann et al., 2011), obwohl die Kritikalität im Vergleich zu zahlreichen Technologiemetallen gering erscheint. Auch existieren in der aktuellen Literatur zu kritischen Rohstoffen individuelle Marktanalysen für Kupfer (vergl. z.B. Rosenau-Tornow et al., 2009, bzw. Abschnitt 2.3.3), die durch die hier vorgestellten Ansätze, insbesondere hinsichtlich der marktdynamischen Betrachtung (vergl. Kapitel 6), sinnvoll ergänzt werden können.

Aus dem Bereich der Rohstoffe mit mittlerer Versorgungsproblematik wird in dieser Arbeit Kobalt betrachtet. Kobalt hat durch die Verwendung als Kathodenmaterial in Li-Ionen-Batterien seit Beginn des 21. Jahrhunderts einen starken Nachfrageimpuls erfahren (siehe Abbildung 5.17). Durch die hohe Konzentration des Bergbaus auf Länderebene (ca. 50 % aus der Demokratischen Republik Kongo (DRK), vergl. Abschnitt 5.3) und die politische Instabilität des Kongo (z.B. nach den “World Governance” Indikatoren der Weltbank, vergl. Kaufmann et al., 2013) wird Kobalt in den meisten Studien als kritisch bis grenzwertig kritisch eingestuft (vergl. Kapitel 2). Auch ist Kobalt Teil der Liste der kritischen Rohstoffe der EU (vergl. Abschnitt 2.3.1).

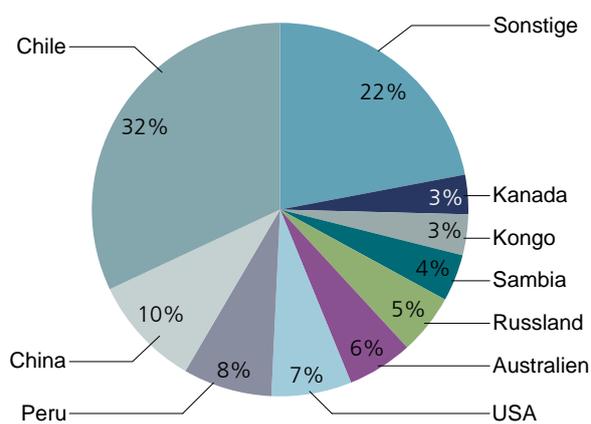
Die Gruppe der Seltenen Erden (SE) wird in aktuellen Kritikalitätsstudien als die wohl kritischste Rohstoffgruppe eingestuft (vergl. z.B. Tabelle 3.1). Da es zusätzlich sinnvoll erscheint zwischen den geologisch häufiger vorkommenden “leichten” und den weit seltener vorkommenden “schweren” Seltenen Erden zu unterscheiden (vergl. hierzu Abschnitt 5.4), werden in dieser Arbeit die Elemente Neodym (leichte SE) und Dysprosium (schwere SE) näher betrachtet, die gemeinsam als Magnetwerkstoffe in den derzeit stärksten Dauermagneten, den NdFeB-Magneten (Neodym-Eisen-Bor) verbaut werden.

Da der Fokus dieses Kapitels auf der Methodik, der Modellstruktur, der Modellparameter sowie auf den Modellergebnissen liegt, werden die einzelnen chemisch-physikalischen Rohstoffeigenschaften, Verwendungsbereiche, Verarbeitungsprozesse etc. nur recht kurz erläutert. Ein Steckbrief zu Kupfer, Kobalt sowie zu Seltenen Erden, mit relevanten Markt- und Rohstoffeigenschaften sowie Fließbildern zur technischen Verarbeitung, befindet sich ergänzend im Anhang dieser Arbeit (vergl. Abschnitt A.5).

5.2. Kupfer

Wegen seiner Materialeigenschaften, wie die hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit, die Duktilität (Verformbarkeit), die Korrosionsbeständigkeit durch Ausbildung einer schützenden Oxid- bzw. Sulfidschicht (Grünspan auf Kupferdächern), sowie seiner Legierungsfähigkeit (insbesondere Messing mit Zink bzw. Bronze mit Zinn) ist Kupfer eines der wichtigsten Industriemetalle (Lossin, 2012; Ayres et al., 2003, S.10 ff.). Mit ca. 25 Mio. Jahrestonnen an Halbzeugproduktion ist Kupfer nach Stahl, bzw. Eisen, und Aluminium das weltweit dritthäufigst verarbeitete Metall (USGS, 2012b). Das mit Abstand wichtigste Bergbauland für Kupfererze ist Chile mit über 5 Mio. t Jahresproduktion (bezogen auf den Kupfergehalt in Konzentraten), während China inzwischen der größte Produzent von Raffinade-Kupfer (elektrolytisch aufbereitetes Reinstkupfer) ist (vergl. Abbildung 5.1).

a: Kupfer Bergbau nach Ländern



b: Raffinade-Kupfer Produktion nach Ländern

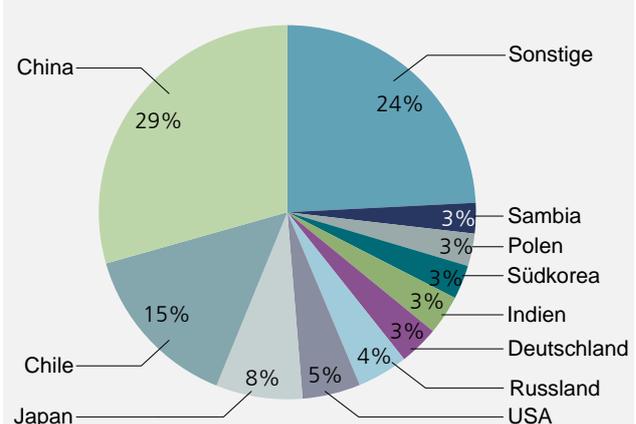


Abbildung 5.1. – Globale Kupferproduktion nach Ländern (USGS, 2012b). Zu unterscheiden ist der reine Bergbau und die Aufkonzentrierung der Erze durch Flotationsverfahren sowie die hydro- und pyrometallurgische Aufbereitung der Kupferkonzentrate bis hin zur Elektrolyse von hochreinen Kupferkathoden.

Eine ausführliche Darstellung der technischen Stufen der Kupfergewinnung und Aufbereitung nach hydro- und pyrometallurgischen Verfahren wird im Anhang A.5 zur Verfügung gestellt.

Im folgenden Abschnitt wird ein in sich geschlossenes, dynamisches, globales Kupfermodell vorgestellt, das auf Produktionsdaten der vergangenen 100 Jahre basiert und in enger Zusammenarbeit mit dem internationalen Kupferverband (International Copper Association, ICA) entwickelt wurde. Schwerpunkt des Modells ist die Quantifizierung von Kupfer in globalen Abfallströmen sowie die Analyse der globalen Recyclingeffizienz. Zwar ist das Recycling von Kupfer, d.h. die Wiederverarbeitung von Schrotten in der Metallherstellung seit der Antike gängige Praxis (Piersig, 2011), durch die vielseitigen Anwendungen von Kupfer und die immer komplexeren Zusammensetzungen moderner Elektronikprodukte sowie die Undurchsichtigkeit zahlreicher Altproduktströme ist die genauere Bestimmung der EoL (End-of-Life) Recyclingeffizienz, d.h.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

der Anteil des Metalls, der aus den gesamten Abfallströmen wiedergewonnen wird, meist sehr schwierig zu ermitteln.

Inwiefern dynamische Stoffstrommodelle dazu beitragen können, eine bessere Übersicht globaler Rohstoffkreisläufe zu erlangen, wird nachfolgend anhand des globalen Kupfermodells erläutert. Anschließend wurde das globale Modell in ein europäisches (EU27) Teilmodell und ein Modell für den Rest der Welt aufgeteilt, wobei beide Teilmodelle mit Handelsströmen in jeder Stufe der Wertschöpfungskette verbunden wurden. Somit wird eine separate Betrachtung des europäischen Kupferkreislaufes ermöglicht.

5.2.1. Das globale Kupfermodell

Das globale Kupfermodell¹ basiert auf Produktionsdaten des vergangenen Jahrhunderts (1910-2011). Die wichtigsten Inputdaten sind dabei die globale Minenproduktion, die Raffinadeproduktion sowie die Halbzeuherstellung (vergl. Abbildung 5.2a).

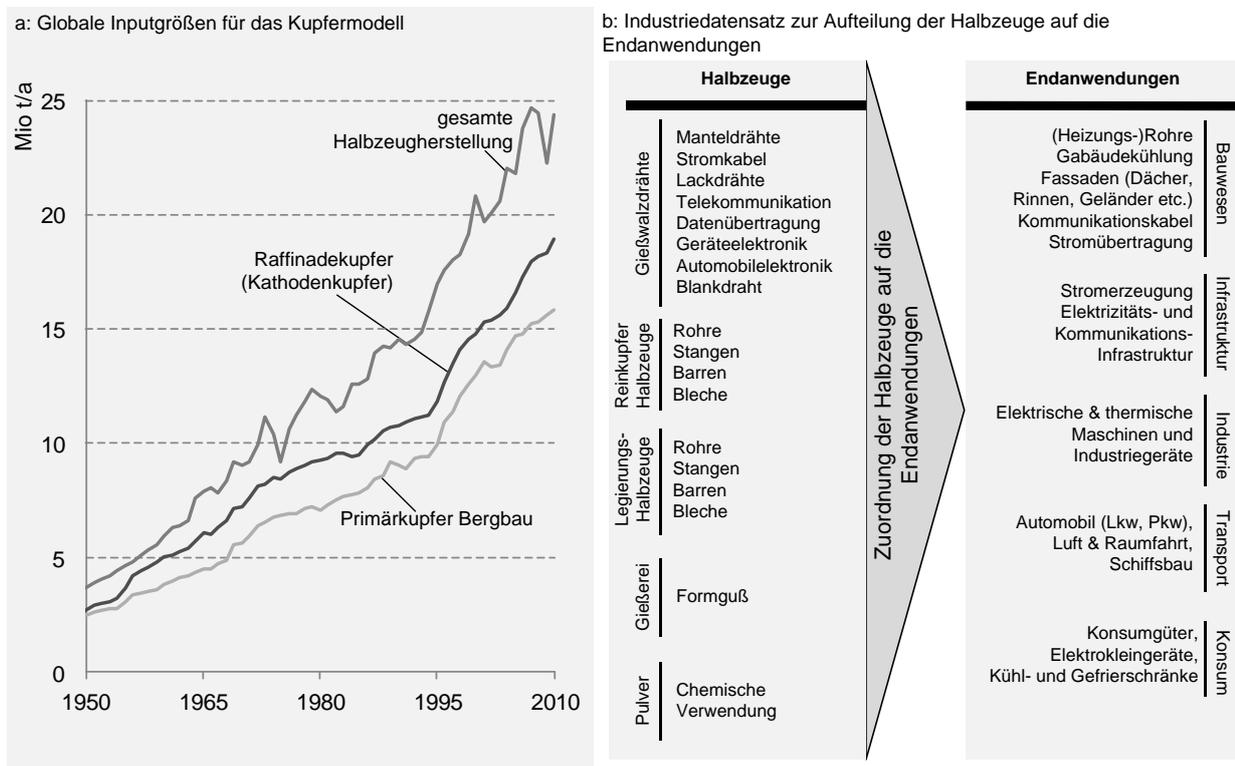


Abbildung 5.2. – Wichtige Inputparameter für das globale Kupfermodell.

a: Produktionsdaten des Kupferbergbaus, der Raffinadeherstellung sowie der gesamten Halbzeuherstellung (USGS, 2012b; ICSG, 2010).

b: Aufteilung der Halbzeuge an die Endverbraucher auf Basis eines Datensatzes der ICA (International Copper Association).

Weiterhin wird das Modell, wie in Abbildung 5.2b dargestellt, von einem Datensatz der International Copper

¹Teile aus diesem Kapitel wurden im Zuge der Dissertation als Peer-Reviewed-Journalbeitrag (Glöser et al., 2013a) sowie als Konferenzbeiträge (Glöser et al., 2013b, 2014) veröffentlicht.

Association (ICA) gespeist, der die Halbzeuge den jeweiligen Endanwendungen zuweist. Dabei werden 18 verschiedene Endanwendungsbereiche unterschieden, die in die übergeordneten Kategorien Bauwesen, Infrastruktur, Industrie, Transport und Konsum unterteilt sind (vergl. Abbildung 5.2b).

Zusätzlich waren Daten zu Produktionseffizienzen zur Abschätzung des Aufkommens von Produktions- bzw. Neuschrotten in den jeweiligen Verarbeitungsbereichen der Halbzeuge, sowie Annahmen zu Produktverwendungsdauern zur Simulation der obsoleten Materialflüsse nötig. Hierzu wurde in erster Linie auf Literaturdaten zurückgegriffen. Wie in Abschnitt 4.2.3 bereits erwähnt, sind genaue Daten zu Verwendungsdauern (Verteilfunktionen) einzelner Produkte weder auf globaler Ebene noch für einzelne Länder kaum verfügbar. Allerdings sind in der Literatur einige Schätzungen zu durchschnittlichen Verwendungsdauern zu finden. Auf Basis dieser Erwartungswerte wurden für die Modellierung Gaußsche Normalverteilungen mit einer Standardabweichung von 15 % des Erwartungswertes angesetzt. Dieses pauschale Vorgehen lässt sich durch den geringen Einfluss der verwendeten Verteilfunktion auf die resultierenden Abfallströme rechtfertigen (vergl. Abbildung 5.9). Tabelle 5.1 fasst die wichtigsten Inputparameter basierend auf aktuellen Literaturdaten zusammen.

Tabelle 5.1. – Durchschnittliche Verwendungsdauern sowie Produktionseffizienzen (Entstehung von Neuschrotten) der verschiedenen Anwendungsbereiche (Ruhrberg, 2006; Eckelmann und Daigo, 2008; Tanimoto et al., 2010; Graedel et al., 2002; Gröticke, 2014; Schlesinger et al., 2011); die Zahlen wurden von Industrievertretern validiert.

Anwendungsbereich	Produktgruppe	Durchschnittliche Verwendungsdauer (Jahre)	Produktionseffizienz (%)
Bauwesen	Rohre	40	0,95
	Gebäudekühlung	40	0,90
	Fassaden	50	0,85
	Gebäude-Kommunikation	30	0,90
	Stromübertragung	40	0,90
Infrastruktur	Telekommunikationsleitungen	30	0,90
	Stromerzeugung	30	0,85
Industrie	Elektrische Anlagen	15	0,80
	Thermische Anlagen	20	0,90
Transport	Automobil	14	0,75
	Lkw	16	0,80
	Luft- und Raumfahrt, Schiffe	25	0,80
Konsum & Elektronik	Konsum allgemein	8	0,75
	Kühl- und Gefrierschränke	10	0,80
	Elektronik	8	0,75
	Sonstiges	10	0,75

Die Produktionseffizienz entspricht dem Anteil an verarbeiteten Halbzeugen, der wirklich in die Endprodukte geht, während der Rest als Verschnitt in Form von Neuschrotten zu den Halbzeugherstellern zurückgeführt wird. Diese Verschnitte erscheinen zunächst recht hoch, allerdings ist dies nicht als Materialverlust, sondern als kontinuierliche Kreislaufführung von Neuschrotten zu verstehen. Insbesondere bei Fräs-, Schneide- und Stanzvorgängen sowie bei Formgussverfahren fallen relativ hohe Mengen an Materialverschnitten an (vergl.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

hierzu z.B. Ruhrberg, 2006). Weiterhin wurden die Modellannahmen von Vertretern der Kupferindustrie und des internationalen Kupferverbandes validiert (vergl. Glöser et al., 2013a).

Im Gegensatz zu anderen Industriemetallen, wie Aluminium oder Stahl, hat der Kupferkreislauf die Besonderheit, dass die Schrotte zur Halbzeugherstellung sowohl direkt eingeschmolzen werden (bei hochwertigeren Schrotten) als auch nochmals den Raffinationsprozess bis hin zur Elektrolyse durchlaufen, um verunreinigte Schrotte zu hochreinen Kupferkathoden aufzubereiten. Dabei werden die hochwertigen reinen Kupfer- und Legierungsschrotte zur Barren- und Halbzeugherstellung meist direkt wieder eingeschmolzen (analog zum Aluminium- und Stahlrecycling), während die weniger reinen Schrotte insbesondere aus dem Elektronikbereich teilweise zusammen mit Kupferkonzentraten (Primärmaterial), teilweise separat in einer Prozessfolge aus Schachtofen, Konverter und Anodenofen zunächst zu Anodenmaterial verarbeitet werden, aus welchem anschließend elektrolytisch hochreines Kupfer gewonnen wird (Lossin, 2008, S.54 ff.).

Abbildung 5.3 zeigt die Struktur des globalen Kupfermodells, wie es in die Simulationssoftware “Vensim”² implementiert wurde. Die jährliche Gesamtmenge an Halbzeugen wird entsprechend der Marktanteile den jeweiligen Endanwendungen zugeordnet (vergl. Abbildung 5.2). Das globale Modell basiert folglich auf einem Top-down-Ansatz, wie in Abbildung 4.11 beschrieben. Die verarbeiteten Kupfermengen werden dann gemäß den zugrunde liegenden Verwendungsdauer-Verteilungen (vergl. Tabelle 5.1) über die Verwendungsphase nach dem in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Prinzip akkumuliert. Die obsoleten Materialmengen werden nach Ablauf der Verwendungsdauer zunächst sechs verschiedenen Schrottarten zugeordnet (vergl. Übergangsmatrix in Abbildung 5.3 links unten), die dann mit unterschiedlichen technischen Effizienzen aufbereitet werden (vergl. Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2. – Technische Recyclingeffizienzen auf globaler Ebene. Diese Effizienzen wurden verschiedenen Literaturquellen entnommen (Ruhrberg, 2006; Qiang und Zhong-wu, 2006; Bertram et al., 2002; van Beers et al., 2007; Agrawal und Sahu, 2010; ICSG, 2010) und durch Literatur zum Stand der Recyclingtechnik ergänzt (Martens, 2011; Lossin, 2008; Thomé-Kozmiensky, 1995; Schlesinger et al., 2011). Weiterhin wurden die angenommenen Effizienzen von Experten aus der Kupferindustrie validiert (vergl. auch Glöser et al., 2013a).

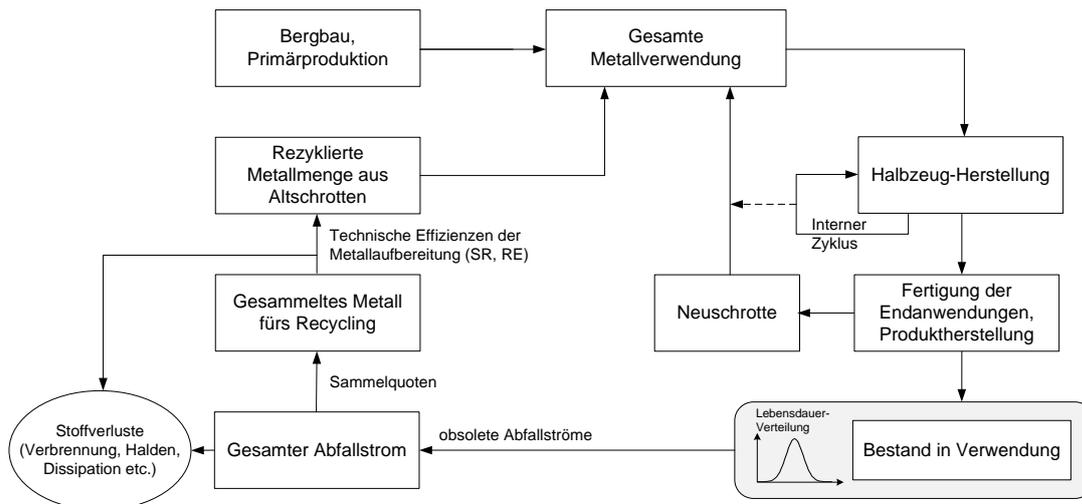
Schrottart	Zerlegungs- und Trenneffizienzen (SR_j)	Schrottschmelzen und Raffination (SE_j)
C&D (Bauschrotte)	0,90	0,99
WEEE (Elektronikschrotte)	0,55	0,97
ELV (Altautos)	0,55	0,97
IEW (Industrieschrotte elektrisch)	0,70	0,97
INEW (Industrieschrotte nicht elektrisch)	0,75	0,99
MSW (Hausmüll)	0,20	0,97

Das globale Modell ist so konzipiert, dass sich zu jedem Zeitpunkt eine geschlossene Massenbilanz ergibt. Dies wird durch eine Anpassung der jährlichen Sammelquote für obsoletere Produkte in Abhängigkeit der Produktionsmenge an Sekundärkupfer unter Berücksichtigung der technischen Recyclingeffizienzen erreicht.

²“Vensim” von Ventana Systems Inc. ist die in dieser Arbeit verwendete Software zur systemdynamischen Modellierung. Insgesamt existiert ein breites Angebot potenzieller Softwarelösungen zur Entwicklung von SD-Modellen (vergl. Anhang A.3).

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Abbildung 5.4 verdeutlicht diese Anpassung in vereinfachter Form: Die Menge an jährlichem Recyclingkupfer lässt sich sowohl aus der Gesamtverwendung von Kupfer (Halbzeugherstellung) abzüglich der Primärproduktion und der Neuschrotte, als auch aus dem Gesamtschrottaufkommen unter Berücksichtigung der Sammelquote und der Recyclingeffizienzen berechnen. Aus diesem Gleichungssystem kann die jährliche Sammelquote so berechnet werden, dass zu jedem Zeitpunkt eine geschlossene Massenbilanz existiert, d.h. die Summe aus Bergbau, Alt- und Neuschrotten entspricht immer der von Seiten der Industrie berichteten jährlichen Halbzeugherstellung.



Rezyklierte Metallmenge aus Altschrotten_t = Gesamtmetallverwendung_t - Minenproduktion_t - Neuschrotte_t
 Rezyklierte Metallmenge aus Altschrotten_t = Gesamter Abfallstrom_t • CR_t • SR_t • RE_t

Berechnung der Sammelquote für Altschrotte zur Schließung der Massenbilanz:

$$CR_t = \frac{\text{Gesamte Metallverwendung}_t - \text{Minenproduktion}_t - \text{Neuschrotte}_t}{\text{Gesamter Abfallstrom}_t \cdot SR_t \cdot RE_t}$$

CR: Collection Rate (Sammelquote Altschrotte) | SR: Separation Rate | RE: Refining Efficiency

Abbildung 5.4. – Grundlegendes Prinzip der geschlossenen Massenbilanz des Kupfermodells.

Das in Abbildung 5.4 vereinfacht dargestellte Prinzip wird in Abbildung 5.5 entsprechend der tatsächlichen Implementierung in das Modell dargestellt. Das Modell unterscheidet sechs verschiedene Schrottararten, sowie die Möglichkeit des direkten Einschmelzens von Altschrotten oder den Weg durch die Raffination und Elektrolyse zu Kathodenkupfer, was die Berechnung der Sammelquoten umfangreicher gestaltet. Das grundlegende Prinzip bleibt aber identisch zu Abbildung 5.4. Auch das europäische Teilmodell, welches zusätzlich Handelsströme in jeder Stufe der Wertschöpfung berücksichtigt, basiert auf diesem Ansatz der geschlossenen Massenbilanz.

Während die Sammelquoten für die einzelnen Schrottararten nach der in Abbildung 5.5 beschriebenen Methodik modellintern berechnet werden, werden die technischen Recyclingeffizienzen exogen vorgegeben. Globale durchschnittliche Effizienzen für die Aufbereitung verschiedener Schrottararten sind nicht einfach

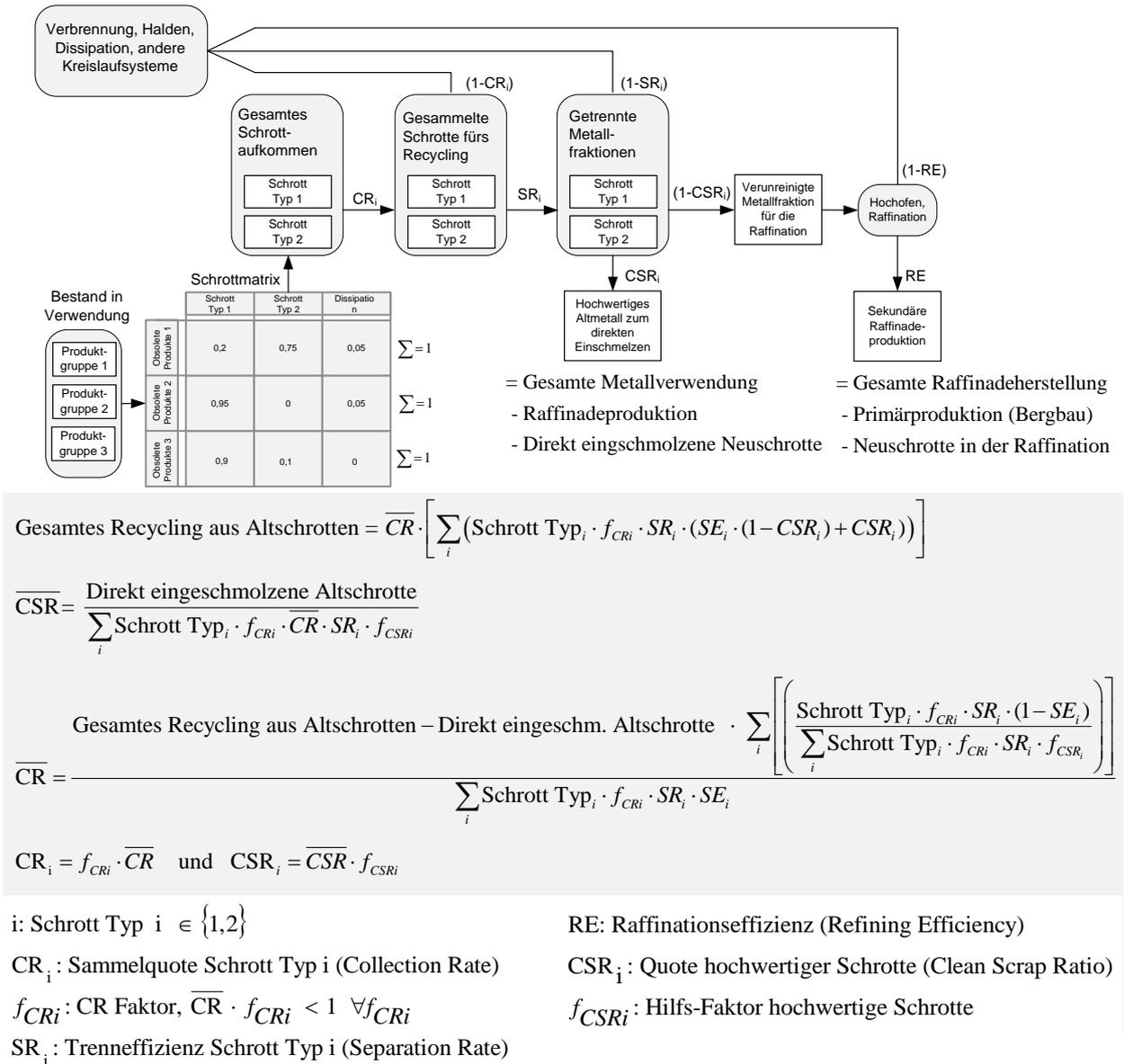


Abbildung 5.5. – Prinzip der geschlossenen Massenbilanz in der Form, wie sie im Kupfermodell umgesetzt wurde. Durch die verschiedenen Schrottarten und die unterschiedlichen Recyclingrouten wird die Berechnung der Sammelquoten umfangreicher, das grundlegende Prinzip bleibt aber identisch zu Abbildung 5.4.

zu erheben, da der Stand der Technik in den verschiedenen Wirtschaftsregionen stark unterschiedlich ist. Dennoch sollten die Zerlegungs- und Trennungs-Effizienz in Schwellen- und Entwicklungsländern nicht unterschätzt werden, da durch die weitaus niedrigeren Arbeitskosten ein erheblicher Teil der Schrottzерlegung und Trennung manuell durchgeführt wird (vergl. z.B. Agrawal und Sahu, 2010). Auf Basis aktueller Literaturschätzungen wurden die in Tabelle 5.2 aufgezeigten Zerlegungs- und Aufbereitungseffizienzen in das globale Modell aufgenommen.

Ergebnisse aus dem globalen Kupfermodell

Ziel des globalen Kupfermodells ist in erster Linie die Erhöhung der Transparenz über Nutzungsstrukturen, die Quantifizierung des Materialbestands in Verwendung sowie die Materialmenge in Abfallströmen und eine fundierte Schätzung der globalen Recyclingeffizienzen. Dabei erscheint insbesondere die Effizienz der Rückgewinnung von Kupfer aus obsoleten Produktströmen interessant. Abbildung 5.6 zeigt die Simulationsergebnisse für den Bestandsaufbau in Verwendung (a), aus dem Kreislauf ausgeschiedenes Material (b), jährliches Schrottaufkommen (c), sowie jährliche Recyclingmengen nach Schrotart (d).

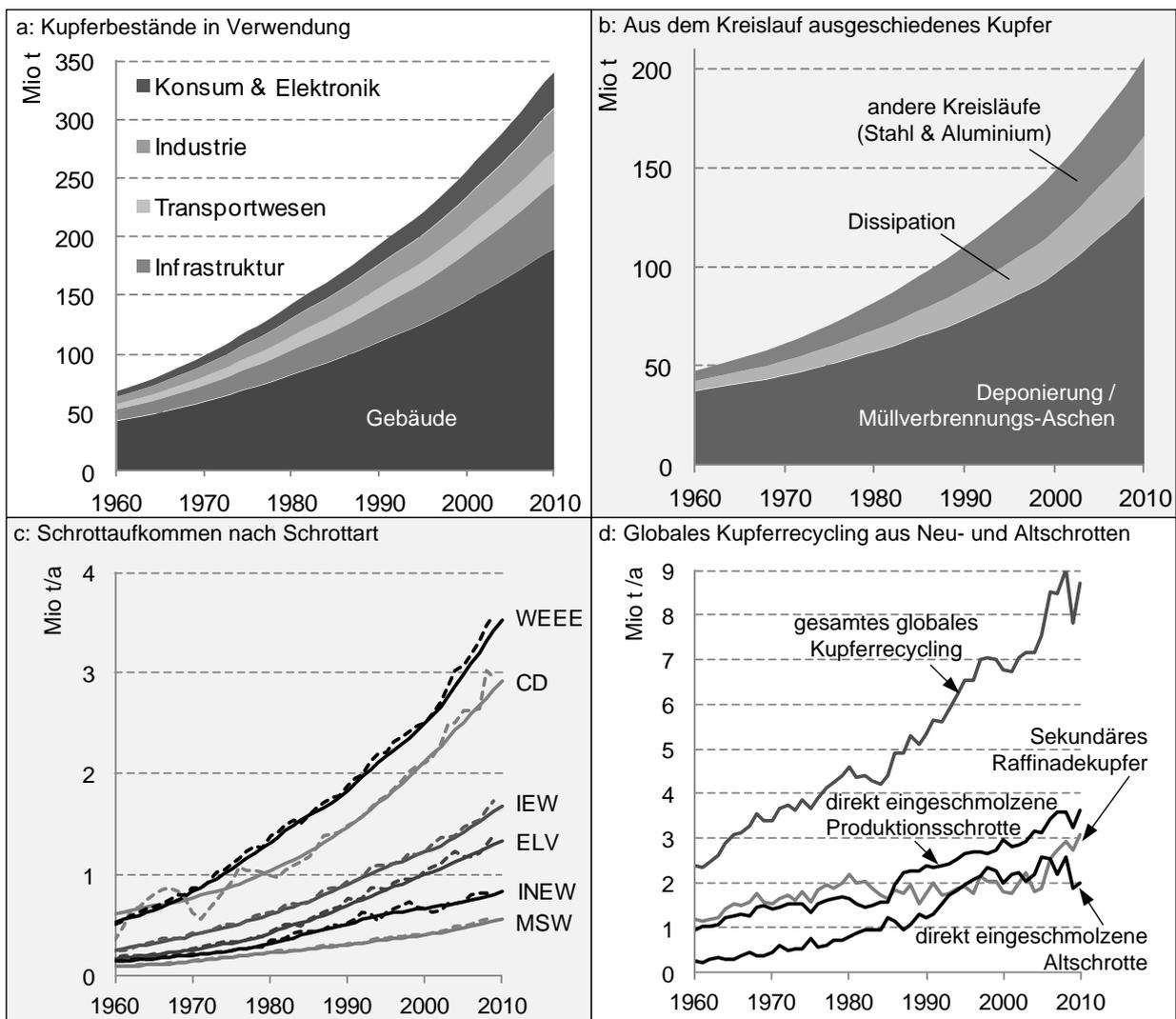
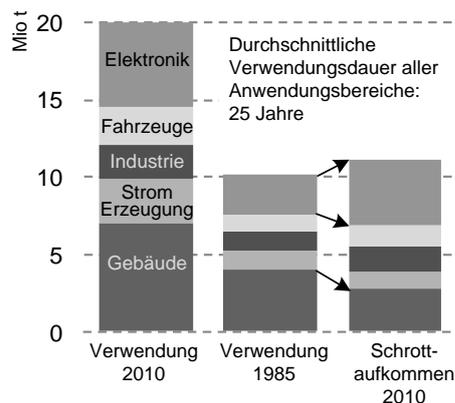


Abbildung 5.6. – Ergebnisse aus dem globalen Modell bezüglich Beständen in Verwendung (a), aus dem Kreislauf verlorengegangene Massenströme (b), Abfallströmen (c) sowie Recyclingmengen (d). Die gestrichelten Linien in Unterabbildung (c) entsprechen den Modellergebnissen, wenn nicht mit Verwendungsdauerverteilungen, sondern mit einfachen Durchschnittswerten gerechnet wird. Für die Bezeichnungen der Schrotarten in Unterabbildung (c), siehe Tabelle 5.2.

Darüber hinaus lassen sich mit diesem recht einfachen globalen Modell bereits interessante Aspekte der Kreislaufwirtschaft aufzeigen: Die durchschnittliche Verwendungsdauer von Kupfer liegt bei ca. 25 Jahren (gewichtetes Mittel heutiger Verwendungsstrukturen vergl. Abbildung 5.2). Wie in Abbildung 5.7 dargestellt unterscheidet sich die Zusammensetzung des heutigen Schrottes allerdings erheblich von der Verwendungsstruktur von vor 25 Jahren. Dies ist auf eine stärkere Verwendung in kurzlebigen Produkten, insbesondere Elektronikanwendungen, zurückzuführen und wird verstärkt durch die stetig gestiegene globale Nachfrage, was zu einer Überrepräsentation kurzlebiger Produkte im gesamten Schrottaufkommen führt. So machen Elektronik und Konsumgüter ca. 25 % der heutigen Kupferverwendung aus, sind aber für nahezu 40 % des Kupfers in obsoleten Produktströmen verantwortlich (vergl. Abbildung 5.7a). Dies wirkt sich auf die Entwicklung der Recyclingquote (EoL Recycling Rate, vergl. Abbildung 5.8) aus. Zwar werden die Technologien zur Schrotttrennung und -aufbereitung immer ausgefeilter, allerdings steigt auch die Komplexität der Verbundmaterialien in modernen Konsumelektronikgütern und der Diffusionsgrad (geringe Rohstoffmengen in verschiedenartigen Produkten), was neue Herausforderungen für die Recyclingtechnik mit sich bringt. Das Prinzip der Übergewichtung von kurzlebigeren Produkten im gesamten Schrottaufkommen wird in Abbildung 5.7 exemplarisch anhand eines 2-Produkte-Systems nochmals verdeutlicht.

a: Kupfer Verwendungs- und Schrottzusammensetzung



b: Erklärung anhand eines 2-Produkte-Systems

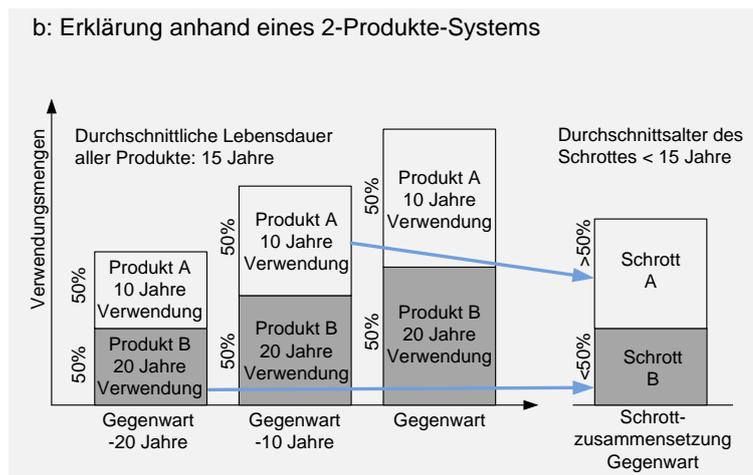


Abbildung 5.7. – Unterscheidung zwischen durchschnittlicher Verwendungsdauer und Alter der obsoleten Produktströme: Durch den kontinuierlichen Anstieg der Kupfernachfrage und die Anhäufung von Elektronikschrotten niedrigeren Alters in den Abfallströmen entspricht das Durchschnittsalter des Schrottes nicht der durchschnittlichen Verwendungsdauer über alle Anwendungsbereiche.

a: Verwendungs- und Schrottzusammensetzung im Kupfermodell.

b: Theoretisches Beispiel anhand zwei verschiedener Produkte.

Weiterhin zeigt das globale Modell, dass ein erheblicher Teil des für die Halbzeugherstellung direkt eingeschmolzenen hochwertigsten Schrottes aus Produktionsschrotten besteht (vergl. Abbildung 5.6d), der in erster Linie durch Stanzarbeiten, Fräsen, Bohren und Verschnitte entsteht und der nahezu vollständig an die Halbzeughersteller zurückgeführt wird, um dort mit sehr hoher Effizienz wiederverwertet zu werden. Dies treibt zwar die Quote der Verwendung von Sekundärmaterial in der Produktion (RIR) nach oben, hat aber auf die Effizienz des Recyclings von Altschrotten keinerlei Einfluss.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Genau hier besteht aber nach wie vor erhebliches Potenzial der Effizienzsteigerung. Daher ist es entscheidend, bei der Definition der Recyclingindikatoren alle Stoffströme eindeutig quantifizieren zu können und Produktionsschrotte von Altschrotten zu unterscheiden. Die aggregierten globalen Stoffströme für Kupfer am Beispiel des Jahres 2011 sind in Abbildung 5.8 als “Sankey-Diagramm” dargestellt.

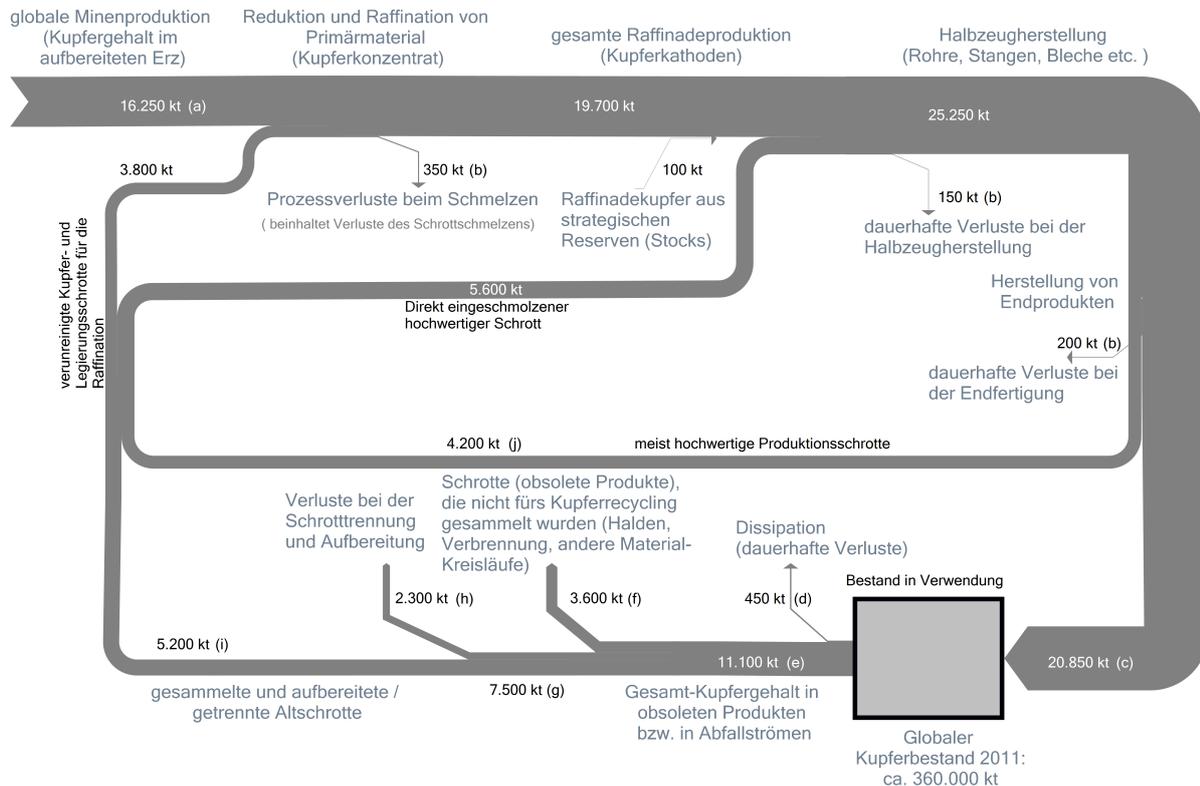


Abbildung 5.8. – Darstellung der aggregierten globalen Kupferströme in einem Sankey-Diagramm für das Jahr 2011.

Die Definition aller wichtigen Indikatoren zur Bewertung der Effizienz des Recycling-Systems basierend auf den Stoffströmen in Abbildung 5.8 ist in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3. – Durchschnittswerte und Standardabweichungen der berechneten globalen Recyclingindikatoren zwischen 2002 und 2012 (Definition nach EuroMetaux, 2006). Aus Gründen der Einfachheit wurden hier die englischen Fachbegriffe beibehalten. Die Definition der Indikatoren bezieht sich auf die Buchstaben in Abbildung 5.8

Indikator	Berechnung	Durchschnitt	Standardabweichung
Recycling Input Rate (RIR)	$(i+j)/(a+i+j)$	0,35	0,02
End-of-Life Recycling Input Rate (EoL RIR)	$(i)/(a+i+j)$	0,19	0,03
Overall Recycling Efficiency Rate (Overall RER)	$(i+j)/(e+j+n)$	0,61	0,04
End-of-Life Recycling Rate (EoL RR)	i/e	0,46	0,05
Overall Processing Rate (Overall PR)	$(i+j)/(g+j+n)$	0,80	0,01
EoL PR	i/g	0,69	0,01
End-of-Life Collection Rate (EoL CR)	g/e	0,67	0,07
Old Scrap Ratio (OSR)	$i/(i+j)$	0,54	0,05

Weiterhin enthält Tabelle 5.3 die Durchschnittswerte der Recyclingindikatoren über die vergangenen Jahre (2002-2012) sowie die Standardabweichung der Schwankungen um den Mittelwert: Wegen der geschlossenen Massenbilanz nach dem in Abbildung 5.4 dargestellten Prinzip, schwanken die Sammelquoten für Altschrotte aufgrund von Volatilität in der Halbzeug- und Raffinadeherstellung (vergl. hierzu auch Abbildung 5.11).

Sensitivitätsanalyse

Da die für die Modellierung des Kupferkreislaufes getroffenen Annahmen, insbesondere bezüglich der durchschnittlichen Lebensdauer der einzelnen Anwendungen sowie der Produktionseffizienzen (vergl. Tabelle 5.1), mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind, wurde eine Sensitivitätsanalyse der Auswirkungen von Variationen dieser Inputparameter auf die berechneten Recyclingquoten durchgeführt. Dabei erscheint es zunächst sinnvoll, die Auswirkungen von Veränderungen in den Verwendungsdauerverteilungen auf die Modellergebnisse zu analysieren. Wie in Abbildung 5.9 gezeigt, haben weder die Standardabweichung der Verteilfunktion (die Breite der Glockenkurve) noch die Wahl der Verteilfunktion (rechtsschief, linksschief, vergl. hierzu auch Abbildung A.6 im Anhang) einen erheblichen Einfluss auf die berechnete Sammelquote von Altschrott nach dem in Abbildung 5.4 beschriebenen Prinzip. Lediglich die Variation des Erwartungswertes der Verteilfunktion hat erheblichen Einfluss auf die Modellergebnisse.

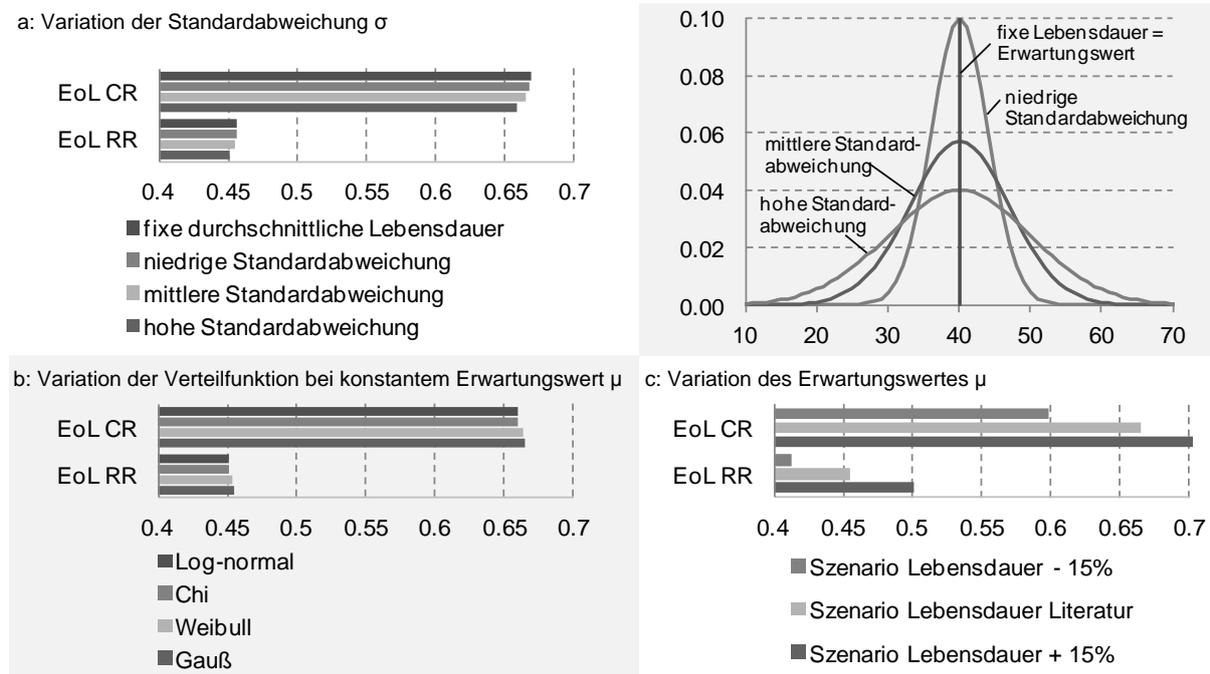


Abbildung 5.9. – Sensitivität der berechneten Recyclingquoten im globalen Kupfermodell in Hinsicht auf Änderungen der Verwendungsdauerverteilungen. Hier zeigt sich eindeutig, dass der Einfluss der Standardabweichung (a) und der Form der Verteilfunktion (b) gering ist im Vergleich zum Einfluss des Erwartungswertes, also der durchschnittlichen Verwendungsdauer der Anwendungsbereiche (c).

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Zur Analyse der Auswirkungen von Datenunsicherheiten auf die Simulationsergebnisse wurde nach dem im Abschnitt 4.4 beschriebenen Prinzip eine stochastische Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Hierzu wurden die Erwartungswerte der Lebensdauerverteilungen (durchschnittliche Lebensdauern) in einem Bereich von $\pm 15\%$ und die Produktionseffizienzen in einem Bereich von $\pm 10\%$ variabel definiert (gleichverteilt), wobei in jedem Simulationslauf ein Wert aus dem definierten Bereich zufällig zugewiesen wurde.

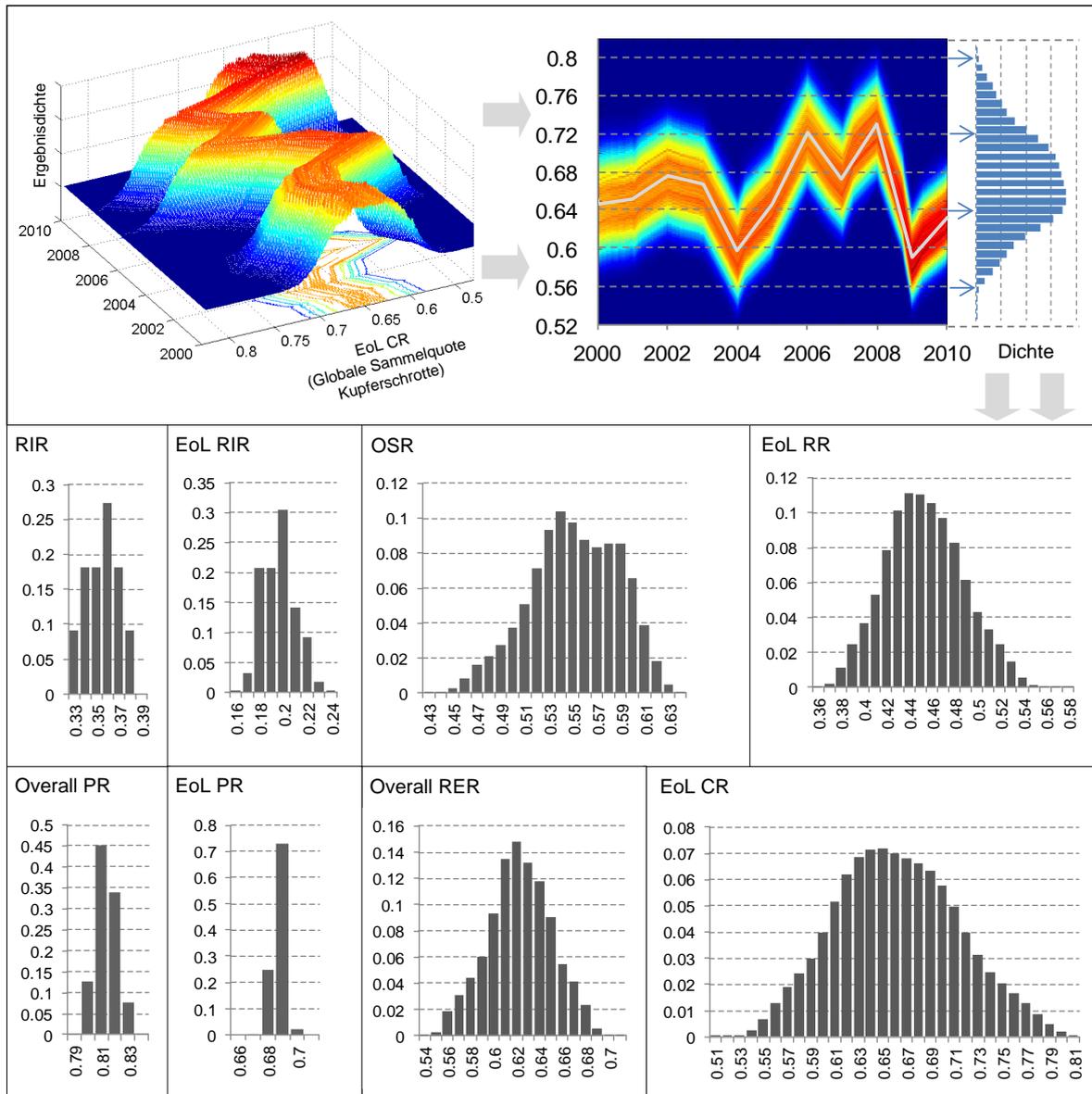


Abbildung 5.10. – Ergebnisse der stochastischen Sensitivitätsanalyse auf die berechneten Recyclingquoten. Durch die Unsicherheiten ergibt sich eine Verteilfunktion über die Zeit. Diese lässt sich wie oben dargestellt in einen Bereich übertragen, der sowohl zeitliche Schwankungen als auch die Datenunsicherheit berücksichtigt.

Durch eine iterative Wiederholung der Simulation und ein Auslesen der Daten wurden in 10^5 Simulationsläufen die Streuung der Ergebnisse festgehalten. Auf diese Weise wurde für die globalen Indikatoren,

wie in Abbildung 5.10 gezeigt, eine Dichtefunktion für jede Recyclingrate extrahiert, die sowohl zeitliche Schwankungen als auch Datenunsicherheiten berücksichtigt. Die Auswirkungen dieser Unsicherheitsanalyse auf alle Recyclingindikatoren aus Tabelle 5.3 ist in Form eines Boxplots³ über die Zeit in Abbildung 5.11 dargestellt. Da die Recycling-Input-Rate (RIR) ausschließlich auf den historisch vorgegebenen Produktionsmengen basiert, wird sie durch diese Unsicherheitsanalyse nicht beeinflusst, sondern variiert lediglich über die Zeit aufgrund von Schwankungen in den Produktionsmengen.

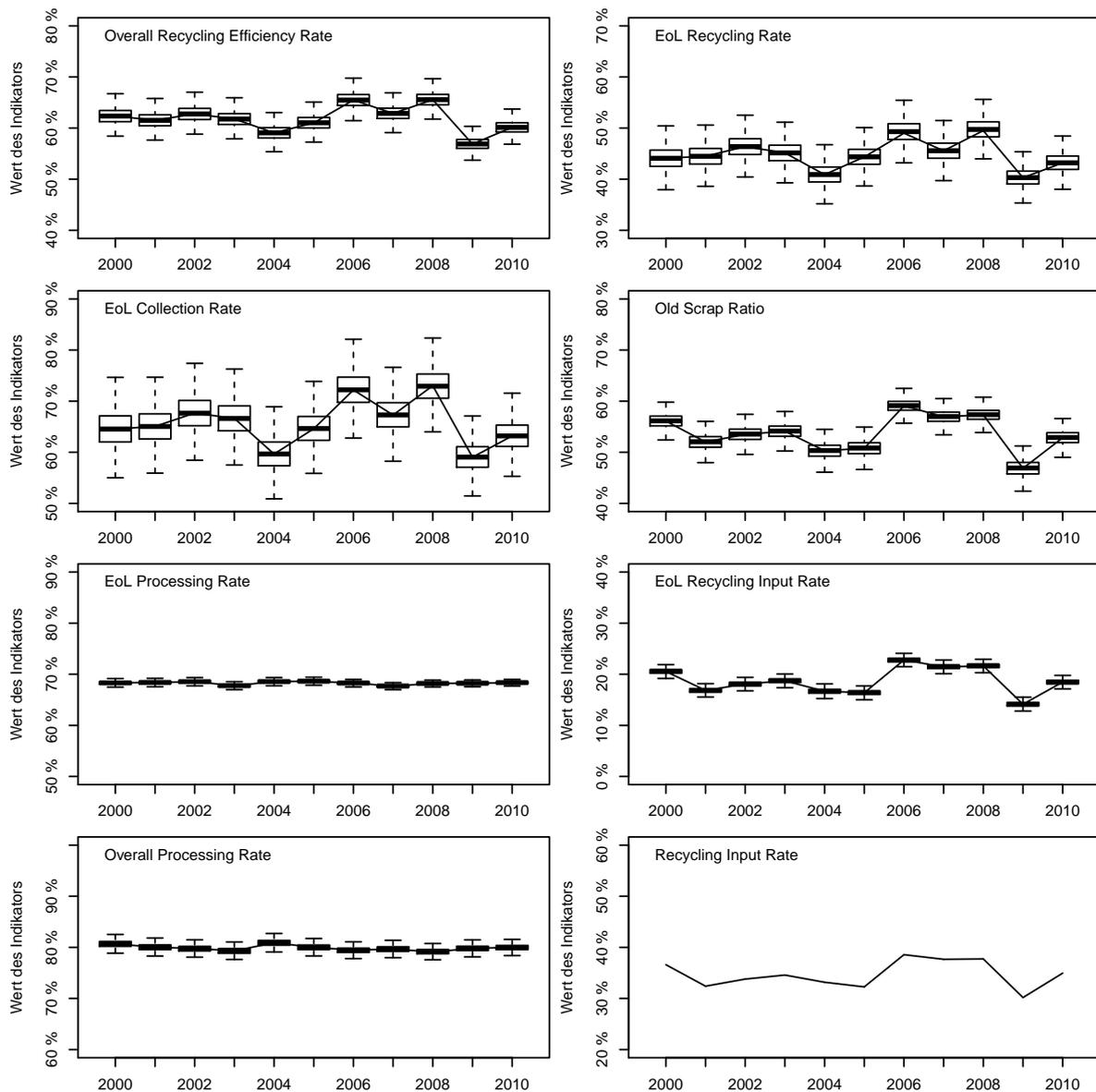


Abbildung 5.11. – Boxplots der Verläufe aller berechneten Recyclingquoten bei der stochastischen Sensitivitätsanalyse.

³Ein Boxplot (auch Kastengrafik genannt) vermittelt eine rasche Übersicht in welchem Bereich die Daten einer Verteilung liegen. Es werden der Median (dicker Strich in der Mitte), die drei Quartile (25 %, 50 %, 75 %, wobei Kästen die mittleren 50 % der Ergebnisse abdeckt) und die beiden "Whiskergrenzen" (2,5 % - 97,5 % der Ergebnisse) abgebildet.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Abbildung 5.12 zeigt die Auswirkungen der stochastischen Sensitivitätsanalyse auf die Abschätzung weiterer Modellergebnisse, wie den Bestand von Kupfer in Verwendung, die Akkumulation von Kupfer in der Umwelt sowie die jährlichen Schrottaufkommen.

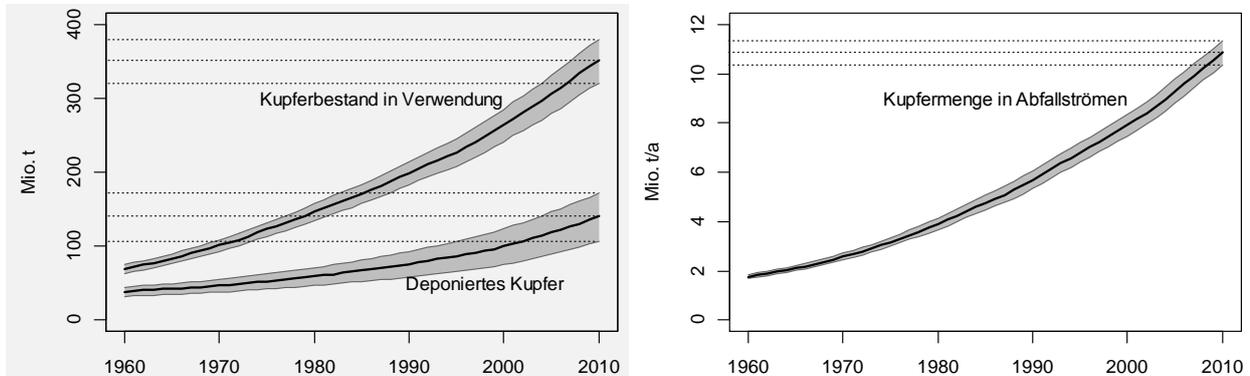


Abbildung 5.12. – Auswirkungen der Unsicherheitsanalyse auf das Schrottaufkommen und die Bestandsmengen in Verwendung.

5.2.2. Regionalisierung des Kupfermodells für Europa (EU27)

Während das globale Stoffstrommodell die Grundlage für die Entwicklung eines Modells des Kupfermarktes bildet (vergl. Kapitel 6.2), eignet sich dieses Modell nicht zur Identifikation potenzieller Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz auf politischer Ebene. Hierzu werden regionale Modelle benötigt, die die Verwendungsstrukturen und Materialkreisläufe innerhalb eines Landes, bzw. einer Region abbilden. Daher wurde in einem weiteren Projektschritt das globale Kupfermodell um ein europäisches Teilmodell ergänzt (siehe hierzu Soulier et al., 2012). Die grundlegende Struktur des europäischen Modells entspricht im Wesentlichen der des globalen Falles, jedoch mit einem entscheidenden Unterschied: Auf jeder Stufe der Wertschöpfungskette beeinflussen Im- und Exporte die Kupferflüsse (vergl. Abbildung 5.13).

Dies führt dazu, dass für verlässliche Simulationsergebnisse eine grundlegende Analyse von Handelsdaten unerlässlich ist. Hierfür wurde eine lokale Datenbank erstellt, in welche die gesamten internationalen Handelsdaten aus der “UN Comtrade Database”⁴ eingelesen wurden. Eine Beschreibung dieser Datenbank einschließlich der für die Analyse des Kupferhandels relevanten Güterklassifikationen (ca. 350 für Kupfer relevante HS Codes) erfolgt im Anhang A.5.1. Die Materialgehalte der für Kupfer relevanten HS Codes konnten teilweise der Literatur entnommen werden (Wittmer et al., 2003; Wittmer, 2006; Bader et al., 2006) und wurden von Experten der “International Copper Association” und des “International Wrought Copper Council” validiert (siehe Soulier et al., 2012).

Trotz der gleichen grundlegenden Struktur wie beim globalen Modell müssen aufgrund der Implementierung der Handelsdaten bei regionalen Modellen einige Änderungen vorgenommen werden. So können regionale Modelle erst ab 1990 simuliert werden, da es für die Jahre davor nur unzureichende Außenhandelsstatistiken

⁴Die Datenbank der Vereinten Nationen stellt die derzeit umfangreichste Sammlung von internationalen Handelsdaten dar und basiert auf den Berichten der nationalen Zollämter.

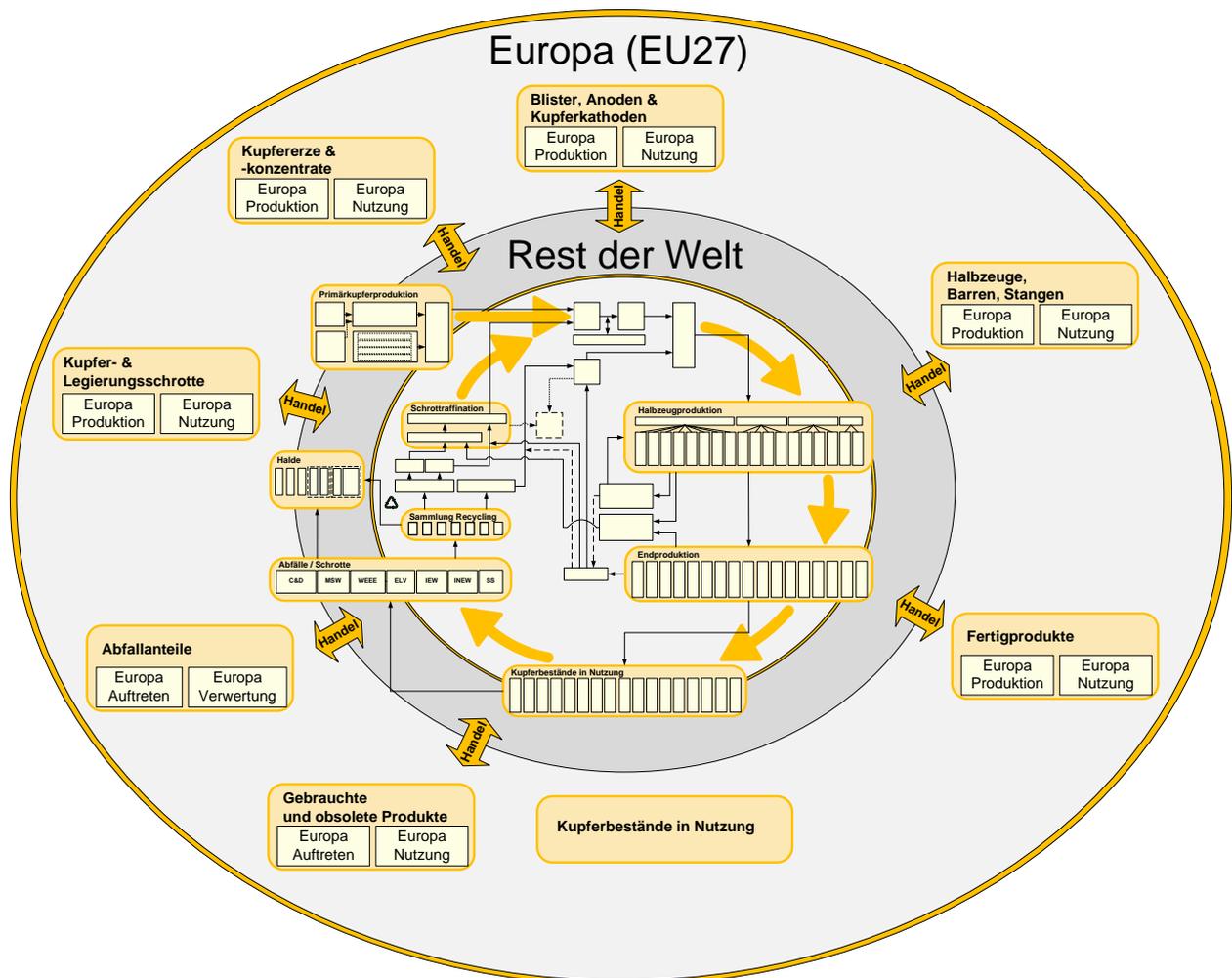


Abbildung 5.13. – Abgrenzung des europäischen Kupfermodells vom globalen Modell und Implementierung von Handelsströmen in jeder Stufe der Wertschöpfungskette (vergl. Glöser et al., 2013b, 2014).

gibt. Anders als im globalen Ansatz können sich die in Gebrauch befindlichen Kupferbestände durch diese Einschränkung nicht über die letzten 100 Jahre aufbauen. Daher musste für das Jahr 1990 ein entsprechender Anfangswert aus der Literatur übernommen werden (ca. 130 kg/Kopf in Europa 1990, vergl. Bergbäck et al., 2001; Gerst und Graedel, 2008), wobei dieser Wert nach den Modellergebnissen inzwischen auf ca. 180 kg/Kopf angestiegen ist, was mit aktuellen Schätzungen zum Kupferbestand in Europa sehr gut übereinstimmt (siehe z.B. Ciacci et al., 2017).

Die europäischen Im- und Exporte von Kupfer entlang der Wertschöpfungskette sowie die Handelsbilanz (rote Linie) sind in Abbildung 5.14 zusammengefasst. Deutlich erkennbar sind die hohen Importe an Konzentraten und Blister- bzw. Raffinadekupfer, wohingegen die Handelsbilanz der Schrotte seit einigen Jahren eine deutlich negative Tendenz aufweist. Für die europäischen technischen Recyclingraten (vergl. Tabelle 5.2) wurde von leicht höheren Werten als im globalen Schnitt ausgegangen (vergl. Ruhrberg, 2006). Im Hinblick auf Unsicherheiten bezüglich Außenhandelsdaten, aber auch hinsichtlich weiteren Inputwerten

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

wie z.B. Produktionsdaten oder Effizienzen bleibt festzuhalten, dass am Anfang der Wertschöpfungskette, d.h. bei Konzentraten bis hin zu Halbzeugen, eine gute Datenlage besteht, wohingegen am Ende der Wertschöpfung, speziell bei Endprodukten und Schrotten, mit einer relativ hohen Unsicherheit insbesondere hinsichtlich der Kupfergehalte zu rechnen ist. Durch die relative Ausgeglichenheit der europäischen Handelsbilanz im Bereich der fertigen Produkte sollten sich diese Unsicherheiten allerdings nur bedingt auf den europäischen Kupferkreislauf auswirken.

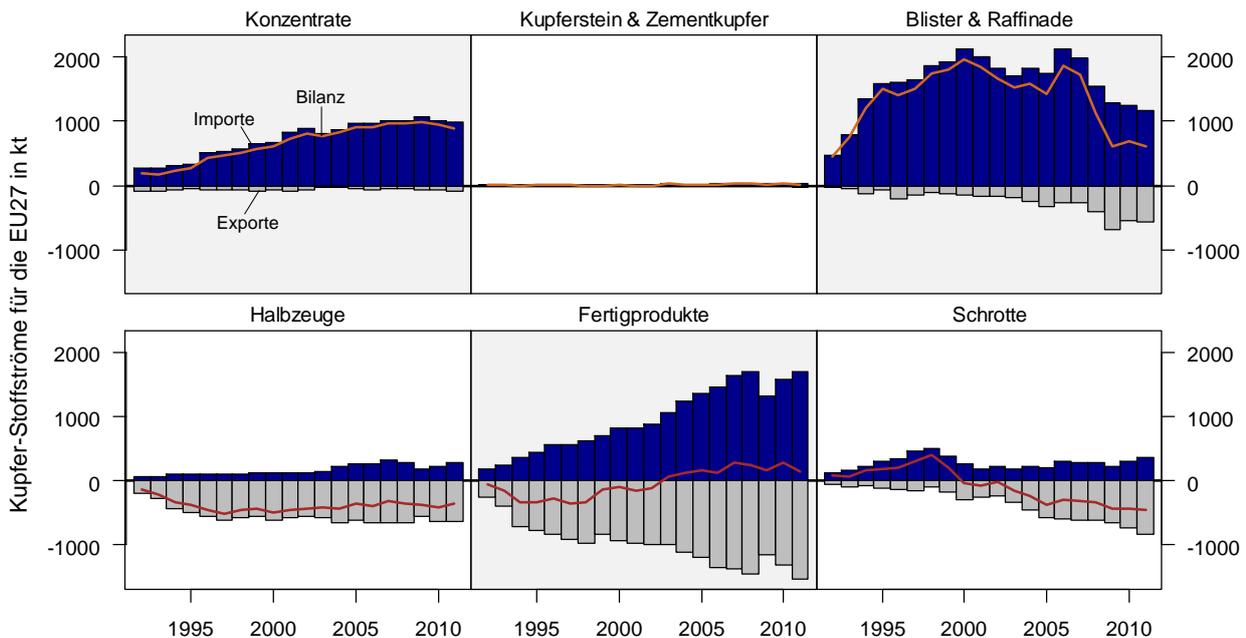


Abbildung 5.14. – Handelsbilanz der europäischen Kupferströme entlang der Wertschöpfungskette. Die rote Linie stellt die Netto Im- bzw. Exporte dar (vergl. Glöser et al., 2014). Die Daten basieren auf der Handelsdatenbank der Vereinten Nationen (UN Comtrade), siehe Anhang A.4.

Was allerdings durch die reine Verwendung von offiziellen Handelsdaten in diesem Modell nicht auftaucht, ist der nicht immer erfasste Export von Altprodukten⁵. Dabei ist anzumerken, dass eine Implementierung derartiger Materialflüsse, bei Verfügbarkeit entsprechender Daten, problemlos möglich wäre.

Abbildung 5.15 zeigt das aggregierte Sankey-Diagramm der europäischen Kupferströme (EU27) im Jahr 2012. Insgesamt zeigt sich eine im Vergleich zum globalen Durchschnitt recht hohe Effizienz des Recyclings von Kupfer in Europa. So liegt die Sammelquote für kupferhaltige Altschrotte im Jahr 2012 bei ca. 80 %, die Recyclingeffizienz von Altschrotten (EoL RR) bei ca. 70 % und die Verwendung von Schrotten für die Kupferproduktion (RIR) bei über 50 %, wobei diese Werte analog zum globalen Modell zeitlichen Schwankungen ausgesetzt sind (vergl. Glöser et al., 2014). Die EoL RR schwankt im zeitlichen Verlauf der vergangenen Jahre zwischen 60 und 70 % (im Schnitt bei ca. 65 %), was mit Literaturwerten zur Recyclingeffizienz von Kupfer in Europa gut übereinstimmt (siehe insbesondere Ruhrberg, 2006).

⁵Erst ab einem Warenwert von 1000 Euro tauchen z.B. Altautos in der Statistik auf. Auch der illegale Export von Elektronikschrott (WEEE) spielt eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Weiterhin unterscheiden die Handelsdaten nicht zwischen Alt-

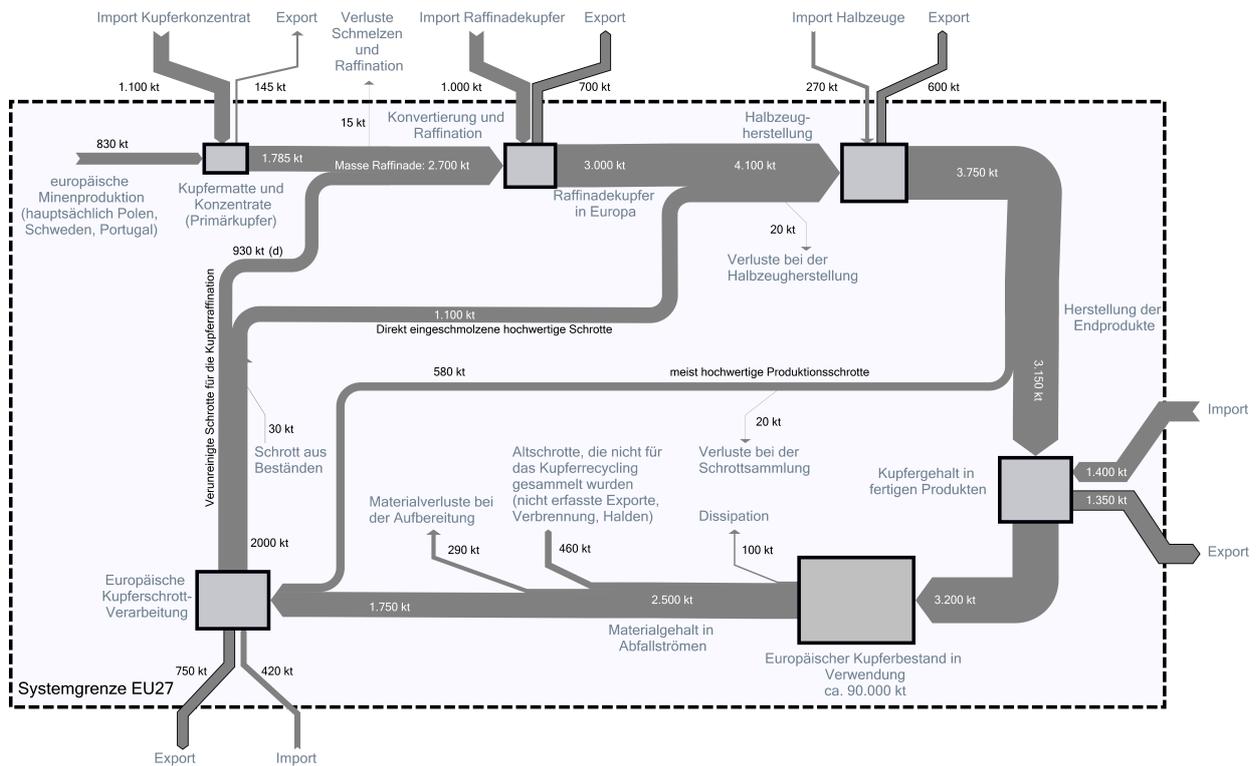


Abbildung 5.15. – Sankey-Diagramm der europäischen Kupferströme für 2012 (vergl. auch ECI, 2012).

Während bei den klassischen Industriemetallen wie Aluminium, Stahl und Kupfer von etablierten Recyclingsystemen und verhältnismäßig hohen Recyclingeffizienzen auszugehen ist (vergl. hierzu z.B. Graedel et al., 2011a; Reuter et al., 2013b) gibt es bei den meisten Technologiemetallen noch erhebliches ungenutztes Recyclingpotenzial (Goldmann, 2010; Hagelüken, 2010). Inwiefern die Nutzung von Sekundärmaterial zur Gesamtversorgung beitragen kann, lässt sich mit den im Folgenden vorgestellten dynamischen Stoffstrommodellen für Technologiemetalle quantifizieren.

und Neuware, was eine genaue Analyse des Anteils von exportierter Gebrauchtware erschwert.

5.3. Kobalt

Die Verwendung von Kobalt (in der Fachliteratur auch Cobalt bzw. Kobald⁶ geschrieben) reicht bereits tausende von Jahren zurück. Das Metall diente den Ägyptern zur Glasur von Töpferwaren, die Perser verwendeten Kobalterze unter anderem zur Blaufärbung von Glasperlen⁷. Später waren Kobalterze zur Herstellung von Pigmenten auch in der chinesischen Porzellanherstellung und im 15. Jh. bei der Produktion von venezianischem Glas von Bedeutung (Donaldson und Beyersmann, 2000, S.430).

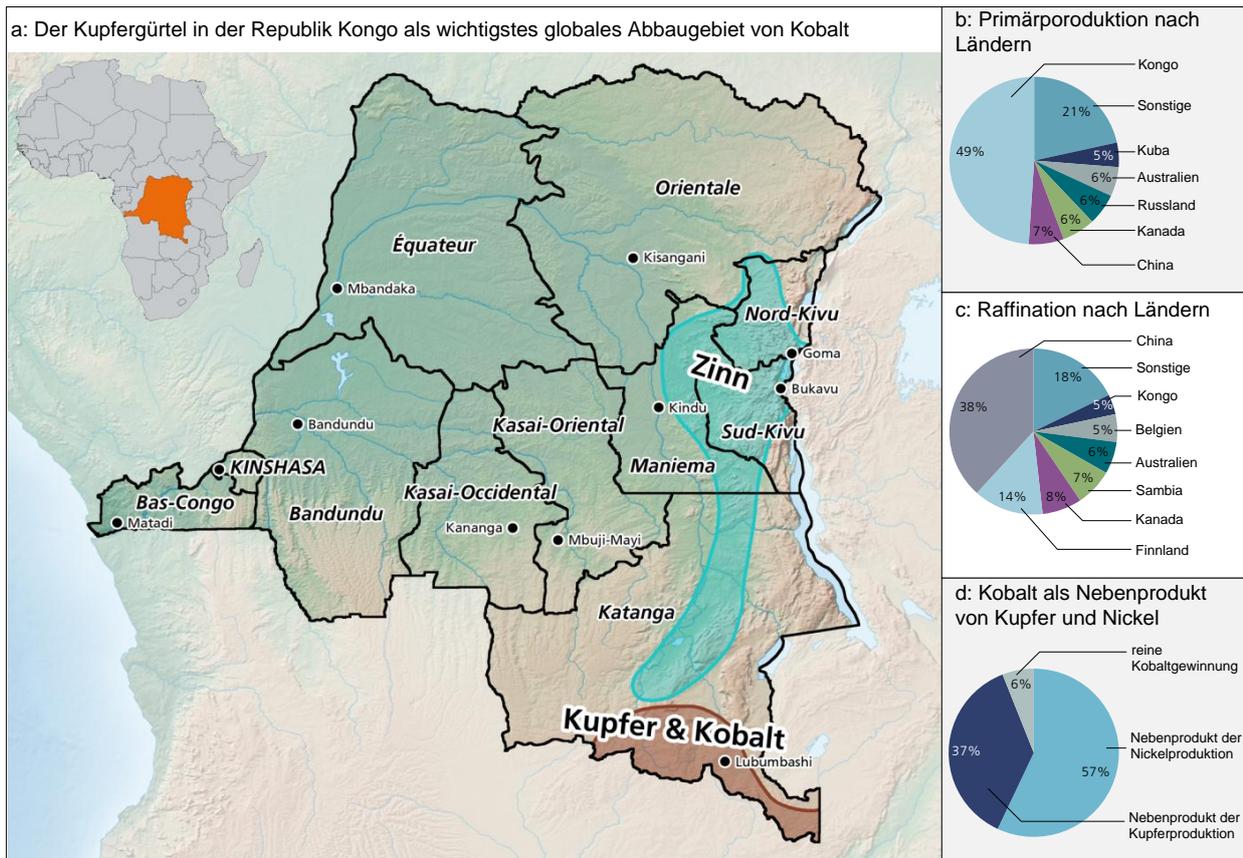


Abbildung 5.16. – Informationen zur Gewinnung und Verarbeitung von Kobalt.

a: Karte des “Kupfergürtels” im südlichen Kongo an der Grenz zu Sambia. In dieser Industrie- und Bergbau Region (Kupfer, Nickel, Kobalt) findet ca. 50% der globalen Kobaltförderung statt.

b: Primärproduktion nach Ländern. c: Raffination nach Ländern.

d: Kobalt als Nebenprodukt der Nickel- und Kupferindustrie (eigene Darstellung, Daten basieren auf USGS, 2012a; Porri, 2013).

Der technische Nutzen von Kobalt wurde jedoch erst Anfang des 20. Jahrhunderts erkannt, als Elwood Haynes eine Reihe von Kobalt-Chrom Legierungen patentieren ließ (Haynes, 1913). Unter dem Namen

⁶Die Bezeichnung “Kobalt” entstammt dem Wort “Kobold”, einer Art Berggeist, und wurde in scherzhaft-verächtlichem Sinne für Erze gebraucht, die trotz ihrer günstigen äußeren Erscheinung (silberlich glänzend) kein gutes Metall (im Sinne von Silber) enthielten (Meyer, 1969).

⁷Bei den ältesten bekannten Artefakten handelt es sich um glasierte Tongefäße, die in ägyptischen Gräbern gefunden wurden und auf die Zeit 2600 v.Chr. datiert werden (Meyer, 1969).

Stellite stellten sie die Vorläufer heutiger Superlegierungen dar (vergl. Erläuterungen unten). In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde festgestellt, dass sich die Eigenschaften spezieller Permanentmagnete aus Nickel-, Eisen- und Aluminiumlegierungen durch die Zugabe von Kobalt verbessern ließen (vergl. auch Abbildung 5.29). Inzwischen wird Kobalt neben den klassischen metallurgischen Anwendungen vor allem in der chemischen Industrie als Katalysator, aber auch zur Herstellung verschiedener Spezialchemikalien wie Kobaltseifen als Zusatz in Lacken und Farben oder Pigmenten verwendet. Größter Wachstumstreiber für Kobalt war in den vergangenen Jahren die Verwendung von Kobalt-Oxiden als Kathodenmaterial in Lithium-Ionen-Batterien (vergl. Abbildung 5.17). Durch die rasche Verbreitung von Li-Ionen-Batterien als Akkumulatoren mit den derzeit höchsten Energiedichten (siehe auch Abbildung 6.13), insbesondere für Elektronikprodukte wie Laptops, Mobiltelefone oder Smartphones, spielt die Verwendung von Kobalt im metallurgischen Bereich inzwischen eine untergeordnete Rolle.

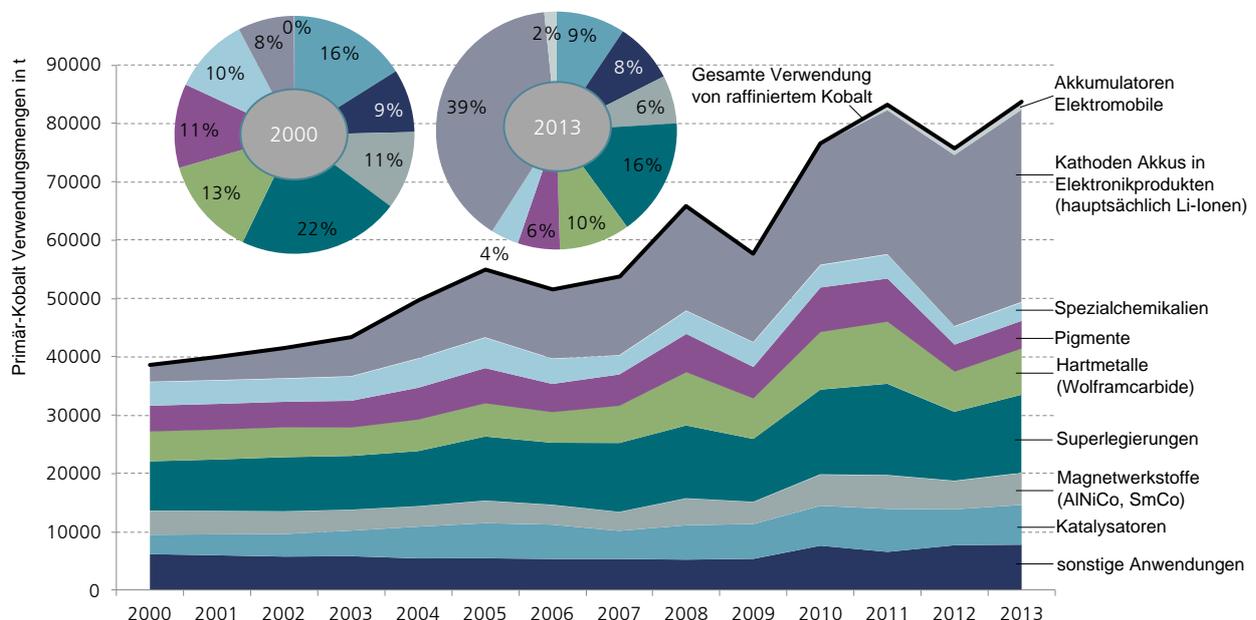


Abbildung 5.17. – Verwendungsstrukturen von raffiniertem Kobalt auf globaler Ebene. Durch den enormen Zuwachs des Kobaltbedarfs zur Herstellung von Akkumulatoren hat sich die Kobaltverwendung in den vergangenen 10 Jahren nahezu verdoppelt. Vor allem durch die Diffusion der Elektromobilität werden in Zukunft neue Impulse auf die Kobaltnachfrage erwartet (Daten basieren auf USGS, 2012a; Roskill, 2007; Porri, 2013; Gerbens, 2013).

Eine detaillierte Erläuterung zu den chemisch-physikalischen Eigenschaften von Kobalt, sowie zur technischen Gewinnung und Aufbereitung erfolgt im Anhang (vergl. Anhang Abschnitt A.5.2). An dieser Stelle soll ein rascher Überblick über die Verwendungsstrukturen und die technische Bedeutung von Kobalt in der chemischen und metallurgischen Verarbeitung gegeben werden.

Rund 60 % der jährlich geförderten Menge an Kobalt stammen aus Afrika, der größte Teil davon aus der Demokratischen Republik Kongo (rund 55 % der weltweiten Gesamtfördermenge, siehe Abbildung 5.16) und aus Sambia. Im Kongo lagert gleichzeitig die Hälfte der weltweit verfügbaren Kobaltreserven (USGS,

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

2012a). Der größte Teil des geförderten Kobalts wird als Nebenprodukt im Kupfer- (37 %) und Nickelabbau (57 %) gewonnen (Porri, 2013). Eine primär auf die Kobaltförderung ausgelegte Produktion existiert dagegen nahezu ausschließlich in Marokko und Kanada (U. S. DoE, 2010, S. 35). Für die weitere Verwendung von Kobalt in der Industrie ist die Aufbereitung des Rohstoffes zu raffiniertem Kobalt erforderlich (für entsprechende Verfahrensfließbilder siehe Anhang A.5.2). Über die Hälfte des raffinierten Kobalts stammt aus China (39 %), Finnland (15 %) und Kanada (8 %) (USGS, 2012a).

Die für die anschließende Modellierung des globalen Kobaltkreislaufs relevanten Anwendungsbereiche (vergl. Abbildung 5.17) werden im Folgenden näher erläutert:

Batterien für Elektronik- und Maschinenanwendungen:

Eines der bedeutendsten Anwendungsgebiete für Kobalt ist die Produktion von wiederaufladbaren Batterien. Der Bedarf der Batterieindustrie stieg dabei in den vergangenen Jahren stark an, was auf die zunehmende Verbreitung von elektronischen Konsumgütern wie Mobiltelefonen oder Laptops zurückzuführen ist (Roskill, 2007, S.208). Kobalt wird in Nickel-Kadmium-Batterien als Kathodenmaterial und in Nickel-Metallhydrid-Batterien als Bestandteil für beide Elektroden verwendet und verbessert die elektrischen und chemischen Batterieeigenschaften (Donaldson und Beyersmann, 2000, S.459 f). Bis zu 15 % des Kathodenmaterials, bezogen auf das Kathodengewicht, werden dabei aus Kobalt hergestellt (Porri, 2013). Noch bedeutender ist die Verwendung von Kobalt in Lithium-Ionen-Batterien. Deren überlegene Eigenschaften gegenüber anderen Batterietechnologien führten in den letzten Jahren zu einer starken Marktdurchdringung im Bereich elektronischer Konsumgüter. Die benötigten Mengen an Kobalt pro Zelle ist vom verwendeten Kathodenmaterial abhängig. Während in Hybrid- und Elektroautos derzeit vorwiegend Mischkathoden aus Nickel, Mangan und Kobalt verbaut werden (vergl. Abschnitt 6.3.4) wird der Elektronikbereich nach wie vor von Lithium-Kobaltoxid-Kathoden (LCO) dominiert, die rund 60 % Kobalt enthalten (vergl. Tabelle 6.1 für Kobaltverwendung pro kWh Speicherkapazität).

Katalysatoren:

Die wichtigste Anwendung von Kobalt als Katalysator ist die Verwendung als Oxidationskatalysator bei der Herstellung von Terephthalsäure und Dimethylterephthalat, die beide Grundstoffe für die Kunststoffherstellung darstellen (Abbasi et al., 2012). Ebenfalls von Bedeutung ist Kobalt als Katalysator für die Petrochemie, u.a. bei der Herstellung von Flüssiggas. Kobaltkatalysatoren werden weiterhin in der Gas-to-Liquid Technologie (GtL) basierend auf der Fischer-Tropsch-Synthese (FTS) zur Herstellung von Kraftstoff aus Erdgas (oder anderen Kohlenstoffquellen wie z.B. Biomasse) eingesetzt (König und Gaube, 1983).

Magnetlegierungen:

Kobalt wird meist in Hartmagneten verwendet, da es eine hexagonale, enge Kristallstruktur aufweist, welche einen positiven Einfluss auf die Anisotropie⁸ hat. Bis zur Einführung der Neodym-Eisen-Bor Magnete (NdFeB) waren Kobalt-basierte Magnetwerkstoffe wie Samarium-Kobalt Magnete (seit Mitte der 1960er Jahre) bzw. Aluminium-Nickel-Kobalt Magnete (AlNiCo) die stärksten Permanentmagnete (vergl. auch Abbildung 5.29). Zwischenzeitlich wurden die Kobalthaltigen Magnete oftmals durch die stärkeren NdFeB-Magnete ersetzt. Durch die Hochpreisphase für Seltene Erden, bzw. Unsicherheiten in der Seltenerd-

⁸Bereitschaft, mit der sich die Magnetisierung in eine bestimmte Richtung ausrichtet

Versorgung (vergl. Abschnitt 5.4) gewinnen neben den kostengünstigen Ferriten auch Kobalthaltige Permanentmagnete unter anderem in der Entwicklung völlig neuer Magnetwerkstoffe wieder an Bedeutung (Vaimann, 2013). Hinsichtlich der Remanenz (Feldstärke), bzw. Energiedichte bilden NdFeB-Magnete allerdings nach wie vor den höchsten Stand der Technik (vergl. hierzu detailliertere Erläuterungen in Abschnitt 5.5.1).

Superlegierungen:

Superlegierungen sind spezielle Hochleistungslegierungen auf der Basis von Nickel, Kobalt oder Eisen. Sie dienen Anwendungen, die besondere Anforderungen hinsichtlich Hitze-, Abnutzungs- oder Korrosionswiderstandsfähigkeit verlangen. Vor allem die hohe Hitzebeständigkeit ist ein Merkmal von Superlegierungen, da diese häufig bei Temperaturen oberhalb von 800°C eingesetzt werden, wie sie zum Beispiel in Flugzeugtriebwerken oder Kraftwerksturbinen (insbesondere in Gaskraftwerken) vorherrschen (Sato et al., 2006). Der im Vergleich zu Nickel und Eisen hohe Schmelzpunkt von Kobalt verbessert diese wichtige Eigenschaft von Superlegierungen (Porri, 2013).

Hartmetalle:

Hartmetalle bezeichnen eine Reihe von Metalllegierungen, die eine sehr hohe Härte und somit auch eine hohe Verschleißfestigkeit besitzen. Sie bestehen meist aus Metallcarbiden (Metall-Kohlenstoffverbindungen) und einem Bindematerial. Kobalt eignet sich als solches Bindungsmittel, da es sich im Vergleich zu den meisten Carbid-Metallen früher verflüssigt, die einzelnen Carbidpartikel vollständig benetzt und deren Zwischenräume füllt (Boeck, 2003). Wolframcarbid spielen insbesondere bei Bohr-, Stanz- und Schneidwerkzeugen eine Rolle. Auch sonstiges stark belastetes Material, wie Baugeräte und Baggerschaufeln werden mit Hartmetallen verstärkt (Harper et al., 2012).

Kobalt in Auftragsschweiß- und anderen Legierungen:

Auftragsschweißen ist das Aufbringen einer harten Legierung auf ein weicherer Metall. Für das Auftragschweißen gibt es eine Reihe an Auftragslegierungen je nach Festigkeit und Abnutzungsbeständigkeit. Die kobaltbasierten Legierungen liegen hier im Mittelfeld und werden vor allem auch aufgrund ihrer anhaltenden Härte bei hohen Temperaturen in diesem Bereich eingesetzt (Roskill, 2007, S.281 ff). Neben den oben genannten Superlegierungen wird Kobalt in Stahllegierungen unter anderem für Federn, Transformatoren und Heizelemente verwendet (Schmitz, 1984, S.47 ff). Eine klare Abgrenzung dieser kobalthaltigen Stähle zu den Superlegierungen ist nicht eindeutig möglich (im Modell fällt alles unter den Legierungsbereich).

Pigmente:

Die erste Anwendung von Kobalterzen in der Geschichte diente der Gewinnung von Pigmenten zur Glas- oder Tonwarenveredelung (Donaldson und Beyersmann, 2000, S.430). Auch heute noch wird Kobalt meist in der Form von Kobaltoxid zum Färben von Keramik und Glas, aber auch zur Herstellung von Farben, Tinte und zum Einfärben von Kunststoffen verwendet (Casadio et al., 2012).

sonstige Chemikalien:

Darunter fällt im Wesentlichen die Verwendung von Kobaltseifen, welche durch Reaktion des Metalls mit organischen Säuren entstehen. Sie kommen im Trocknungsprozess ölbasierter Farben, Lacke und Tinten zum Einsatz und dienen in der Produktion von Fahrzeugreifen als Haftmittel und Härter (AURO, 2015).

5.3.1. Der globale Kobaltkreislauf

Die Struktur des globalen Kobaltmodells ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Der Modellaufbau (Prinzip des Top-down-Ansatzes auf globaler Ebene) sowie die Simulation der Produktverwendungszyklen verläuft identisch zum globalen Kupfermodell und entspricht der in Abschnitt 4.2.3 erläuterten Methodik. Lediglich der Teil der Schrottverwertung, bzw. der Anpassung der Sammelquote unterscheidet sich, wie nachfolgend erläutert, vom globalen Kupfermodell (vergl. Abschnitt 5.2.1). Die in Abbildung 5.17 gezeigten Verwendungsstrukturen beziehen sich auf raffiniertes Kobalt, das sowohl in metallischer als auch in oxidischer Form zur chemischen Weiterverarbeitung vorliegen kann.

Zwar werden die zuvor beschriebenen metallischen Anwendungen (Hartmetalle, Superlegierungen etc.) mit verhältnismäßig hohen Effizienzen recycelt (Graedel et al., 2011a; Reuter et al., 2013b, vergl. auch Tabelle 5.4), allerdings bleibt Kobalt dabei in seiner Legierungsform, wird also nicht mehr als raffiniertes Kobalt, sondern als kobalthaltige Metalllegierung rezykliert. Da die meisten chemischen Anwendungen in Pigmenten und Metallseifen dissipative Verluste darstellen, und auch Katalysatoren, wenn sie wiederverwertet werden hauptsächlich als Katalysator wieder in Umlauf gebracht werden (vergl. z.B. Harper et al., 2012), bildet das Recycling von Kathodenmaterialien in Batterien den einzigen Bereich, in dem Kobalt in Reinform wiedergewonnen wird und analog zu Primärmaterial in verschiedenen Bereichen wiederverwendet werden könnte. Tabelle 5.4 fasst die der Literatur entnommenen Verwendungsdauern in den einzelnen Bereichen sowie die derzeitigen Recyclingeffizienzen der verschiedenen Verwendungsbereiche von Kobalt zusammen.

Tabelle 5.4. – Durchschnittliche Verwendungsdauern und aktuelle Recyclingraten wichtiger Anwendungsbereiche von Kobalt (vergl. Harper et al., 2012; Dewulf et al., 2010).

Anwendungsbereich im Modell	Produktbeispiele	⊙ Verwendungs- dauer (Jahre)	Recycling- Effizienz Literatur
Superlegierungen (Ni, Fe, Cr, Co-Basis)	Turbinen in Gaskraftwerken	7	0,90
	Flugzeugdüsen	5	0,70
	Raketen-Turbinen	5	0,70
Hartmetall-Legierungen (insb. Wolframcarbide)	Schneide-, Fräs-, Stanz- und Mahlwerkzeuge	2	0,75
	Baggerschaufeln	5	0,75
	Bohrköpfe für Exploration und Rohstoffförderung	2	0,15
Batterien (insb. Li-Ionen-Akkus)	Batterien Hybrid / Elektroautos	10	0,90
	Batterien Konsumelektronik	8	0,1
Magnetlegierungen (AlNiCo)	Elektromotoren	10	0,10
	Konsumgüter (Magnetverschlüsse etc.)	5	0,01
Katalysatoren	Petrochem. Raffination, Fischer-Tropsch-Synth.	2	0
	Polyester Herstellung	2	0,90
Pigmente	Farben	15	dissipativ
Chemikalien	Kobaltseifen für Lacke	8	dissipativ

Während Kobalt als Legierungselement in Hochleistungslegierungen in über Jahrzehnte aufgebauten Recyclingsystemen verhältnismäßig effizient wiederverwertet wird, ist insbesondere die Sammlung, aber auch

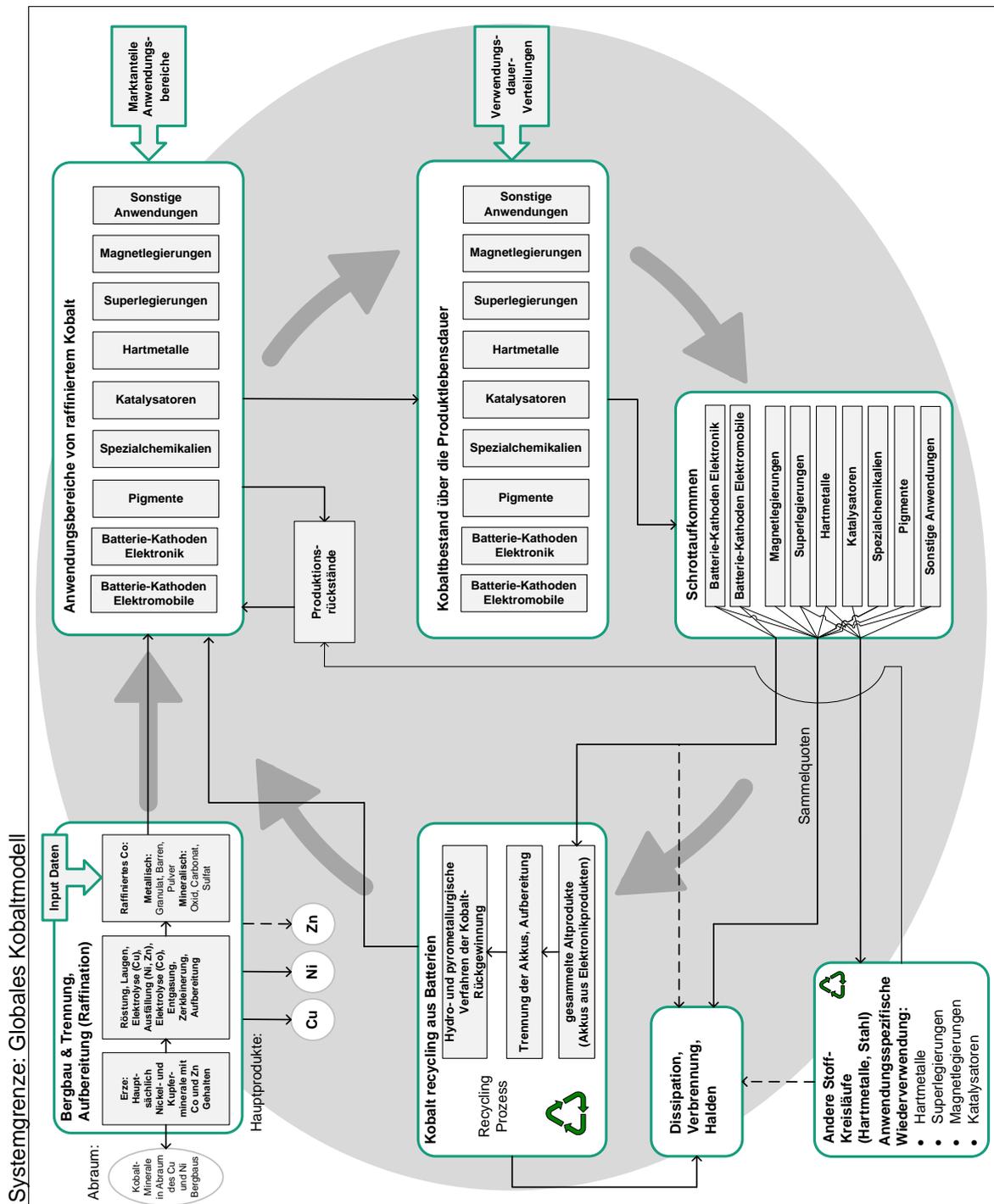


Abbildung 5.18. – Struktur des globalen Kobaltmodells. Im Gegensatz zum Kupferkreislauf wird Kobalt derzeit hauptsächlich innerhalb der metallurgischen Anwendungen in Legierungsform rezykliert (anwendungsspezifischer Kreislauf). Raffiniertes Sekundärkobalt, das analog zum Primärkobalt in verschiedenen Anwendungsbereichen verwendet werden kann, wird derzeit nur in verhältnismäßig geringen Mengen aus Altbatterien gewonnen.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

die Trennung und Rückgewinnung von Kobalt aus Altbatterien vor allem im globalen Schnitt noch wenig ausgereift (Harper et al., 2012; Graf, 2013; Sommer et al., 2015). Zwar gibt es in Europa und Japan erste Anlagen zum Recyceln von Li-Ionen-Akkus (vergl. z.B. Reuter et al., 2013b, S.227 ff), hier stellt sich aber regelmäßig das Problem eines effizienten Sammelsystems für alte Elektronikware wie Mobiltelefone, Laptops oder Smartphones. Auch lässt das Produktdesign von Elektronikprodukten wie Smartphones nicht immer eine rasche und unaufwendige Trennung der Akkus vom Altgerät zu (vergl. z.B. Hagelüken und Messers, 2010; Gantner et al., 2013). So wird die derzeitige Wiederverwendungsquote von Kobalt aus Altakkus lediglich auf 10-15 % geschätzt (Sommer et al., 2015; Harper et al., 2012). Die starke Marktdurchdringung von Li-Ionen-Batterien auf der einen Seite in Verbindung mit den niedrigen Recyclingquoten von Altbatterien auf der anderen Seite führen, wie das globale Modell aufzeigt, derzeit zu einer sinkenden Recyclingquote für Kobalt (vergl. Abbildung 5.19b).

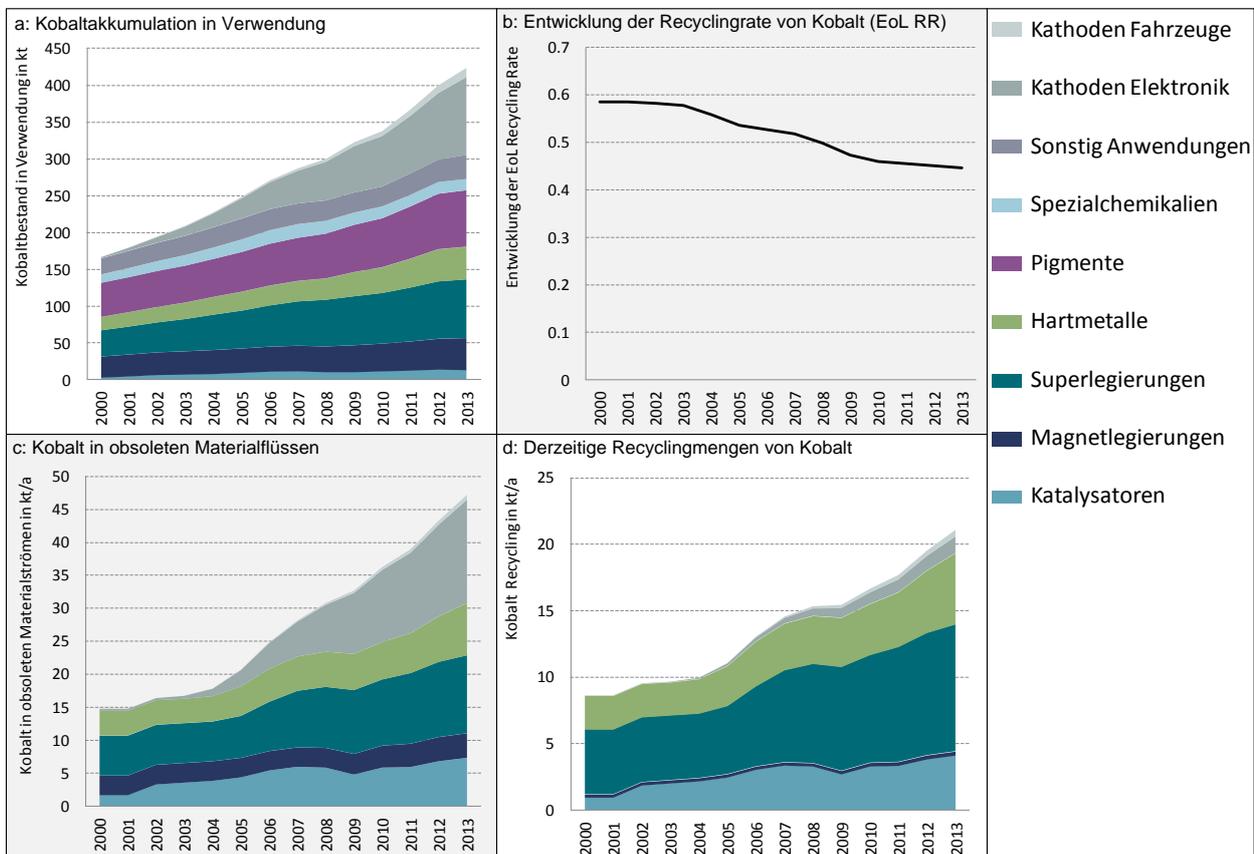


Abbildung 5.19. – Ergebnisse aus dem globalen Kobaltmodell. a: Globaler Kobalt Bestand in der Verwendungsphase. b: Entwicklung der End-of-Life Recyclingrate über die vergangenen Jahre. c: Kobaltgehalt in obsoleten Materialströmen nach Anwendungsbereich. d: Derzeit geschätzte Recyclingmengen von Kobalt basierend auf Effizienzwerten aus der Literatur (vergl. hierzu Tabelle 5.4).

Die in der Literatur zu findenden Angaben einer Recyclingquote für Kobalt von über 50 % (vergl. z.B. Graedel et al., 2011a,b), was in erster Linie auf die relativ effiziente Wiederverwertung von Kobalt in Hochleistungslegierungen zurückzuführen ist, wird durch den steigenden Anteil von nicht rezykliertem Kobalt in

Altbatterien revidiert. Die Entwicklung der berechneten Recyclingquote, sowie weitere Ergebnisse aus dem globalen Kobaltmodell sind in Abbildung 5.19 zusammengefasst.

Zur Analyse des Potenzials der Rückgewinnung von Kobalt aus Altbatterien in Konsumelektronik und Elektrofahrzeugen ist eine regionale Betrachtung notwendig. Hierzu wurde das nachfolgend vorgestellte europäische Stoffstrommodell für Kobalt entwickelt.

5.3.2. Der europäische Kobalt-Kreislauf

Zur Analyse des Recyclingpotenzials von Kobalt auf europäischer Ebene (EU27) wurde eine Kombination aus einem Top-down und einem Bottom-up-Ansatz gewählt (vergl. Abbildung 4.11). Während für den unteren Bereich der Wertschöpfung, insbesondere für den europäischen Bergbau und die europäische Raffination von Kobalt, aber auch für den Handel mit metallischem Kobalt sowie mit chemischen Zwischenprodukten, verlässliche Daten existieren, erscheint es aufgrund der Vielseitigkeit der Kobaltverwendung insbesondere als Legierungselement in der metallurgischen Weiterverarbeitung kaum möglich, die gesamten Verwendungsstrukturen bis hin zu den Fertigprodukten analog zum europäischen Kupfermodell (vergl. Abschnitt 5.2.2) nachzuverfolgen.

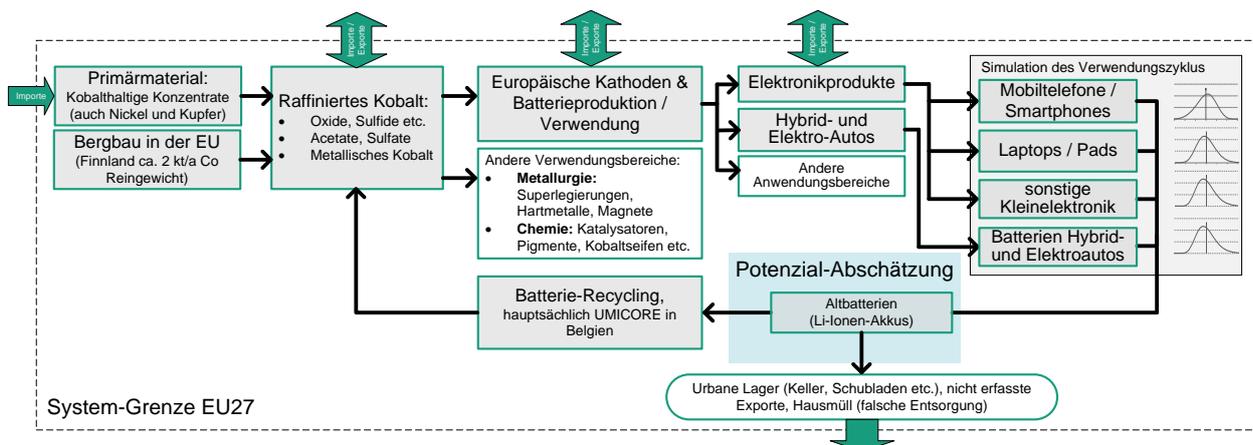


Abbildung 5.20. – Struktur des europäischen Kobaltmodells. Da alle metallurgischen Anwendungen über relativ effiziente interne Kreislaufsysteme verfügen (vergl. Tabelle 5.4), ist aus Sicht der Ressourceneffizienz vor allem die Wiedergewinnung von Kobalt aus Batteriekathoden entscheidend. Daher betrachtet das europäische Modell in erster Linie den Zyklus von Li-Ionen-Batterien.

Wie zuvor auf globaler Ebene erläutert, ist aus Sicht des Recyclingpotenzials allerdings in erster Linie das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien aus alten Elektronikprodukten interessant, da davon auszugehen ist, dass die metallurgische Wiederverwertung von Kobalt in den entsprechenden Legierungsanwendungen (insbesondere Hartmetalle wie Wolframcarbide und Superlegierungen für Hochtemperaturanwendungen) auch aufgrund der hohen Preise dieser Werkstoffe recht effizient ausfällt (siehe auch Tabelle 5.4) und teilweise in direktem Austausch zwischen Kunden und Herstellern stattfindet (Austausch von Verschleißteilen gegen Neuware, vergl. z.B. Gandenberger et al., 2012, S.202 ff.). Aus diesem Grund wurde, wie in Abbildung 5.20

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

dargestellt, lediglich der Verwendungszyklus von Li-Ionen-Akkus in Elektronikprodukten näher untersucht. Neben Mobiltelefonen, Smartphones, Laptops, Tablets und weiterer Kleinelektronikware (Mp3-Player, Kameras etc.) wurden auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge berücksichtigt.

Zwar wird die globale Verwendung von Kobalt inzwischen von der Batterieindustrie dominiert (vergl. Abbildung 5.17), dennoch findet die Herstellung von Li-Ionen-Akkus nahezu vollständig in Asien statt (Nansai et al., 2014). Wichtigste Produktionsländer sind dabei Südkorea, China und Japan (Pillot, 2013). Die europäische Verwendung von Kobalt ist, wie in Abbildung 5.21 dargestellt, nach wie vor von den klassischen metallurgischen Anwendungsbereichen geprägt, die insbesondere in Deutschland eine entscheidende Materialbasis für verschiedenste Bereiche des Maschinenbaus bilden. In diesem Zusammenhang ist das effiziente Rezyklieren von Kobalt aus importierten Akkus und Elektronikgeräten nicht nur aus ökologischer Sicht, sondern auch unter versorgungsstrategischen Aspekten interessant. Dieses Potenzial wird nachfolgend genauer untersucht und quantifiziert.

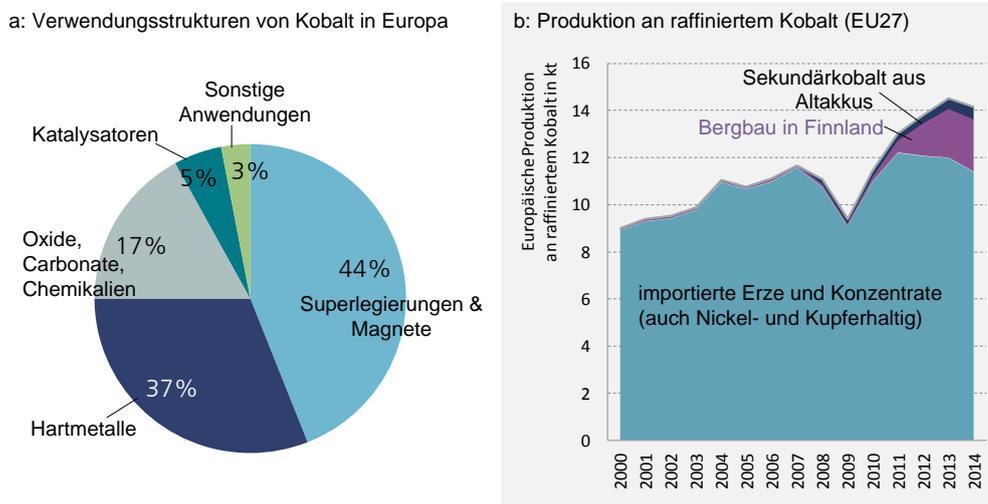


Abbildung 5.21. – Europäische Produktion und Verwendung von Kobalt.

- a: Aufteilung der Kobaltverwendung in Europa (European Commission, 2010a, S.51).
b: Europäische Kobaltraffination (EU27, Norwegische Produktion wurde nicht berücksichtigt) sowie Anteil des innereuropäischen Bergbaus (ausschließlich Finnland) an der Gesamtproduktion (Porri, 2013; Minerals4EU, 2014).

Recyclingpotenziale von Kobalt aus Altakkus in Europa

Bei Betrachtung der Materialflüsse von Kobalt in der europäischen Handelsbilanz wird bereits eine erhebliches Potenzial der Gewinnung von Sekundärmaterial aus Altakkus sichtbar (vergl. Abbildung 5.22).

Die Summe des Kobaltgehalts in importierten Li-Ionen-Akkus innerhalb von Kleinelektronikgeräten, sowie als reiner Akku oder Batterie-Zelle für die Verwendung in europäischen Maschinen und Geräten beträgt ca. 6000 t/a, was in etwa der Hälfte des importierten Primärmaterials in Form von Erzen und Konzentraten entspricht (ca. 12000 t/a). Wie zuvor erläutert, wurde für das europäische Kobaltmodell für die Modellierung der Materialmenge über die Verwendungsphase ein Bottom-up-Ansatz gewählt. Hierzu wurden neben

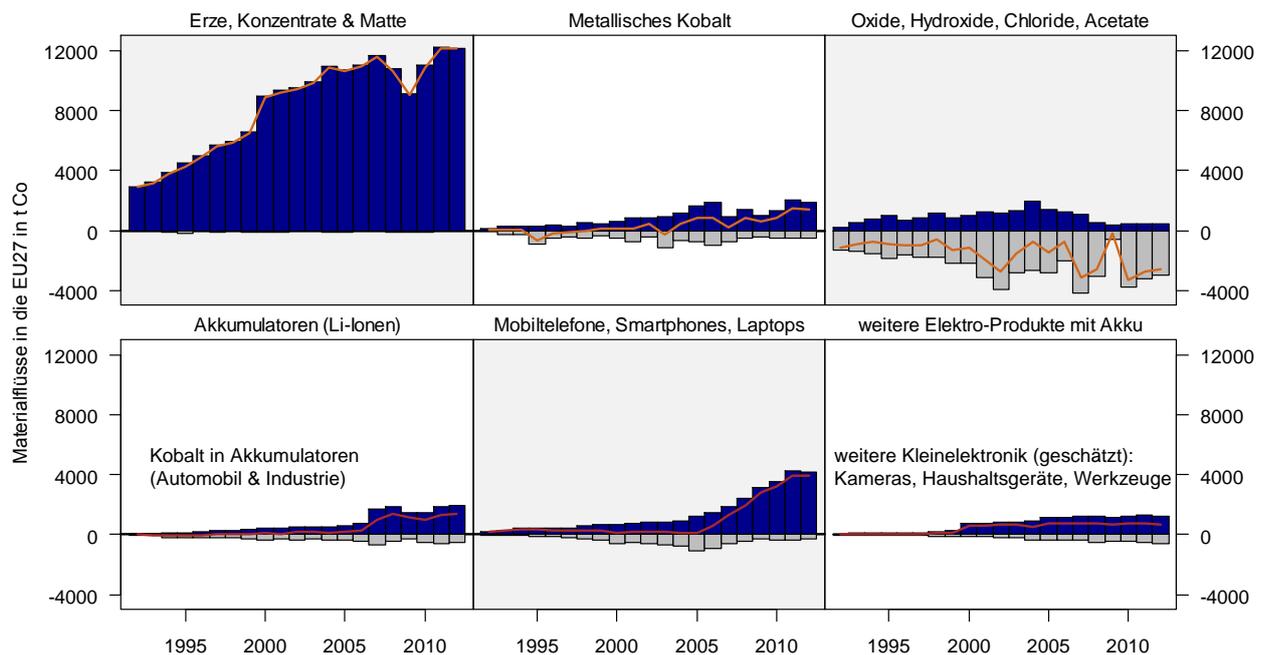


Abbildung 5.22. – Handelsvolumen von Kobalt (Materialinhalt) in den verschiedenen Wertschöpfungsstufen für die EU27. Die Daten basieren größtenteils auf UN Comtrade (vergl. Tabelle mit Güterklassifikationen im Anhang A.5.2), für die Importmenge an Erz wurde die Differenz aus europäischer Raffinadeherstellung und europäischem Bergbau angesetzt, da eine Verfolgung des Kobaltanteils in Nickel- und Kupferhaltigen Erzen über eine Handelsdatenanalyse kaum möglich erscheint. Auch basiert der Materialgehalt in Kleinelektronik auf der nachfolgend erläuterten Bottom-up-Analyse.

den Verkaufszahlen für Elektronikprodukte mit Li-Ionen-Batterie wie Mobiltelefone oder Laptops (vergl. Abbildung 5.23a) auch Hybrid- und Elektrofahrzeuge herangezogen (siehe Abbildung 5.23b).

Da nicht für alle Länder der EU verlässliche Verkaufszahlen von Kleinelektronikgeräten zur Verfügung stehen, wurden die Zahlen der Länder, für die entsprechende Zahlen vorhanden sind, auf die gesamte EU hochgerechnet (vergl. Gleichung 5.1). Hierzu wurde sowohl die Bevölkerungszahl als auch die Wirtschaftsleistung des jeweiligen Landes berücksichtigt, wobei beide Werte mit jeweils 50% in die endgültige Schätzung einfließen.

$$\text{Mobiltelefone}_{\text{Land2}} = \text{Mobiltelefone}_{\text{Land1}} \cdot \frac{X_{\text{Land2}}}{X_{\text{Land1}}} \quad (5.1)$$

mit:

X – BIP bzw. Bevölkerung

⁹Bitkom: Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien

Cemix: Consumer Electronics Market Index

Gartner Inc. unterhält die weltweit umfangreichste Datenbank zu globalen Verkaufs- und Produktionszahlen von Kommunikationstechnik.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

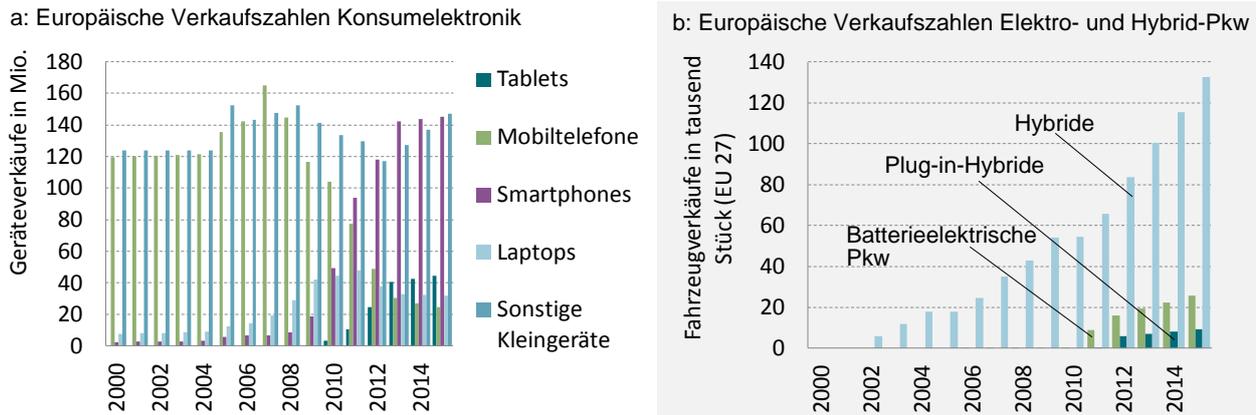


Abbildung 5.23. – Verkaufszahlen von Elektroprodukten mit Li-Ionen-Batterien in der EU27.
a: Verkäufe von Mobiltelefonen, Notebooks, Smartphones und Tablets in der EU (Daten basieren auf Bitkom, Cemix, Gartner⁹). Wenn für einzelne Länder keine Daten vorhanden waren, wurden die Werte nach Gleichung 5.1 geschätzt.
b: Zulassungszahlen von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben in der EU (Daten basieren auf Marklines, 2015).

Bei einer Bevölkerung von ca. 500 Mio. Menschen (vergl. Eurostat 2015) und Mobiltelefonverkäufen (Neugeräte Smartphones + reine Mobiltelefone) von knapp unter 170 Mio. Stück ergibt sich unter der Annahme, dass nahezu alle Neukäufer schon einmal ein Mobiltelefon besaßen, d.h. eine gewisse Marktsättigung erreicht ist (vergl. sehr gering ansteigende, in den vergangenen 3 Jahren nahezu konstante Entwicklung der Summe der Verkäufe von Mobiltelefonen und Smartphones in Abbildung 5.23), ein Neukauf pro Einwohner einmal in 3 Jahren, also eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 3 Jahren pro Mobilfunkgerät. Zu unterscheiden ist hier allerdings die reine Nutzungsdauer und die Aufbewahrungsdauer von Altgeräten. Eine breit angelegte, deutschlandweite Sammelaktion für Altgeräte (Gantner et al., 2013) ergab eine sehr breite Streuung des Gerätealters und ein durchschnittliches Alter der gesammelten Geräte von knapp 10 Jahren (vergl. Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5. – Aktuelle Materialgehalte durchschnittlicher Elektrokleingeräte sowie die Verweildauer in Verwendung (nicht die direkte Nutzungsdauer), abgeleitet vom Alter gesammelter Altgeräte. Zur Erhebung der technischen Daten wurden Geräte verschiedener führender Hersteller betrachtet. Die angesetzten Kobaltmengen pro Gerät wurde nach dem in Abschnitt 6.3.4 erläuterten Prinzip errechnet und mit Literaturangaben abgeglichen (vergl. Gantner et al., 2013; Hagelüken, 2010).

Gerät	Batteriekapazität (mAh)	Spannung (V)	Spez. Energie (Wh)	Kobaltmenge g Co/Gerät (LiCoO ₂ -Kathode)	Durchschnittliche Verweildauer
Laptop	4000-6000	11	ca. 50-70	60-80	8
Smartphone	1500-2500	3,5	5-8	6-9	9
Mobiltelefon	800-1500	3,5	5	5	9
Tablet	2000-4000	11	30-50	40-55	9
Digitalkamera	800-1500	3,5	5	5	9

Insgesamt wird davon ausgegangen, dass nach wie vor große Mengen von Elektronikaltgeräten in deutschen und europäischen Haushalten lagern. Was genau mit den bisherigen Altgeräten geschehen ist (Verkauf als

Gebrauchtware und Export, falsche Entsorgung im Hausmüll, Lagerung), lässt sich nicht eindeutig klären; das Recyclingpotenzial, sowohl in Abfallströmen als auch in “herumliegenden” Altgeräten, lässt sich mit den hier vorgestellten Simulationsansätzen allerdings klar quantifizieren.

Diese Ergebnisse können sowohl aus Sicht der Industrie – zur Abschätzung von Geschäftspotenzialen – als auch für die Politik – zur Ergreifung möglicher Maßnahmen mit dem Ziel der Erhöhung der Ressourceneffizienz – relevante Erkenntnisse bringen. Insbesondere der Vergleich des derzeitigen und vor allem in den kommenden Jahren erwarteten Recyclingpotenzials mit dem aktuellen Import von Primärmaterialien (vergl. Abbildung 5.22) zeigt abgesehen von den ökologischen Vorteilen der Rohstoffrückgewinnung auch versorgungsstrategisch klare Möglichkeiten auf. Dabei ist das Problem des Recyclings von Li-Ionen-Batterien kein technisches: Das belgische Recyclingunternehmen Umicore betreibt seit 2009 eine Anlage zur Verarbeitung von Altakkus, die in der Lage ist verschiedene metallische Batterierohstoffe (Co, Ni, Mn, Nd, vergl. Fließbild im Anhang A.5.2 und Beschreibung der Materialzusammensetzung verschiedener Li-Ionen-Technologien in Kapitel 6.3.4) zurückzugewinnen (Reuter et al., 2013b, S.202 ff.). Das Problem der derzeit niedrigen Recyclingquote von Li-Ionen-Batterien (vergl. Tabelle 5.4) liegt eher in der Logistik der Sammlung von Elektroaltgeräten, bzw. im Schaffen von Anreizen zur Abgabe alter Geräte. Zwar verbiete die europäische WEEE-Richtlinie¹⁰ den Export von Elektroschrott, dennoch werden nach wie vor große Mengen an teilweise nicht mehr funktionsfähigen Altgeräten auf mehr oder weniger illegale Weise exportiert (vergl. z.B. Hagelüken, 2010; Sander und Schilling, 2010; Chancerel, 2010, S.45 ff.) und auf sowohl ökologisch als auch ökonomisch grenzwertige Weise in Ländern der Dritten Welt “wiederverwertet”. Problematisch ist dabei auch häufig die klare Abgrenzung zwischen gebrauchter Elektroware und Elektroschrott. Während es durchaus sinnvoll sein kann, die Verwendungsdauer von Elektroware durch eine “zweite Verwendungsphase” in wirtschaftlich schwächeren Regionen der Welt zu verlängern, muss der illegale Export von Elektroschrott unterbunden werden (Sander und Schilling, 2010)¹¹.

Eine quantitative Argumentationsgrundlage für die Erörterung von politischen Maßnahmen zur Erhöhung der Sammeleffizienz von Altgeräten können Modelle wie das hier vorgestellte liefern. Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Sammelquoten für Elektronikschrott wären z.B. (Hagelüken, 2014, S.162 ff.):

- Vorgaben zu recyclingfreundlichem Produktdesign (Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit bereits bei der Entwicklung, z.B. durch herausnehmbare Akkus etc.),
- Einführung eines separaten Sammelsystem für Elektrogeräte in Form einer zusätzlichen “Wertstofftonne” (Vermeidung der Vermengung von verschiedenen Produktkategorien),
- Einführung eines Pfandsystems für Elektronikgeräte, welches Altprodukten einen Restwert verleiht, der einen Anreiz für die gezielte Rückgabe schafft,

¹⁰Die europäische WEEE Richtlinie ist eine Vorgabe der Europäischen Union, die in den Mitgliedsstaaten über jeweilige Gesetze umgesetzt wird. In Deutschland wird der rechtliche Umgang mit Elektronikschrott über das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) geregelt.

¹¹Das Umweltbundesamt betont hierzu: “Ein zweites Leben eines bei uns ausrangierten Handys oder Computers schont Ressourcen. Die Wiederverwendung älterer Geräte stärkt – gegebenenfalls nach einer kleinen Reparatur, die bei uns zu teuer gewesen wäre – die Infrastruktur im Importstaat und ermöglicht den neuen Besitzerinnen und Besitzern die Teilhabe am wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Leben.”

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

- schärfere Kontrollen bei gebrauchter Exportware zur Vermeidung von Schrottexporten (dies wird in der neuen EU-Richtlinie zu WEEE¹² bereits gefordert, vergl. European Commission, 2012).

Zwar spielt die Elektromobilität nach wie vor eine Nischenrolle, dennoch bieten nahezu alle Automobilhersteller inzwischen Hybrid- und reine Elektrofahrzeuge an. Von einer stärkeren Diffusion alternativer Antriebe ist folglich auszugehen, auch wenn die politischen Ziele (z.B. 1 Mio. Fahrzeuge in Deutschland bis 2020) eher unrealistisch erscheinen. Welcher Materialverbrauch sich durch eine stärkere Diffusion der Elektromobilität ergibt und welches Recyclingpotenzial daraus entsteht lässt sich mit Hilfe der hier vorgestellten System Dynamics Modelle ebenfalls darstellen. Wie in Kapitel 6.3.3 ausführlich erläutert ist die Materialzusammensetzung in Li-Ionen-Akkus in Elektrofahrzeugen eine andere als in Kleinallektroprodukten. Während für Elektrogeräte nach wie vor reine $LiCoO_2$ (Lithium-Kobalt-Oxid) Kathoden aufgrund der hohen Energiedichte, Stabilität und Lebensdauer den Markt dominieren, kommen für große Fahrzeugbatterien vor allem kobalthaltige Mischmetalle zum Einsatz (insbesondere $Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$, vergl. hierzu Abschnitt 6.3.4). Im europäischen Kobaltmodell wird hinsichtlich der Kathodenmaterialien von derselben Technologieverteilung wie in Kapitel 6.3.3 beschrieben ausgegangen.

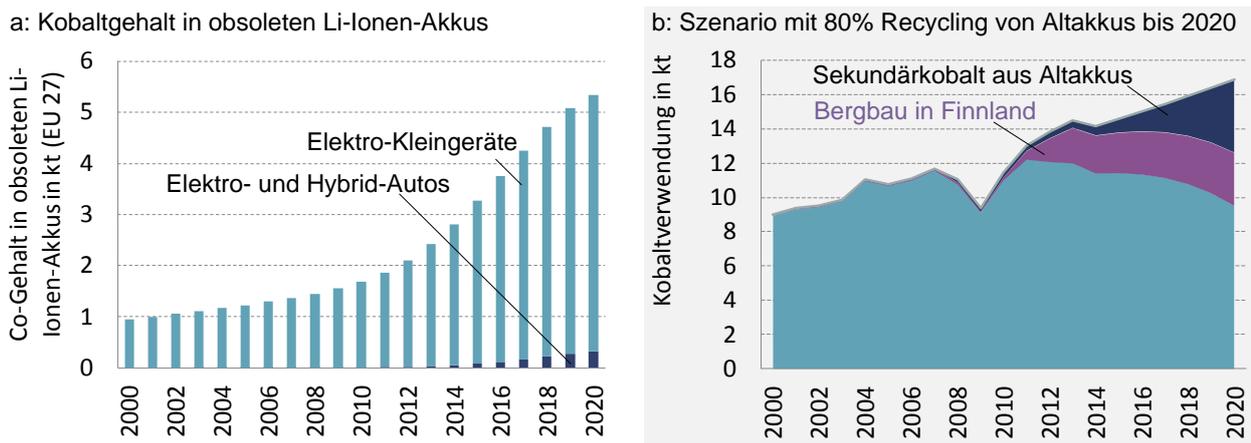


Abbildung 5.24. – Recyclingpotenzial von Kobalt aus Elektroschrott.
a: Kobalt in obsoleten Li-Ionen-Akkus.
b: Theoretisches Szenario der Zusammensetzung der europäischen Raffinadeherstellung bei einer Sammelquote von 80% bis 2020.

Während technologische Entwicklungen und die damit verbundene Rohstoffnachfrage nur mit sehr hohen Unsicherheiten abgeschätzt bzw. prognostiziert werden können, lassen sich mittelfristige Schrottaufkommen und deren Zusammensetzung einfacher quantifizieren, da diese Daten auf bereits bekanntem, heutigem Konsum basieren. So wurden die Entwicklungen der einzelnen Anwendungsbereiche in Abbildung 5.23 über einfache polynomische Trends fortgeschrieben und die hauptsächlich auf aktuellem und jüngst vergangenem Konsum basierende Kobaltmenge in Altbatterien in Europa für die kommenden Jahre abgeschätzt (vergl. Abbildung 5.24a). Dabei ist dies noch eine eher konservative Schätzung, da weitere Anwendungsbereiche von Li-Ionen-Batterien wie die zunehmende Zahl an Elektrowerkzeugen (Akkubohrer, Rasenmäher,

¹²Waste Electrical and Electronic Equipment

Kettensägen etc.), Elektrofahrrädern (Pedelecs) oder auch Freizeitelektronik (Drohnen, sonstige ferngesteuerte Geräte) in dem Bottom-up-Ansatz nicht berücksichtigt wurden.

Abbildung 5.24b zeigt ein theoretisches Szenario, bei dem die Sammelquote für obsoletere Klein Elektronikprodukte bis 2020 auf 80 % ansteigt und die enthaltenen Li-Ionen-Batterien effizient recycelt werden. Trotz kontinuierlichen Anstiegs der Produktion von raffiniertem Kobalt (Trendfortschreibung der vergangenen Jahre) kann die Importmenge von Primärmaterial reduziert werden und zusätzlich zum ansteigenden Bergbau in Finnland ein erheblicher Teil der Gesamtproduktion aus Sekundärmaterial gewonnen werden. So könnte Europa entweder Rohstofflieferant für die Batterieindustrie in Asien werden, oder einen Teil des in Europa metallurgisch verarbeiteten Kobalts aus Altbatterien gewinnen. Die effizientere Nutzung dieser Sekundärquellen essenzieller Rohstoffe ist sowohl aus ökologischen als auch aus versorgungsstrategischen und ökonomischen Gründen für die Entwicklung einer nachhaltigen Industriegesellschaft unumgänglich.

5.5. Globales Angebot und Verwendungsstrukturen Seltener Erden

Derzeit stammen knapp 90% der global abgebauten Seltenen Erden aus China (vergl. Abbildung 5.26). Die Volksrepublik hat allerdings zur Konsolidierung des heimischen Marktes und aufgrund der negativen Umweltauswirkungen ihre Produktion gedrosselt und will ihre Ressourcen über Exportquoten für die eigenen Zwecke bewahren. Auch spielen hier, wie bereits in der Einleitung dieser Arbeit erläutert, wirtschaftsstrategische Aspekte eine Rolle, da durch die Wettbewerbsverzerrung aufgrund von Exportrestriktionen, Steuern und sonstigen Handelshemmnissen die heimische Wertschöpfung und der Technologietransfer aus dem Ausland gestärkt wird. Die bedeutendsten nicht chinesischen Projekte, welche die globale Seltenerd-Produktion in jüngster Vergangenheit ergänzt haben¹⁵, werden hauptsächlich leichte Seltene Erden (LREE) hervorbringen.

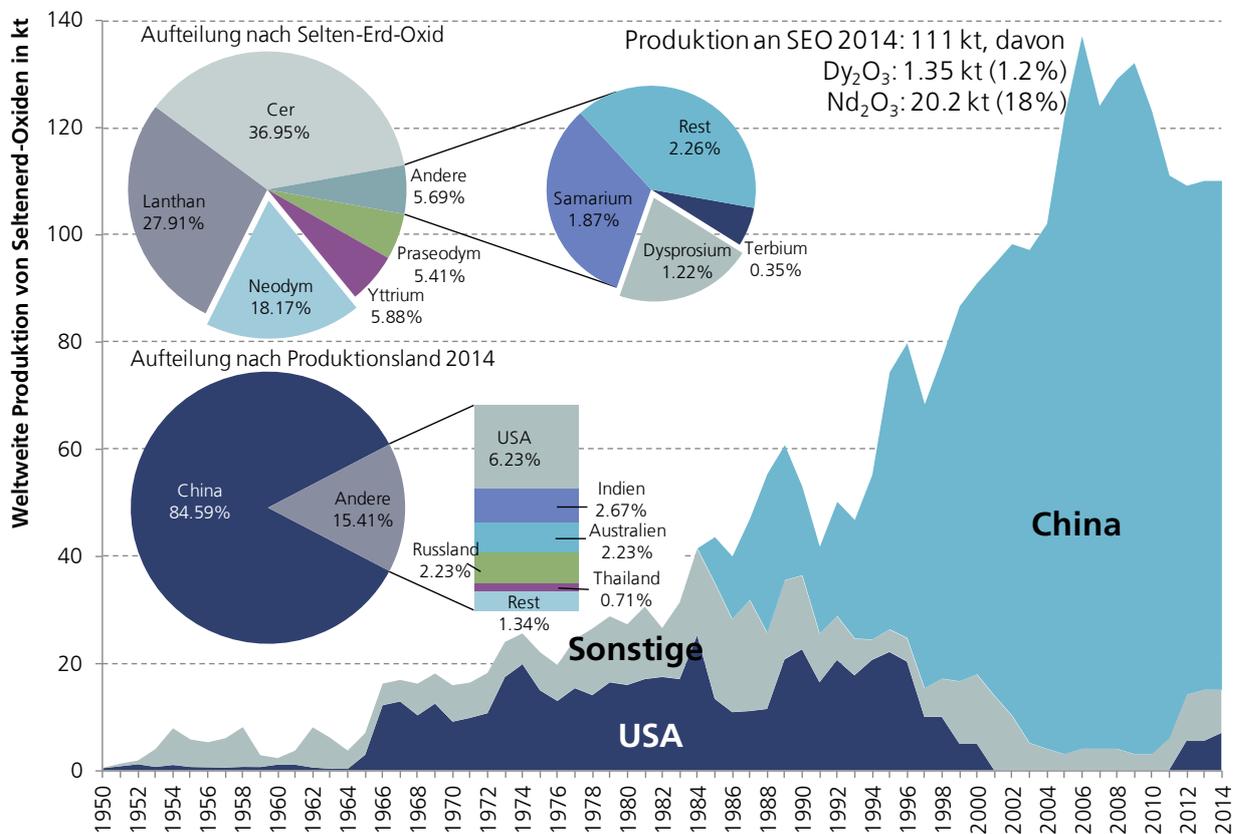


Abbildung 5.26. – Globale Seltenerd-Produktion nach Ländern sowie Zusammensetzung der gewonnenen Elemente (Daten basieren auf USGS, 2013).

Obwohl das Gesamtangebot an Seltenen Erden die Gesamtnachfrage erwartungsgemäß übersteigen wird (siehe z.B. Hatch, 2011; Alonso et al., 2012a; Kingsnorth, 2014), werden Engpässe bei der Versorgung mit HREE erwartet, da die verschiedenen Seltenen Erden nicht im gleichen Verhältnis konsumiert werden wie sie geologisch in den Erzen vorkommen. So ist davon auszugehen, dass die häufigsten leichten Seltenen

¹⁵z.B. die Mount Weld Mine in Australien (LYNAS corp.).

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Erden Cer und Lanthan (vergl. Abbildung 5.26 oben) in Zukunft im Überfluss vorhanden sein werden (was sich schon heute in den Preisniveaus zeigt), Neodym als wichtigster Magnetrohstoff den Wachstumstreiber der Seltenerd-Förderung darstellen wird (Alonso et al., 2012a) und die schweren Seltenen Erden Dysprosium, Terbium und Europium auch in Zukunft sehr knapp sein werden. Diese Einschätzung spiegelt sich auch in der aktuellen Kritikalitätsstudie der EU wider (European Commission, 2014), die die Schweren Seltenen Erden als versorgungskritischer einschätzt. Da Dysprosium als wichtiger Bestandteil von Hochleistungs-Magneten eine zentrale Rolle für die Elektromobilität, aber auch für andere Wachstumsbranchen wie den Windenergiesektor, insbesondere bei wartungsarmen, direkt-angetriebenen großen Offshore-Windanlagen, spielt, ist die Versorgungslage hier als besonders problematisch einzustufen, was im Folgenden näher untersucht wird (vergl. hierzu auch z.B.: Hoenderdaal et al., 2013; Habib und Wenzel, 2014).

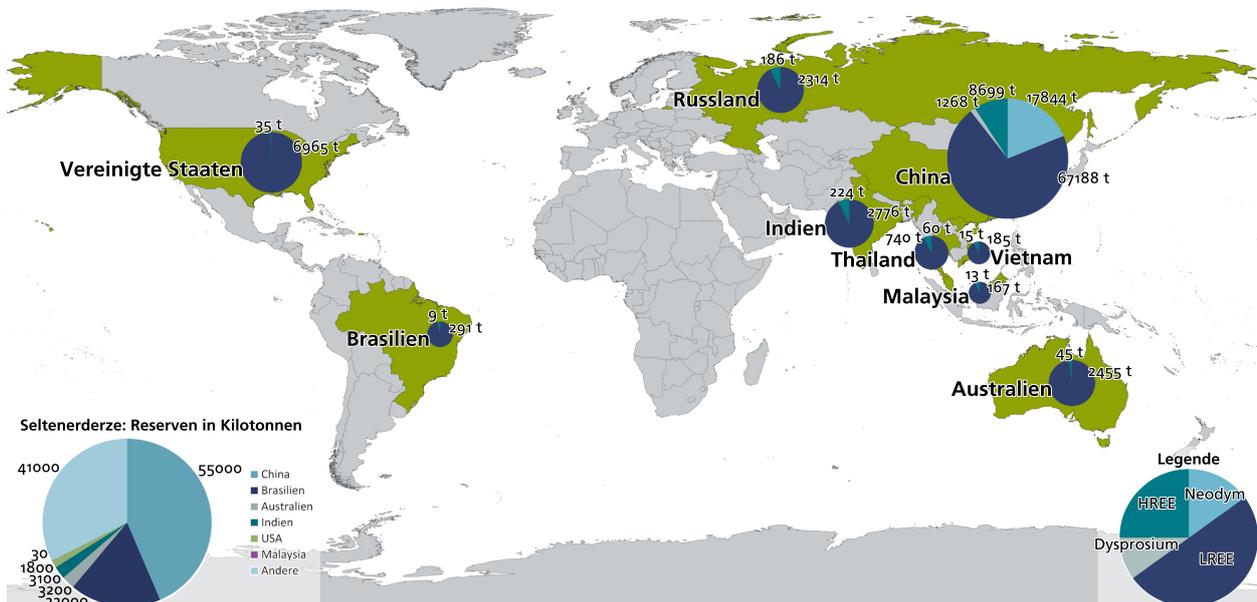


Abbildung 5.27. – Globale Verteilung der Seltenerd-Produktion (USGS, 2013). Zwar haben die USA und Australien ihre Produktion in den vergangenen Jahren ausgeweitet (vergl. auch Abbildung 5.26). Die gewonnenen Monazit und Bastnäsit-Erze enthalten allerdings nur geringe Mengen an schweren Seltenen Erden und nahezu kein Dysprosium (Kingsnorth, 2014). Hier hat China nach wie vor eine klare Monopolstellung.

Seltene Erden sind in geringen Konzentrationen in der gesamten Erdkruste vorhanden und in hunderten von Mineralen enthalten. Die Zusammensetzung der abbauwürdigen Minerale variiert von Mine zu Mine, häufig werden Seltene Erden auch als Kuppelprodukt bei der Förderung anderer Metalle gewonnen (z.B. in Verbindung mit der Eisenerzförderung in der Inneren Mongolei, vergl. USGS, 2011). Aufgrund der großen chemischen und physikalischen Ähnlichkeiten ist die Aufbereitung und Trennung der verschiedenen Seltenerd-Oxide sehr aufwendig und teilweise mit erheblichen Umwelteinwirkungen verbunden. Bei den Gewichtsangaben muss zwischen den metallischen Seltenerd-Elementen (SEE) und Seltenerd-Oxiden (SEO) unterschieden werden, da die Oxide das Gewicht des gebundenen Sauerstoffs beinhalten. Allgemein werden die Produktion und die Vorräte in SEO angegeben. Eine Übersicht über die nach Ländern aufge-

5.5. Globales Angebot und Verwendungsstrukturen Seltener Erden

schlüsselsten globalen Abbaumengen und Reserven an Seltenen Erden liefert Abbildung 5.27.

Hinsichtlich der Produktionsdaten zu einzelnen Seltenerd-Elementen herrscht einige Unsicherheit und Unklarheit. Dies liegt u.a. an den erheblichen Mengen illegalen Bergbaus, der bezogen auf die Gesamtheit der Seltenerd-Oxide auf ca. 15% geschätzt wird (Hurst, 2010; Schüler et al., 2011, S.20). Dabei ist anzunehmen, dass der Anteil schwerer Seltener Erden aus inoffizieller Produktion besonders hoch ist (Wübbeke, 2013). Da die leichten Seltenen Erden über 80% der Gesamtförderung ausmachen, erscheint eine Quote von 50 % illegalen Bergbaus bei schweren Seltenen Erden (HREE) nicht unrealistisch. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass im Süden Chinas einzigartige Tonerden mit enorm hohem Anteil an HREE vorkommen (vergl. Abbildung 5.28). Angesichts des großen Preisunterschieds zwischen Cer, Lanthan und HREE wie Terbium, Dysprosium oder Europium, ist es naheliegend, dass es für dortige Minenbetreiber aufgrund der hohen Konzentration an HREE auch wirtschaftlich sein kann, die abgetrennten LREE zu deponieren und über die Produktionsvorgaben der Zentralregierung in Peking hinaus HREE zu fördern. Insgesamt ist davon auszugehen, dass vor allem bezüglich der HREE, auch aufgrund des weit höheren Preisniveaus und der Konzentration der Vorkommen in den südlichen Provinzen Chinas (vergl. Abbildung 5.28), die tatsächlichen Produktionszahlen weit höher liegen als die offiziell veröffentlichten Daten in Abbildung 5.26 (vergl. z.B. Buchert, 2011; Kingsnorth, 2014).

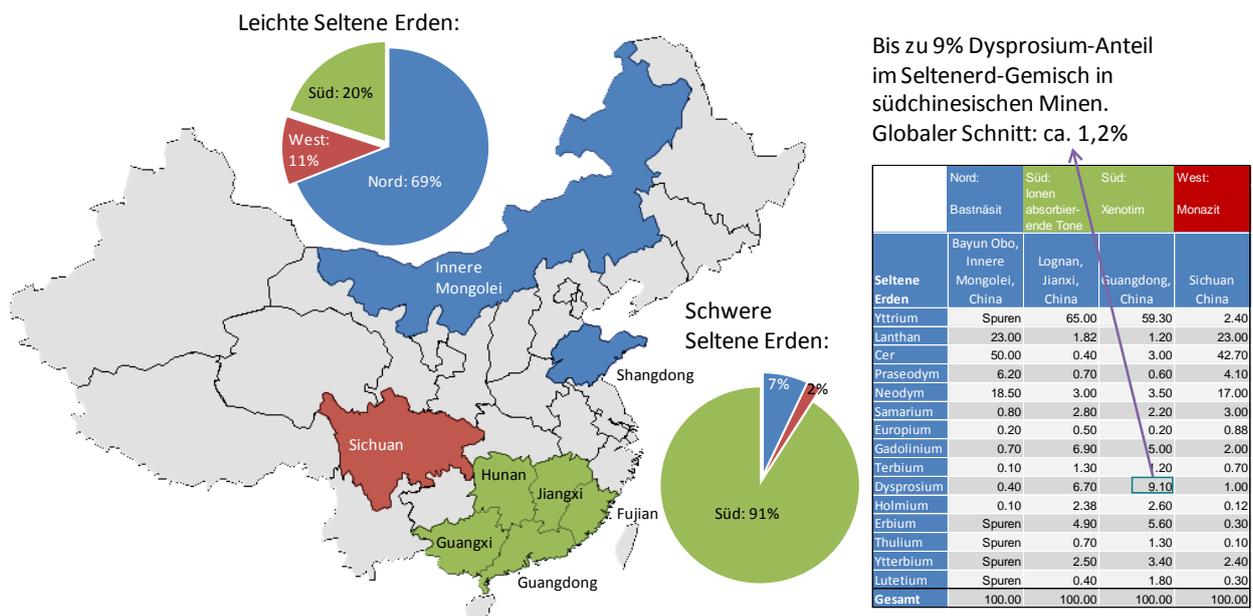


Abbildung 5.28. – Chinesische Abbaugelände Seltener Erden und Erzzusammensetzung verschiedener Minen (USGS, 2011; Wübbeke, 2013; Kennedy, 2014).

Hier kommt die gesamte Problematik der zwar offiziell nach wie vor planwirtschaftlich geführten chinesischen Industrie (einschließlich Produktionsvorgaben seitens der Zentralregierung) und der tatsächlich privatwirtschaftlichen Umsetzung zum Tragen: In offiziellen Statistiken tauchen lediglich die von der Zentralregierung vorgegebenen Zahlen auf, während die tatsächliche Produktion davon offensichtlich abweicht. Ein weiteres Problem bei der Analyse der Verwendungsstrukturen von Seltenen Erden bildet die Tatsache,

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

dass nicht nur die Rohstoffgewinnung, sondern auch ein erheblicher Teil der Seltenerd-Verarbeitung in China stattfindet. So hat China nicht nur bei der Seltenerd-Förderung einen Marktanteil von ca. 85%, sondern auch bei der Herstellung von NdFeB-Magneten (vergl. z.B. Du und Graedel, 2011a). Eine Abschätzung der tatsächlichen Produktionsmengen bestimmter Seltenerd-Elemente ist daher nur mit einer erheblichen Fehlerspanne möglich (vergl. Abschnitt 5.5.1, insbesondere Abbildung 5.34).

Aufgrund der schlechten Datenlage ist eine genaue Quantifizierung der Verwendungsstrukturen der Gesamtheit der Seltenen Erden schwierig. Die Haupt- und Nebenanwendungsbereiche sind allerdings für die einzelnen Elemente bekannt und werden in Tabelle 5.6 zusammengefasst (vergl. z.B. Schüler et al., 2011; Buchert et al., 2013; Zepf, 2013, S.33 ff.).

Tabelle 5.6. – Verwendungsbereiche Seltener Erden aufgeteilt nach Elementen (vergl. z.B. Zepf, 2013, S.33 ff.) ergänzt um weitere Anwendungsbereiche nach (Roskill, 2011; Schüler et al., 2011; Kingsnorth, 2014).

Rohstoff \ Anwendungsbereich	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Sc	Y
Akkumulatoren (NiMH)	⊗	⊗		⊗												
Katalysatoren	⊗	⊗		⊗												
Keramik	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗				⊗		⊗		⊗		⊗	⊗
Glas	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗				⊗		⊗	⊗		
Poliermittel		⊗			⊗											
Magnete			⊗	⊗	⊗			⊗	⊗							
Metallurgie	⊗	⊗	⊗	⊗											⊗	⊗
Leuchtstoffe	⊗	⊗			⊗	⊗	⊗	⊗			⊗		⊗		⊗	⊗
Sonstige	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗

Hauptanwendung: ⊗, Nebenanwendung: ⊗

Dies sind lediglich die wichtigsten aus der Literatur entnommenen Anwendungsfelder. Die Liste der Spezialanwendungen für die Hightechmetalle der Seltenen Erden ist sehr lange, da dies für die weiteren Betrachtungen in der vorliegenden Arbeit aber keine Rolle spielt, wurde auf zusätzliche Recherchen verzichtet.

In dieser Arbeit werden lediglich die Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium untersucht und Stoffstromanalysen auf globaler Ebene sowie für Deutschland durchgeführt.

5.5.1. Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe

In der vorliegenden Arbeit werden die Verwendungsstrukturen der Seltenen Erden Neodym und Dysprosium, die zum größten Teil bzw. ausschließlich in Neodym-Eisen-Bor-Magneten (NdFeB-Magneten) eingesetzt werden (vergl. Tabelle 5.6), analysiert. Diese sind derzeit die stärksten Permanentmagnete und essenziell für die Herstellung von effizienten Synchron-Elektromotoren mit hohen Leistungsdichten und kompakter Bauweise, was insbesondere für mobile, batteriebetriebene Anwendungen entscheidend ist, da hier Gewichts- und Effizienz Aspekte eine wichtige Rolle spielen. Die Entwicklung von Permanentmagnet-

Materialien seit Beginn des 20. Jahrhunderts ist in Abbildung 5.30 dargestellt.

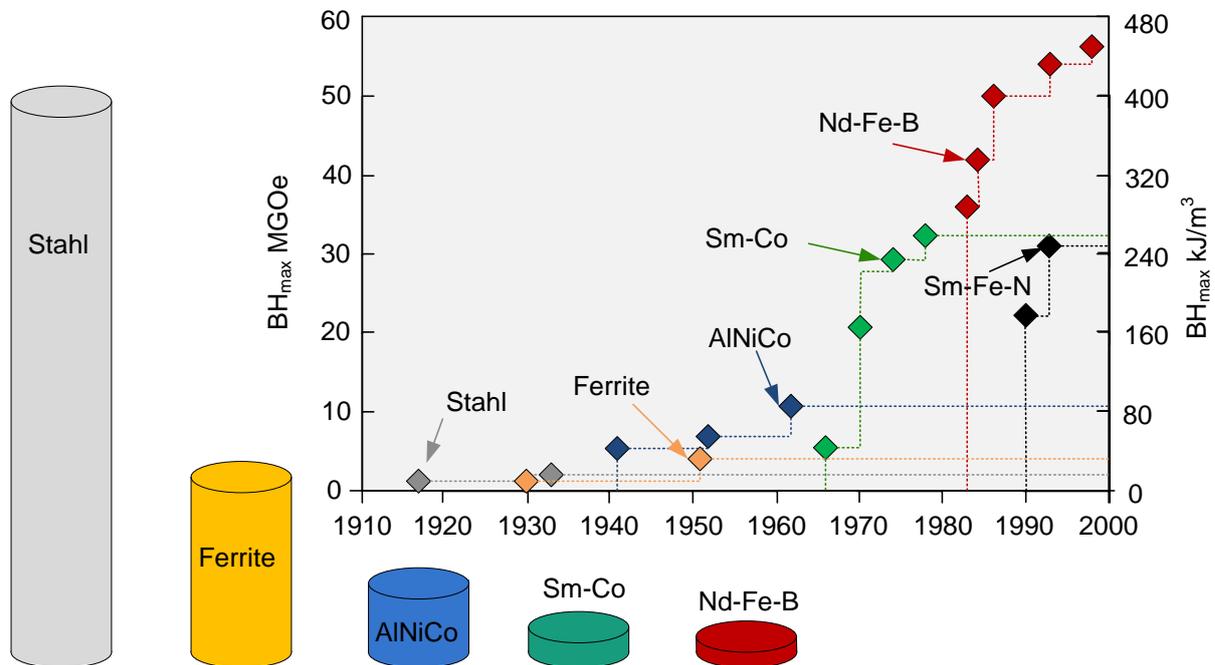


Abbildung 5.29. – Entwicklung der Permanentmagnet-Technologien¹⁶ sowie Vergleich der Volumina verschiedener Magnettypen gleicher Stärke. NdFeB Magnete sind heute die Magnete mit der mit Abstand höchsten Energiedichte und daher für kompakte Synchron-Elektromotoren hervorragend geeignet (Gutfleisch et al., 2011).

Neodym als dritthäufigste Seltene Erde (nach Cer und Lanthan, vergl. Abbildung 5.26) wird neben der Verwendung als Magnetwerkstoff (ca. 90 % der Weltproduktion, vergl. z.B. Buchert et al., 2013; Sprecher et al., 2014) auch in NiMH-Batterien (Nickel-Metall-Hydrid-Batterien, vergl. Manchester et al., 1991) und sonstigen Metalllegierungen (z.B. spezielle Aluminium- und Magnesiumlegierungen, vergl. Rochlin, 2003), sowie in Leuchtstoffen (siehe Tabelle 5.6) verwendet. Weitere Anwendungsgebiete mit geringem Verbrauchsvolumen bilden die Verarbeitung in Lasersystemen zur Metallbearbeitung und das Färben von Emaille, Porzellan und Glas (Schüler et al., 2011). Diese Anwendungsbereiche werden hier aufgrund ihrer mengenmäßig geringen Relevanz nicht näher betrachtet. Wegen der ähnlichen Eigenschaften, der besseren Korrosionsbeständigkeit und des günstigeren Preises von Praseodym werden in NdFeB-Magneten auch häufig Neodym-Praseodym-Gemische eingesetzt, wobei typische Mengenverhältnisse zwischen Neodym und Praseodym bei 5:1 liegen (dieses Gemisch nennt sich Didymium, siehe Zepf, 2013, S.80).

Dysprosium wird nahezu ausschließlich in Neodym-Magneten verwendet¹⁷ und ist dort für die Steigerung der Temperaturbeständigkeit der Magnete, aber auch zur Vermeidung der Entmagnetisierung durch externe Magnetfelder ein essentieller Bestandteil. Ohne Dysprosium wäre der Betrieb der Elektromotoren und Generatoren bei Temperaturen über 80 °C nicht möglich (siehe Abbildung 5.30).

¹⁶Abkürzungen: Sm-Co: Samarium-Cobalt, Alnico: Aluminium-Nickel-Cobalt, Sm-Fe-N: Samarium-Eisen-Stickstoff

¹⁷Es gibt weiterhin spezielle Keramik-Kondensatoren, die geringe Mengen an Dysprosium enthalten, dies ist allerdings eine absolute Nischenanwendungen (Hoenderdaal et al., 2013).

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

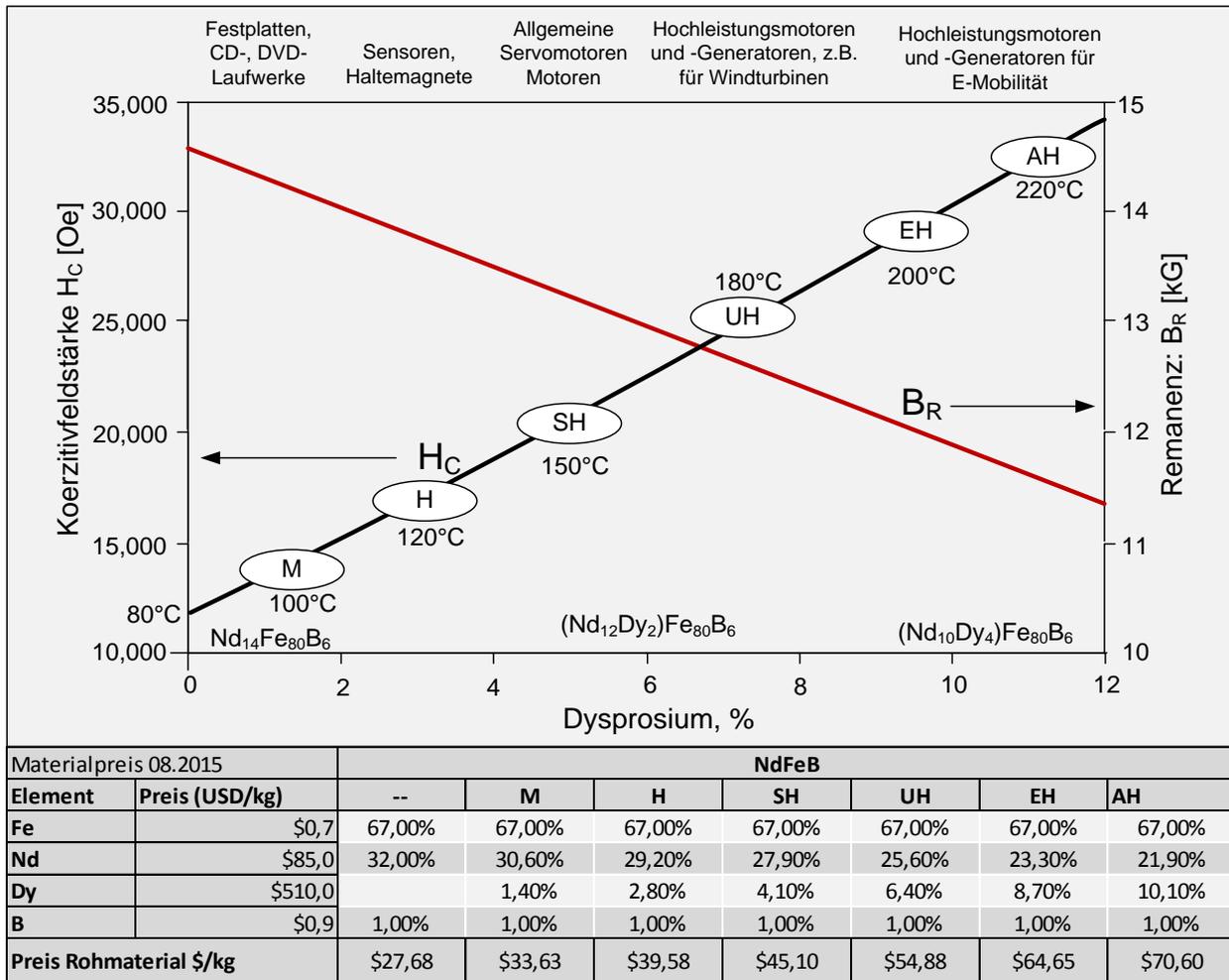


Abbildung 5.30. – Einfluss des Dysprosiumanteils auf die Magneteigenschaften (Remanenz und Koerzitivität, vergl. z.B. Constantinides, 2013; Gutfleisch et al., 2011). Die Bezeichnungen M, H, SH, UH, EH, AH sind typische Klassifizierungen von NdFeB-Magneten nach entsprechenden Einsatzbereichen bezogen auf die Betriebstemperatur.

Zur Erläuterung der hier relevanten Magneteigenschaften werden nachfolgend einige zentrale Größen definiert. Im Gegensatz zu fremderregten Elektromagneten bestehen Permanentmagnete aus einem magnetisierten Werkstoff, der dauerhaft ein magnetisches Feld aufweist. Ferromagnetische Stoffe sind z.B. Eisen, Nickel, Kobalt und Legierungen, die diese Elemente beinhalten. Die maximale magnetische Energie eines Magneten ist das Produkt aus Feldstärke H [A/m] und Flussdichte B [T]. Sie wird Energiedichte BH genannt. Diese Energiedichte wird auf das Volumen des Magneten bezogen und in Kilojoule pro Kubikmeter [kJ/m^3] oder Mega-Gauß-Oersted [$MGOe$] angegeben. Die Größe, mit der die im Magnetwerkstoff verbleibende Flussdichte B nach Entfernung eines extern angelegten Magnetfeldes beschrieben wird, heißt Remanenz (B_r), mit der Einheit Tesla, bzw. Gauß [$1 T = 10000 G$]. Die Koerzitivfeldstärke H_c gibt an, wie groß die Feldstärke eines externen Magnetfeldes in [A/m] sein muss, um diesen Magneten wieder vollständig zu entmagnetisieren. Sie gibt auch die Widerstandsfähigkeit gegen Entmagnetisierung bei höheren Temperatu-

ren an. Dies ist besonders wichtig für Anwendungen in Motoren, da dort beide Arten der Entmagnetisierung (externes Magnetfeld und höhere Temperaturen) kontinuierlich auftreten.

Wie in Abbildung 5.30 dargestellt, wird die Remanenz, also die im Magnet verbleibende Flussdichte und damit auch die Energiedichte des Magneten, durch Dysprosium-Zugabe reduziert. Der einzige Grund für die Beimischung von Dysprosium liegt in der relativ niedrigen Koerzitivität von NdFeB-Magneten, und den damit verbundenen niedrigen Betriebstemperaturen. Während reine NdFeB Magnete lediglich bis Betriebstemperaturen von ca. 80 °C eingesetzt werden können, da sie bei höheren Temperaturen entmagnetisiert würden, kann die Betriebstemperatur durch Zugabe von Dysprosium auf bis zu 220 °C erhöht werden (vergl. Abbildung 5.30). Gleichzeitig sinkt allerdings auch die Restmagnetisierung (Remanenz). Wie die Tabelle in Abbildung 5.30 unten zeigt, steigen mit zunehmendem Anteil an Dysprosium wegen des ca. 5-fachen Preises von Dysprosium gegenüber Neodym auch die Materialkosten erheblich. Dies kann sich wegen höherer Wirtschaftlichkeit auch positiv auf das Recycling auswirken.

Die wichtigsten physikalischen Kenngrößen von Permanentmagneten, die für das Verständnis der Dysprosium-Beimischung in NdFeB-Magneten entscheidend sind, werden nachfolgend nochmals zusammengefasst:

Energiedichte BH :

Die Energiedichte ist die magnetische Energie, die ein Magnet im Verhältnis zu seinem Volumen aufweist. Sie entspricht, wie zuvor erläutert, dem Produkt aus Feldstärke H [A/m] und Flussdichte B [T] bezogen auf das Volumen. Einheit: [kJ/m^3], bzw. Mega-Gauß-Oersted [$MGOe$] wobei [$1 MGOe = 7,96 kJ/m^3$].

Intrinsische Koerzitivität H_C :

Die intrinsische Koerzitivität, oder auch Koerzitivfeldstärke genannt, ist eine "innere" Eigenschaft des Magneten, die aussagt wie stark eine aufgewendete Feldstärke sein muss, damit ein Magnet vollständig entmagnetisiert wird. Je größer die intrinsische Koerzitivität ist, desto beständiger ist ein Magnet gegenüber Entmagnetisierung durch äußere Felder oder durch hohe Temperaturen. Einheit: [A/m], bzw. Oersted [Oe], mit [$1 Oe = 79,58 A/m$].

Remanenz B_R :

Die Remanenz ist eine Angabe über die Magnetisierung eines dauermagnetischen Werkstoffes, die er beibehält nachdem das extern angelegte magnetische Feld entfernt wurde. Einheit: Tesla, bzw. Gauß, mit [$1 T = 10000 G$].

Betriebstemperatur T :

Die Betriebstemperatur gibt an, bis zu welcher Temperatur des Magneten die unvermeidliche Entmagnetisierung äußerst langsam verläuft. Einheit: [$^{\circ}C$].

NdFeB-Magnete werden aus Magnetlegierungen im Sinter- oder Fügeverfahren hergestellt. Gesinterte Magnete haben eine höhere Energiedichte, daher wird dieses Verfahren auch häufiger verwendet. Gebundene Magnete beruhen auf einer Kunststoffbasis, um das Pulvergemisch zusammenzuhalten. Der Vorteil polymergebundener Magnete liegt in der besseren Formbarkeit, was vor allem für Kleinmotoren (z.B. im Automobilbereich) eine Rolle spielt. Circa 94 % der NdFeB-Magnete sind gesinterte und 6 % gebundene

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Magnete (Roskill, 2011, S.237). In Abbildung 5.31 wird die jährliche globale Produktion von Neodym-Magneten (beider Verfahren) dargestellt. Die Magnetproduktion wuchs innerhalb der ersten sechs Jahre des 21. Jahrhunderts um durchschnittlich 25 % pro Jahr und verlagerte sich zunehmend nach China, was nicht zuletzt von Exportzöllen- und Restriktionen im Export von Seltenen Erden seitens der chinesischen Regierung beeinflusst wurde. So war eine sichere Versorgung mit Neodym und Dysprosium zu günstigeren Preisen lediglich in China gegeben, was dazu geführt hat, dass auch japanische und europäische Hersteller ihre Produktion zunehmend nach China verlagert haben. Heute stammen ca. 90 % der NdFeB-Magnete aus China.

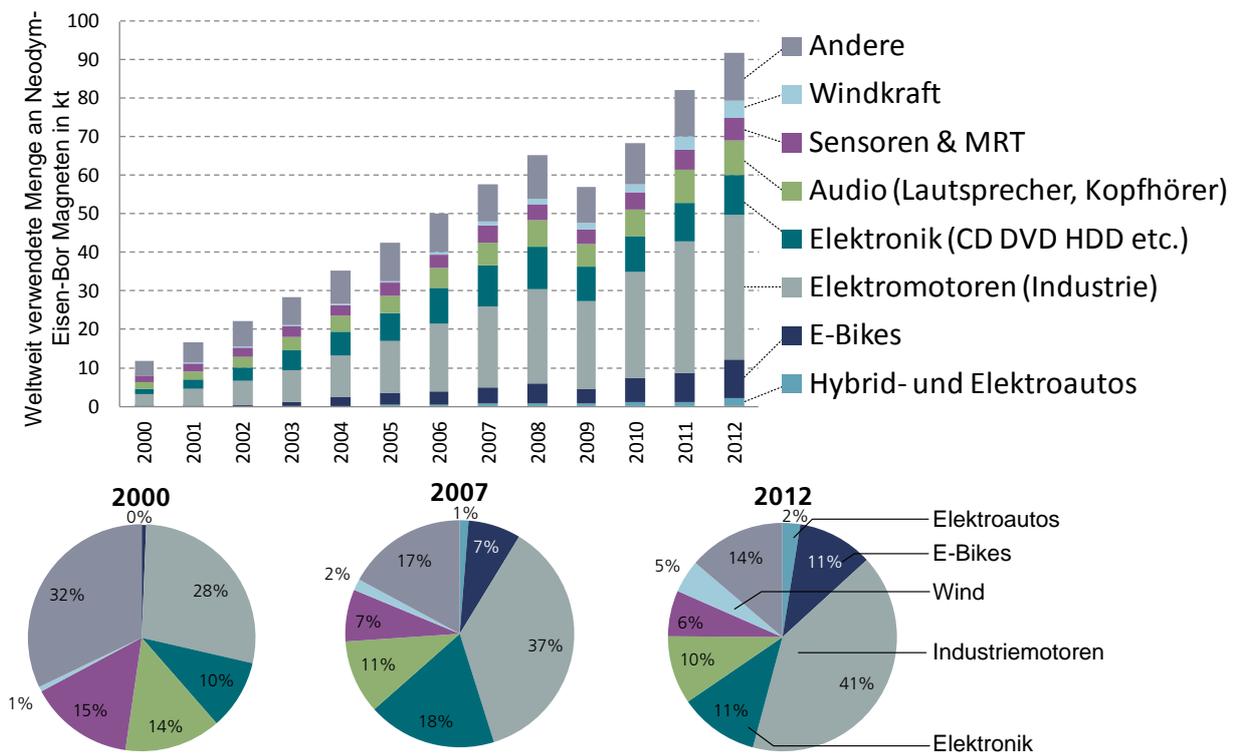


Abbildung 5.31. – Globale Produktions- und Verwendungsstrukturen von NdFeB Magneten (Daten basieren auf Gutfleisch et al., 2011; Roskill, 2011; Constantinides, 2011, 2012, 2013; Research and Markets, 2014).

Die wichtigsten Anwendungsbereiche der Magnete werden nachfolgend kurz erläutert und bezüglich ihrer Verbrauchsmengen untersucht, was die um Literaturangaben ergänzte Marktaufteilung in Abbildung 5.31 bekräftigt.

Elektrische Zweiräder:

Wie in Abbildung 5.29 erläutert, lassen sich mit Hilfe von NdFeB-Permanentmagneten die derzeit kompaktesten Elektromotoren mit der höchsten Leistungsdichte und der besten Energieeffizienz herstellen. Dies liegt insbesondere daran, dass bei PM-Synchronmotoren (permanentmagnetisch erregt) im Gegensatz zu Induktionsmotoren das zweite Magnetfeld im Rotor nicht elektrisch erregt werden muss, folglich keine zusätzliche Energie verbraucht wird. Durch das Einsparen der Spule im Vergleich des Permanent- mit dem Induk-

tionsmagneten werden zusätzlich Gewicht und Material gespart. Daher bietet sich der PM-Synchronmotor vor allem für mobile Anwendungen an, in denen durch Gewichts- und Effizienzeinsparungen die Reichweiten der Elektromobile optimiert werden können. Während die Elektromobilität im Bereich der Pkw nach wie vor eine untergeordnete Rolle spielt, waren es in den vergangenen Jahren vor allem E-Scooter aus Asien, die die Nachfrage nach NdFeB-Magneten vorantrieben. Diese Elektrozweiräder enthalten nur relativ kleine Magnete mit ca. 0,2 - 0,5 kg (vergl. Hoenderdaal et al., 2013; Hofmann et al., 2013, Anhang S.55 ff.), werden allerdings in Asien und insbesondere in China in enormen Mengen verkauft. 2014 wird von Verkaufszahlen im Bereich um 40 Mio. Stück ausgegangen, wobei allein in China über 30 Mio. Elektrozweiräder verkauft wurden (INSG, 2014)¹⁸. Dabei wurden in den vergangenen Jahren Wachstumsraten von 10% und mehr realisiert. Da nahezu alle Hersteller aus China stammen, wo die Versorgung mit NdFeB-Magneten und Seltenen Erden insgesamt gesichert ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Elektrozweiräder nahezu vollständig auf PM-Synchronmotoren basieren. Bei ca. 35 Mio. verkauften Einheiten im Jahr 2012 und durchschnittlich 0,3 kg Magnetmasse pro Zweirad ergibt sich ein Verbrauch von NdFeB-Magneten von ca. 10,5 Mio. t was einem Marktanteil von etwas über 10 % entspricht (vergl. Abbildung 5.31). Während unter dem Begriff "E-Bike" grundsätzlich alle elektrischen Zweiräder zusammengefasst werden (E-Scooter, Motorräder, aber auch Fahrräder mit elektrischer Kraftverstärkung "Pedelects"¹⁹), ist für die detailliertere Betrachtung eine Unterscheidung zwischen den hauptsächlich in Asien verkauften Elektrorollern und den in Europa inzwischen immer weiter verbreiteten "Pedelects" zu machen (vergl. hierzu Abschnitt 5.5.3).

Hybrid und Batterie-elektrische Pkw:

Im Traktions-Elektromotor von Elektrofahrzeugen werden fast ausschließlich Neodym-Magnete verwendet, um Volumen und Gewicht möglichst gering zu halten und die Energieeffizienz zu maximieren (vergl. z.B. Hoenderdaal et al., 2013; Habib et al., 2014). Je nach Pkw-Segment und Motorleistung variiert die Menge an benötigtem Magnetmaterial. In Tabelle 5.7 werden verschiedene Angaben aus der Literatur für die Magnetmenge pro Traktionsmotor in Elektroautos aufgelistet. Bezüglich der Dysprosium-Menge in diesen Magneten wird dabei von einem Massenanteil von 8-10 % ausgegangen (vergl. Abbildung 5.30).

Tabelle 5.7. – Mengenmäßige Verwendung von NdFeB bzw. Neodym für Traktionsmotoren in Elektrofahrzeugen. Die Mengenangaben zu Neodym und Dysprosium wurden nach Abbildung 5.30 berechnet wobei ca. 22-24 % Neodym (mit Beimischung von Praseodym) und 8-10 % Dysprosium verwendet werden.

Quelle	Magnetmasse pro Traktionsmotor (kg)	Anteil Neodym (g)	Anteil Dysprosium (g)
Campbell (2008, S.3, S.37 ff.)	0,65 - 1,39	150-320	60-120
U. S. DoE (2010, S.130)	1 - 2	230-460	85-170
Avalon Rare Metals Inc. (2010)	1 - 2	230-460	85-170
Hofmann et al. (2013, Anhang S.55 ff.)	1,8	410	150
Gutfleisch (2013)	2	460	170
Haan und Zah (2013, S.106 ff.)	1,11 - 3,3	250-750	90-280
Hatch (2011, S.9 ff.)	1	230	85
Angerer et al. (2009, S.37 ff.)	1,5 - 4,5	350-1000	120-380

¹⁸Vergleiche auch Weinert et al. (2007) zur Erläuterung der enormen Verbreitung von Elektrozweirädern in China.

¹⁹Pedelect steht für "Pedal Electric Bicycle"

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Eine genauere Betrachtung der Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebe auf die Nachfrage nach Neodym und insbesondere nach Dysprosium erfolgt in Kapitel 6. Dabei wird auch nochmals detailliert auf den Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetmasse eingegangen. Basierend auf aktuellen Verkaufszahlen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen unter den in Abschnitt 6.3.5 erläuterten Annahmen zur Magnetgröße nach Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie ergibt sich derzeit ein Marktanteil der Elektromobilität an der Gesamtnachfrage nach NdFeB-Magneten von lediglich knapp über 2 %. Wie in Kapitel 6 allerdings dargestellt, hätte eine stärkere Diffusion alternativer Antriebe insbesondere auf die Nachfrage nach Dysprosium eine starke Auswirkung, was höchstwahrscheinlich zu Substitution in anderen Bereichen, wie der Verwendung von NdFeB-Magneten in Servomotoren für allgemeine industrielle Anwendungen führen würde.

Windkraftanlagen:

Während sich Windkraftanlagen (WKA) standardmäßig aus drei Teilen zusammensetzen (Rotor, Getriebe und Generator), werden seit einigen Jahren auch getriebelose Direktantriebe verwendet. Bei diesen wesentlich leistungsstärkeren Anlagen laufen Rotor und Generator direkt auf einer Welle – das Getriebe entfällt. Die drei grundlegenden Konzepte heutiger Windkraftanlagen sind in Abbildung 5.32 dargestellt. Da doppeltgespeiste Asynchronmaschinen nur in höherem Drehzahlbereich sinnvoll eingesetzt werden können, benötigen diese Generatoren zwingend ein Getriebe zur Drehzahlwandlung. Synchrongeneratoren existieren sowohl auf Basis von Permanentmagneten als auch als reine Induktionsgeneratoren, wobei der Strom für die Spulen im Rotor durch Schleifringe übertragen wird (daher auch die Bezeichnung “Ringgenerator”).

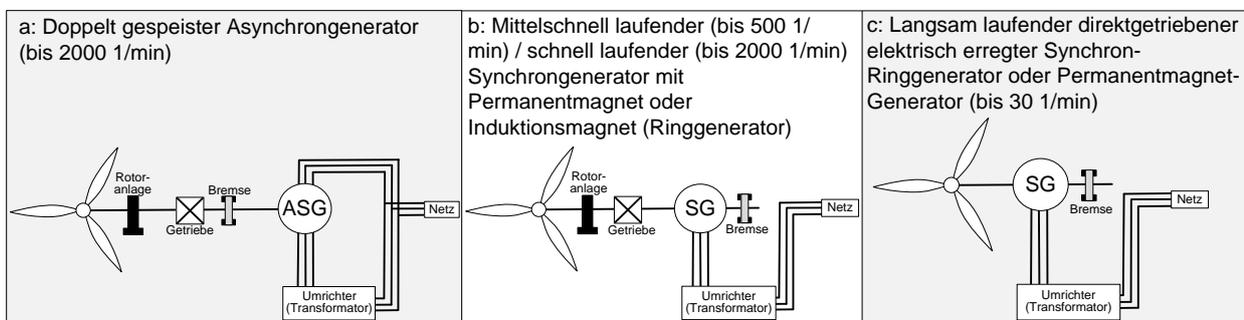


Abbildung 5.32. – Die drei grundlegenden Konzepte für Windkraftanlagen (vergl. z.B.: Buchert, 2011).

Der Vorteil der PM-Synchronmaschinen (Permanentmagnet im Rotor des Generators) liegt in einem etwas höheren Wirkungsgrad, da das zweite Magnetfeld nicht fremderregt werden muss, sowie in einem geringeren Wartungsaufwand aufgrund des nicht vorhandenen Getriebes. Daher werden PM-Synchronmaschinen mit Direktantrieb von europäischen Herstellern in erster Linie im Offshore-Bereich eingesetzt, da dort die Wartungskosten sehr hoch ausfallen (vergl. z.B. Kaufhold und Jöckel, 2002). Chinesische Hersteller dagegen verbauen weit mehr PM-Anlagen auch im Onshore-Bereich, was auf die bessere Verfügbarkeit der Magnete zurückzuführen ist. Ein Vergleich der aktuellen Anlagen europäischer und chinesischer Hersteller befindet sich im Anhang. Dieser bestätigt die Tendenz einer verstärkten Verwendung von PM-Generatoren durch führende chinesische WKA-Hersteller.

5.5. Globales Angebot und Verwendungsstrukturen Seltener Erden

Bei Synchronmaschinen mit Direktantrieb (Abbildung 5.32c) werden ca. 650 kg Magnetmasse pro MW Leistung verwendet (Buchert, 2011). Da diese Anlagen, insbesondere die Offshore-Anlagen, häufig mehr als 5 MW Leistungskapazität besitzen, werden hier regelmäßig über 3 t Magnetmasse pro Anlage verbaut (Hoenderdaal et al., 2013). Ein weiteres Antriebskonzept mit Permanentmagnet und Getriebe, was eine kleinere Gestaltung des Generators zulässt, ist in Abbildung 5.32b dargestellt. Dieses Konzept benötigt wegen des kleineren Generators nur ca. 100 kg/MW an Magnetmasse (Buchert, 2011). In Abbildung 5.33 sind die jährlich neu installierten Kapazitäten von Windkraftanlagen (a) und deren Verteilung nach Ländern im Jahr 2012 (b) dargestellt.

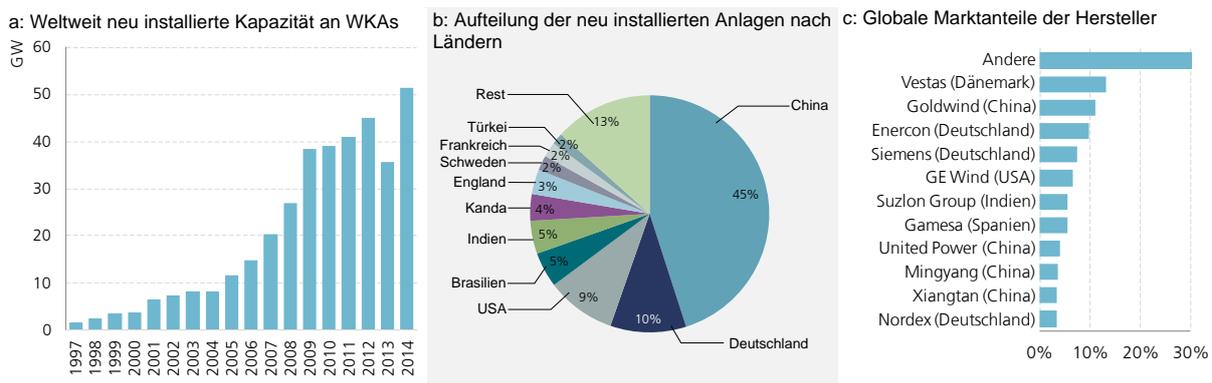


Abbildung 5.33. – Weltweit installierte Leistung von Windkraftanlagen und deren Verteilung nach Ländern (Daten basieren auf GWEC 2015²⁰).

Im Jahr 2012 wurden Windkraftanlagen mit einer zusätzlichen Kapazität von 45 GW installiert, fast die Hälfte davon in China. Dadurch belief sich die globale Windkraft-Kapazität am Ende des Jahres 2012 auf ca. 282 MW. Da der chinesische Markt von chinesischen Herstellern dominiert wird, ist davon auszugehen, dass eine Großzahl der installierten WKA mit PM-Synchrongeneratoren in China steht (was durch die Analyse der angebotenen Technologien chinesischer Hersteller im Anhang A.5.3 bekräftigt wird). Schüler et al. (2011, S.71) schätzen den weltweiten Anteil an WKA mit NdFeB Magneten auf 14 %, wobei ca. 9 % der global installierten WKA auf dem Direktantrieb mit NdFeB-Magneten basiert (Buchert, 2011, S.16). Dies entspräche im Jahr 2012 einem Gesamtverbrauch von knapp 3 kt NdFeB-Magneten, was einem Marktanteil der Windenergie-Branche an der globalen Produktion von NdFeB-Magneten (vergl. Abbildung 5.31) von 3-4 % ausmacht. Da China den mit Abstand größten Wachstumsmarkt für WKA darstellt und der Marktführer in China “Goldwind Ltd.” unter Lizenz der deutschen “Vensys AG” ausschließlich auf Direktantriebe mit NdFeB-Magneten setzt und auch weitere chinesischen Hersteller diese Technologie nutzen (insbesondere Xiangtan Electric Manufacturing Group Co., Ltd. (XEMC), vergl. Tabellen im Anhang A.5.3) scheint der Anteil von PM-Direktantrieben in China bei ca. 30 % zu liegen, was einen weltweiten Anteil dieser Technologie im Bereich um 15 % realistisch erscheinen lässt (dies entspricht einem Absolutverbrauch von 4-5 kt an NdFeB-Magneten). Auf globaler Ebene wird der Anteil der Windenergie-Branche am Gesamtverbrauch von NdFeB-Magneten in dieser Arbeit daher auf ca. 5 % geschätzt (vergl. neben der obigen Erläuterung z.B. Constantinides, 2013), obwohl auch hier sehr unterschiedliche Werte zwischen 2 % (Hoenderdaal et al.,

²⁰GWEC: Global Wind Energy Council

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

2013; Habib und Wenzel, 2014) und über 10 % (Du und Graedel, 2011a) in der Literatur zu finden sind.

Das starke Wachstum der Windenergie-Branche wird sich erwartungsgemäß auch zukünftig fortsetzen und somit neben der Elektromobilität als weiterer Treiber der Nachfrage nach NdFeB-Magneten und damit nach Neodym und Dysprosium wirken (vergl. z.B. Alonso et al., 2012a; Hoenderdaal et al., 2013; Habib und Wenzel, 2014).

Elektronik und Audio:

Der Bereich der Verwendung von NdFeB-Magneten in Kleinmotoren für die Elektronikindustrie (von der HDD-Festplatte (Hard Disk Drive), über CD- und DVD-Player bis hin zu Kleinmotoren für Vibrationsalarm-Funktionen in Mobiltelefonen), aber auch für Magnete in Lautsprechersystemen, Kopfhörern etc. bildeten in den ersten Jahren des 21. Jahrhunderts die wichtigsten Anwendungsbereiche für NdFeB-Magnete (vergl. Abbildung 5.29). Inzwischen wird die HDD-Festplatte mit Elektromotor und Nadel allerdings zunehmend von der SSD (Solid State Drive, auch Halbleiterlaufwerk genannt) Technologie verdrängt, die keine beweglichen Bauteile mehr enthält (vergl. z.B. Sprecher et al., 2014). Auch werden durch Video-Streamingdienste und die Steigerung der Kapazitäten kleiner USB-Speicher immer weniger CD- und DVD Laufwerke verkauft. So verliert dieser Verwendungsbereich von NdFeB-Magneten kontinuierlich an Bedeutung. Daher wird das aktuelle Schrottaufkommen zwar von Magneten in Kleinmotoren obsoletter Elektronikprodukte dominiert (vergl. hierzu Abschnitt 5.5.2), für die zukünftige Verwendung von NdFeB-Magneten wird dieser Bereich aber kontinuierlich an Bedeutung verlieren. Dies gilt nicht für Lautsprecher und Kopfhörer-Systeme, wo vor allem bei hochwertigeren Systemen (“High-End Soundsystemen”) nach wie vor auf NdFeB-Magnete zurückgegriffen wird.

Industrie-Elektromotoren:

Den größten, aber wohl auch undurchsichtigsten Verwendungsbereich von NdFeB-Magneten bildet der breite Einsatz von PM-Elektromotoren (Permanentmagnet als alternative zu Induktions-Elektromagneten) im Maschinenbau. Der für NdFeB-Magnete wichtigste Motortyp ist dabei der Synchron-Servomotor im niedrigeren Leistungsbereich bis 10 kW (vergl. z.B. Buchert et al., 2013, S.93). Anwendungsbereiche dieser Motoren reichen von einfachen Haushaltsgeräten, über Waschmaschinen bis hin zu Pumpsystemen oder Elektromotoren für Aufzüge- und Rolltreppen. Auch spielen hier Kleinmotoren für konventionelle Pkw, vom Lenkungsmotor für die Servo-Lenkung über Scheibenwischermotoren bis hin zu Motoren für die elektrische Sitzverstellung eine nicht unerhebliche Rolle (Wilde, 2008; Gieras, 2010, S.58 ff.). Insgesamt ist es allerdings enorm schwierig die genaue Menge an NdFeB-Magneten zu bestimmen, da in nahezu allen Bereichen auch Alternativen in Form sonstiger Permanentmagnete wie Ferrite (vergl. Abbildung 5.31) oder durch reine Induktionsmotoren bestehen. Daher muss hier auf die globale Produktion an NdFeB-Magneten und literaturbasierte Schätzungen des Verwendungsanteils im Bereich des Maschinenbaus zurückgegriffen werden. Insgesamt wird der Anteil der Verwendung von NdFeB-Magneten für Servomotoren in verschiedensten Produkten des Maschinenbaus auf ca. 40 % der Gesamtproduktion geschätzt (vergl. Abbildung 5.31, sowie Roskill, 2011; Gutfleisch et al., 2011; Constantinides, 2013).

Sensoren, MRT:

Eine Nischenanwendung von Magnetlegierungen bilden Magnetfeldsensoren, die in verschiedensten Be-

reichen, von der Automobilindustrie (z.B. Raddrehzahl-Sensoren, Pedalzustandserkennung, Erkennung des Zündzeitpunkts etc.) über Metalldetektoren, bis hin zu Kompass- und Navigationssystemen eingesetzt werden. Ein weiterer Anwendungsbereich von NdFeB Permanentmagneten bilden Magnetresonanztomographen (MRT) im Bereich der Medizintechnik. Pro Gerät können 1-3 t Magnetmaterial verbaut werden (Hoenderdaal et al., 2013). Allerdings ist hier anzumerken, dass ein Großteil der MRT-Anlagen über Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) auf Keramikbasis, die nur sehr geringe elektrische Widerstände aufweisen, die sehr starken Magnetfelder induzieren und keine Permanentmagnete enthalten. Lediglich bei sehr kleinen und teilweise mobilen MRTs werden NdFeB-Magnete eingesetzt. Dies spielt aber mengenmäßig eine untergeordnete Rolle.

Weitere Anwendungsbereiche:

Unter den Bereich sonstiger Anwendungen fallen in erster Linie Magnetabscheider (auch Wirbelstromabscheider), die durch Permanentmagnete energieeffizient gestaltet werden können, magnetische Kupplungen sowie verschiedenste Formen von magnetischen Verschlüssen und Anwendungen von Kleinmagneten im Konsumbereich (siehe insbesondere Constantinides, 2013).

Wie einleitend bereits erwähnt, zeigt sich bei der Betrachtung benötigter Rohstoffmengen für die Herstellung von NdFeB-Magneten die problematische Datengrundlage hinsichtlich der Produktion und Verfügbarkeit bestimmter Seltener Erden. So rechnet der USGS (U.S. Geological Survey) mit einem Anteil an Dysprosium von 1,2 % der Gesamtproduktion Seltener Erden (USGS, 2011, vergl. auch Abbildung 5.26). Aufgrund der unterschiedlichen Erz-Zusammensetzung nach Mine und Region (siehe auch Abbildung 5.28) sowie der weit höheren Preise schwerer Seltener Erden wie Dysprosium, Terbium oder auch Europium ist davon auszugehen, dass die tatsächliche Abbaumenge von Dysprosium inzwischen weit höher liegt als 1,2 % der Weltproduktion, was ca. 1350 t Dysprosiumoxid und 1150 t reduziertem Dysprosiummetall entspricht. Eine Analyse der Materialgehalte nach Anwendungsbereich auf Basis der verhältnismäßig gut dokumentierten Gesamtproduktion an NdFeB-Magneten zeigt, dass die tatsächliche Verwendungsmenge von Dysprosium eher im Bereich um 2000 t liegt (vergl. Abbildung 5.34).

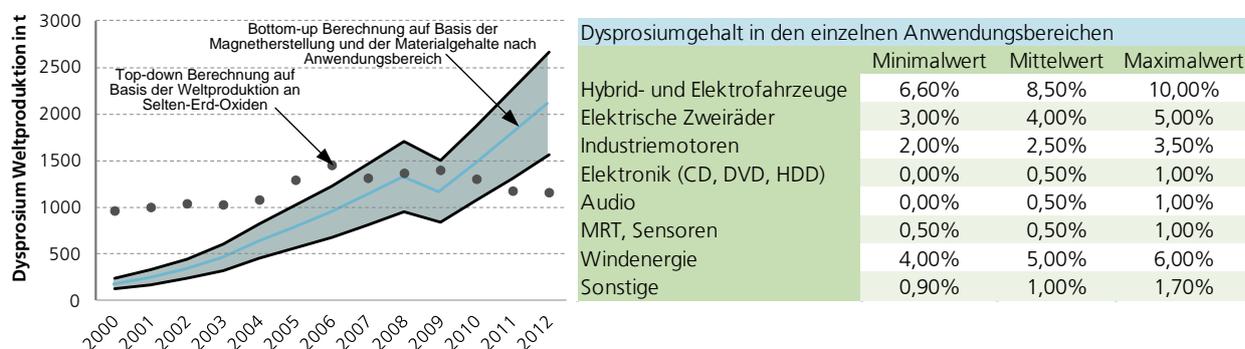


Abbildung 5.34. – Top-down (als Anteil der Gesamtproduktion an SEO) und Bottom-up (Auf Basis der Produktions- und Verwendungsmengen von NdFeB-Magneten) Berechnung der industriell verarbeiteten Dysprosiummengen.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Dies spiegelt die problematische Datenlage hinsichtlich der tatsächlichen Produktion einzelner Seltenen Erden wider. Dabei wirkt sich sowohl die Tatsache, dass es sich bei Seltenen Erden um 17 verschiedene, im Verbund abgebaute Elemente handelt, als auch die hohe Konzentration der Produktion auf China negativ auf die verfügbare Datengrundlage aus. Produktionsstatistiken aus China entsprechen grundsätzlich eher den offiziellen Vorgaben der Zentralregierung in Peking, während die tatsächlichen Produktionsmengen insbesondere bei schweren Seltenen Erden weit höher liegen. So wird davon ausgegangen, dass nach wie vor zwischen 10 und 20 kt an SEO in China inoffiziell gefördert werden (Kingsnorth, 2014). Da ein Großteil des illegalen Bergbaus in den HREE-reichen südchinesischen Minen stattfindet (vergl. z.B. Wübbeke, 2013, siehe auch Abbildung 5.28), erscheint vor allem bei einigen schweren Seltenen Erden eine um 50% höhere Produktion als die offiziellen Vorgaben der Zentralregierung nicht unwahrscheinlich. In diesem Zusammenhang wirken die in Abbildung 5.34 berechneten Verbrauchsmengen trotz der niedrigeren Einschätzungen seitens der geologischen Dienste realistisch. Inwiefern verschiedene Berichte zur Produktion Seltenen Erden miteinander verstrickt sind und letztlich immer auf offizielle Daten der chinesischen Regierung (China Rare Earth Information Center, CREIC) zurückzuführen sind, wurde von Zepf (2013) analysiert und ist vereinfacht in Abbildung 5.35 dargestellt.

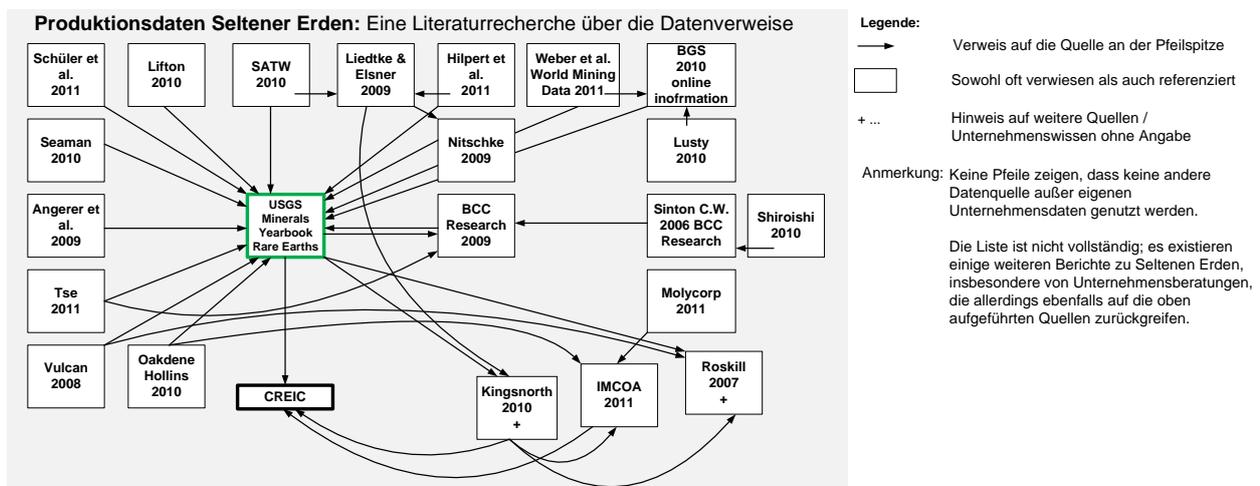


Abbildung 5.35. – Vernetzung verschiedener Berichte, Marktanalysen und Studien zur Produktion Seltenen Erden (vergl. Zepf, 2013, S.52). Wie hier gezeigt, beziehen sich nahezu alle Studien und Publikationen direkt oder indirekt auf die Zahlen des USGS (USGS, 2014), die wiederum auf den offiziellen Daten der chinesischen Regierung basieren, veröffentlicht durch das “China Rare Earth Information Center” (CREIC).

Für das globale Modell wird daher von den besser dokumentierten Produktionszahlen von NdFeB-Magneten in einem Top-down-Ansatz analog zum globalen Kupfer- bzw. Kobaltmodell ausgegangen. Die Ergebnisse des globalen Stoffstrommodells für NdFeB-Magnete sowie für Neodym und Dysprosium werden im Folgenden vorgestellt.

5.5.2. Globales Modell der Neodym- und Dysprosium-Materialflüsse

Die grundlegende Struktur des globalen Stoffstrommodells für Neodym und Dysprosium, bzw. für NdFeB-Magnete, ist in Abbildung 5.36 dargestellt. Auf Basis der Produktionsdaten der vergangenen 15 Jahre wird über einen Top-down-Ansatz der Verwendungszyklus in den einzelnen Bereichen, basierend auf den zuvor diskutierten Produktionsdaten (vergl. Abbildung 5.31) simuliert. Da bisher nur Recyclingkonzepte bestehen, aber kein Recycling von NdFeB-Magneten stattfindet, werden mit Hilfe dieses Modells globale Recyclingpotenziale aufgezeigt. Inwiefern Recycling in Zukunft zum Gesamtangebot an Magnetwerkstoffen beitragen kann, wird durch die Modellerweiterung in Kapitel 6 diskutiert.

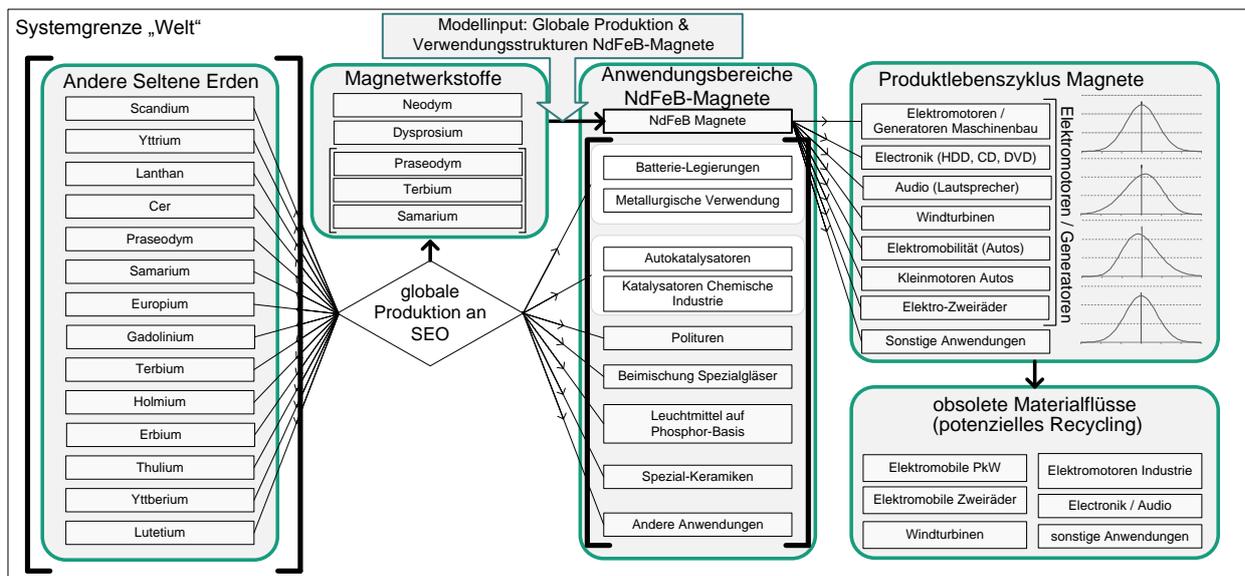


Abbildung 5.36. – Struktur des globalen Stoffstrommodells für Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe und Abgrenzung von der restlichen Wertschöpfung von Seltenerd-Elementen.

Tabelle 5.8 zeigt die literaturbasierten Annahmen zu den Verwendungsdauern in den verschiedenen Anwendungsbereichen von NdFeB-Magneten.

Tabelle 5.8. – Annahmen zur durchschnittlichen Verwendungsdauer in den einzelnen Anwendungsbereichen von NdFeB-Magneten (vergl. insbesondere Du und Graedel, 2011a; Schulze und Buchert, 2016).

Anwendungsbereich	Durchschnittliche Verwendungsdauer	Anwendungsbereich	Durchschnittliche Verwendungsdauer
Hybrid und Elektro-Autos	12	E-Bikes	10
Windkraft	20	Servomotoren (Industrie)	15
Sonstige	10	Sensoren & MRT	10
Audio	10	Elektronik	9

Im Modell wurde aufgrund mangelnder Daten zu genauen Verläufen der Verteilfunktionen analog zu den zuvor vorgestellten globalen Modellen von Gaußschen Normalverteilungen ausgegangen. Zentrale Ergebnisse des globalen Magnetmodells sind in Abbildung 5.37 zusammengefasst.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Die Zusammensetzung der Magnete nach Anwendungsbereich (insbesondere hinsichtlich des Dysprosiumanteils) entspricht den in den Abbildung 5.30 und 5.34 dargestellten Werten. Anzumerken ist weiterhin, dass wie zuvor bereits erläutert, häufig eine Beimischung von Praseodym zum Neodym stattfindet. Da dies für die Rezyklierbarkeit keine Rolle spielt wird hier lediglich der Neodymanteil als Beimischung leichter Seltener Erden betrachtet. Auch würde Terbium dieselben Funktionen wie Dysprosium hinsichtlich der Steigerung der Koerzitivität (Koerzitivfeldstärke) erfüllen (vergl. Abbildung 5.30). Allerdings ist Terbium noch knapper und teurer als Dysprosium (vergl. Abbildung 5.26) und wird zusammen mit Europium in erster Linie für die Herstellung von Leuchtstoffen in Energiesparlampen verwendet (sieh hierzu auch Tabelle 5.6). Daher ist davon auszugehen, dass der Terbiumanteil in NdFeB-Magneten sehr niedrig ist, sodass eine reine Betrachtung von Dysprosium als Beimischung schwerer Seltener Erden realitätsnah erscheint. Auch Gadolinium, was in geringen Mengen zur Steigerung der Korrosionsbeständigkeit von NdFeB-Magneten beigemischt wird, wird hier nicht betrachtet.

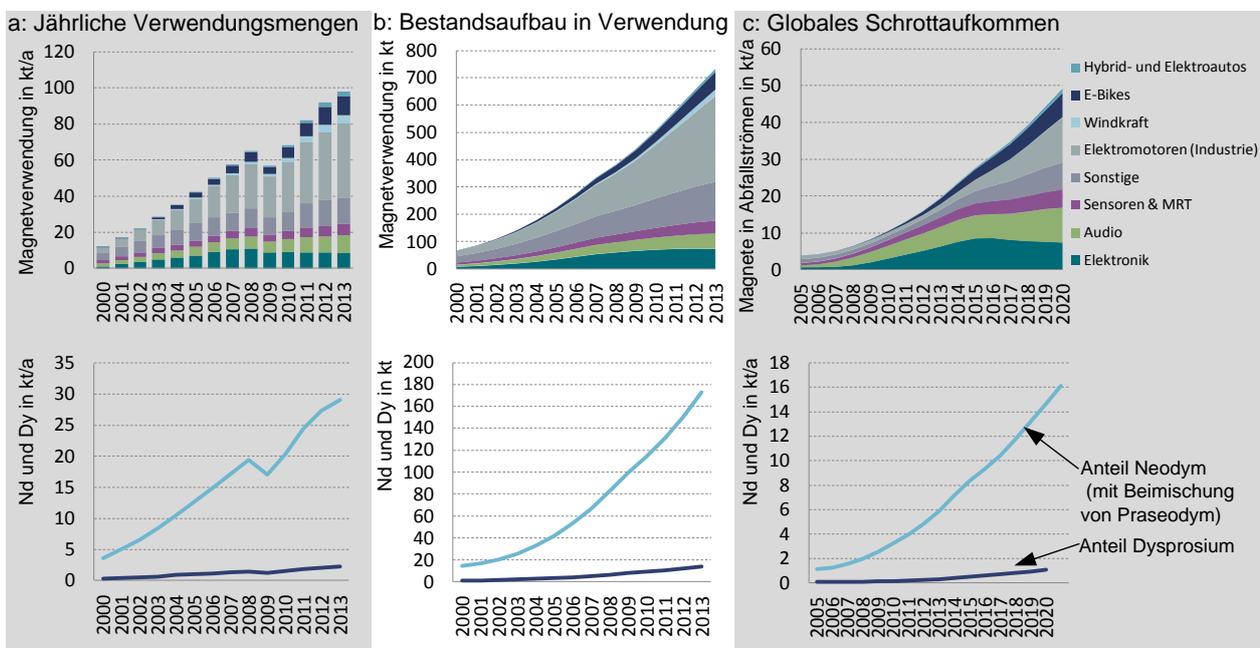


Abbildung 5.37. – Ergebnisse des globalen Stoffstrommodells für NdFeB-Magnete.

- a: Jährlich verbrauchte Menge an Magneten sowie die enthaltenen Seltenerd-Elemente.
- b: Bestand an NdFeB-Magneten in Verwendung.
- c: Obsolete Materialströme.

Neben der Akkumulation von NdFeB-Magneten, bzw. Neodym und Dysprosium in Verwendung, kann mit Hilfe des Modells vor allem aufgezeigt werden, inwiefern die heutige Schrottzusammensetzung von Kleinmagneten aus dem Elektronik- und Audiobereich (vergl. Abbildung 5.37c) dominiert wird. Durch die relativ langen Verwendungsdauern der Industriemotoren, aber auch von Windkraftanlagen und Elektroautos, nimmt die Menge an größeren Motoren mit PM-Magneten im Schrottaufkommen erst allmählich zu. Dies ist sicherlich mit ein Grund dafür, weshalb derzeit noch kein Recycling von NdFeB-Magneten stattfindet (Rademaker et al., 2013).

Inwiefern Magnetrecycling aus verschiedenen Anwendungsbereichen zur Rohstoffversorgung in Deutschland betragen kann, wird im folgenden Abschnitt über einen technologiespezifischen Bottom-up-Ansatz analysiert.

5.5.3. Neodym und Dysprosium in der deutschen industriellen Wertschöpfung

Während die untere Wertschöpfung von Kobalt in Europa noch sehr gut dokumentiert war (vergl. Abschnitt 5.3.2), ist die Datengrundlage bezüglich der Verarbeitung von NdFeB-Permanentmagneten, bzw. Seltenen Erden insgesamt, eher spärlich. Über die Güterklassifikationen in den Handels- und Produktionsdaten lassen sich weder einzelne Seltenerd-Elemente noch NdFeB-Magnete von Ferriten oder AlNiCo Magneten unterscheiden (Nansai et al., 2014). Daher kann eine Abschätzung des direkten Verbrauchs an Neodym und Dysprosium in Deutschland nur über eine Herstelleranalyse erfolgen. Eine Zusammenstellung verschiedener Unternehmen der deutschen Magnetindustrie ist in Tabelle 5.9 gegeben.

Tabelle 5.9. – Hersteller von NdFeB-Magneten in Deutschland basierend auf Firmendatenbanken und eigener Recherche.

Unternehmen	Beschreibung/Bemerkung	geschätzte Kapazität in Deutschland (NdFeB Magnete in t)
VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG	Größter europäischer Hersteller von NdFeB-Magnete im Sinterverfahren, Tochtergesellschaften weltweit	ca. 1500 t in Deutschland (Erdmann et al., 2011, Anhang, S.142), Kapazitäten von bis zu 5000 t (Roskill, 2011, S.267)
MS Schramberg GmbH	Hersteller von polymergebundenen NdFeB-Magneten	ca. 150 t in Deutschland (Roskill, 2011, S.267)
ThyssenKrupp Magnettechnik Schulte GmbH	Vertrieb von gesinterten NdFeB-Magneten	Produktionsmenge in Deutschland unklar, wahrscheinlich reine Importware
Tridelta Magnetsysteme GmbH	Produktion und Vertrieb von polymergebundenen und gesinterten NdFeB-Magneten (Übernahme von Teilen der Thyssen Krupp Magnettechnik)	Produktionsmenge unklar, höchst wahrscheinlich keine Sintermagnete in Deutschland
Kolektor Magnet Technology GmbH	Herstellung von polymergebundenen NdFeB-Magneten in Deutschland, Vertrieb von gesinterten NdFeB-Magneten aus China	Produktionsmenge unklar
Magnetfabrik Bonn GmbH	Herstellung von polymergebundenen NdFeB-Magneten in Deutschland, Vertrieb von gesinterten NdFeB-Magneten aus China	Produktionsmenge unklar
MAX BAERMANN GmbH	Herstellung von polymergebundenen NdFeB-Magnete in Deutschland	Produktionsmenge unklar
Gussmagnete Bitterfeld GmbH, Schallkammer Magnetsysteme GmbH, Veekim AG ²¹	Unternehmen, die zwar teilweise Ferrite und AlNiCo Magnete in Deutschland fertigen, aber offensichtlich ausschließlich mit importierten NdFeB-Magneten (aus China) handeln	keine Produktion in Deutschland

Da die Unternehmen kaum Daten zu ihren Produktionsmengen nennen²², bleibt lediglich eine grobe Ab-

²¹...DST Dauermagnet-System Technik GmbH, Calamit Magnete GmbH, Magnequench GmbH (weitere kleine Handelsunternehmen werden hier nicht gelistet)

²²Gezielte Anfragen bei einzelnen Unternehmen wurden nicht eindeutig beantwortet.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

schätzung der Kapazitäten. Insgesamt ist die europäische Produktion von NdFeB-Magneten nahezu vollständig auf deutsche Hersteller zurückzuführen (Roskill, 2011, S.267 ff.). Diese wird auf ca. 2000 t/a geschätzt (vergl. Du und Graedel, 2011a), wobei die Kapazitäten des größten europäischen Herstellers, der Vacuumschmelze in Hanau, bei bis zu 5000 t/a an gesinterten NdFeB-Magneten liegen (vergl. Roskill, 2011, S.267). Da die Vacuumschmelze, wie auch weitere Unternehmen aus Tabelle 5.9 neben dem Produktionsstandort Deutschland auch in China eigene Produktionsstätten betreiben, oder Partnerschaften mit chinesischen Herstellern haben, ist es kaum möglich, genaue Zahlen zum Produktionsvolumen in Deutschland zu bekommen. Dies hängt auch damit zusammen, dass seitens der Industrie kein Interesse besteht, genaue Produktionsmengen offenzulegen (vergl. insbesondere Buchert et al., 2013; Bast et al., 2014). Allerdings gibt es in Deutschland neben der Vacuumschmelze eine Reihe mittelständischer Unternehmen (vergl. Tabelle 5.9), die sich auf polymergebundene Magnete spezialisiert haben. Diese Magnete weisen zwar eine etwas geringere Energiedichte als gesinterte Magnete auf, lassen sich aber einfacher in bestimmte Formen pressen. Dies ist insbesondere bei kleineren Synchronmotoren, wie sie z.B. im Automobilbereich (Scheibenwischer, elektrische Sitzverstellung etc.) eingesetzt werden, von Vorteil. Zwar produzieren diese Unternehmen verhältnismäßig geringe Mengen von ca. 50-100 t/a an polymergebundenen NdFeB-Magneten, dennoch hängt eine relativ große Wertschöpfungskette an diesen Magneten.

Wie viel fertige NdFeB-Magnete, aber auch entsprechende PM-Synchron-Servomotoren nach Deutschland importiert werden, ist auf Basis herkömmlicher Produktions- und Güterklassifikationen aufgrund mangelnder Produktspezifikationen nicht nachvollziehbar (siehe Tabellen im Anhang A.5.3, vergl. auch Buchert et al., 2013). Hier können lediglich allgemeine Handelsbilanzen und Produktionsstatistiken entlang der Wertschöpfung betrachtet werden, was einen gewissen Rückschluss auf Rohstoff- und Materialbedarfe ermöglicht.

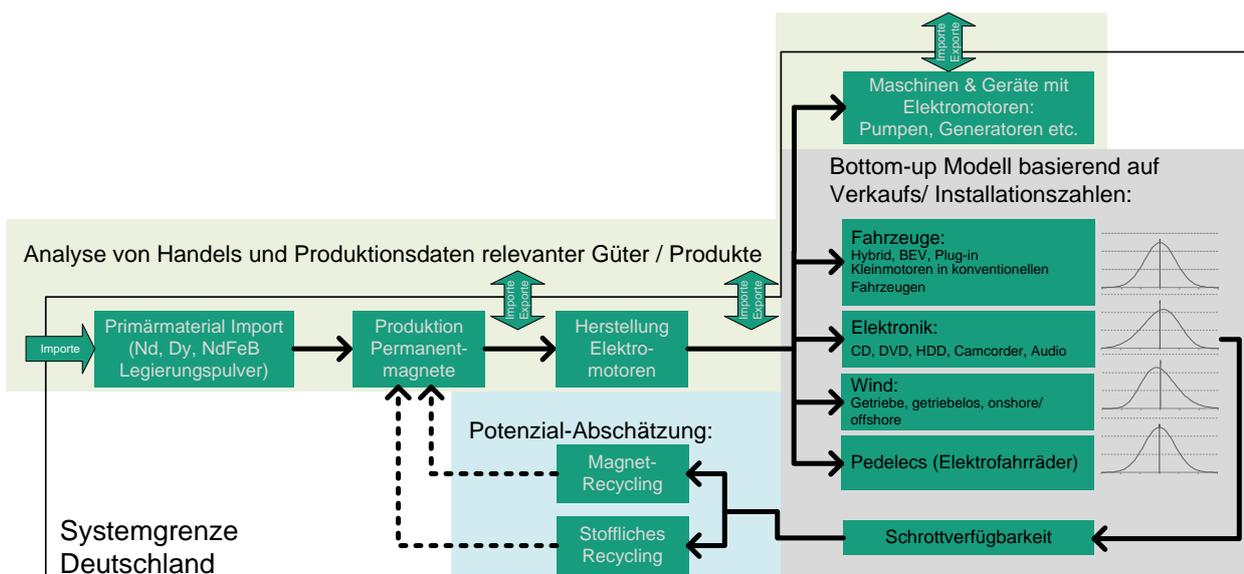


Abbildung 5.38. – Struktur der Stoffstromanalyse für Neodym und Dysprosium in Deutschland. Aufgrund der schlechten Datenlage wird lediglich eine Bottom-up-Modellierung für die Bereiche Automobil, Elektronik, Wind und Elektrofahrräder umgesetzt.

Zur Analyse des Recyclingpotenzials von NdFeB-Magneten, bzw. Neodym und Dysprosium in Deutschland wurde analog zur Betrachtung des europäischen Kobaltkreislaufes ein Bottom-up-Ansatz auf Basis von deutschen Verkaufszahlen, Zulassungszahlen etc. umgesetzt. Dabei wurden, wie in Abbildung 5.38 gezeigt, die Bereiche Elektronik (Computer, Laptops, Mobiltelefone, Smartphones, Tablets, DVD & und CD-Player, Digitalkameras etc.), Audio (Kopfhörer, Soundsysteme & Lautsprecher), Pkw (Kleinmotoren in konventionellen Automobilen sowie alternative Antriebskonzepte mit großen Traktionsmotoren), Windenergieanlagen sowie Pedelecs (Fahrräder mit elektrischer Kraftverstärkung) berücksichtigt.

Dies sind zwar nur ausgewählte Anwendungsbereiche von NdFeB-Magneten, wobei ein erheblicher Teil der Magnete in kleinen Synchron-Servomotoren verschiedenster Industrieprodukte (Haushaltsgeräte, Waschmaschinen, Elektrowerkzeuge, Pumpen etc.) steckt, da in diesen Bereichen aber auch Ferrit-Magnete, elektrisch erregte Synchron- und Asynchronmotoren eingesetzt werden (vergl. auch Abbildung 6.20), erscheint eine sinnvolle Quantifizierung der Verwendungsmengen an NdFeB-Magneten auf Basis von Produktions- und Verkaufszahlen (Bottom-up-Ansatz) unmöglich. Hier müssten systematisch Stichproben an Altgeräten durchgeführt werden, wobei zu beachten ist, dass der Anteil der Verwendung von PM-Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten aufgrund des höheren Wirkungsgrades und der kompakteren Bauweise seit der Jahrtausendwende kontinuierlich zugenommen hat, also davon auszugehen ist, dass in neueren Geräten auch häufiger PM-Synchronmotoren verbaut werden.

NdFeB Permanentmagnete in Elektronikprodukten in Deutschland

Da, wie bereits auf globaler Ebene gezeigt, das aktuelle Aufkommen von NdFeB-Magneten in Altprodukten von Elektronikanwendungen (PCs, Laptops, CD- und DVD-Player etc.) geprägt ist und zu Konsumelektronik fundierte Verkaufszahlen der vergangenen Jahre existieren, lassen sich in diesem Bereich über den Bottom-up-Ansatz relativ gute Schätzungen zu den verwendeten Magnetmengen durchführen. Da insbesondere der Elektronikschrott aus diesen kleineren Geräten häufig nicht in die richtigen Recyclingkanäle gelangt, eignet sich der Modellansatz gut zur Analyse von Recyclingpotenzialen, die durch entsprechende Optimierung des Sammelsystems besser ausgeschöpft werden könnten²³. Die Verkaufszahlen von Elektronikprodukten in Deutschland, die teilweise oder hauptsächlich NdFeB-Magnete enthalten, sind in Abbildung 5.39a zusammengefasst.

Wie bereits erwähnt, werden Synchron-Servomotoren mit NdFeB-Magneten in der unteren Leistungsklasse bis 10 kW in verschiedensten Bereichen, unter anderem für Konsumelektronik-Anwendungen verwendet (Küchengeräte, Staubsauger, Rasierapparate, Werkzeuge, elektrische Zahnbürsten etc.). Da in diesen Bereichen auch Synchron- und Asynchron-Induktionsmotoren sowie andere Magnetwerkstoffe wie Ferrite eingesetzt werden, erscheint es unmöglich über eine Bottom-up-Analyse, wie sie hier durchgeführt wird, fundierte Schätzungen zu verwendeten Materialmengen zu bekommen.

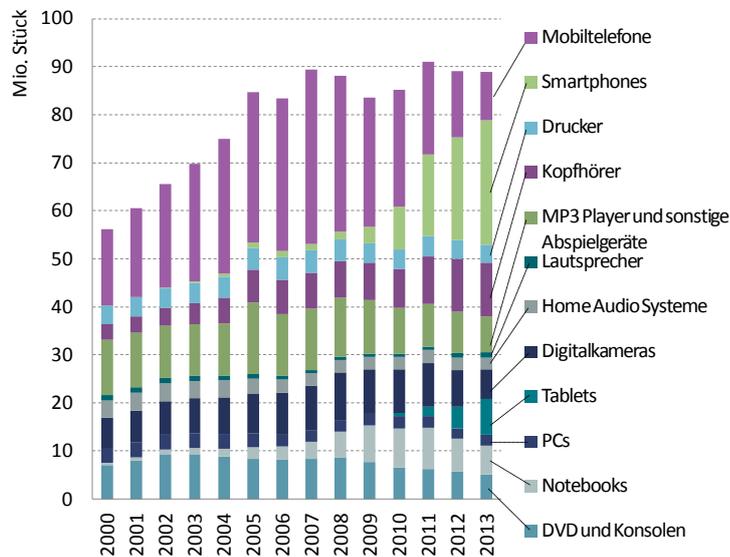
Tabelle 5.10 zeigt die für die Bottom-up-Analyse zu Grunde gelegten Materialgehalte.

²³z.B. durch die Einführung einer Wertstofftonne für Elektroschrott, eines Pfandsystems für Elektronikware etc.

²⁴Bitkom: Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien
Cemix: Consumer Electronics Market Index

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

a: Verkaufszahlen Kleinelektronik



b: Enthaltene Materialmengen

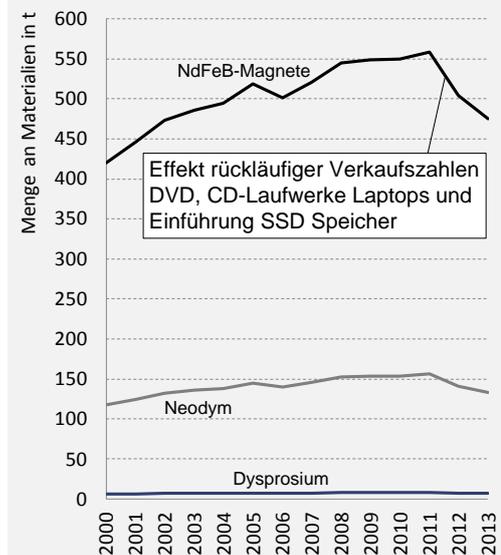


Abbildung 5.39. – Deutsche Verkaufszahlen ausgewählter Elektronikprodukte und deren aggregierte Gehalte an NdFeB-Magneten.

a: Verkaufszahlen Konsumelektronik in Deutschland (Daten basieren auf Bitkom und Cemix²⁴).

b: Enthaltene Magnet- und Seltenerd-Ströme basierend auf den Annahmen in Tabelle 5.10.

Tabelle 5.10. – Literaturbasierte Annahmen zu Materialgehalten (NdFeB-Magnete) in Elektronikanwendungen. Beimischungen an Praseodym werden hier ebenfalls zum Neodymanteil gezählt.

Produkt	Materialgehalt in g Magnetmasse	Anteil NdFeB-haltiger Komponenten in %	Quelle
Desktop PC	15-20 (HDD, CD, Lautsprecher)	100	Böni et al. (2015); Sprecher et al. (2014); Zepf (2013); Westphal et al. (2014); Habib et al. (2014)
Laptop / Notebook	10-15 (HDD, CD, Lautsprecher)	90	Böni et al. (2015); Sprecher et al. (2014); Zepf (2013); Habib et al. (2014)
CD/DVD Player	10	100	Böni et al. (2015); Habib et al. (2014)
Spiel-Konsole	10	100	Böni et al. (2015); Habib et al. (2014)
Kopfhörer	1-5	30	Westphal und Kuchta (2012)
Soundsysteme (Lautsprecher)	50	10-20	Westphal und Kuchta (2013); Habib et al. (2014)
Kameras	3	100	eigene Schätzung
Drucker	5-25	100	eigene Schätzung
Mobiltelefone	1-2	100	Westphal et al. (2014); Zepf (2013); Habib et al. (2014, S.466)
Smartphones	1-2	100	Westphal et al. (2014); Zepf (2013); Habib et al. (2014, S.466)
Tablets	1-2	100	eigene Schätzung
MP3-Player	1-2	100	eigene Schätzung

Der Dysprosiumanteil in den Kleinmotoren von Elektronikanwendungen ist gering und reicht von 0-2 % (Habib et al., 2014, vergl. auch Abbildung 5.30). Im Modell wird pauschal mit 1 % Dy-Anteil gerechnet. Aufgrund der Variation in den Stichproben und der unterschiedlichen Bemessungsgrundlagen (Gewicht der Magnete, Menge des rückgewinnbaren Neodyms) weichen die jeweiligen Quellen teilweise relativ stark voneinander ab. Da der Großteil der NdFeB-Magnete in PCs und Notebooks sowie optischen Laufwerken verbaut ist, für die gute Werte vorhanden sind, ist die Auswirkung dieser Abweichungen auf die Modellergebnisse relativ gering. Bei Angabe von Bereichsspannen wurde im Modell mit dem Mittelwert gerechnet. Weiterhin ist bei Laptops und PCs davon auszugehen, dass erst seit 2010 der Anteil an SSD²⁵ Speichern ohne NdFeB-Magnete langsam ansteigt (vergl. Sprecher et al., 2014). Dies spielt für heutige Recyclingmengen allerdings noch keine Rolle.

Insgesamt ergeben sich auf Basis dieser Datengrundlage die in Abbildung 5.39b dargestellten Materialströme innerhalb der betrachteten Elektronikprodukte, woraus sich über die Simulation der Produktlebenszyklen ein theoretisch maximales Recyclingpotenzial errechnen lässt (siehe hierzu Abschnitt 5.5.3).

NdFeB Permanentmagnete in Automobilen (Pkw)

Neben den Traktionsmotoren für Hybrid- und Batterie-elektrische Fahrzeuge enthalten auch konventionelle Pkws nicht zu vernachlässigende Mengen an Magneten in kleinen Elektromotoren. Dabei kann für Elektrofahrzeuge von 1-3 kg Magnetmasse pro Traktionsmotor ausgegangen werden (vergl. Tabelle 5.7, wobei die im Modell zugrunde gelegten Magnetgrößen nach Technologie und Fahrzeugsegment in Abbildung 6.21 dargestellt sind).

Eine klare Quantifizierung der Mengen an NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw ist nicht eindeutig möglich, dennoch ist davon auszugehen, dass nahezu jeder moderne Pkw kleinere NdFeB-Magnete in einigen der zahlreichen Elektromotoren enthält (vergl. Tabelle A.8). In Pkws aus den oberen Preissegmenten werden heute weit über 100 verschiedene Elektromotoren für Komfort (z.B. automatische Sitz-, Rückspiegel-, Scheinwerfer- und Lenkradeinstellung), Sicherheit (ABS, ESP, Scheibenwischer usw.) und Funktionalität (Anlasser, Lenkungsmotor, Kraftstoffpumpe) verbaut. Einige dieser Motoren sind im Anhang in Tabelle A.8 zusammengetragen. Natürlich kommen hier häufig Ferrit-Magnete zum Einsatz, auch werden oft reine Induktionsmotoren ohne Permanentmagnet verbaut, dennoch werden aufgrund der kompakteren Bauweise und der damit verbundenen Materialeinsparungen (weniger Gehäuse, kleinere Kupfer-Spulen) in vielen Bereichen unter anderem NdFeB-Magnete (gesintert und kunststoffgebunden) verbaut. Elektromotoren in konventionellen Pkw, die bevorzugt auf NdFeB-Magneten basieren sind insbesondere Lenkungsmotoren für die Servolenkung, Motoren für die automatische Kupplung und Schaltung sowie Kleinmotoren im Komfortbereich, wie die automatische Sitzverstellung, Spiegel- und Scheinwerferausrichtung etc. (vergl. z.B. Wilde, 2008).

Hier ist auch zu berücksichtigen, dass eine gewisse Flexibilität in der Materialverwendung besteht. So wurden aufgrund der extremen Preisanstiege für Neodym 2010-2011 wieder vermehrt Ferrit-Magnete, bzw.

²⁵Solid State Drive

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Tabelle 5.11. – Annahmen zu Gehalten von NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw aus der Literatur.

Quelle	Methode	Masse NdFeB-Magnete pro Pkw
Roskill (2011)	Expertenschätzung	150-250 g
Kohlmeyer et al. (2015a,b)	Zerlegung eines Mittelklassewagens	ca. 150 g
Widmer et al. (2015)	Analyse von Altauto-Schredderfraktionen Schweiz	<10 g
Alonso et al. (2012b)	Analyse der Kleinmotoren bei Automobilzulieferern	>1 kg
Cullbrand und Olof (2011)	Analyse einzelner Bauteile (Kleinmotoren)	ca. 150 g

reine Induktionsmotoren verbaut, während die Automobilzulieferer inzwischen wieder verstärkt auf NdFeB-Magnete zurückgreifen²⁶. Derartige Effekte erschweren eine Schätzung der Verwendungsmengen von NdFeB-Magneten zusätzlich. Die Literaturwerte zur durchschnittlichen Menge an NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw variieren, wie in Tabelle 5.11 dargestellt, relativ stark. Dies liegt auch daran, dass es einen erheblichen Unterschied macht, ob aktuelle Verwendungsmengen von NdFeB-Magneten in konventionellen Pkw betrachtet werden, oder aktuelle Altauto-Schredderfraktionen. Da NdFeB-Magnete erst seit der Jahrtausendwende in Pkw verbaut werden und ihre Verwendungsmenge seitdem kontinuierlich angestiegen ist, zeigen derzeitige Analysen von verschrotteten Altautos (die im Schnitt 12 bis 13 Jahre alt sind) noch sehr geringe Anteile an NdFeB-Magneten (vergl. Widmer et al., 2015), während in absehbarer Zukunft definitiv mit einem erheblichen Anstieg an NdFeB-Magneten in den Schredderfraktionen von Altautos (speziell in der Eisenfraktion) zu rechnen ist.

Für das Modell wird auf Basis der Literaturrecherche von aktuell 100 g/Pkw im Segment der Kompaktklasse und Kleinwagen, 150 g/Pkw im Mittelklasse-Segment und 250 g/Pkw in der Oberklasse ausgegangen, wobei die Mengen seit 2000 mit Ausnahme von 2011 und 2012 (wegen der Hochpreisphase) kontinuierlich ansteigt. Da die genauen Mengen an verwendeten Permanentmagneten kaum zu bestimmen sind, erscheint dies ein realitätsnaher Ansatz für die Simulation des Schrottaufkommens in konventionellen Pkw zu sein. Dabei zeigt sich die Problematik der niedrigen Transparenz hinsichtlich der Verwendungsstrukturen von NdFeB-Magneten insgesamt. Da zahlreiche Bauteile (z.B. Autositze, Rückspiegel, Scheibenwischer) bereits in fertiger Form extern geliefert werden, ist selbst den Autobauern in der Endfertigung nicht immer klar, wie die genaue Materialzusammensetzung des Bauteils aussieht, da in erster Linie auf Funktionalität und Bauteileigenschaften Wert gelegt wird²⁷. Angesichts der Tatsache, dass ein Großteil der Kunden der in Tabelle 5.9 gelisteten Hersteller aus der Automobilindustrie kommen, muss von einem vermehrten Einsatz von PM-Synchronmotoren in konventionellen Pkw ausgegangen werden (Erdmann et al., 2011, Anhang, S.142). Dies wird durch Analysen aktueller Pkw-Modelle und Zulieferer-Angaben bestätigt (vergl. neben Tabelle 5.11 insbesondere Kohlmeyer et al., 2015a; Alonso et al., 2012b; Wilde, 2008).

Die deutschen Zulassungszahlen der Pkw mit alternativem Antrieb sowie der Pkw insgesamt, auf deren Basis die Bottom-up-Modellierung der Materialströme erfolgt, sind in Abbildung 5.40 zusammengefasst.

²⁶Diese Aussage basiert auf persönlicher Korrespondenz mit Vertretern aus der Automobilindustrie.

²⁷Diese Aussage basiert ebenfalls auf persönlicher Korrespondenz mit Vertretern der Automobilindustrie.

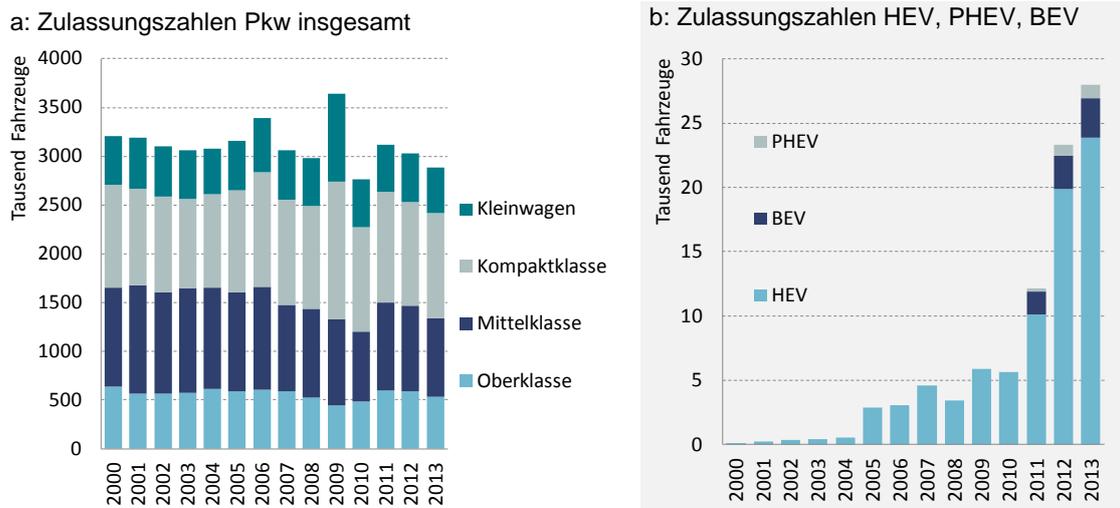


Abbildung 5.40. – Pkw Zulassungszahlen in Deutschland (Daten basieren auf dem Verband der deutschen Automobilindustrie (VDA, 2000-2013) sowie auf dem Kraftfahrt-Bundesamt, KBA). HEV: Hybrid Electric Vehicle, PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle, BEV: Battery Electric Vehicle.

NdFeB Permanentmagnete in Windkraftanlagen in Deutschland

In Deutschland ist die insgesamt installierte Kapazität von Windkraftanlagen (WKA) vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2013 um mehr als das Fünffache gestiegen (dies entspricht den kumulierten Werten in Abbildung 5.41). Zur Abschätzung des Anteils von WKA mit Permanentmagneten (langsam laufender Direktantrieb, oder Schnellläufer mit Getriebe) wurde eine Herstelleranalyse durchgeführt (vergl. hierzu Tabellen im Anhang A.5.3). Im Jahr 2012 setzte sich der Markt der neu installierten Leistung in Deutschland entsprechend Abbildung 5.41b zusammen. Der Offshore-Anteil aller WKA betrug in Deutschland Ende 2012 nur 1 % (vergl. Abbildung 5.41b nach dem Bundesverband Windenergie²⁸). Generell ist der Direktantrieb ohne Getriebe aufgrund der geringen Wartungsintensität vor allem für Offshore-WKA interessant (Kaufhold und Jöckel, 2002, vergl. auch Abbildung 5.32).

Die Herstelleranalyse ergab, dass der größte und der drittgrößte Marktteilnehmer, Enercon und Senvion (ehemals REPower), mit einem gemeinsamen Marktanteil von derzeit ca. 70 %, keine Permanentmagnete in ihren WKA verwenden. Der zweitgrößte Anbieter, Vestas (Weltmarktführer), verwendet Permanentmagnete in drei seiner über zehn angebotenen Turbinen, wovon eine ausschließlich im Offshore-Bereich eingesetzt wird (vergl. Tabelle 5.12). Diese drei Turbinen sind Hybridturbinen²⁹. Die Firma Nordex produziert derzeit sechs verschiedene Onshore-WKA, verbaut jedoch nur in ihrer einzigen Offshore-WKA Permanentmagnete. Lediglich kleinere Unternehmen wie die VENSYS Energy AG, die in Deutschland einen Marktanteil von ca. 1,5 % hat, setzt auf getriebelose PM-Direktantriebe im Onshore-Bereich (Wallasch et al., 2014). In erster Linie werden diese Anlagen allerdings vom größten chinesischen Hersteller "Goldwind Ltd." in China

²⁸Bundesverband Windenergie (BWE): www.wind-energie.de

²⁹Hybridturbinen verbinden das Konzept des PM-Synchrongenerators mit einem kleiner dimensionierten Getriebe, meist mit Planetengetriebe, was eine kompaktere Bauweise ermöglicht.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

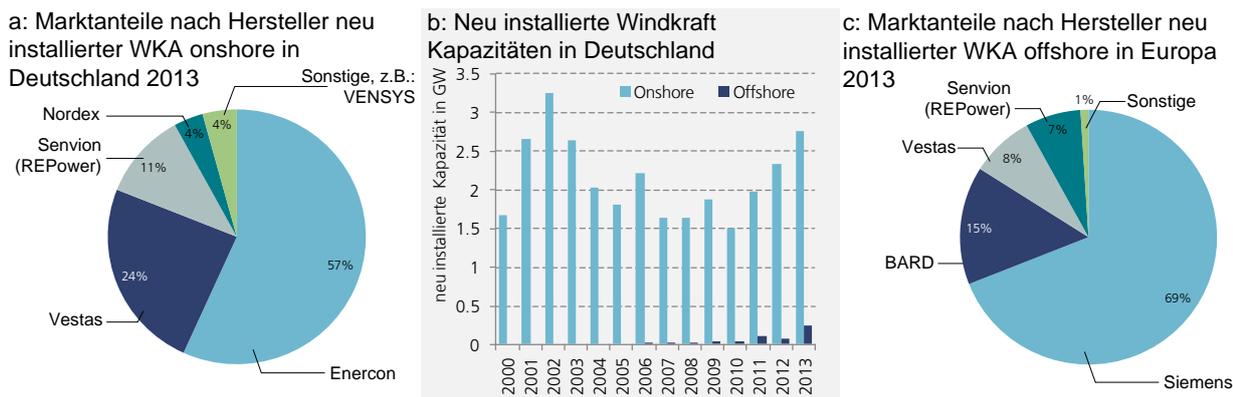


Abbildung 5.41. – Hersteller von Windkraftanlagen nach deutschen Marktanteilen sowie installierte jährliche Neuleistungen.

a: Marktanteile der Hersteller im Onshore-Bereich (Wallasch et al., 2014).

b: Jährlich neu installierte Leistung in Deutschland nach dem Bundesverband Windenergie (BWE).

c: Marktanteile der Hersteller im Offshore-Bereich (Wallasch et al., 2014).

produziert, der 2008 die Mehrheitsanteile der VENSYS Energy AG übernommen hat, und hauptsächlich innerhalb Chinas installiert³⁰.

Der Marktführer im Offshore-Bereiche, Siemens Windpower, setzt vor allem bei größeren Turbinen auf Direktantriebe mit Permanentmagneten³¹. Auch hat der Weltmarktführer für WKA (onshore und offshore), Vestas, die derzeit größte Offshore-Turbine mit 8 MW Leistung und PM-Generator auf den Markt gebracht³². Zwar wird der Offshore-Windenergie starkes Wachstum in absehbarer Zukunft zugesprochen (vergl. z.B. IEA, 2013), insgesamt spielt der Offshore-Bereich derzeit aber nach wie vor eine untergeordnete Rolle (vergl. Abbildung 5.41).

Der genaue Anteil der Anlagen, die mit Neodym-Magneten arbeitet, lässt sich auf Basis der verfügbaren Daten nicht eindeutig bestimmen. Wie zuvor erläutert, kann weltweit von einem Anteil der WKA mit PM-Direktantrieb von 10-15 % ausgegangen werden, zusätzlich kommen einige Schnellläufer mit Getriebe und kleineren PM-Synchrongeneratoren hinzu. Die Ergebnisse der Herstelleranalyse im deutschen Markt in Verbindung mit dem geringen Offshore-Anteil lassen aber den eindeutigen Schluss zu, dass in Deutschland der Prozentsatz neuer WKA mit Permanentmagneten deutlich unter 10 % liegt. Wie bereits in Abschnitt 5.5.1 erläutert, konzentriert sich die Verwendung von NdFeB-Magneten in kleineren WKA im Onshore-Bereich mit und ohne Getriebe auf China, während die installierten Anlagen auf dem deutschen Festland nur sehr selten Permanentmagnete enthalten. Lediglich die größer dimensionierten Offshore-Anlagen basieren hauptsächlich auf der DD-Technologie (Direct Drive) mit NdFeB-Magneten von bis zu 3-4 t.

Insgesamt wird auf Basis der hier zusammengetragenen Daten im Onshore-Bereich von einem Anteil von 5 % der installierten WKA mit Permanentmagnet ausgegangen, wobei 2,5 % keinen Direktantrieb, sondern als

³⁰siehe hierzu Herstellerangaben Goldwind Ltd.: www.goldwindglobal.com

³¹Hierzu wird derzeit in Cuxhaven ein neues Produktionswerk für die Endmontage aufgebaut (vergl. www.siemens.com/press/de).

³²vergl. Herstellerangaben: V164-8 MW www.mhivestasoffshore.com

Tabelle 5.12. – Windkraftanlagen mit NdFeB-Permanentmagnet, die in Deutschland in den vergangenen Jahren installiert wurden. Die Angaben wurden den Produktblättern der jeweiligen Hersteller entnommen.

Hersteller	Anlage	Getriebe vorhanden?	Einsatzbereich
Vensys	Vensys 100/109/112 (2,5 MW)	-	onshore
Vensys	Vensys 120 (3 MW)	-	onshore
Vestas	V112-3 MW IEC 2A	G	onshore
Vestas	V126-3 MW	G	onshore-/offshore
Vestas	V164-8 MW	G	offshore
Nordex	N150/6000 (6 MW)	-	offshore
Siemens	SWT-3.0-101 (3 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.2-101 (3,2 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.0-108 (3 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.2-108 (3,2 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.0-113 (3 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-3.2-113 (3,2 MW)	-	onshore-/offshore
Siemens	SWT-6.0-154 (6 MW)	-	offshore

Schnellläufer mit Getriebe und kleinerem Generator ausgelegt ist. Der Anteil der Offshore-Anlagen mit PM-Generator wird auf Basis der Marktanteile der einzelnen Hersteller und ihres Anteils an PM-Direktantrieben im Produktportfolio (vergl. Tabelle 5.12, sowie Anhang A.5.3) auf aktuell ca. 50 % geschätzt. Dabei basieren die sehr großen Turbinen ab 5 MW Leistung fast immer auf einem PM-Synchrongenerator³³, während bei kleineren Offshore-Anlagen durchaus auch schnelllaufende doppeltgespeiste Asynchron-Generatoren oder Synchron-Ringgeneratoren mit Elektromagnet im Rotor eingesetzt werden³⁴. Daher ist davon auszugehen, dass aufgrund der Tendenz zu immer größeren Turbinen in Zukunft verstärkt auf die PM-Direktantriebe gesetzt wird, während die in der Vergangenheit installierten Offshore-Anlagen eher geringere Anteile an PM-Direktantrieben aufweisen. Dies wurde im Modell durch entsprechend niedrigere Anteile der DD-Technologie (**D**irect **D**rive) in der Vergangenheit berücksichtigt.

NdFeB-Magnete in Pedelecs (E-Velos)

Während in Asien, insbesondere in China, die Verkaufszahlen elektrischer Zweiräder (E-Scooter) in den vergangenen Jahren einen enormen Zuwachs erlebt haben, spielen Motorroller, bzw. Motorräder mit Elektroantrieb in Europa bisher kaum eine Rolle.

Dagegen verbreiten sich in Deutschland in den vergangenen Jahren verstärkt Fahrräder mit elektrischem Hilfsantrieb bzw. elektrischer Kraftverstärkung, die im Allgemeinen als “Pedelecs” (Pedal Electric Cycle) bezeichnet werden und sich von E-Scootern dadurch unterscheiden, dass der Fahrer über die Pedale zum Antrieb beisteuert bzw. den Antrieb reguliert und nicht wie beim klassischen E-Bike ausschließlich über einen Gasgriff. Technisch gesehen unterscheiden sich Pedelecs von E-Scootern auch durch die geringere

³³vergl. Siemens SWT-6.0-154, Nordex N150/6000, oder Vestas V164-8.0MW

³⁴So basiert z.B. der 2015 in Betrieb genommene Windpark “Baltic 2” der EnBW auf 80 Anlagen des Typs SWT-3,6-120 mit doppeltgespeistem Asynchron-Generator (vergl. www.enbw.com/media).

³⁵<http://www.bosch-ebike.de/de/home/home.html>

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle



Abbildung 5.42. – Verkäufe von E-Bikes in Deutschland und Abgrenzung von Pedelecs und E-Scootern.
a: Pedelec und E-Scooter Verkäufe in Deutschland (Daten basieren auf ZIV Zweirad Industrie-Verband e.V.).
b: Unterscheidung Pedelec und E-Scooter (Bilder entnommen von Bosch E-Bike³⁵).
c+d: Antriebskonzepte (vergl. z.B. Bosch E-Bike).

Motorleistung und entsprechend niedrigere Magnetmengen in den Elektromotoren. Häufig werden diese unterschiedlichen Konzepte unter dem allgemeinen Begriff der “E-Bikes” zusammengefasst wodurch gewisse Mißverständnisse entstehen können. Zwar kann davon ausgegangen werden, dass auch in Pedelecs aus Platz- und Gewichtsgründen nahezu ausschließlich PM-Synchronmotoren mit NdFeB-Magneten verbaut werden, durch die geringeren Betriebstemperaturen sind hier allerdings nur Dysprosiumgehalte im Bereich um 1 % nötig³⁶. Je nach Leistungsklasse kann bei Pedelecs von einer verbauten Magnetmenge von 100-300 g ausgegangen werden (vergl. insbesondere Hofmann et al., 2013, Anhang S.55 ff.). Im Modell wird mit einem Durchschnittswert von 200 g NdFeB-Magnet pro Pedelec gerechnet, während die größeren E-Scooter bis zu 500 g Magnetmasse enthalten können (siehe ebenfalls Hofmann et al., 2013, Anhang S.55 ff.). In diesen Motoren ist auch aufgrund der höheren Leistung von Gehalten an Dysprosium um 5 % auszugehen. Abbildung 5.42 zeigt die Entwicklung der Pedelec-Verkäufe in den vergangenen Jahren sowie deren Unterscheidung gegenüber E-Scootern und das grundlegende Funktionsprinzip der Kraftverstärkung durch den elektrischen Antrieb. Zu unterscheiden ist auch die Position des Elektromotors als Tretlagermotor, oder als Nabenmotor direkt in den Radnaben.

³⁶Diese Aussage basiert auf persönlicher Korrespondenz mit Motor-Herstellern.

Weitere Anwendungsbereiche von NdFeB Permanentmagneten

Wie bereits erläutert, werden NdFeB Magnete für die industrielle Verwendung hauptsächlich in kleineren Synchron-Servomotoren eingesetzt (bis 10 kW Leistung, vergl. z.B. Kaufhold und Jöckel, 2002; Buchert et al., 2013). Hierzu gehören, wie in Abschnitt 5.5.1 bereits erwähnt, neben den oben genannten Punkten z.B. Haushaltsgeräte von einfachen Küchenmaschinen bis hin zu Spül- und Waschmaschinen, verschiedenste Formen elektrischer Pumpen, sowie Servomotoren im allgemeinen Maschinenbau. Zwar haben die permanentmagneterregten Servomotoren im Gegensatz zu den Induktionsmotoren einen höheren Wirkungsgrad, dennoch spielen sie im Vergleich zu Induktionsmotoren vor allem aufgrund der hohen Kosten für NdFeB-Magnete nach wie vor eine untergeordnete Rolle. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass, wenn nicht zwingend volumeneffizient konstruiert werden muss, auch häufig schwächere Ferrit-Magnete in Elektromotoren verbaut werden. Die neue, 2015 in Kraft tretende Richtlinie der EU zur Energieeffizienz von Elektromotoren³⁷, könnten den Trend hin zu PM-Synchron-Servomotoren allerdings nochmals forcieren. Theoretisch ist die Verwendung von Permanentmagneten in langsam drehenden Großmaschinen sinnvoll, da durch die Ersparnis des Energieaufwands zum Aufbau eines elektrisch induzierten Magnetfelds im Rotor grundsätzlich höhere Wirkungsgrade erreicht werden. Wegen der hohen Kosten der Magnetmaterialien und der unsicheren Versorgungslage, werden diese Systeme allerdings bisher hauptsächlich für große Offshore-Windanlagen eingesetzt (vergl. z.B. Buchert, 2011; Westphal und Kuchta, 2013) und kommen außer für einige Schiffsmotoren (Kaufhold und Jöckel, 2002) bisher industriell kaum zum Einsatz.

Insgesamt ist folglich davon auszugehen, dass neben den oben betrachteten Bereichen in zahlreichen weiteren Anwendungsgebieten von kleineren Elektromotoren (Maschinenbau, Haushaltstechnik usw.) unter anderem PM-Synchronmotoren auf NdFeB-Basis eingesetzt werden. Eine eindeutige Quantifizierung erscheint hier allerdings kaum möglich. Dies liegt auch daran, dass Elektromotoren meist nur nach den Leistungskennzahlen und Spannungsart (Gleichstrom / Wechselstrom) unterschieden werden, und der genaue Motortyp in den meisten Elektrogeräten unbenannt bleibt. Weiterhin besteht von Seiten der Industrie wenig Interesse, ihre Wertschöpfung offenzulegen, was dazu führt, dass selbst die Produktionszahlen von NdFeB-Magneten in Deutschland nur mit einem breiten Unsicherheitsbereich quantifiziert werden können (siehe Tabelle 5.9, vergl. auch Buchert et al., 2013). Sicher ist, dass die Versorgungskrise 2010-2011, ausgelöst durch die verstärkten Exportrestriktionen seitens der chinesischen Regierung³⁸, viele Unternehmen des Maschinenbaus getroffen hat und dadurch eine gewisse Vorsicht bei der Verwendung von Seltenerd-Magneten entstanden ist.

Während die Magnetresonanztomographie (MRT) wie in Abschnitt 5.5.1 bereits erläutert, nahezu vollständig auf elektrisch induzierten Magnetfeldern in stark gekühlten Supraleitern mit sehr geringem elektrischen Widerstand basieren, hier also erwartungsgemäß kaum NdFeB-Magnete verbaut werden, ist ein in Deutschland mit Sicherheit breites Einsatzgebiet von NdFeB-Magneten – neben den oben beschriebenen Verwendungsbereichen – die Sensorik in der Mess- und Automatisierungstechnik, die für nahezu alle Bereiche des

³⁷In Deutschland umgesetzt durch die Ökodesign-Richtlinie Elektromotoren, siehe Umweltbundesamt: www.umweltbundesamt.de.

³⁸Vor allem der Territorialkonflikt mit Japan und die vorübergehende komplette Einstellung der Exporte nach Japan führten in westlichen Industrieländern Ende 2010 zu einer erheblichen Versorgungskrise.

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

Maschinen- und Anlagenbaus eine Rolle spielen. Dieser sehr undurchsichtige Anwendungsbereich lässt sich allerdings mit dem hier durchgeführten Bottom-up-Ansatz nicht sinnvoll untersuchen.

Basierend auf den zuvor aufgezeigten Verkaufszahlen und Magnetgehalten in den Produkten werden nachfolgend unter Annahme entsprechender Verwendungsdauer-Verteilungen die sich ergebenden Recyclingpotenziale analysiert.

Recyclingpotenziale von NdFeB-Magneten aus Altprodukten in Deutschland

Über das Prinzip der "Aging Chain" (vergl. Abbildung 4.13 in Kapitel 4.2.3) und den in Tabelle 5.8 gelisteten durchschnittlichen Verwendungsdauern, wobei aufgrund mangelnder Daten von Gaußschen Normalverteilungen ausgegangen wird, wurden die jeweiligen Produktlebenszyklen simuliert. Auf diese Weise lassen sich die Recyclingpotenziale aus den betrachteten Bereichen simulieren und relativ verlässliche Aussagen über zukünftige Materialmengen im Schrottaufkommen treffen. Die Ergebnisse der gegenwärtigen und zukünftigen Materialströme in obsoleten Produkten aus der Bottom-up-Simulation sind in Abbildung 5.44 zusammengefasst.

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass in verschiedenen Anwendungsbereichen ein erheblicher Teil an gebrauchten Produkten exportiert wird. Bei Altfahrzeugen werden von den ca. 3 Mio. jährlich in Deutschland abgemeldeten Fahrzeugen lediglich ca. 0,5 Mio. Pkw verschrottet. Der Rest wird als Gebrauchtwagen ins europäische und nicht europäische Ausland exportiert (vergl. hierzu Sander und Schilling, 2010). Die Wirtschaftlichkeit des Recyclings der Magnete aus Traktionsmotoren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen wird neben der Größe der Magnete (1-3 kg, vergl. Abbildung 6.21, sowie Tabelle 5.7) durch den hohen Anteil an hochpreisigem Dysprosium zusätzlich gestärkt (Elwert und Goldmann, 2014, S.151). Wie in Abbildung 5.30 gezeigt, liegt der Materialwert eines NdFeB-Magneten mit knapp 10 % Dysprosiumanteil auf Basis aktueller Preise mit ca. 65 \$/kg bei mehr als dem doppelten Wert eines reinen NdFeB-Magneten ohne Dysprosium (ca. 30 \$/kg). Es ist folglich davon auszugehen, dass insbesondere Traktionsmotoren und größere Elektromotoren aus konventionellen Pkw, wie z.B. Lenkungsmotoren, die häufig auf NdFeB-Magneten basieren, recycelt werden. Inwiefern sich die Exportquoten von Pkw mit alternativem Antrieb von denen konventioneller Pkw unterscheiden bleibt abzuwarten. Insgesamt wirkt sich, wie in Abbildung 5.43 dargestellt, der Export alter Fahrzeuge aber massiv auf das Recyclingpotenzial in Deutschland aus.

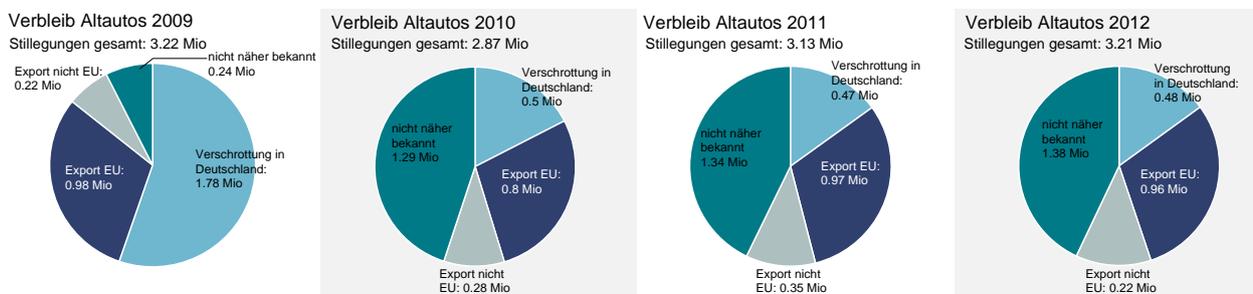


Abbildung 5.43. – Verbleib von Altfahrzeugen in Deutschland (UBA, 2012). Die Abweichungen 2009 entsprechen einem Einmaleffekt durch die Abwrackprämie.

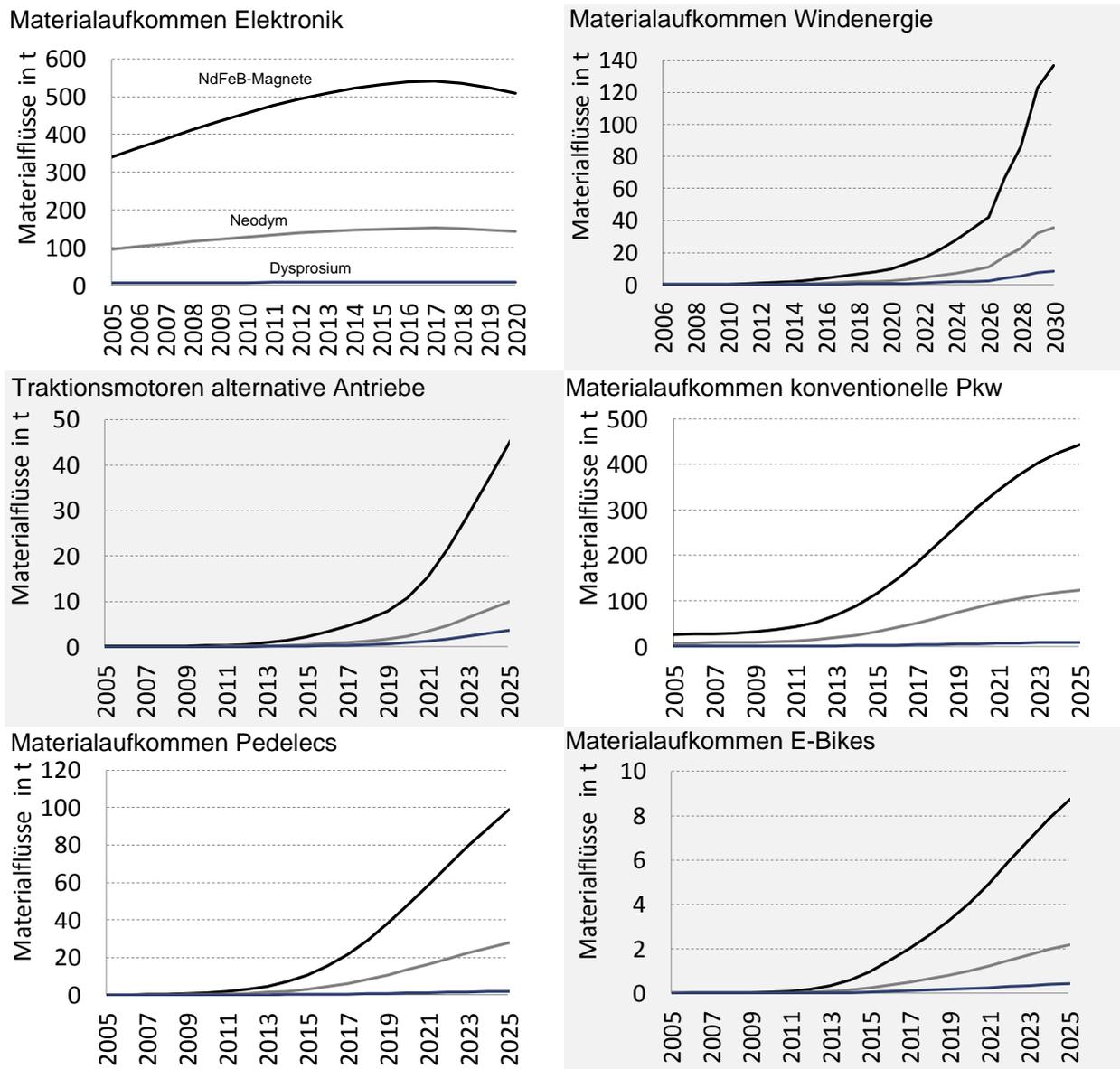


Abbildung 5.44. – Recyclingpotenzial NdFeB-Magnete aus der Bottom-up-Simulation. Da zukünftiges Schrottaufkommen in erster Linie von aktuellen Verbräuchen abhängt, lassen sich diese zukünftigen Materialflüsse relativ gut quantifizieren.

Das Problem der erheblichen Mengen an exportiertem oder falsch entsorgtem Elektronikschrott wurde bereits in Zusammenhang mit dem Recycling von Li-Ionen-Batterien diskutiert (vergl. Abschnitt 5.3.2). Hinsichtlich des Recyclingpotenzials von NdFeB-Magneten in Deutschland kann hier allerdings klar aufgezeigt werden, dass in Zukunft sowohl die absolute Menge an NdFeB-Magneten als auch der prozentuale Schrottanteil von NdFeB-Magneten aus Kleinstmotoren für Festplatten (HDD) sowie CD und DVD-Laufwerken aufgrund neuer Technologien (insbesondere SSD-Festplatten) in absehbarer Zukunft abnehmen wird. Da sich die Trennung dieser sehr kleinen Magnete aus der Schredderfraktion von Elektronikschrott ohnehin sehr aufwendig gestaltet (vergl. z.B. Westphal et al., 2014) und nicht zuletzt aufgrund der derzeit verhältnismä-

5. Globale und regionale dynamische Stoffstrommodelle

big niedrigen Preise für Seltene Erden kaum wirtschaftlich erscheint, ist eine Fokussierung des Recyclings auf größere Synchron-Servomotoren aus Altautos und elektrischen Maschinen (Pumpen, Klimaanlage, Waschmaschinen etc.) zu erwarten. Da allerdings, wie bereits erläutert, die Spanne an verschiedenen Motorkonzepten sehr groß ist und es selbst nach dem Ausbau der Motoren bei Betrachtung des Gehäuses nicht eindeutig bestimmbar ist, ob es sich um einen PM-Synchronmotor mit NdFeB-Magneten handelt, wäre eine gesetzlich vorgeschriebene Markierung der Motoren durchaus sinnvoll. Auch wäre in diesem Zusammenhang ein direktes Einbeziehen der Hersteller in den Recyclingprozess zur Identifikation relevanter Motoren sinnvoll. Bereits heute werden größere NdFeB-Magnete aus Elektromotoren von einigen Schrotthändlern zwischengelagert, in der Voraussicht, diese in Zukunft gewinnbringend veräußern zu können (vergl. Bast et al., 2014).

Bei Windkraftanlagen mit PM-Generator ist eine Sammlung und Wiederverwertung der NdFeB-Magnete aufgrund der reinen Magnetgröße und des entsprechenden Wertes³⁹ naheliegend. Hier ist allerdings die sehr lange Nutzungsdauer der WKA von 20 bis 25 Jahren zu berücksichtigen, die wie in Abbildung 5.44 dargestellt, erst nach 2025 größere Mengen an potenziellem Recyclingmaterial erwarten lassen. Auch kommt es vor allem im Onshore-Bereich aufgrund des Mangels an Fläche für Windkraftanlagen regelmäßig zu einem "Repowering", d.h. zu einem Ersetzen kleinerer WKA durch größere, leistungsstärkere. Dabei werden die alten Anlagen nicht zwingend verschrottet, sondern unter Umständen in Entwicklungs- und Schwellenländern wieder aufgebaut. Daher kann auch im Bereich der Windkraft der Export von Altanlagen zu einer erheblichen Minderung des Recyclingpotenzials in Deutschland führen.

Während die in Asien (insbesondere in China, vergl. Abschnitt 5.5.1) weit verbreiteten E-Scooter in Europa nach wie vor eine sehr untergeordnete Rolle spielen und daher auch keine große Quelle für Recyclingmaterial darstellen werden (vergl. Abbildung 5.44), ist die Zahl der Pedelecs in Deutschland in den vergangenen Jahren stark angestiegen. Da die Motoren einfach zugänglich sind (vergl. Abbildung 5.42c+d) erscheint das Recycling hier recht vielversprechend.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass angesichts der Produktionszahlen von NdFeB-Magneten in Deutschland in Höhe von ca. 2000 t/a (vergl. Tabelle 5.9), das Recycling von Magnetmaterialien nicht unerheblich zur Deckung des Rohstoffbedarfs der deutschen Magnetindustrie beitragen kann, zumal die hier durchgeführte Bottom-up-Schätzung nur einzelne Bereiche abdeckt und ein erheblicher Teil der magnetisch erregten Synchron-Servomotoren im allgemeinen Maschinenbau (Haushaltstechnik, Pumpen, Werkzeuge etc.) aufgrund der schlechten Datenlage nicht einbezogen wurde. Zu berücksichtigen bleibt allerdings die Tatsache, dass der Großteil der von der deutschen Industrie verbauten NdFeB-Magnete nicht in Deutschland hergestellt wird, sondern in Form von fertigen Magneten, Motoren, oder innerhalb entsprechender Zwischen- und Endprodukte importiert wird. So ist es, ohne genaue Zahlen quantifizieren zu können, naheliegend, dass der exportorientierte deutsche Maschinenbau einen weit höheren Rohstoffverbrauch hat, als durch Recycling gedeckt werden könnte. Während in Deutschland z.B. jährlich 5,5 Mio. Pkw produziert werden (vergl. VDA, 2000-2013) und ca. 3 Mio. Pkw zugelassen und stillgelegt werden, liegt, wie zuvor erläutert, die Zahl der in Deutschland verschrotteten Pkw lediglich bei ca. 0,5 Mio. (vergl. Abbildung 5.43).

³⁹auf Basis heutiger Preise bei 3 t Magnetmasse für große WKA mit Direktantrieb entspricht der Materialwert über 100 k€.

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

Während die im vorherigen Kapitel beschriebenen Stoffstrommodelle den System Dynamics Ansatz zur reinen Materialfluss-Modellierung und die Bestandsvariablen lediglich zur Darstellung der Akkumulation von Materialmengen über Produktnutzungsdauern (durch verschiedene Formen von Verzögerungsfunktionen) zum Einsatz kommen, werden im folgenden Kapitel aufbauend auf die Stoffstrommodelle rohstoffspezifische, systemdynamische Marktmodelle vorgestellt (vergl. hierzu auch Abbildungen 4.2 und 4.3 in Kapitel 4.3).

Mit Hilfe dieser Modelle wird es ermöglicht, dynamisches Marktverhalten zu modellieren und über erweiterte Szenarioanalysen und stochastische Simulationen mögliche zukünftige Entwicklungen abzubilden und zu untersuchen. Das Ziel der hier vorgestellten Modelle ist es, die verschiedenen Möglichkeiten der systemdynamischen Marktmodellierung breit abzubilden. Daher wird für das Industriemetall Kupfer ein Marktmodell vorgestellt, das anhand historischer Daten kalibriert wurde und basierend auf modellexogenem Wachstum der Weltwirtschaft die Entwicklung des Kupfermarktes abbildet. Für die Technologiemetalle Kobalt, Neodym und Dysprosium wird über verschiedene Szenarien die Auswirkung der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte dargestellt und unter Berücksichtigung verschiedener Anpassungsmechanismen untersucht unter welchen Bedingungen Versorgungsengpässe wahrscheinlich werden.

6.1. Statistische Trends und ökonometrische Zeitreihenanalyse zur Modellerweiterung für prospektive Simulationen

Wie in Kapitel 4 bereits erwähnt, ist es neben den breiten Möglichkeiten der Umsetzung dynamischen Verhaltens über Rückkopplungseffekte und Verzögerungsfunktionen, die Flexibilität bei der Modellentwicklung, die System Dynamics zu einem für praktische Anwendungen sehr brauchbaren Werkzeug macht. So lässt sich z.B. der System Dynamics Ansatz mit ökonometrischen Trendanalysen sinnvoll kombinieren. Wie in Kapitel 2 (Abbildung 2.21) bereits erläutert, erscheinen ökonometrische Ansätze vor allem dann sinnvoll, wenn klare Trends in historischen Zeitreihen zu erkennen sind und die Abweichungen zwischen Trend- und historischer Zielfunktion möglichst gering ist. Dies ist im Rohstoffbereich vor allem bei der Entwicklung der Bergbauproduktion der Fall. Während Preise, Halbzeugherstellung etc. viel stärkeren wirtschaftlichen bzw. konjunkturellen Schwankungen ausgesetzt sind, folgt die Primärproduktion auch wegen ihrer gerin-

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

geren Anpassungsfähigkeit aufgrund der kontinuierlichen Prozessführung (Kapazitätsanpassung etc.) meist einem relativ klaren, leicht exponentiellen Trend. Diese Entwicklung lässt sich über polynomische Regressionsfunktionen relativ gut abbilden und wurde wie in den folgenden Abschnitte dargestellt in die jeweiligen systemdynamischen Modelle aufgenommen und teilweise um gewisse Modelldynamiken ergänzt (vergl. z.B. Darstellung des zukünftigen Kupferbergbaus in Abbildung 6.1a).

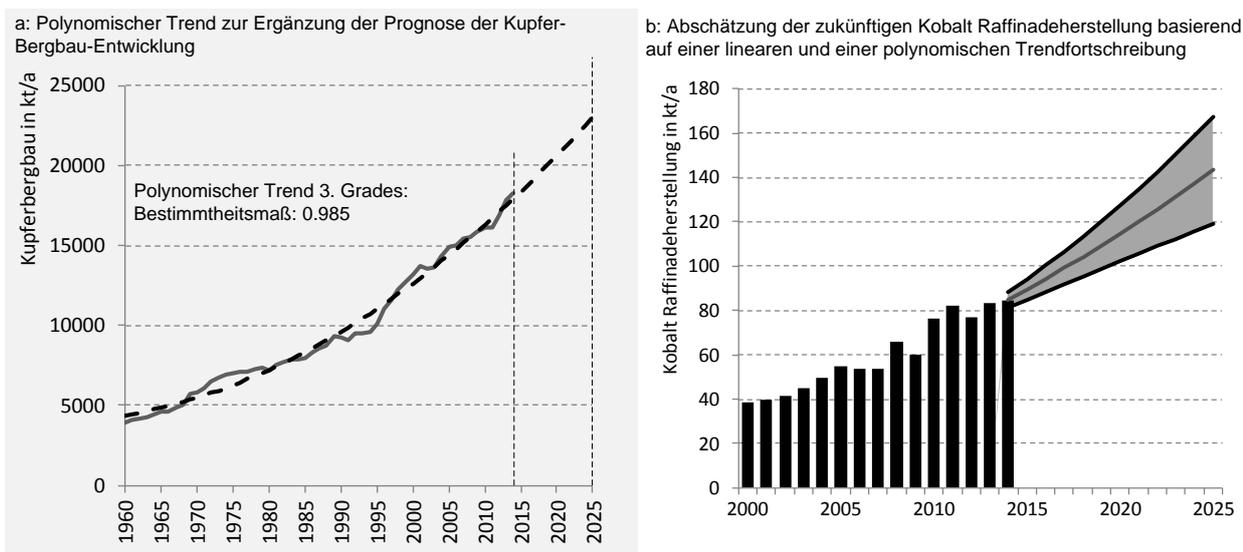


Abbildung 6.1. – Einfache Trendfortschreibung zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen basierend auf Vergangenheitswerten.
a: Polynomischer Trend des globalen Kupferbergbaus.
b: Lineare und polynomische Fortschreibung der globalen Kobalt-Raffinadeherstellung.

Wie in Abbildung 6.1b am Beispiel der Kobaltproduktion dargestellt, lässt sich über einen linearen und einen exponentiellen Trend relativ einfach ein Trichter aufspannen, der die zukünftige Produktionsmenge recht wahrscheinlich zwischen den Grenzen eines eher schwächeren Wachstums (linear) und eines stärkeren Wachstums (exponentiell) abbildet. Dies ist zwar ein sehr pragmatischer Ansatz, bei dem nicht von statistischen Konfidenzintervallen ausgegangen werden kann, angesichts der Tatsache, dass bei der Darstellung sozioökonomischer Systeme grundsätzlich externe Unsicherheitsfaktoren mitspielen, die eine absolute Sicherheit über zukünftige Verläufe ausschließen, erscheint der Ansatz in Abbildung 6.1 zur Abschätzung der mittelfristigen zukünftigen Rohstoffverfügbarkeit basierend auf historischen Trends sinnvoll. Eine Alternative wären mehrfach differenzierte Autoregressionsmodelle, die sehr ähnliche Ergebnisse liefern (vergl. hierzu Abbildung 2.21b).

6.2. Systemmodell Kupfer und dessen Marktdynamik

Als klassisches Industriemetall ist die Nachfrage nach Kupfer in erster Linie von der Entwicklung der Weltwirtschaft getrieben (vergl. Abbildung 6.2). Nachfrageimpulse durch einzelne Zukunftstechnologien spielen bei Betrachtung des Gesamtmarktes nur eine sehr untergeordnete Rolle (vergl. z.B. Angerer et al., 2009; Angerer, 2010).

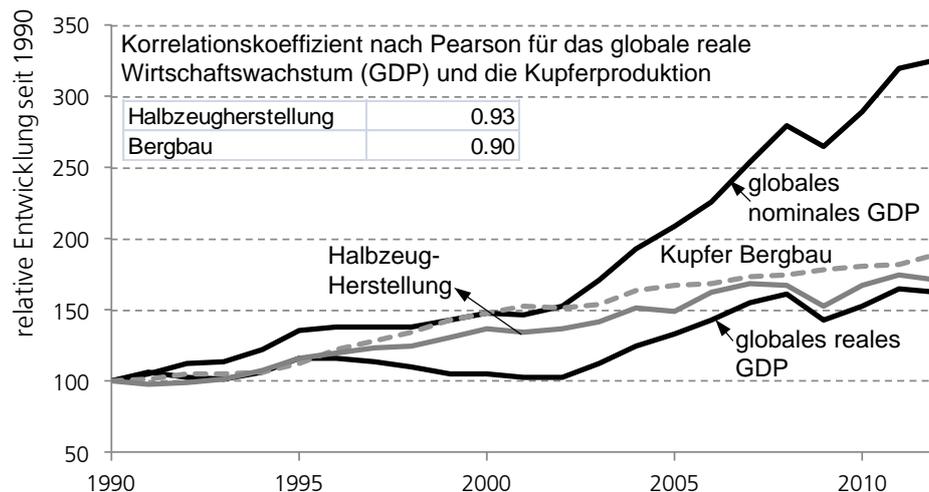


Abbildung 6.2. – Entwicklung der Kupfer-Halbzeugherstellung in Abhängigkeit der Weltwirtschaft.

Durch die unterschiedlichen Konjunkturzyklen der Weltwirtschaft in Verbindung mit einer verzögerten Angebotsanpassung wegen langen Planungs-, Genehmigungs- und Bauphasen (vergl. Abbildung 4.20) kann Kupfer als klassisches Beispiel für Preiszyklen aufgrund verzögerter Angebotsanpassung an Rohstoffmärkten herangezogen werden. Dieses, dem in Kapitel 4.3 erläuterten klassischen Schweinezyklus sehr ähnliche Prinzip, das in der Literatur qualitativ immer wieder beschrieben wurde (vergl. hierzu insbesondere Humphreys, 2012a,b; Buchholz et al., 2010; Rosenau-Tornow et al., 2009), lässt sich innerhalb des System Dynamics Ansatzes durch die Modellierung von Verzögerungseffekten in Verbindung mit Anpassungsmechanismen auf Preisänderungen realitätsnah abbilden. Während bisherige Studien zur Entwicklung des Kupfermarktes basierend auf dem System Dynamics Ansatz in erster Linie die Langzeitverfügbarkeit des endlichen Rohstoffes Kupfer analysieren (siehe insbesondere Sverdrup et al., 2014; Kwakkel et al., 2014; Gröticke, 2014; van Vuuren et al., 1999) und vor allem auf die Ressourcenverfügbarkeit in Szenarien für die kommenden 100 Jahre und länger abzielen, wird hier mit Hilfe von System Dynamics die mittelfristige Marktentwicklung der nächsten 10 Jahre nach dem zuvor beschriebenen Prinzip des "Regelkreises der Rohstoffversorgung" (vergl. hierzu Abschnitt 4.3) analysiert.

Die Kombination physischer Stoffströme mit dynamischen Markt Anpassungsmechanismen ermöglicht, wie im Folgenden erläutert, eine Modellkonzeption, die erheblich zu einem besseren Verständnis des Kupfermarktes beitragen kann und sogar als Prognose-Werkzeug mittelfristiger Preisentwicklungen herangezogen werden kann.

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

6.2.1. Ergänzung des globalen Kupfermodells um marktdynamische Effekte

Wie in Abbildung 6.3 dargestellt, ergibt sich die Preisänderung aus der relativen Abweichung zwischen der Summe der Nachfrage in den einzelnen Anwendungsbereichen und dem tatsächlichen Angebot aus Primär- und Sekundärproduktion. Die Primärproduktion folgt einem polynomischen Trend auf Basis historischer Entwicklungen, der durch die preisabhängigen Investitionen in neue Bergbauprojekte verstärkt, bzw. geschwächt wird. Die Investitionen wirken sich entsprechend der Verteilungsdauer der Planungs- und Bauphase verzögert auf das tatsächliche Primärangebot aus.

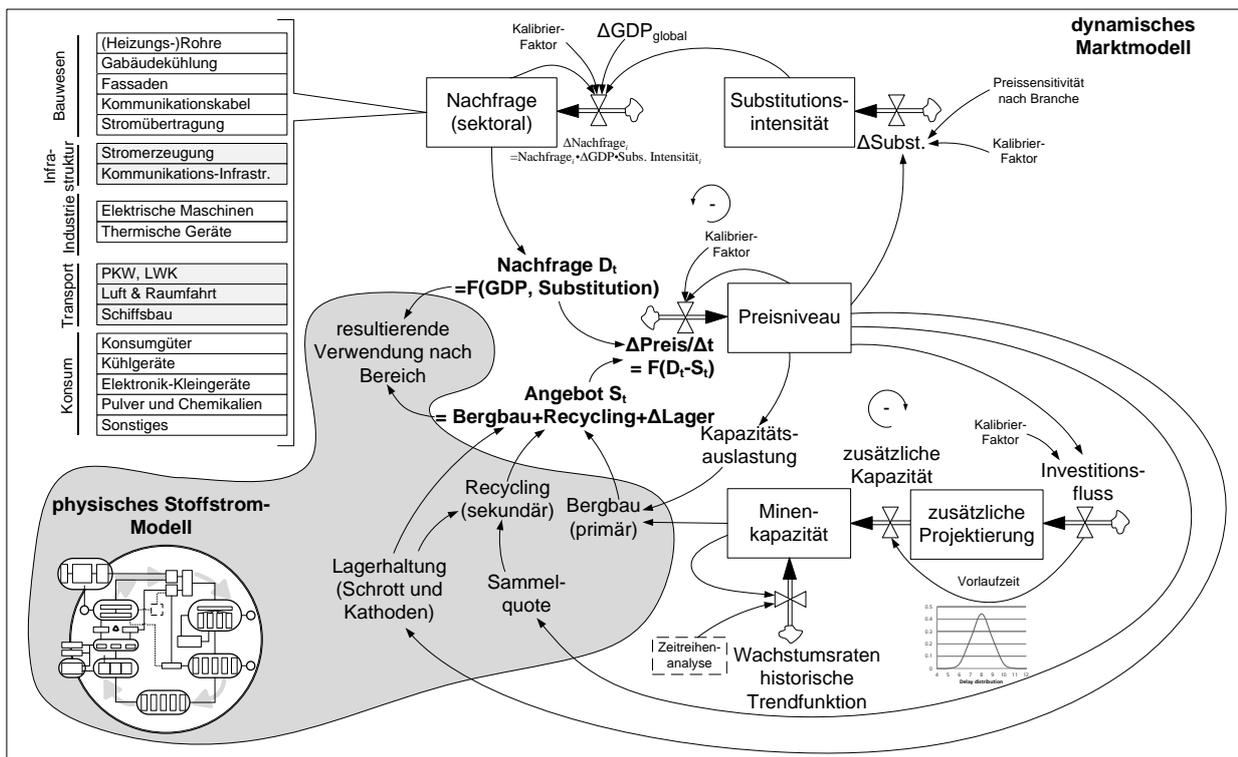


Abbildung 6.3. – Struktur des Kupfer-Marktmodells mit Bestands- und Flussvariablen.

Weiterhin wird die Sammelquote für Altschrotte vom Preisniveau beeinflusst, was aus historischen Verläufen der Sammelquoten ebenfalls ersichtlich ist (vergl. Abbildung 5.11). Die Nachfrage nach Kupfer in den einzelnen Anwendungsbereichen hängt in erster Linie vom exogenen Wirtschaftswachstum ab (vergl. Abbildung 6.2), wobei hier je nach Anwendungsbereich negative Rückkopplungseffekte bezüglich des Preisniveaus bestehen. Dabei wird, wie in Abbildung 6.3 oben rechts dargestellt, von einem Substitutionsniveau in Form einer Bestandsvariablen ausgegangen. Dieses Substitutionsniveau nimmt zunächst für alle Anwendungsbereiche einen Wert von 1 an und fließt als Faktor in die Berechnung der Nachfrage basierend auf exogenem Wachstum der Weltwirtschaft ein. Je nach Preissensitivität der verschiedenen Anwendungsbereiche ist die Intensität dieser Rückkopplungseffekte unterschiedlich. Dabei wird davon ausgegangen, dass Kupfer in technischen Anwendungen (Stromerzeugung, Industrie, Transport, Elektronik) kaum substituierbar ist, also eine niedrige Preissensitivität aufweist und die Nachfrage auch bei höheren Preisen erhalten

bleibt, während im Baubereich, insbesondere für Dächer und Fassaden eine hohe Preissensitivität besteht, die Rückkopplungseffekte bezüglich des Preisniveaus also stärker ausfallen.

Die Lagerhaltung von Kupferkathoden, die ebenfalls vom Preisniveau abhängt und im Modell berücksichtigt wird, spielt insgesamt eine untergeordnete Rolle, was sich aus historischen Verhältnissen zwischen Lager- und Produktionsmengen von Kupferkathoden begründen lässt. Insgesamt lässt sich mit diesem einfachen, dem ‘‘Regelkreis der Rohstoffversorgung’’ folgenden systemdynamischen Modell, wie im Folgenden gezeigt, bereits sehr reales Marktverhalten abbilden.

6.2.2. Modellkalibrierung und Ergebnisse zur Entwicklung des Kupfermarktes

Über einen von der verwendeten Software (Vensim) zur Verfügung gestellten iterativen heuristischen Optimierungsprozess (vergl. Anhang A.3.2), wurden die Modellparameter anhand historischer Daten kalibriert. Dabei gilt es herauszufinden, inwiefern das in Abbildung 6.3 dargestellte einfache Marktmodell in der Lage ist, mit Hilfe vergangener Wachstumsraten der Weltwirtschaft historische Verläufe der Primärproduktion, aber auch des Kupferpreises grob nachzubilden. Wie in Abbildung 6.4 dargestellt, lässt sich die Entwicklung der Primärproduktion durch die Kombination aus historischem Trend und verzögerter Auswirkung der preisabhängigen Bergbauinvestitionen relativ gut abbilden (vergl. Abbildung 6.4b). Die Erklärung des historischen Preisverlaufes ist dabei schwieriger, dennoch werden die Tendenzen im Preisverlauf recht klar dargestellt (vergl. Abbildung 6.4b).

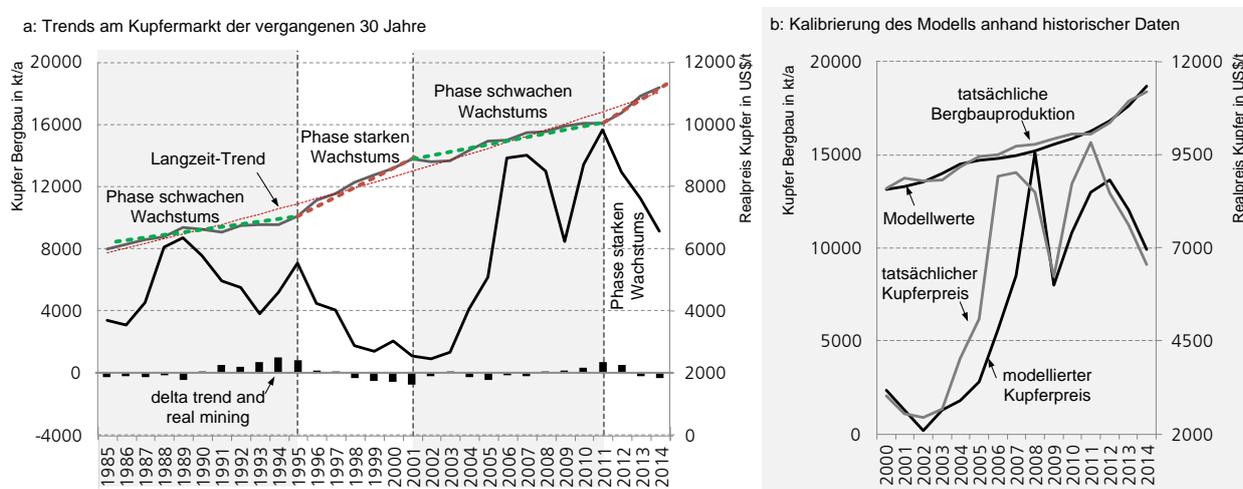


Abbildung 6.4. – Historische Trends am Kupfermarkt (a) und Kalibrierung des Modells anhand historischer Verläufe (b).

Mit Hilfe der anhand historischer Verläufe kalibrierten Parameter und zukünftiger Einschätzungen zur Entwicklung der Weltwirtschaft kann das Modell zur Prognose mittelfristiger Preisentwicklungen herangezogen werden. Wie in Abbildung 6.5a dargestellt, ist auf Basis der Einschätzungen der Weltbank zur Entwicklung der Weltwirtschaft zwar davon auszugehen, dass der seit 2011 anhaltende Preisverfall am Kupfermarkt 2015 seinen Tiefpunkt erreicht. Eine signifikante Erholung ist aufgrund des nach wie vor hohen Angebots

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

allerdings zunächst nicht zu erwarten. Erst die verzögerte Auswirkung des aktuellen Preisverfalls auf den Zuwachs neuer Bergbauaktivitäten macht eine stärkere Markterholung wahrscheinlicher. Dies ist aber erst ab 2018 zu erwarten.

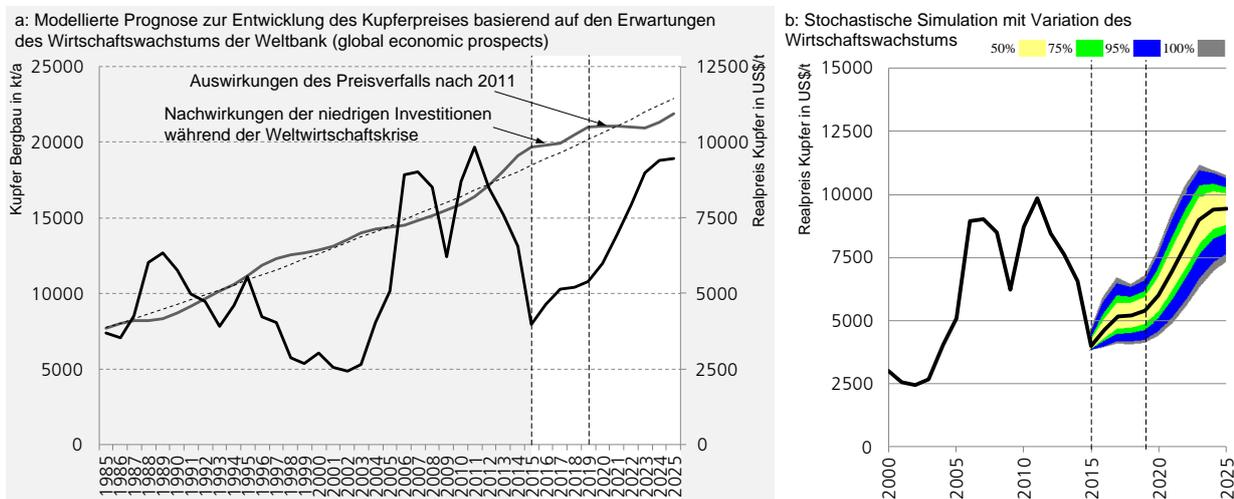


Abbildung 6.5. – Vorausschau auf erwartete Entwicklungen des Kupfermarktes anhand von Modell-exogenem Wirtschaftswachstum. a: Prognose des Kupferpreises auf Basis der von der Weltbank erwarteten Entwicklung der Weltwirtschaft (World Bank Economic Prospects 2015). b: Modellergebnisse bei stochastischer Variation des Wirtschaftswachstums.

Die Flexibilität der Modellbildung ermöglicht Anstelle fixer Annahmen zur Entwicklung der Weltwirtschaft auch die Implementierung von Wahrscheinlichkeitsbereichen für die Entwicklung der Wachstumsraten. Durch iterative Simulationsläufe können so Bereiche der erwarteten Preisentwicklung realisiert werden (vergl. Abbildung 6.5b). Diese Bereiche stellen keine statistischen Konfidenzintervalle dar, sondern sollten vielmehr als Darstellung individueller Markteinschätzung basierend auf den exogenen Modellparametern gesehen werden.

Damit bilden derartige Marktmodelle ein flexibles, praxisorientiertes Werkzeug zur Analyse und Kommunikation individueller Einschätzungen zu zukünftigen Entwicklungen an Rohstoffmärkten und könnten z.B. zur Unterstützung von Expertenschätzungen herangezogen werden.

6.2.3. Vergleich der Ergebnisse des SD-Modells mit Autoregressionsmodellen (ARIMA)

Inwiefern sich die flexiblen System Dynamics Modelle von ökonometrischen Ansätzen wie Autoregressionsmodellen (vergl. Kapitel 2.3.3) unterscheiden, soll im Folgenden kurz verdeutlicht werden. Wie in Abbildung 6.6 gezeigt, basiert diese Form der Zeitreihenanalyse auf dem Prinzip, zukünftige Entwicklungen einer Zeitreihe durch eine zeitversetzte Regression mit sich selbst darzustellen. Dies funktioniert bei periodischen Schwankungen hervorragend, da hier innerhalb der Zeitreihe eine hohe Korrelation jeweils um eine Wellenlänge versetzt besteht. Bei nicht periodischen Schwankungen ergeben sich allerdings hohe Abweichungen zwischen Modellwerten und historischen Werten, die sich für prospektive Betrachtungen

aufsummieren und zu einer sehr breiten Fehlerspanne führen. Dies gilt insbesondere bei der Prognose von Preisverläufen, bei denen keine Trendstationarität besteht, d.h. eine mehrfache Differenzierung der Zeitreihe durchgeführt werden muss (vergl. hierzu auch Anhang A.2). Hier scheinen struktureklärende System Dynamics Modelle einige entscheidende Vorteile auch hinsichtlich der Flexibilität der Modellgestaltung aufzuweisen. Dabei ist allerdings auch der Aufwand der Modellentwicklung um ein Vielfaches höher.

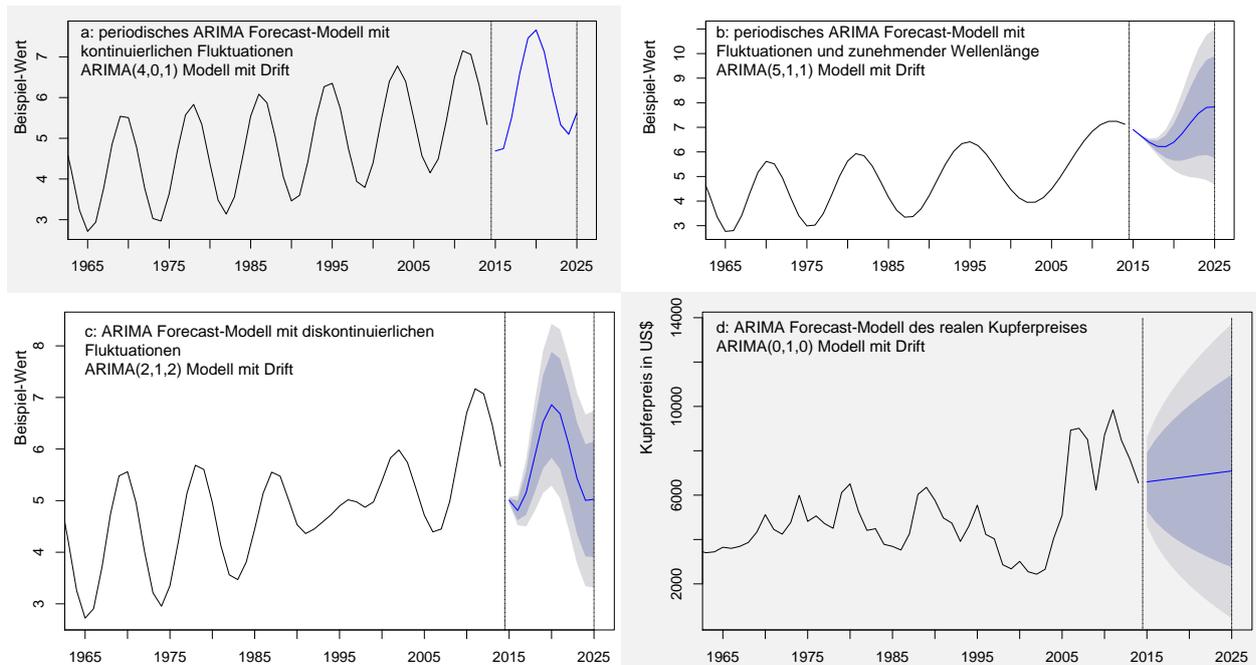


Abbildung 6.6. – Darstellung verschiedener Prognosen mit Autoregressionsmodellen (ARIMA). Bei nicht periodischen Fluktuationen sind die Ergebnisse von Autoregressionsmodellen nicht zufriedenstellend. Hier haben systemische, struktureklärende Modelle einen klaren Vorteil bei der Erstellung von Prognosen (vergl. Abbildung 6.5).

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

Während für Kupfer als klassisches Industriemetall die Weltwirtschaft und insbesondere die Entwicklung verschiedener Schwellenländer den entscheidenden Nachfragemotor bilden, ist der Bedarf von Kobalt, bzw. Neodym und Dysprosium in erster Linie technologiegetrieben (vergl. z.B. Angerer, 2010; Tercero, 2012). Bisherige Studien zur Entwicklung des Rohstoffbedarfs für Zukunftstechnologien betrachten häufig nur die reine Nachfrageentwicklung, ohne das limitierte Angebot zu berücksichtigen (vergl. z.B. Angerer et al., 2009; Konietzko, 2011; Alonso et al., 2012a; Hoenderdaal et al., 2013). Da die meisten Technologiemetalle allerdings nur als Neben- bzw. Kuppelprodukte gewonnen werden und eine entsprechend starke Anpassung des Angebots an die wachsende Nachfrage kaum möglich erscheint, wird sich die Nachfrage an das limitierte Angebot anpassen müssen. Hier kommen in allen Anwendungsbereichen Substitutionseffekte sowie Effizienz Anpassungen zum Tragen. Unter Umständen wird allerdings auch die Verbreitung bestimmter Technologien aufgrund mangelnder Rohstoffverfügbarkeit beeinträchtigt bzw. verhindert. Andere Studien stellen erwartete Angebots- und Nachfrageentwicklung übereinander dar, um eine grobe Vorstellung über zukünftige Engpässe zu bekommen (vergl. Abbildung 6.7, Habib und Wenzel (2014) oder Schulze und Buchert (2016), siehe auch Methode der BGR/DERA in Abschnitt 2.3.3).

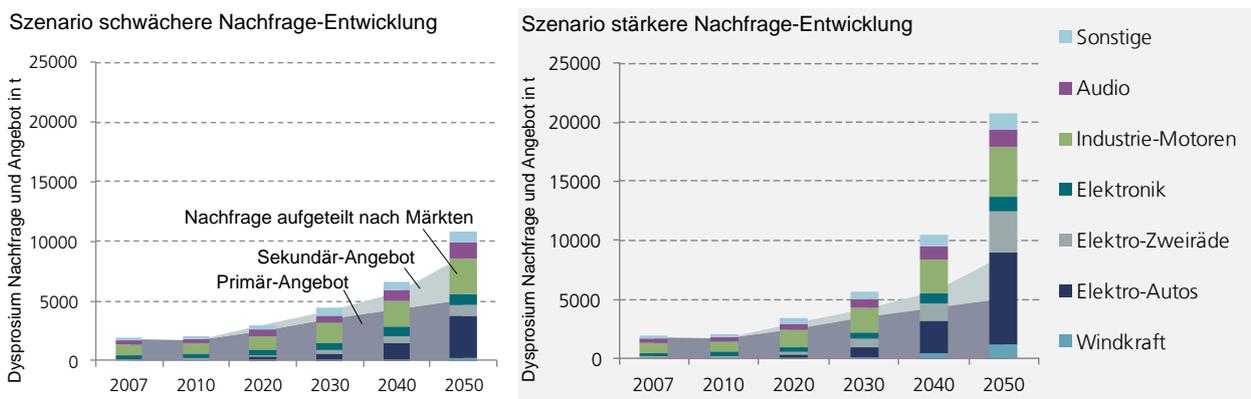


Abbildung 6.7. – Beispiel der separaten Betrachtung von Nachfrage und Angebot (diese Szenarien sind als Beispiel entnommen aus Habib und Wenzel, 2014). Diese Form der Analyse der Nachfrageentwicklung beinhaltet keine Markt Anpassungsmechanismen und basiert ausschließlich auf exogenen Wachstumsannahmen.

Was hier allerdings ebenfalls nicht abgebildet wird, ist die Frage, wie sich die Nachfrage an das erwartete Angebot anpasst, denn mehr als der physisch verfügbare Rohstoff kann nicht verteilt werden. Anpassungsreaktionen der Nachfrage können sogar dazu führen, dass aus einer anfänglichen Knappheit, ein Rohstoff-Überschuss entsteht, da einzelne Anwendungsgebiete systematisch auf Alternativrohstoffe- oder Technologien setzen. So lässt sich z.B. auch der systematische Preisverfall für Seltene Erden nach dem extremen Peak 2011 erklären, der dazu führte, dass nur noch dort Seltene Erden verwendet werden, wo keine Alternativen zur Verfügung standen. Diese Anpassung kann aufgrund der Umstellung der Produktionsprozesse immer nur Zeitverzögert erfolgen, ist aber an verschiedenen Rohstoffmärkten, die extremen Spannungen

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

ausgesetzt waren, zu beobachten.

Wie in Kapitel 4 theoretisch erläutert und im Folgenden am Beispiel von Kobalt sowie Dysprosium gezeigt, eignet sich der System Dynamics Ansatz durch die Möglichkeit der Erweiterung der physischen Stoffstrommodelle um dynamische Anpassungsmechanismen unter Berücksichtigung von Angebots- und Nachfrageentwicklungen sehr gut zur Analyse der Auswirkungen der Diffusion von Zukunftstechnologien auf Rohstoffmärkte. Während in bisherigen Studien vorwiegend reine Nachfrageszenarien aufgezeigt wurden, lassen sich mit Hilfe der System Dynamics Modelle auch potenzielle Anpassungs- und Substitutionseffekte und deren Wirkung auf den Gesamtmarkt abbilden. Dabei liegt das Ziel der Modellierung nicht in der genauen Prognose der zukünftigen Marktentwicklung (was angesichts der vielseitigen mit großen Unsicherheiten behafteten Einflussfaktoren unmöglich ist), sondern vielmehr in der Entwicklung eines Werkzeugs zur erweiterten Szenarioanalyse, was eine sinnvolle Ergänzung zu vielen bisherigen Studien darstellen kann.

Hierzu wurden die globalen Stoffstrommodelle für Kobalt sowie für Dysprosium mit einem bereits vorhandenen Flottenmodell (GloMo) zur Entwicklung des weltweiten Pkw-Marktes gekoppelt.

6.3.1. Das Globale Mobilitätsmodell (GloMo)

Das globale Flottenmodell (GloMo) ist analog zu den zuvor beschriebenen Rohstoffmodellen in die System Dynamics Software 'Vensim' implementiert.

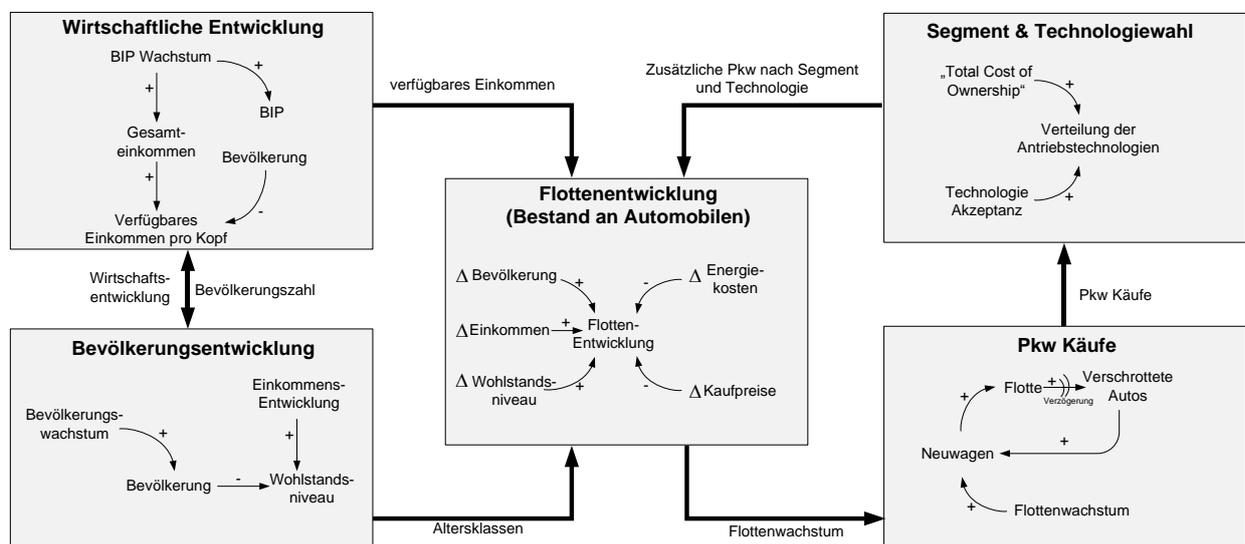


Abbildung 6.8. – Struktur und Zusammenhänge im globalen Flottenmodell GloMo.

Da dieses Modell nicht Teil der vorliegenden Arbeit ist, sondern lediglich zur Darstellung möglicher Entwicklungen des Pkw-Marktes genutzt wird, wird das Modell hier nur relativ kurz vorgestellt. Detaillierte Erläuterungen zum hier verwendeten globalen Flottenmodell wurden anderweitig veröffentlicht (vergl. hierzu insbesondere Kühn und Glöser, 2012; Schade et al., 2012; Kühn und Glöser, 2013). Das systemdynamische

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

Modell wurde zur Prognose des weltweiten Pkw-Absatzes für den Innovationsreport “Zukunft der Automobilindustrie” für das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) erstellt (Schade et al., 2012, S.164 ff.). Die Ausbreitung unterschiedlicher Technologien auf dem Fahrzeugmarkt wird von weltweiten demographischen und sozioökonomischen Entwicklungen beeinflusst. Im Modell werden besonders die TRIADE-Staaten¹ und die aufstrebenden Volkswirtschaften der BRICS-Staaten² betrachtet. Zwar ist damit nur knapp 85% des globalen Automobilmarkts abgedeckt, dennoch ist davon auszugehen, dass alternative Antriebe in anderen Wirtschaftsregionen aufgrund mangelnder Infrastruktur keine entscheidende Rolle spielen werden. Die in GloMo implementierte Verknüpfung des systemdynamischen Ansatzes mit der diskreten Entscheidungstheorie ermöglicht eine relativ realistische Modellierung der Diffusion alternativer Antriebe. Die Modularisierung dient der besseren Übersichtlichkeit und der Möglichkeit, jeden Einflussfaktor einzeln analysieren zu können (siehe auch Kühn und Glöser, 2012, 2013). Abbildung 6.8 zeigt den schematischen Aufbau des GloMo-Modells mit seinen fünf Modulen.

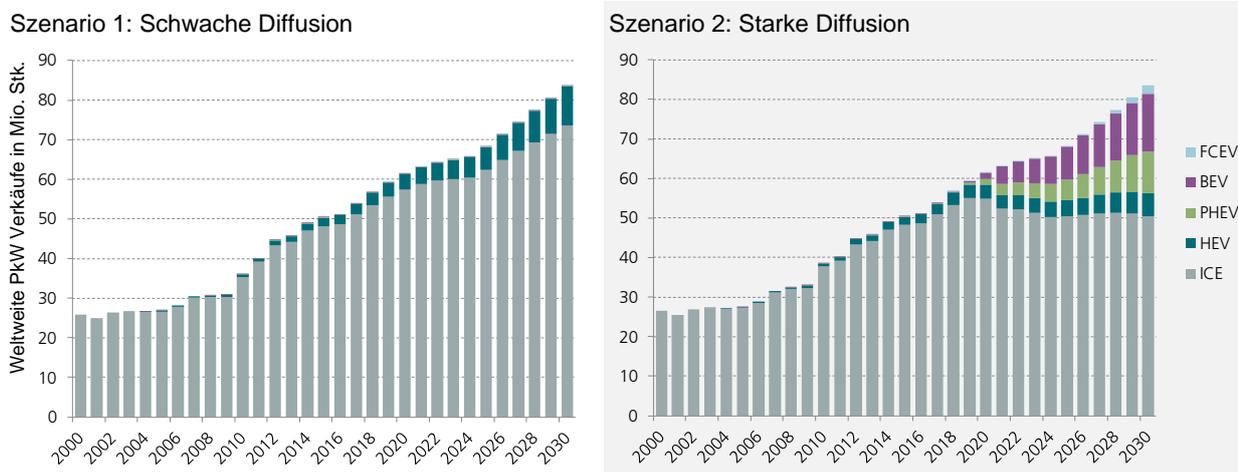


Abbildung 6.9. – Für die folgenden Betrachtungen werden zwei Szenarien zur Entwicklung alternativer Antriebe im Pkw Markt verwendet, die als Extreme zu verstehen sind (vergl. Schade et al., 2012). Szenario 1: Schwache Diffusion, lediglich Hybridfahrzeuge setzen sich nennenswert am Markt durch. Szenario 2: Starke Diffusion, durch systematische Förderung etabliert sich die Elektromobilität insbesondere in urbanen Ballungszentren.

In diesem Modell wird zunächst basierend auf exogenen Prognosen zur Wirtschafts- und Bevölkerungsentwicklung, die Entwicklung der gesamten Pkw-Zahl in den entsprechenden Wirtschaftsregionen modelliert. Unter Berücksichtigung der Verschrottung von Altfahrzeugen und des jährlichen Flottenwachstums wird auf die zusätzlichen Pkw-Käufe geschlossen. Erst dann findet basierend auf Annahmen zu den Lebenszykluskosten der einzelnen Technologien (unter Berücksichtigung des Ölpreises und der Energiekosten) und politischen Förderprogrammen eine Zuordnung zu den jeweiligen Technologien statt. Die beiden zentralen Szenarien, die jeweils von einer schwachen Entwicklung alternativer Antriebe (Szenario 1), bei der nur Hybridfahrzeuge eine signifikante Marktdurchdringung erreichen und die übrigen Technologien (insbesondere reine

¹Die drei größten Wirtschaftsräume Nordamerika (USA + Kanada), EU, sowie das industrialisierte Ostasien (Japan, Taiwan, Südkorea, Hongkong, Singapur)

²Brasilien, Russland, Indien, China, Südafrika

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

batterieelektrische Fahrzeuge) nur ein Nischensegment bleiben und einer starken Diffusion der Elektromobilität ausweichen (Szenario 2) bei der auch batterieelektrische Fahrzeuge und Plug-in-Hybride erhebliche Marktanteile erreichen, sind in Abbildung 6.9 dargestellt. In beiden Fällen bleibt, wie zuvor beschrieben die Zahl der Pkw Käufe insgesamt identisch, lediglich die Antriebstechnologien unterscheiden sich. Die im Flottenmodell unterschiedenen Technologien sind in Abbildung 6.10 dargestellt.

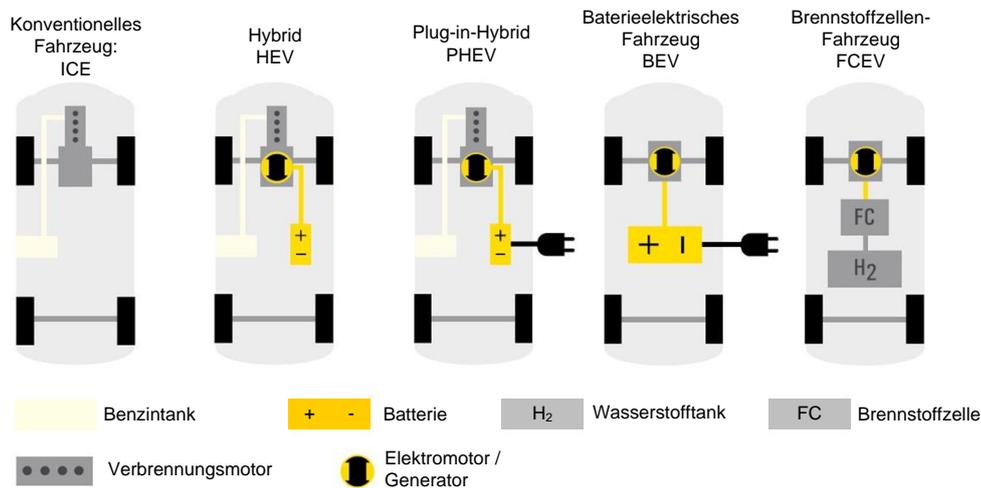


Abbildung 6.10. – Antriebskonzepte für Pkw (vergl. Spath et al., 2011) in der Form, wie sie in GloMo unterschieden werden (siehe auch Abbildung 6.9).

Da sich die in Abbildung 6.10 dargestellten Antriebskonzepte auch innerhalb der hier getroffenen Gruppierung unterscheiden, wird nachfolgend eine kurze Erläuterung zu den in “GloMo” berücksichtigten Technologien gegeben.

Konventionelle Verbrennungs-Motoren (Internal Combustion Engine ICE):

Abhängig vom verwendeten Brennstoff beinhaltet diese Kategorie alle Formen des Verbrennungsmotors von klassischen Otto- und Dieselmotoren bis hin zu Verbrennungsmotoren auf LPG (Liquified Petroleum Gas, oder Autogas) und CNG (Compressed Natural Gas) Basis. Dabei wird ein Luft-Brennstoff-Gemisch in einer Brennkammer gezündet und entfaltet dort kinetische Energie, welche den Zylinderkolben verdrängt. Dieser ist über eine Pleuelstange mit der Kurbelwelle verbunden und führt dort zu einer Rotationsbewegung, welche über ein Getriebe die Fahrzeugachsen antreibt. Durch die Energiedichte der eingesetzten Kraftstoffe ergeben sich hier sehr hohe Reichweiten der Fahrzeuge, was durch die globale Verbreitung von Tank-Infrastruktur ergänzt wird.

Hybridfahrzeuge (Hybrid Electric Vehicle HEV):

In der Gruppe der Hybridfahrzeuge gibt es mehrere Varianten, welche sich teils stark in ihrem Antriebskonzept unterscheiden. Nach der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) handelt es sich um einen Hybriden, wenn ein Fahrzeugantriebssystem mit mindestens zwei verschiedenen Energiewandlern und mit zwei verschiedenen im Fahrzeug verbauten Energiespeichersystemen ausgestattet ist (Chagnes und Pospiech, 2013). In der Regel gilt, dass hier neben dem klassischen Verbrennungsmotor auch ein Elektromotor verbaut ist, welcher durch eine Batterie gespeist wird. Unterschieden wird zwischen

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

Micro-, Mild-, und Full-Hybrid-Vehicles:

Der Micro-Hybrid-Antrieb ist als konventioneller Verbrennungsantrieb mit Start-Stopp-Automatik zu verstehen (automatische Motorabschaltung bei Fahrzeugstillstand) und hat lediglich eine etwas größere Autobatterie mit begrenzter Rekuperation der Bremsenergie, wodurch die Lichtmaschine ersetzt wird, was zusätzlich geringe Mengen an Kraftstoff spart. Mikrohybrid-Antriebe werden hier zu den ICE gezählt, da eine Kraftübertragung eines elektrischen Antriebs auf die Achsen nicht stattfindet.

Als Mild-Hybrids werden Fahrzeuge bezeichnet, deren elektrische Leistung vor allem dazu genutzt wird, den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen zu unterstützen und somit Kraftstoff einzusparen. Die Start-Stopp-Funktion wird hier durch eine bessere Bremsenergiezurückgewinnung ergänzt. Zusätzlich erhöht der Elektromotor durch rascheres Beschleunigungsverhalten die Fahrdynamik der Fahrzeuge (Simon und Weil, 2013, S.7). Mild-Hybrids sind Parallelhybride, d.h. beide Antriebe übertragen die Kraft auf die Kurbelwelle (Reif, 2010, S.15).

Full-Hybrids sind solche hybriden Fahrzeuge, welche durch einen stärkeren Elektromotor und einer meist größeren Batterie in der Lage sind auch längere Strecken rein elektrisch zurückzulegen. Während dieses Vorgangs ist der Verbrennungsmotor vom Antriebsstrang abgekoppelt (Reif, 2010, S.36). Wenn diese Fahrzeuge mit einem parallelen Energiefluss realisiert sind, trennt eine zweite Kupplung den Verbrennungsmotor beim rein elektrischen Fahren ab. Beim seriellen Hybrid ist der Verbrennungsmotor nicht mehr direkt mit dem Antriebsstrang verbunden; er treibt nur noch einen Generator an, welcher die Batterie lädt. Der primäre Antrieb ist hier der Elektromotor. Solche Fahrzeuge verfügen im Normalfall über eine Plug-In-Funktion und werden auch "Range Extender Electric Vehicle" (REEV) genannt (vergl. nachfolgenden Unterpunkt). Neben rein seriellen und parallelen Hybriden gibt es auch noch leistungsverzweigte Hybridantriebe, bei denen der Antrieb über ein Planetengetriebe gesteuert wird.

Plug-In-Hybride (Plug-In-Hybrid Electric Vehicle PHEV):

Plug-In Hybride sind die Weiterentwicklung der Vollhybridfahrzeuge. Im Vergleich ist die Kapazität des Akkumulators deutlich größer und sie können extern über einen Stecker (Plug) am Stromnetz geladen werden. Der Verbrennungsmotor ist also nicht mehr die einzige Quelle der im Fahrzeug umgesetzten Energie. Die Reichweite rein elektrisch gefahrener Strecken erhöht sich gegenüber HEVs deutlich und es kann bei Fahrtbeginn auf einen vollgeladenen Akkumulator zugegriffen werden. Auch hier kann der Antrieb durch die Kombination beider Motoren erfolgen, wobei der Elektromotor meist eine Leistung von mehr als 50 kW besitzt, da er öfter als alleiniger Antrieb dient (ADAC Fahrzeugtechnik, 2013). Die Bezeichnung "Range-Extender" wird auf verschiedene Hybridtypen angewandt. Teilweise sind serielle Hybride gemeint, deren Verbrennungsmotor nicht ausreicht, um dauerhaft auf Höchstgeschwindigkeit zu fahren. Teilweise werden aber auch batterieelektrische Fahrzeuge damit bezeichnet, bei denen der Verbrennungsmotor der Erweiterung der Fahrzeugreichweite dient. Sie besitzen daher auch noch einen zweiten Elektromotor, der als Generator dient. Die Hauptaufgabe des Verbrennungsmotors ist das Nachladen der Batterie bei kritischem Ladestand. Je nach Umsetzung kann er, wie auch der Generator, als zusätzlicher Antrieb eingesetzt werden (Reif, 2010, S.62 ff). Aus Gründen der Vereinfachung werden die REEV in der vorliegenden Arbeit zu den PHEV gerechnet.

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

Batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle BEV):

Ein BEV besitzt keinen Verbrennungsmotor und ist ausschließlich batteriebetrieben. Die Batterien können wie beim PHEV extern über das Stromnetz und über Rekuperation beim Bremsvorgang aufgeladen werden, wobei der Elektromotor als Generator dient. Im Vergleich zu Hybridfahrzeugen ist der Aufbau für diese Antriebsform verhältnismäßig einfach, da er nur die Komponenten Elektromotor, Batterie und Leistungselektronik besitzt und aufgrund des hohen Anfangsdrehmoments von Elektromotoren im Allgemeinen kein Getriebe notwendig ist (Wallentowitz und Freialdenhoven, 2011, S.73). Das Problem stellt die Energieversorgung durch den Akkumulator dar, wobei derzeit ausschließlich Lithium-Ionen-Batterien einen ausreichenden Energiespeicher zu wirtschaftlichen Kosten bereitstellen. Dennoch werden von den meisten gängigen Elektroautos derzeit lediglich Reichweiten von 100-300 km erreicht (vergl. z.B. ADAC Fahrzeugtechnik, 2013). Auch hier werden Elektromotoren mit Nennleistungen von meist mehr als 50 kW eingesetzt. Ein Vorteil gegenüber der Verwendung von Wasserstoff als Energieträger ist die bereits vorhandene und weit verbreitete Infrastruktur des Stromnetzes. Die Ladezeit der Batterie ist allerdings deutlich länger und insbesondere in urbanen Ballungszentren wären zusätzliche Ladestationen notwendig (vergl. z.B. Ketterer et al., 2009).

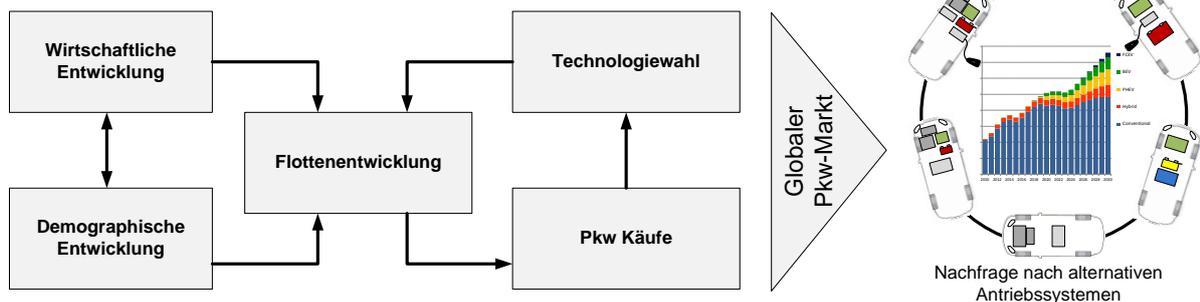
Brennstoffzellen-Fahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle FCEV):

Der Brennstoffzellenantrieb wird wie der batterieelektrische Antrieb in reinen Elektroautos verwendet. In der Brennstoffzelle, die analog zur Batterie als galvanisches Element fungiert, wird Elektrizität durch die chemische Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff erzeugt (Umkehrreaktion der Wasserstoff Elektrolyse). Neben dem Wasserstofftank besitzen Brennstoffzellenfahrzeuge zusätzlich eine kleine Batterie, die zur Abdeckung von Leistungsspitzen des Antriebes genutzt wird. Sie wird sowohl durch Bremsenergie als auch durch überschüssigen elektrischen Strom der Brennstoffzelle geladen, die so im optimalen Wirkungsgrad-Bereich betrieben werden kann. Auch sind durch die Kombination von Brennstoffzelle und Batterie gewisse Hybridkonzepte denkbar, wobei nur noch ein zentraler Elektro-Traktionsmotor benötigt würde. Das Hauptproblem bei dieser Technologie ist nach wie vor die sichere Speicherung des Wasserstoffs und die Schaffung einer breiten Tank-Infrastruktur. FCEVs werden erst nach 2020 Serienmäßig in den Markt eintreten (Wallentowitz und Freialdenhoven, 2011, S.80 ff.). Inwiefern sich diese grundsätzlich vielversprechende Technologie durchsetzt bleibt abzuwarten. Für den hier betrachteten Zeithorizont bis 2030 werden FCEV allerdings keine entscheidende Rolle spielen (vergl. Szenario 2 in Abbildung 6.9).

6.3.2. Prinzip der Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen

Durch Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen von Kobalt, bzw. Dysprosium lassen sich die Auswirkung der in Abbildung 6.9 dargestellten Szenarien zur Diffusion alternativer Antriebe auf die Rohstoffnachfrage und die Anpassungsreaktionen des Marktes auf potenzielle Rohstoffengpässe modellieren.

Global Mobility Model [GloMo]: Entwicklung der Automobilnachfrage unter besonderer Berücksichtigung alternativer Antriebssysteme



Rohstoffmodelle: Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebe auf die Rohstoffnachfrage unter Berücksichtigung des Gesamtmarktes

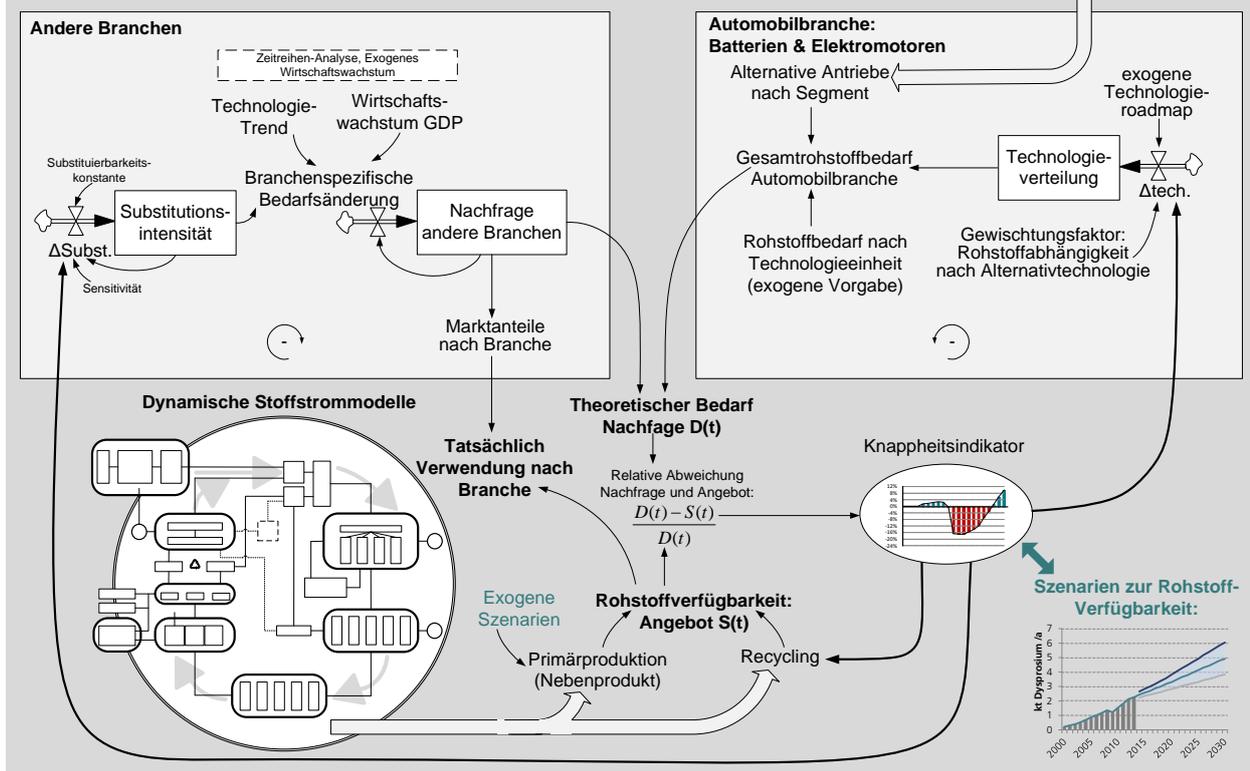


Abbildung 6.11. – Prinzip der Kopplung des Flottenmodells mit den Stoffstrommodellen unter Berücksichtigung von Anpassungsmechanismen.

Während sich die Primärproduktion von Kupfer als klassisches Industriemetal an die steigende Nachfrage anpasst, werden Kobalt sowie Dysprosium hauptsächlich, bzw. ausschließlich als Neben- und Kuppelpro-

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

dukte im Verbund mit anderen Metallen gewonnen, was die Anpassungsfähigkeit der Produktionsmengen stark einschränkt. Folglich ist eine unmittelbare Anpassung der Primärproduktion an eine steigende Nachfrage unrealistisch, da die Kobaltproduktion an die Entwicklung der Produktionsmengen von Kupfer und Nickel gebunden ist und Neodym und Dysprosium nur im Verbund mit anderen Seltenen Erden gewonnen werden, deren Nachfrage bei der Investitionsentscheidung in neue Bergbauaktivitäten ebenfalls eine große Rolle spielt. So sind bei einer Verknappung durch stark ansteigende Nachfrage sowohl für Kobalt als auch für die Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium verstärkt Anpassungseffekte in Form von Substitution zu erwarten. Dabei ist vor allem mit funktionalen Substitutionseffekten (vergl. Definitionen in Abschnitt 4.3) zu rechnen, d.h. es wird Rohstoff durch die verstärkte Verwendung von alternativen Technologien eingespart, die weniger, bzw. keine der betrachteten Metalle benötigen. Die technischen Hintergründe hierzu werden in den jeweiligen Abschnitten beschrieben.

Die Anpassungsmechanismen der Nachfrage, ausgehend von einem Knappheitsindikator, der sich aus der Differenz des Rohstoffangebots (primär- und sekundär) und der Nachfrage in den unterschiedlichen Anwendungsbereichen ergibt, sind in Abbildung 6.11 dargestellt. Im Modell werden den verschiedenen Anwendungsbereichen Substitutionsfähigkeiten in Form relativer Gewichtungsfaktoren zugeordnet. Kommt es aufgrund von starkem Rohstoffbedarf seitens alternativer Antriebstechnologien für Pkw zu einer Verknappung, wirken die negativen Rückkopplungsschleifen auf die Nachfrage in den jeweiligen Anwendungsbereichen. Insgesamt bleibt aber zu beachten, dass mit Hilfe des Modells lediglich qualitative Zusammenhänge quantifiziert werden und die Intensität der Anpassungseffekte durch die externen Gewichtungsfaktoren vorgegeben werden, die im Vergleich zu dynamischen Modellen im Bereich chemisch/physikalischer Systeme nicht durch entsprechende Versuche überprüft werden können. Folglich sind die Modelle, wie einleitend bereits erwähnt, eher als Werkzeug zur Darstellung grundsätzlicher Anpassungsmechanismen und zur Entwicklung realitätsnaher Szenarien zu verstehen und nicht als Modell allgemein gültiger Zusammenhänge wie sie im naturwissenschaftlich/technischen Bereich zu finden sind.

Während im Marktmodell für Kupfer (vergl. Abschnitt 6.2) noch tatsächliche Preise modelliert wurden, das Modell also auch zur Preisprognose basierend auf exogenem Wirtschaftswachstum herangezogen werden kann, wird hier lediglich ein "Knappheitsindikator" modelliert, der zwar ähnliche Anpassungsmechanismen wie der Preis hervorruft, dennoch nicht zur Preisprognose fungiert. Dies liegt vor allem daran, dass gewisse Anpassungsmechanismen an den relativ überschaubaren Märkten von Technologiemetallen bereits stattfinden, bevor es zu einer tatsächlichen Verknappung kommt, was den Preis treiben würde. So ist z.B. zu erwarten, dass bei drohender Knappheit aufgrund von starkem Nachfragewachstum frühzeitig auf alternative Technologien gesetzt wird. Weiterhin reagieren die Preise dieser Metalle häufig sehr sensitiv auf exogene Einflüsse (vergl. z.B. Abschnitt 3.1.6), was mit dem hier vorgestellten Modell kaum berücksichtigt werden kann. So erscheint es sinnvoll, allgemein von einer Rohstoffknappheit und nicht direkt von Rohstoffpreisen zu sprechen.

6.3.3. Kopplung von “GloMo” mit dem globalen Kobaltmodell

Zunächst wird die Auswirkung der Diffusion alternativer Antriebe auf den Kobaltmarkt untersucht. Dabei ist Kobalt aufgrund seiner Verwendung als Kathodenmaterial in Li-Ionen-Batterien ein Schlüsselrohstoff für die Elektromobilität. Während im Bereich der Konsumelektronik (Mobiltelefone, Smartphones, Tablets etc.) nach wie vor in erster Linie reine CoO_2 -Kathoden (Kobaltoxid) verwendet werden, werden aus Sicherheits- und Kostengründen im Bereich der größeren Auto-Akkumulatoren, aber auch für sonstige industrielle Anwendungen (z.B. batteriebetriebene Maschinen, elektrische Stapler etc.) verschiedene Mischkathoden verwendet. Die derzeit führende Technologie ist dabei die NMC-Kathode (Nickel-Mangan-Kobalt), wobei zahlreiche Alternativen bis hin zu kobaltlosen Eisen-Phosphat-Kathoden (LFP) existieren. Die gängigen Materialien werden nachfolgend vorgestellt.

6.3.4. Kobalt als Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien

Eine der größten Herausforderungen für die Diffusion der Elektromobilität ist die Sicherung einer möglichst großen Reichweite, d.h. die Verfügbarkeit von Batteriesystemen mit entsprechend hohen Speicherkapazitäten und Energiedichten. Die hierfür zentrale Batterietechnologie ist derzeit der Li-Ionen-Akku, der unter den chemischen Energiespeichern die höchsten Energie- und Leistungsdichten erreicht (vergl. Abbildung 6.13a). Der grundlegende Aufbau einer Li-Ionen-Zelle ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

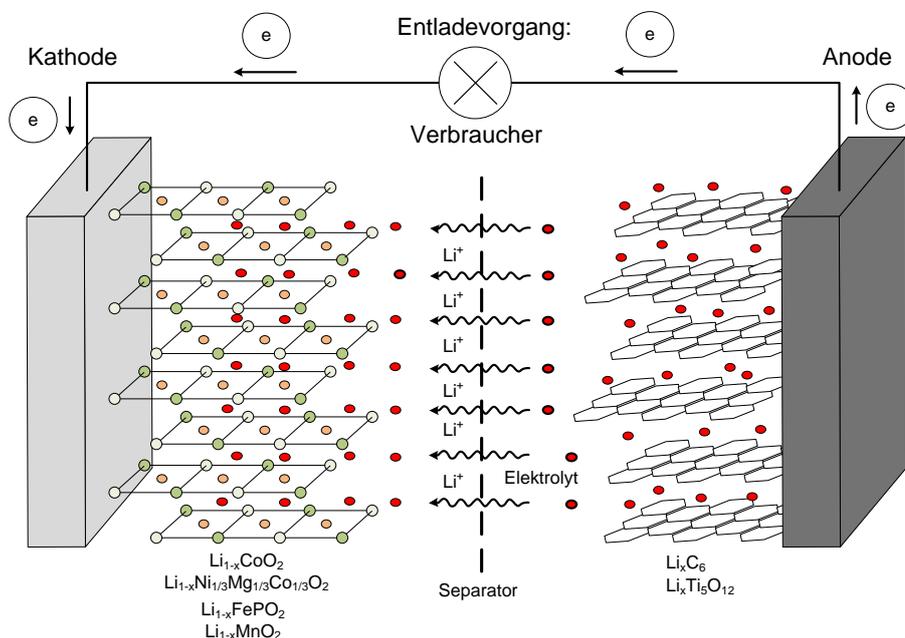


Abbildung 6.12. – Funktionsprinzip einer Li-Ionen-Zelle beim Entladevorgang (vergl. z.B. Ketterer et al., 2009): Die Anode (Ort der Oxidation) gibt Lithium-Ionen ab, die über die Elektrolytlösung durch den Separator diffundieren und an der Kathode (Ort der Reduktion) wieder eingelagert werden. Während das Anodenmaterial meist aus Graphit besteht, werden hinsichtlich der Kathoden verschiedene Materialien und Kristallstrukturen verwendet (vergl. Abbildung 6.13).

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

Dabei werden bei der Entladung Li-Kationen von der Anode an das Elektrolyt abgegeben, wobei Elektronen freigesetzt werden, und elektrischer Strom generiert wird. An der Kathode werden die Li-Kationen wieder zu Li reduziert und in die Gitterstruktur eingelagert.

Bei den Kathodenmaterialien handelt es sich um Stoffe, bei denen Lithium-Ionen ein- und ausgebaut werden können, ohne dass es zu einer strukturellen Schädigung des Kristallgitters kommt. Kommerziell wurde seit der Einführung der Lithium-Akkumulatoren bis ca. 2005 ausschließlich Lithium-Kobaltoxid (LiCoO_2) eingesetzt (vergl. auch Abbildung 6.15). Inzwischen sind jedoch eine Reihe weiterer Kathodenmaterialien im Einsatz, die entweder erhöhten Energiedichten, Sicherheitsaspekten oder verbesserter Stabilität Rechnung tragen. Verschiedene gängige Kathodenmaterialien, sowie ihr elektrisches Potenzial sind in Abbildung 6.13b dargestellt.

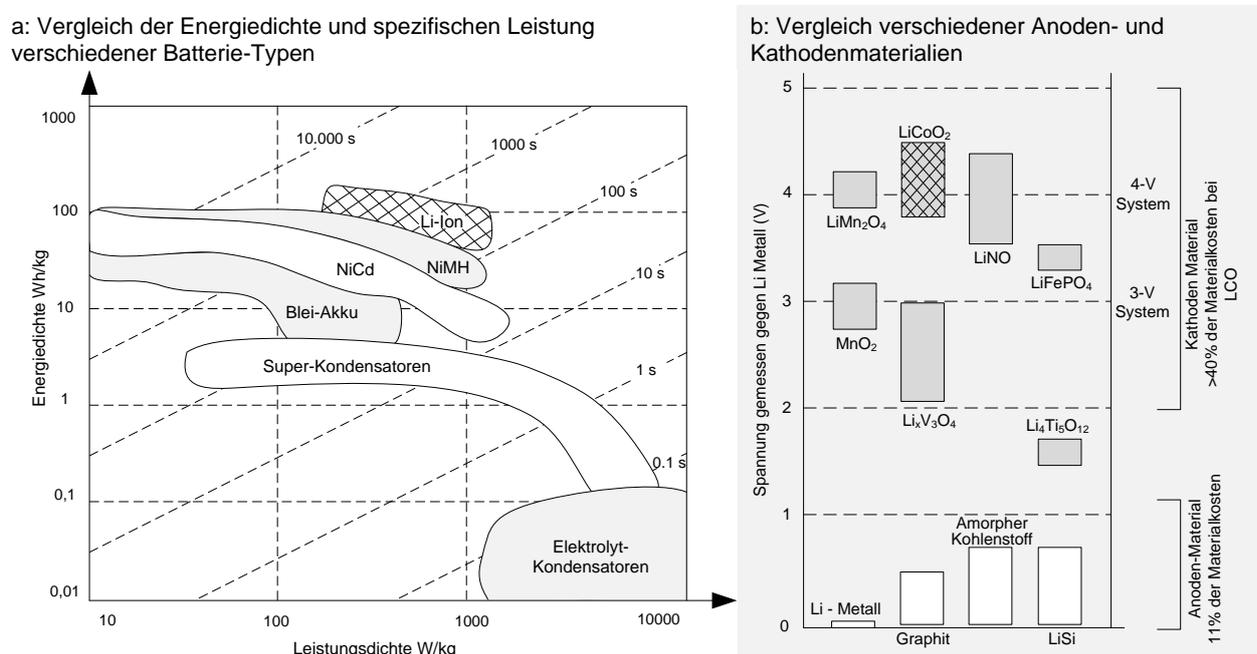


Abbildung 6.13. – Vergleich verschiedener Batterietechnologien:
a: Leistungs- und Energiedichte von Li-Ionen-Batterien im Vergleich zu anderen Batteriesystemen (bzw. Kondensatoren). Li-Ionen-Batterien weisen die höchsten Werte hinsichtlich der für die Elektromobilität entscheidenden Energiedichte [kWh/kg] auf.
b: Vergleich verschiedener Kathoden- bzw. Anodenmaterialien. Die resultierende Zellspannung ergibt sich aus der Differenz des elektrischen Potentials von Kathode und Anode.

In der Praxis werden häufig Mischkathoden, d.h. ein Verschnitt aus verschiedenen Materialien verwendet. Die heute und in den kommenden Jahren relevanten Kathodenmaterialien, sowie die jeweils benötigten Mengen an Kobalt pro kWh Speicherkapazität sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Die Forschung im Bereich der Speichertechnologien arbeitet an einer ständigen Verbesserung bisheriger Konzepte und Materialien, aber auch an der Entwicklung völlig neuer Ansätze, wie z.B. der Lithium-Luft-Batterie, bei der Lithium mit Sauerstoff reagiert, wodurch die Zellen leichter, also mit weit höheren Energiedichten realisiert werden könnten. Es wird allerdings von Experten davon ausgegangen, dass Mischme-

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

Tabelle 6.1. – Spezifische Eigenschaften und Kobalt-Materialgehalt der verschiedenen Kathodenmaterialien. Die Berechnung der Kobaltmenge erfolgte aus der theoretischen Energiedichte des jeweiligen Kathodenmaterials und des molaren Massenanteils unter Berücksichtigung der “Auslagerungseffizienz” der Li-Ionen (vergl. Neumann, 2011). Weiterhin wurden die Angaben mit Literaturwerten verglichen (Graf, 2013; Reuter et al., 2013a; Konietzko und Gernuks, 2011). Zwar enthalten reine $LiMnO_2$ Kathoden kein Kobalt, in der Praxis werden diese allerdings aus Gründen höherer Stabilität meist mit geringen Mengen an $LiCoO_2$ verschnitten, wodurch auch bei dieser Technologie ein geringer Kobaltanteil zustande kommt (vergl. Simon und Weil, 2013). Die hier berechnete Energiedichte als Produkt aus spezifischer Kapazität und mittlerer Spannung ist ein rein theoretischer Wert, der weit höher liegt als die tatsächlich erreichte Energiedichte (vergl. Abbildung 6.13).

Material	spezifische Kapazität [Ah/kg]	mittlere Spannung [V]	theoretische Energiedichte [Wh/kg]	Massenanteil Kobalt [kg/kWh]
LCO, Lithium-Kobaltoxid ($LiCoO_2$)	155	3,9	604	1,1
LFP, Lithium-Eisenphosphat ($LiFePO_4$)	140	3,5	490	0
LMO, Lithium-Manganoxid ($LiMn_2O_4$)	140	4,0	560	0,07
NCA, Nickel-Kobalt-Aluminiumoxid ($LiNi_{0,8}Co_{0,15}Al_{0,05}O_2$)	181	4,2	760	0,17
NMC, Nickel-Mangan-Kobaltoxid ($LiNi_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3}O_2$)	160	4,0	640	0,40
LMP, Lithium-Manganphosphat ($LiMnPO_4$)	150	4,3	645	0
LCP, Lithium-Kobaltphosphat ($LiCoPO_4$)	130	5,0	650	0,63

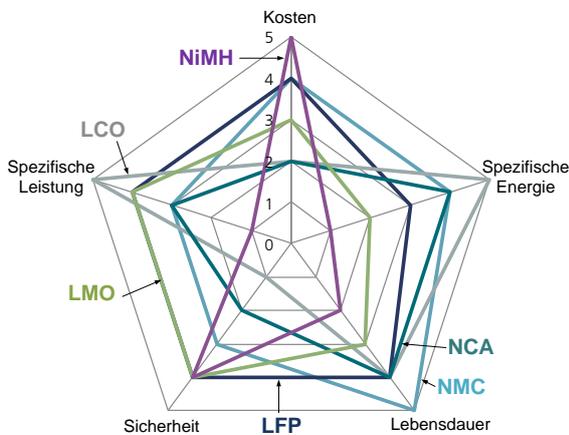
tallkathoden in den kommenden zehn Jahren den Markt von Lithium-Ionen-Batterien dominieren werden und neue Konzepte wie die Lithium-Luft-Batterie aufgrund anhaltender technischer Probleme erst frühestens ab 2025 eine Marktreife erreicht haben könnten (Thielmann et al., 2012). Dennoch wird sich die Tendenz, Kobalt durch andere Metalle zu substituieren, fortsetzen (Ketterer et al., 2009). So werden derzeit NMC-Kathoden erprobt, die nur noch einen Anteil von 20% Kobalt enthalten (bezogen auf die molare Zusammensetzung, vergl. Abbildung 6.14 b). So kann der Kobaltbedarf pro kWh Speicherkapazität in NMC Kathoden auf bis zu 240 g reduziert werden (Dunn et al., 2012, diese Entwicklung wird für die Materialverbräuche in der anschließenden Modellierung berücksichtigt). Die aktuell häufig zu findende Bezeichnung der Li-Polymerbatterie bezieht sich auf den Elektrolyten und hat mit der Zelltechnologie, insbesondere den Kathodenmaterialien nichts zu tun (Neumann, 2011).

Die qualitativen Vor- und Nachteile verschiedener Kathodenmaterialien sind in Abbildung 6.14 zusammengefasst. Da Stabilität und Energiedichte wichtige Eigenschaften für Batterien in Elektrofahrzeugen darstellen, sind NMC Kathoden die derzeit dominierende Technologie im Bereich der Elektromobilität (vergl. z.B. Pillot, 2013). Aufgrund der niedrigeren Materialkosten und der höheren Sicherheit ist in Zukunft auch mit einer stärkeren Verwendung von Eisen-Phosphat-Kathoden (LFP) zu rechnen. Derzeit spielt diese Technologie allerdings noch eine untergeordnete Rolle und die niedrigere Energiedichte und Stabilität (was sich auch auf die Lebensdauer der Batterie auswirkt) bilden klare Nachteile gegenüber NMC Kathoden.

Die derzeitigen Marktanteile der jeweiligen Kathodentechnologien und potenzielle zukünftige Entwicklungen basierend auf den zuvor vorgestellten Szenarien zur Entwicklung der Elektromobilität werden nachfolgend mit Hilfe des systemdynamischen Modells analysiert.

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

a: Performanz einzelner Li-Ionen Technologien



b: Erwartete Entwicklungen bezüglich des Kobalt-Gehalts in NMC Mischkathoden

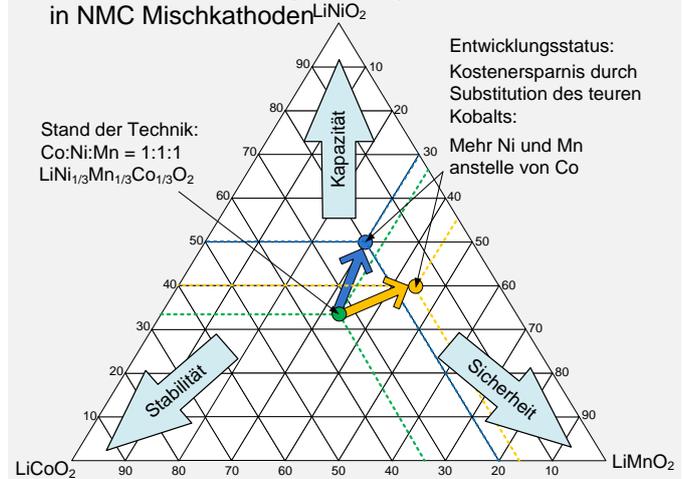


Abbildung 6.14. – Vergleich unterschiedlicher Kathodenmaterialien.

a: Qualitative Bewertung einzelner Technologien im Vergleich (vergl. z.B. Novinsky et al., 2014, siehe auch Tabelle A.7 im Anhang). Für Abkürzungen siehe Tabelle 6.1, Nickel-Metallhydrid-Batterien (NMH) basieren nicht auf der Li-Ionen-Technologie und gelten aufgrund der geringeren Energiedichte in Zukunft als wenig relevant für die Elektromobilität. b: Zu erwartende Entwicklung bei NMC Kathoden in Richtung einer stärkeren Substitution von Kobalt (Angaben basieren auf Ketterer et al., 2009).

Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebe auf die Kobaltnachfrage

Basierend auf den in Tabelle 6.1 aufgezeigten Kobaltgehalten und aktuellen Angaben zur Marktverteilung der einzelnen Kathodentechnologien im Bereich der Elektromobilität (vergl. Pillot, 2013, siehe auch Abbildung 6.15) werden verschiedene Szenarien zur Entwicklung des Kobaltmarktes dargestellt. Dabei wird nachfrageseitig die Elektromobilität als Wachstumstreiber gesehen und auf Seiten der zukünftigen Primärproduktion von Kobalt wird zwischen einer schwachen Angebotsentwicklung (lineare Trendfortschreibung) und einer stärkeren Angebotsentwicklung (polynomische Trendfortschreibung) unterschieden (vergl. Abbildung 6.1). Die Annahmen zu Batteriekapazitäten nach Fahrzeugsegment sind in Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.2. – In den Modellen angesetzte Batteriekapazitäten nach Antriebskonzept und Fahrzeugsegment. Annahmen basieren auf aktuellen Herstellerangaben, siehe insbesondere (ADAC Fahrzeugtechnik, 2013). Vor allem bei Plug-in-Hybriden kommt es aufgrund der unterschiedlichen Konzepte zu großen Schwankungen hinsichtlich der Batteriekapazitäten. Hier wurden grobe Mittelwerte angesetzt.

Antriebstechnologie / Fahrzeugsegment	ICE (Verbrennungsmotor)	Hybrid	PHEV (Plug-in-Hybrid)	BEV (batterieelektrische Fahrzeuge)
Kleinwagen	–	1,5 kWh	10 kWh	15 kWh
Kompaktklasse	–	1,5 kWh	10 kWh	25 kWh
Mittelklasse	–	2 kWh	15 kWh	35 kWh
Oberklasse	–	3 kWh	25 kWh	75 kWh

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

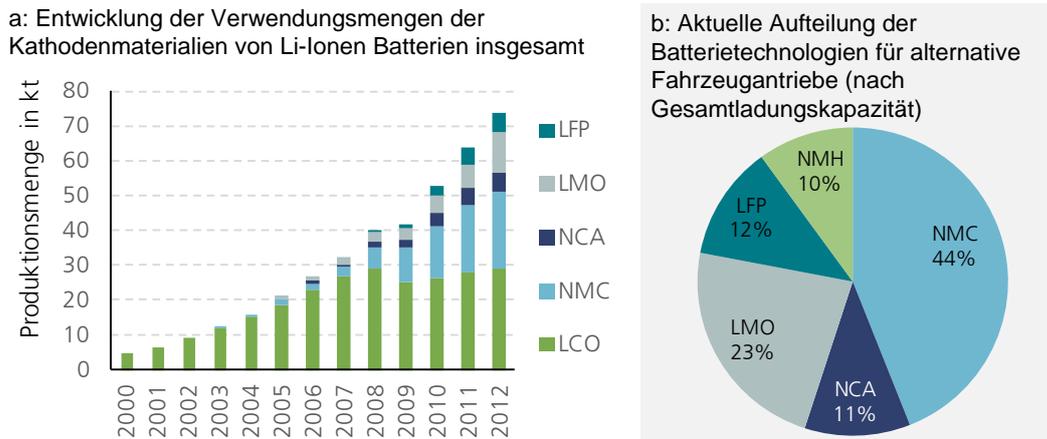


Abbildung 6.15. – Marktanteile der jeweiligen Kathodentechnologien nach Pillot (2013).
a: Produktionsmengen an Kathoden für Li-Ionen-Batterien insgesamt.
b: Anteile einzelner Kathodentechnologien im Pkw Markt (für Abkürzungen siehe Tabelle 6.1).

Die geschätzte Entwicklung der anderen Anwendungsbereiche von Kobalt basiert auf erwarteter Entwicklung der Weltwirtschaft sowie auf einer Fortschreibung vergangener Wachstumsraten³. Wie bereits zuvor erläutert, wird aufgrund der Tatsache, dass Kobalt hauptsächlich als Nebenprodukt gewonnen wird, nicht davon ausgegangen, dass sich das Angebot unmittelbar an eine unerwartet stark steigende Nachfrage anpasst, sondern vielmehr nachfrageseitige Anpassungsmechanismen stattfinden. Dabei ist allerdings davon auszugehen, dass im metallurgischen Bereich wenig Substitutionspotenzial besteht und Kobalt mit verhältnismäßig geringen Mengenanteilen in den Hartmetallen und Superlegierungen vorkommt, wodurch diese Bereiche auch höhere Preise verkraften könnten. Lediglich im Bereich der Magnetlegierungen scheint eine Materialsubstitution von AlNiCo-Magneten durch z.B. Ferrite möglich. Eine allmähliche Substitution von reinen CoO_2 -Kathoden durch NMC-Kathoden mit verringertem Kobaltanteil im Bereich größerer Akkus für Elektronikanwendungen (Laptops, Werkzeuge etc.) erscheint aufgrund des hohen Preises für Kobalt auf Dauer naheliegend und lässt sich in jüngster Vergangenheit bereits beobachten (vergl. Pillot, 2013). Eine Fortschreibung dieser Entwicklung wurde durch abnehmende zukünftige Wachstumsraten der Kobaltnachfrage für Li-Ionen-Akkus in Elektronikanwendungen berücksichtigt. Hier würden neue Potenziale für eine verstärkte Nachfrage seitens der Elektromobilität geschaffen werden. Auch im Bereich der chemischen Verarbeitung von Kobalt sowie der Verwendung von Kobalt als Katalysator ist nicht von einer verstärkten Substitution auszugehen, da auch hier die Preissensitivität aufgrund des minimalen Beitrags des Kobaltpreises zu den Produktionskosten sehr gering ist. Die Kombinationen der einzelnen Angebots- und Nachfrageszenarien und die simulierten Marktanpassungsmechanismen sowie der Knappheitsindikator (Abweichung Nachfrage und Angebot) für Kobalt sind in den Abbildung 6.16 bis 6.19 zusammengefasst. Dabei wird zunächst von einer starken Angebotsentwicklung von Kobalt ausgegangen (vergl. Abbildung 6.1b).

³Hier wurde eine einfache lineare Regression basierend auf historischen Wachstumsraten angesetzt: $Wachstum_{Tech} = k * Wachstum_{GDP}$, wobei die Abweichung zwischen modellierten und tatsächlichen historischen Werten über die Zeit minimiert wurde

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

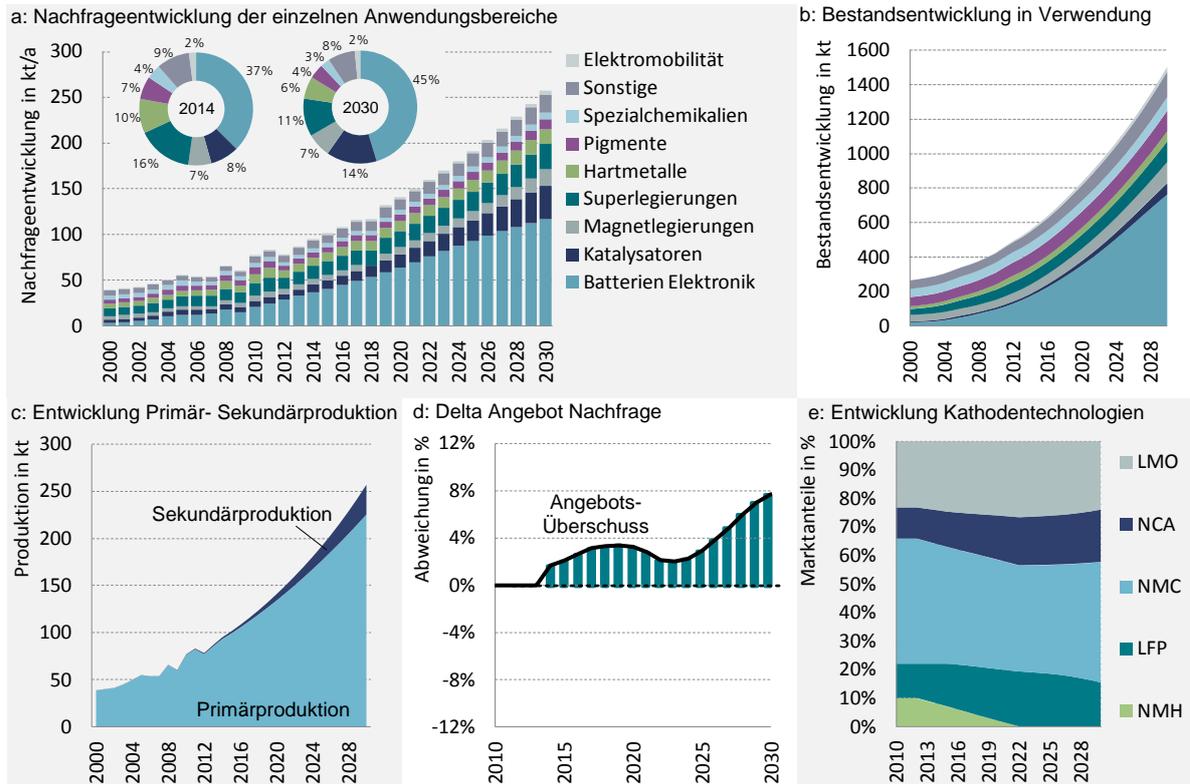


Abbildung 16. – Szenario starke Angebotsentwicklung, schwache Diffusion alternativer Antriebe.

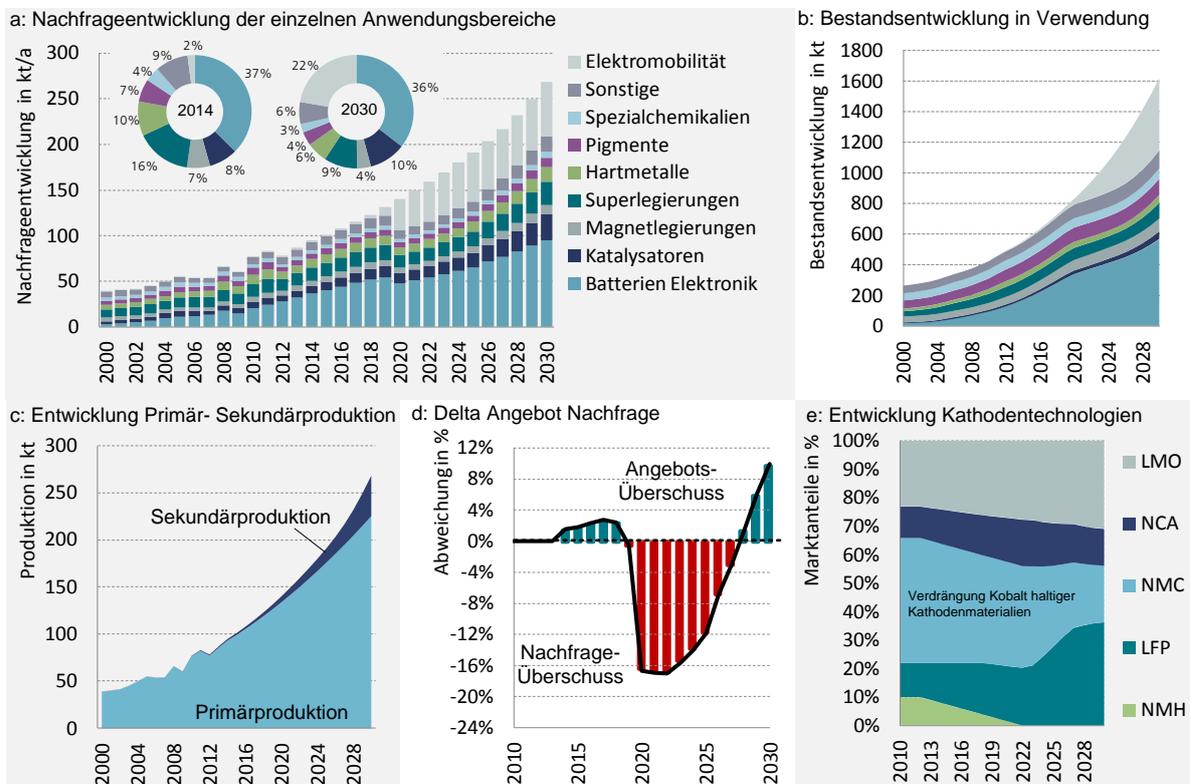


Abbildung 17. – Szenario starke Angebotsentwicklung, starke Diffusion alternativer Antriebe.

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

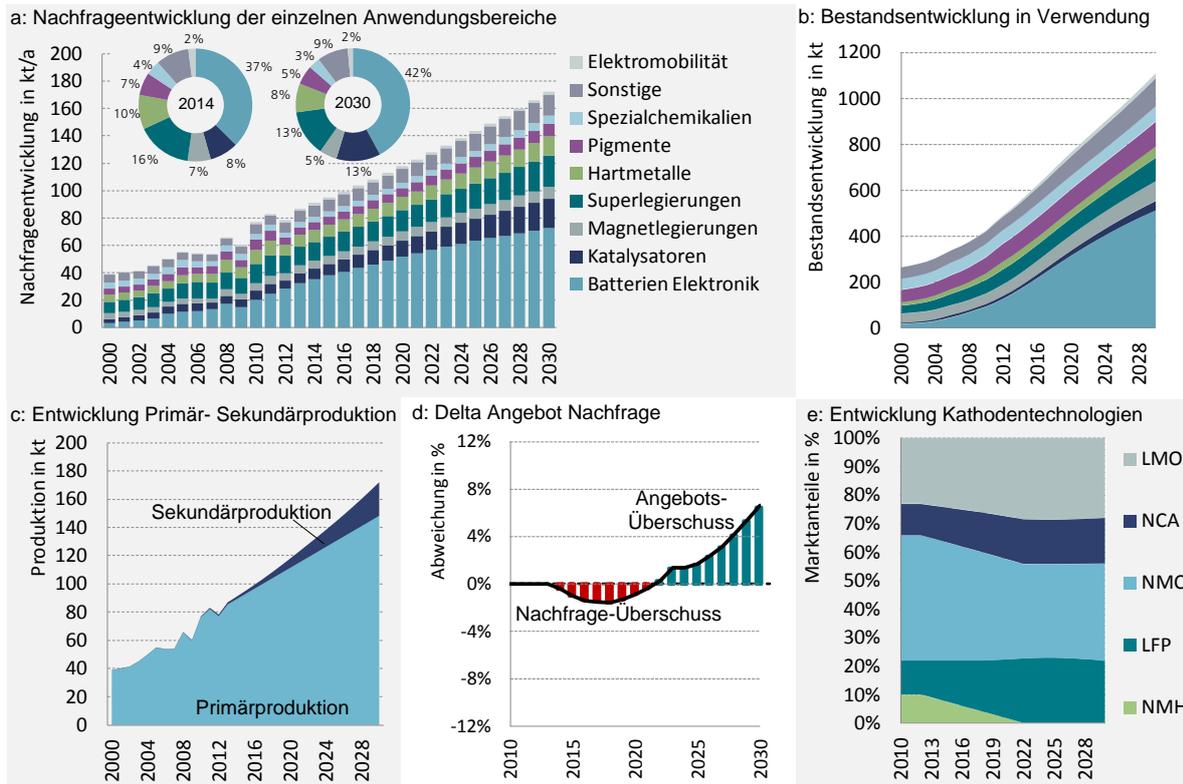


Abbildung 6.18. – Szenario schwache Angebotsentwicklung, schwache Diffusion alternativer Antriebe.

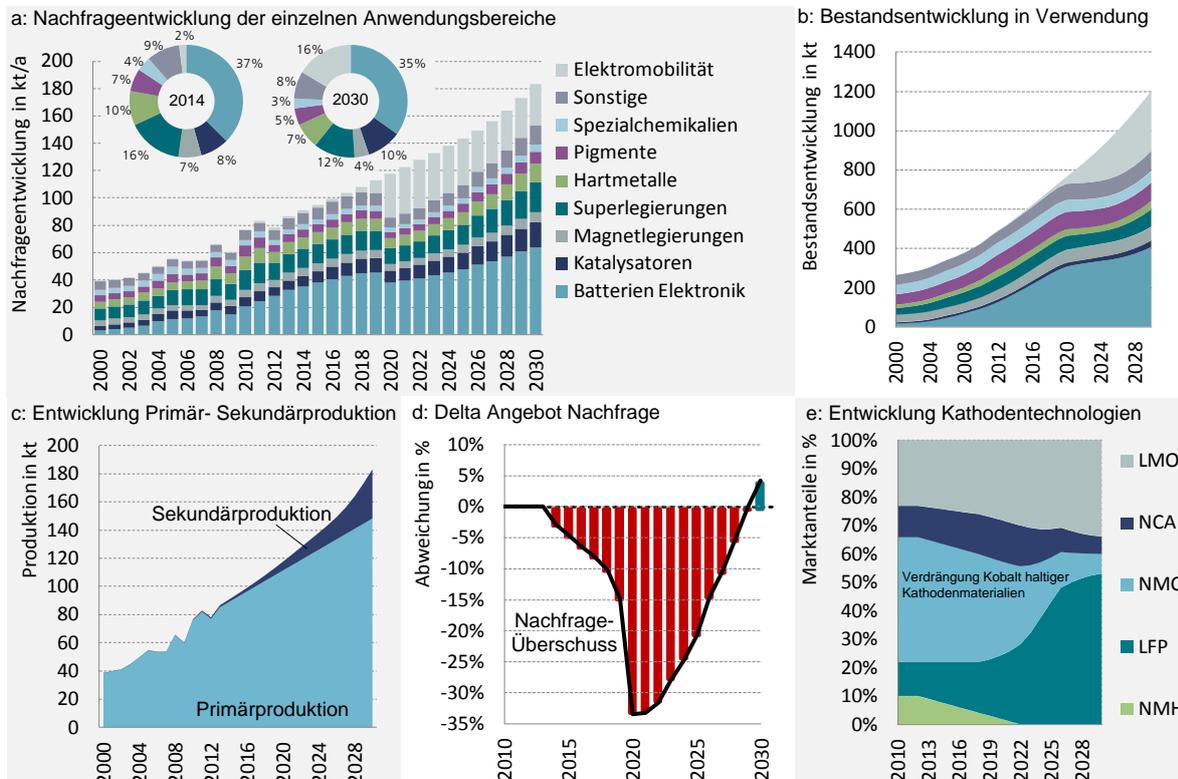


Abbildung 6.19. – Szenario schwache Angebotsentwicklung, starke Diffusion alternativer Antriebe.

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

Wie in den Abbildungen 6.16 und 6.18 dargestellt, ist wegen des weit höheren Bedarfs an Speichkapazitäten von reinen batterieelektrischen Fahrzeugen im Vergleich zu Hybridfahrzeugen (vergl. Tabelle 6.2) im Szenario 1 (Abbildung 6.9) aufgrund des geringen Impulses seitens der von Hybridfahrzeugen dominierten alternativen Antriebe auch im Falle einer schwachen Angebotsentwicklung nicht von einer erheblichen Knappheit von Kobalt auszugehen. Lediglich im Falle einer starken Diffusion der Elektromobilität (Szenario 2 in Abbildung 6.9) ist ein erheblicher Druck auf den Kobaltmarkt zu erwarten, der dazu führt, dass auch im Bereich der Kathodentechnologien systematisch die kobalthaltigen Technologien (NMC und NCA) verdrängt werden und trotz der geringeren Energiedichte ein vermehrter Einsatz der Eisenphosphat-Kathoden (LFP) zu erwarten ist (siehe Abbildung 6.17 und insbesondere Abbildung 6.19).

Zusammenfassend konnte hier gezeigt werden, dass lediglich aufgrund einer starken Verbreitung von reinen batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), bzw. Plug-in-Hybriden (PHEV) mit einer Spannung am Kobaltmarkt aufgrund des steigenden Batteriebedarfs zu rechnen ist. Die Verbreitung von Hybridfahrzeugen hat wegen der weit kleiner dimensionierten Batterien nur geringe Effekte auf die Nachfrage nach Kobalt als Rohstoff für die Kathodenherstellung. Da allerdings insbesondere führende Hersteller aus Japan, Europa und den USA aufgrund der höheren Energiedichte und des besseren Ladeverhaltens auf NMC-Kathoden setzen (Pillot, 2013; ADAC Fahrzeugtechnik, 2013), bleibt Kobalt ein kritischer Rohstoff für die Elektromobilität. Dabei ist vor allem zu berücksichtigen, dass auch im Falle einer zunächst ausreichenden Verfügbarkeit von Kobalt die hohe Konzentration der Produktion auf die Demokratische Republik Kongo (vergl. Abbildung 5.16) eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Versorgungsstörungen mit sich bringt.

6.3.5. Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe für Traktionsmotoren

Neben dem Speichersystem der elektrischen Energie und der Leistungssteuerung bildet der Elektromotor das zentrale technische Element der Elektromobilität. Da insbesondere bei mobilen Anwendungen die Leistungsdichte, d.h. eine möglichst hohe Motorleistung bei geringem Gewicht und Volumen, eine entscheidende Rolle spielt, sind in diesem Bereich Synchronmotoren mit Permanentmagneten zur Optimierung der Energieeffizienz und der Fahrzeugreichweite besonders entscheidend. Daher hängt die Diffusion alternativer Antriebskonzepte im Automobilbereich auch von der Verfügbarkeit von Neodym und insbesondere von Dysprosium als Magnetwerkstoffe ab. Während Neodym als dritthäufigstes Seltenerd-Element (vergl. Abbildung 5.26) aufgrund der kontinuierlich steigenden Nachfrage nach NdFeB-Magneten in Zukunft als der Wachstumstreiber der Seltenerd-Förderung gilt (Alonso et al., 2012a) und auch außerhalb Chinas in größeren Mengen gefördert wird (vergl. Abbildung 5.27), beschränkt sich die Gewinnung von Dysprosium als Teil der schweren Seltenen Erden nahezu vollständig auf China (vergl. Abbildung 5.28). Da zahlreiche Lagerstätten Seltener Erden auf Monazit- und Bastnäsit-Erzen basieren, die nur geringe Teile schwerer Seltener Erden enthalten, wird die Versorgungssituation mit schweren Seltenen Erden als besonders kritisch eingestuft, was sich auch in der aktuellen Studie der EU zu kritischen Rohstoffen widerspiegelt (vergl. Abschnitt 2.3.1, oder European Commission, 2014). Da Dysprosium für die Sicherung der Temperaturbeständigkeit und den Schutz vor Entmagnetisierung durch externe Magnetfelder unerlässlicher Bestandteil der für die Elektromobilität benötigten NdFeB-Magnete ist (vergl. hierzu Abschnitt 5.5.1), gleichzeitig aber nur in beschränkter Menge zur Verfügung steht, gilt Dysprosium als besonders kritischer Rohstoff für die Elektromobilität. Daher werden in der folgenden Analyse verschiedene Szenarien hinsichtlich der Nachfrageentwicklung nach Dysprosium untersucht. Insgesamt wird bei dieser Analyse davon ausgegangen, dass sich die Primärproduktion des Kuppelprodukts Dysprosium, das nur einen Bruchteil des Produktionsspektrums Seltener Erden ausmacht, nicht unmittelbar an eine steigende Nachfrage anpassen wird, solange keine klare Bedarfssteigerung der übrigen Elemente zu verzeichnen ist. Daher ist eher zu vermuten, dass sich die Nachfrage an die veränderte Verfügbarkeit anpasst und Bereiche, in denen substituiert werden kann (stofflich, materiell oder funktional), systematisch aus dem Markt gedrängt werden. Die Rückkopplungseffekte innerhalb des System Dynamics Modells ermöglichen eine Untersuchung der Auswirkung potenzieller Versorgungsengpässe auf die Marktanteile der verschiedenen Anwendungsbereiche. Dabei werden verschiedene Substitutionspotenziale, aber auch die Auswirkungen zu erwartender Effizienzsteigerungen bezüglich der benötigten Dysprosium-Menge untersucht und verglichen.

Substitution, Effizienz und Recycling von NdFeB-Magneten

Zur Reduzierung des Bedarfs an Neodym und insbesondere an Dysprosium kommen sowohl Maßnahmen zur Effizienzsteigerung, also auch verschiedene Substitutionspotenziale in Betracht. Diese sind allerdings vom jeweiligen Anwendungsbereich abhängig und werden nachfolgend näher betrachtet. Weiterhin findet zwar bisher kein Recycling von NdFeB-Magneten statt, was auch auf die Menge an Kleinstmotoren aus dem Elektronikbereich im heutigen Schrottaufkommen zurückzuführen ist (vergl. Kapitel 5.5.2), dennoch

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

ist davon auszugehen, dass in Zukunft insbesondere bei größeren Magneten in Industriemotoren, Traktionsmotoren und Windgeneratoren ein Recycling der Magnetlegierungen, bzw. eine Rückgewinnung von Neodym und Dysprosium erfolgt. Sowohl Verfahren zur Reduzierung der Dysprosium-Mengen in NdFeB-Magneten (Wehrspohn, 2014) als auch Recyclingverfahren für NdFeB-Magnete (Elwert und Goldmann, 2014; Bast et al., 2014) werden derzeit entwickelt und erprobt.

Steigerung der Rohstoffeffizienz

Während die Magnetstärke von NdFeB-Magneten bereits nahe am technischen Limit ist und daher nur noch geringfügiges Verbesserungspotenzial erwartet wird (Westphal und Kuchta, 2013), wird derzeit vor allem versucht, die Menge an benötigtem Dysprosium bei gleichbleibenden Magneteigenschaften zu reduzieren, d.h. Magnete mit vergleichbarer Koerzitivfeldstärke, aber weniger Dysprosiumgehalt herzustellen. Verschiedene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten werden derzeit unternommen, um eine Leistungssteigerung der Magnete bei gleichzeitiger Reduktion des Dysprosiumanteils zu erreichen (Schüler et al., 2011, S.97 ff.). Das Fraunhofer-Leitprojekt zur "Kritikalität Seltener Erden" untersucht Möglichkeiten, den benötigten Anteil an Dysprosium weiter zu reduzieren (Wehrspohn, 2014). Dabei sind die folgenden Ansätze vielversprechend (siehe auch Weickhmann, 2013):

- **Net-Shape-Production:** Mit diesem Metallpulverspritzguss-Verfahren können die Magnete direkt in ihrer finalen Form angefertigt werden. Eine Nachbearbeitung durch Abnehmen überschüssigen Materials entfällt und entsprechend viel Magnetwerkstoff kann eingespart werden. Dieses Verfahren bezieht sich auf die Reduzierung von Produktionsrückständen durch die direkte endformnahe Magnetfertigung.
- **Dysprosium-Layer-Technology:** Durch gezielte Aufkonzentrierung des Dysprosiums an den Korngrenzen sind im Rest des Magnetmaterials geringe Konzentrationen ausreichend. Durch dieses Verfahren zum lokalen Einbringen von Dy in den Korngrenzenbereich lassen sich bis zu 20 % Dysprosium bei gleichbleibenden Magneteigenschaften einsparen.
- **Grain-Size-Tuning Technology:** Durch die Kornfeinung lässt sich zunächst die Koerzitivfeldstärke optimieren. Über spezielle Press- und Sinterverfahren können nanoskalige Materialgefüge mit reduziertem Dysprosiumgehalt (bis zu 50 %) bei konstanten Magneteigenschaften hergestellt werden.

Eine weitere Reduzierung von Dysprosium im Magnetmaterial kann durch eine optimierte Auslegung des Elektromotors erreicht werden. Effizientere Kühlung und verbesserte Auslegung reduzieren die Betriebstemperatur, die den Einsatz von Dysprosium erst notwendig macht. Entsprechende Effizienzsteigerungen hinsichtlich der benötigten Dysprosiummengen werden in den verschiedenen Szenarien berücksichtigt (vergl. Abschnitt 6.3.5). Während diese Ansätze eher in den Bereich der Effizienzsteigerung, d.h. gleichbleibende Materialeigenschaften bei niedrigerem Ressourcenverbrauch fallen, werden nachfolgend die verschiedenen Möglichkeiten der Substitution betrachtet.

Substitution

Wie in Kapitel 4.3 bereits erläutert, ist bezüglich der Substitution von Rohstoffen zwischen der stofflichen Substitution (ein Element ersetzt ein anderes), der Material-Substitution (eine neues Materialsystem mit ähnlichen Eigenschaften wird verwendet) und der funktionalen Substitution (eine alternative Technologie identischer Funktion wird verwendet) zu unterscheiden (vergl. z.B. auch Ziemann und Schebek, 2010). Für die Substitution von NdFeB-Magneten und damit von Neodym und Dysprosium erscheint die funktionale Substitution durch Verwendung von alternativen Motor- und Generatorkonzepten in den meisten Bereichen als die aussichtsreichste Substitutionsform, obwohl dadurch gewisse Effizienzeinbußen unvermeidbar werden. Zwar kann Neodym durch Praseodym ergänzt werden (meist als "Didymium" im Verhältnis 5:1, vergl. Abschnitt 5.5.1) und Dysprosium theoretisch durch Terbium ersetzt werden (vergl. z.B. Schüler et al., 2011, S.97), die Substitution von Seltenerd-Elementen untereinander löst allerdings die Rohstoffproblematik nicht. Auch die Materialsubstitution ist problematisch, da alternative Magnetwerkstoffe wie Ferrite oder AlNiCo-Magnete weitaus niedrigere Magnetstärken aufweisen (vergl. Abbildung 5.29) und SmCo-Magnete mit Samarium ein Seltenerd-Element benötigen, das nur in sehr geringen Mengen zur Verfügung steht (siehe Abbildung 5.26), also keine Massentauglichkeit besitzt. Es wird derzeit intensiv an neuen Magnetwerkstoffen geforscht, die ähnliche Energiedichten wie NdFeB-Magnete aufweisen, welche Erfolge hierbei erzielt werden, bleibt allerdings abzuwarten.

So bleibt lediglich die funktionale Substitution von NdFeB-Magneten durch die Verwendung alternativer Motor- und Generatorkonzepte. Es könnten z.B. in der Elektromobilität anstatt PM-Synchron-Motoren die in Abbildung 6.20 beschriebenen Käfigläufer-Asynchron-Motoren eingesetzt werden (Westphal und Kuchta, 2013), oder unter Umständen auch Reluktanzmotoren, die allerdings sowohl bezüglich der Effizienz als auch hinsichtlich der Steuerung und Geräuschbildung einige Nachteile aufweisen (Bradshaw et al., 2013). Während die verschiedenen Alternativtechnologien für Windkraftanlagen bereits in Abschnitt 5.5.1 (Abbildung 5.32) aufgezeigt und erläutert wurden, zeigt Abbildung 6.20 verschiedene Alternativen für die Umsetzung von Elektromotoren. Diese werden nachfolgend näher beschrieben.

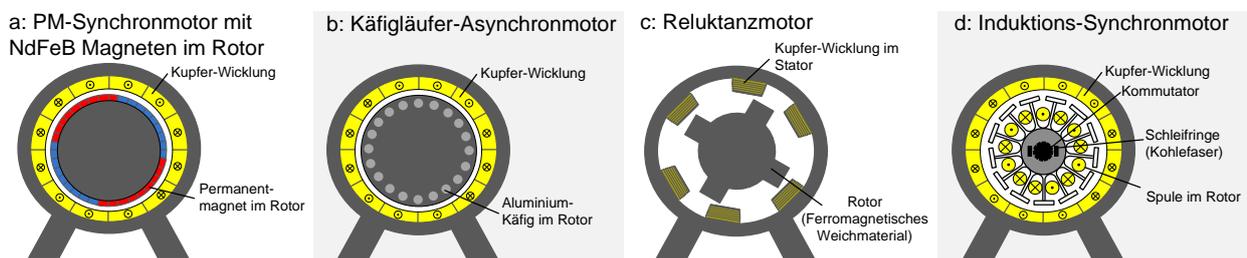


Abbildung 6.20. – Gängige Konzepte für Elektromotoren (eigene Darstellungen nach Bradshaw et al., 2013; Chau und Li Wenlong, 2014).

Der bürstenlose permanentmagnetisch erregte Synchronmotor ist aufgrund der hohen Leistungsdichte, der volumeneffizienten Bauweise und des hohen Wirkungsgrades in Fahrzeugen mit elektronischem Antrieb die sinnvollste Motorlösung (Abbildung 6.20 a). Dieses Motorkonzept setzt aber die Verwendung von Hochleis-

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

tungsmagneten voraus und kann durch einfache Ferrit-Magnete nicht realisiert werden⁴. Durch die Anordnung der Permanentmagnete im Rotor sind keine Schleifringe zur Übertragung des Stroms notwendig. Auch kann die Wärme aufgrund von elektrischen Widerständen, die hauptsächlich im Elektromagneten auftreten, wesentlich einfacher abgeleitet werden. Weitere Vorteile sind geringere Trägheit und eine hohe magnetische Flussdichte im Luftspalt (Gieras, 2010, S.2). Wenn der Elektromotor beim Bremsen als Generator arbeitet induziert der Permanentmagnet im Stator eine Spannung. Der so erzeugte Strom kann wieder in der Batterie gespeichert werden (Rekuperationsprinzip in Hybridfahrzeugen, vergl. Angerer et al., 2009, S.10 f.).

Eine Alternative zu Permanentmagnetmotoren bilden Induktions-Asynchronmotoren, die auch Käfigläufermotoren genannt werden (Abbildung 6.20 b). Hier enthält der Rotor kurzgeschlossene Aluminium- oder Kupferstäbe. Das Statormagnetfeld induziert in den Stäben einen Stromfluss, der wiederum ein Magnetfeld erzeugt. Dabei läuft der Rotor asynchron zum Magnetfeld im Stator. Zwar erreichen Käfigläufer-Asynchronmotoren inzwischen ebenfalls hohe Wirkungsgrade, die nur geringfügig niedriger als bei PM-Synchronmotoren liegen, dennoch kann der PM-Synchronmotor bis zu 30 % kompakter und leichter gebaut werden (Gutfleisch et al., 2011).

Eine weitere Gruppe alternativer Elektromotoren, die keine Seltenen Erden verwenden, sind z.B. Reluktanz-Motoren (Abbildung 6.20 c), die in Brennstoffzellenfahrzeugen aus Kostengründen eingesetzt werden könnten (Angerer et al., 2009, S.10 f.). Diese besitzen einen Rotor aus weichmagnetischem Material, wie z.B. Eisen. Durch das Magnetfeld der elektrisch erregten Spulen im Stator wird im Rotor eine Reluktanzkraft induziert. Diese Anziehungskraft bewegt den Rotor, wobei sich im Rotor weniger Pole befinden als im Stator (Abbildung 6.20 c), um einen Stillstand bei exakter Nordpol-Südpol-Stellung von Stator und Rotor zu vermeiden. Der Wirkungsgrad ist mit dem eines Permanentmagnet-Motors vergleichbar, aber das Drehmoment ist geringer (Bradshaw et al., 2013).

Folglich hat die Verwendung von Permanentmagneten gegenüber elektromagnetischer Erregung für verschiedene Anwendungsbereiche mehrere Vorteile, die nachfolgend zusammengefasst werden (Gutfleisch et al., 2011; Gieras, 2010; Chau und Li Wenlong, 2014; Bradshaw et al., 2013, S.25 ff.):

- Es wird keine elektrische Energie zur Erregung des Magnetfeldes im Rotor benötigt, was in elektrischen Maschinen zu einem höheren Wirkungsgrad führt.
- Die Leistungsdichte und/oder die Drehmomentdichte der Elektromotoren ist höher (bis zu 30 % geringeres Gewicht und Volumen).
- Besseres dynamisches Verhalten der Servomotoren (einfachere Drehzahlsteuerung)
- Einfachere Bauweise und Wartung

Weiterhin ermöglicht die Elektromobilität im Vergleich zu konventionellen Verbrennungsmotoren völlig

⁴Vor der Entwicklung von Neodym-Magneten wurden die Spulen des Elektromagneten in elektrischen Maschinen im Rotor verbaut, der sich innerhalb eines Stators aus Permanentmagneten (im Allgemeinen Ferrite) drehte. Die Stromzufuhr zu den Spulen erfolgt dabei über Kohlebürsten (oder Schleifringe), die jedoch zu erheblichem Verschleiß führen und der Hauptgrund für Wartungsarbeiten sind. Mit der Einführung der Neodym-Magnete in den neunziger Jahren konnte das Konzept umgekehrt und die Leistung der elektrischen Maschine deutlich erhöht werden. Der Permanentmagnet wurde im Rotor und die elektrisch erregten Spulen im Stator angebracht. Somit sind keine Kohlebürsten zur Stromübertragung in den Rotor mehr notwendig (Angerer et al., 2009, S.10 f.)

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

neue Konzepte für den Antriebsstrang, die sich derzeit noch in der Entwicklungsphase befinden. So können z.B. Radnabenmotoren direkt in die Pkw-Räder verbaut werden, wodurch auf verschiedene Bauteile wie z.B. das Getriebe, das Achsdifferenzial, oder die Kardanwelle (zur Kraftübertragung auf die Achsen) verzichtet werden kann. Entsprechend entfallen auch die verschiedenen Übersetzungen mit ihren Reibungsverlusten (Wallentowitz und Freialdenhoven, 2011, S.164). Da bei Radnabenmotoren aufgrund des begrenzten Raums auf eine besonders kompakte Bauweise zu achten ist, kommen hier die Vorteile des PM-Synchronmotors voll zum Tragen.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass sowohl für Hybrid- als auch für reine batterieelektrische Fahrzeuge vorwiegend auf PM-Synchronmotoren zurückgegriffen werden wird. Zwar existieren bereits einzelne Elektrofahrzeuge mit Käfigläufer-Asynchronmotor, diese wurden aber in erster Linie zur Hochphase der Versorgungskrise mit Seltenen Erden Anfang 2011 entwickelt. Langfristig ist davon auszugehen, dass die Automobilindustrie hauptsächlich auf die aus verschiedenen Gründen vorteilhaften PM-Synchronmotoren zurückgreifen wird⁵. Weiterhin existieren inzwischen Hybrid-Synchronmotoren, bei denen das Prinzip des PM-Synchronmotors mit dem des Reluktanzmotors verbunden wird, wodurch die Masse des Permanentmagneten bei gleich bleibender Leistung reduziert werden kann (Chau und Li Wenlong, 2014). Ob sich derartige Konzepte allerdings durchsetzen bleibt abzuwarten.

Mit doppelgespeisten Asynchrongeneratoren und fremderregten Ringgeneratoren (vergl. Abbildung 5.32) gibt es Alternativen zu Permanentmagnetgeneratoren im Bereich der Windkraftanlagen und insbesondere europäische Hersteller verwenden direktangetriebene PM-Generatoren inzwischen nahezu ausschließlich im Offshore-Bereich (vergl. Abschnitt 5.5.3 sowie Listen aktueller Windturbinen verschiedener Hersteller im Anhang A.5.3). Eine weitere Alternative zum Direktantrieb mit Permanentmagnet im Bereich der Windenergie, die derzeit in der Entwicklungsphase steckt, basiert auf keramischen Supraleitern (High Temperature Superconductor HTS). Dabei werden allerdings andere Seltene Erden, wie z.B. Yttrium, Lanthan und Cerium, verwendet. Die Entwicklung und der Einsatz von HTS können heute noch nicht abgeschätzt werden (Buchert, 2011), eine Marktreife wird allerdings frühestens ab dem Jahr 2025 erwartet (Hoenderdaal et al., 2013; Habib und Wenzel, 2014).

Als Ersatz für PM-Synchron-Servomotoren in niedrigen Leistungsbereichen bis 10 kW, die das wichtigste Anwendungsgebiet von NdFeB-Magneten im Maschinenbau darstellen (Pumpsysteme, Aufzugmotoren, Waschmaschinen etc.), können auch Induktionsmotoren (Asynchronmotoren, oder Synchronmotoren mit Elektromagnet, vergl. Abbildung 6.20d) verwendet werden, was zwar ebenfalls die Energieeffizienz und die Kompaktheit der Motoren beeinflusst, grundsätzlich aber in vielen Bereichen problemlos möglich sein sollte (vergl. z.B. Buchert et al., 2013, S.93).

Magnete in Festplatten können zukünftig durch Solid State Drives (SSD) abgelöst werden, die keine beweglichen Teile und damit auch keine Magnete besitzen (siehe hierzu auch Abschnitt 5.5.3).

⁵Diese Aussage wurde von Mitarbeitern des VW Konzerns sowie von führenden Motorherstellern und Automobilzulieferern bestätigt.

Recycling

Wie in Abschnitt 5.5.2 gezeigt, war das Schrottaufkommen von NdFeB-Magneten bisher hauptsächlich von den Elektronik- und Audio-Anwendungen (HDD, CD, DVD, Kopfhörer, Lautsprecher etc.) geprägt. Derzeit werden Permanentmagnete aus kleinen Elektronikgeräten weder erfasst noch recycelt, da sie zwar massenhaft, aber pro Gerät immer nur in geringen Mengen eingesetzt werden. Eine manuelle Entnahme ist aufwendig und kaum wirtschaftlich und eine mechanische Aufbereitung birgt technische Schwierigkeiten, da eine Trennung der Magnetwerkstoffe von der Stahl- und Eisenfraktion mit erheblichem Aufwand verbunden ist (Westphal und Kuchta, 2013). So gelangen die Magnete bisher meist ins Stahlrecycling, wo die Seltenen Erden entweder in der Schlacke landen, oder im Stahlkreislauf bleiben (Buchert, 2011).

Aufgrund des steigenden Schrottaufkommens größerer Magnete aus verschiedenen Produkten des Maschinenbaus (z.B. Waschmaschine, Pumpen, Klimaanlage) aber vor allem bei Traktionsmotoren von Hybrid- oder Elektroautos sowie PM-Generatoren aus Windanlagen ist davon auszugehen, dass im Laufe der kommenden Jahre Recyclingverfahren für größere NdFeB-Magnete etabliert werden (Bast et al., 2014; Rademaker et al., 2013, vergl. auch Erläuterungen in Abschnitt 5.5.3). Der hohe Anteil an Dysprosium in diesen Magneten wirkt sich aufgrund des höheren Wertes (vergl. Abbildung 5.30) ebenfalls positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Recyclings aus. Dennoch beschränkt sich derzeit das Recycling von NdFeB-Magneten ausschließlich auf Produktionsrückstände wie Schleifschlämme, die bei der Herstellung und Verarbeitung anfallen (Elwert und Goldmann, 2014, S.151). Diese Mengen, die bis zu 30% des ursprünglich eingesetzten Materials ausmachen, werden wiedergewonnen und in den Produktionsprozess zurückgeführt (Du und Graedel, 2011a,b).

Magnetbedarf für alternative Antriebe

Für die Stoffstromanalyse in Abschnitt 5.5.1 wurden bereits verschiedene Quellen zur Größe von NdFeB-Magneten in Traktionsmotoren von Hybrid- und Elektrofahrzeugen ausgewertet. Diese schwanken in Bereichen zwischen ca. 1 und 3 kg (vergl. Tabelle 5.7). Zwar besteht kein linearer Zusammenhang zwischen der Motorleistung und der benötigten Magnetmasse, und die Menge an verwendetem Magnetmaterial hängt von weiteren Faktoren wie der Anordnung der Magneteile im Rotor ab (Campbell, 2008), dennoch kann davon ausgegangen werden, dass Leistungsstärkere Motoren auch mehr Magnetmaterial benötigen (vergl. Abbildung 6.21a). Auf Basis der Leistungskennzahlen einzelner Fahrzeuge aus den jeweiligen Segmenten wurden für das Modell die in Abbildung 6.21b gezeigten Magnetgrößen pro Traktionsmotor angenommen.

Basierend auf diesen Materialmengen wurden die nachfolgend vorgestellten Modellergebnisse generiert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass bezüglich der benötigten Menge an Dysprosium pro Magnet in den verschiedenen Anwendungsbereichen (vergl. hierzu auch Abbildung 5.30 sowie Abbildung 5.34) in Zukunft von einer zusätzlichen Effizienzsteigerung ausgegangen wurde.

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

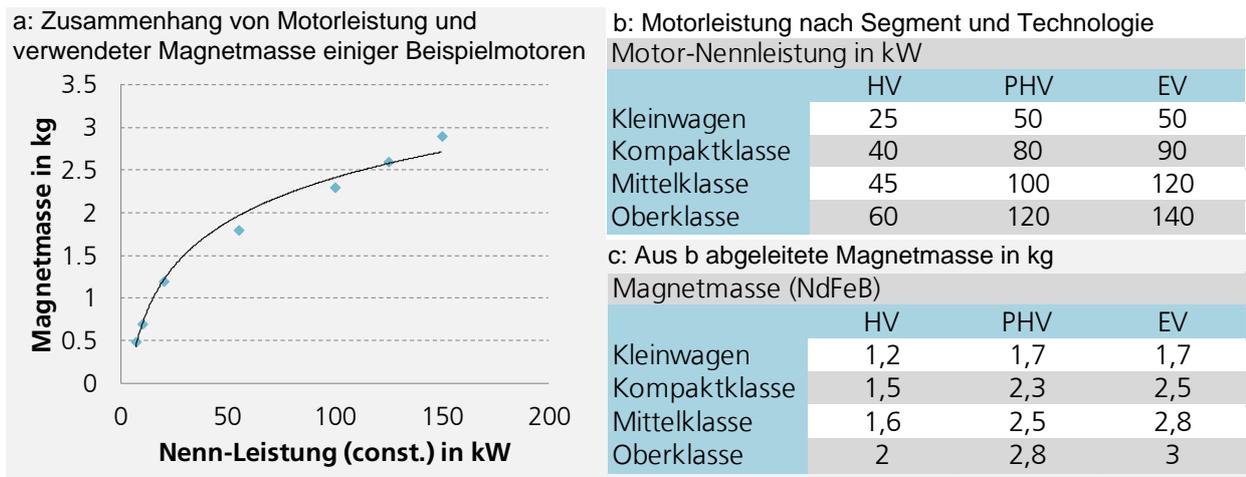


Abbildung 6.21. – Zusammenhang zwischen Motorleistung und Magnetgröße (siehe auch Tabelle 5.7) sowie Magnetgrößen nach Fahrzeugsegment und Antriebstechnologie.

a: Zusammenhang Magnetmasse und Motorleistung (vergl. insbesondere Hofmann et al., 2013, Anhang Seite 55 ff.)

b: Motorleistung nach Antriebstechnologie und Fahrzeugsegment (vergl. ADAC Fahrzeugtechnik, 2013)

c: Aus a und b abgeleitete Magnetmasse nach Fahrzeugsegment.

Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebe auf die Nachfrage nach Neodym und Dysprosium

Die ausreichende Versorgung mit den jeweils benötigten Rohstoffen ist Grundvoraussetzung für die Marktfähigkeit einer neuen Technologie. Während in der Vergangenheit in erster Linie technische und wirtschaftliche Aspekte über die Zukunftsfähigkeit einer neuen Technologie entschieden, rücken durch die kontinuierlich zunehmende Diversität industriell verarbeiteter Rohstoffe, aber auch aufgrund der zunehmenden Konkurrenz um den Rohstoffzugang, häufiger Aspekte der Rohstoffversorgung und Verfügbarkeit in den Vordergrund. Bei einer rohstoffspezifischen Betrachtung technologischer Entwicklungen ist allerdings die Berücksichtigung potenzieller Substitute auf stofflicher, materieller und funktionaler Ebene notwendig. Wie in Abschnitt 5.5.1 gezeigt, ist die Beimischung von Dysprosium vor allem im Bereich der Elektromobilität, der Windkraft und in einigen Industriemotoren essentiell. In allen Bereichen existieren, wie zuvor erläutert, Alternativen zur Verwendung von NdFeB-Magneten. Diese funktionalen Substitut-Technologien haben aber jeweils Nachteile, die es abzuwägen gilt.

So ist z.B. die Verbreitung von Windkraftanlagen nicht unmittelbar von der Verfügbarkeit der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium abhängig. Vielmehr würden bei einer Verknappung, wie es derzeit bereits der Fall ist, verstärkt doppeltgespeiste Asynchrongeneratoren, oder Induktions-Synchrongeneratoren eingesetzt werden (vergl. Abbildung 5.32), die ohne Permanentmagnete auskommen. Die neueste Generation an Offshore-Anlagen mit PM-Direktantrieb wäre allerdings stark von einem Versorgungsengpass betroffen.

Bei Industrie-Servomotoren ist die Frage der potenziellen Verwendung der etwas weniger energieeffizienten und größeren Asynchronmotoren oder des Einsatzes von alternativen Permanentmagneten, wie z.B. Ferrite,

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

sehr anwendungsabhängig. Insgesamt ist allerdings auch hier von einem gewissen Substitutionspotenzial auszugehen: So wurden z.B. für kleine Elektromotoren in Automobilen im Zuge der Hochpreisphase Seltenen Erden nach 2011 wieder verstärkt Ferrite für Kleinmotoren, wie sie z.B. für Scheibenwischer verwendet werden, eingesetzt, was vor der Verbreitung von NdFeB-Magneten dem Standard entsprach⁶. Zwar sind derartige Substitutionen nicht innerhalb kürzester Zeit umsetzbar, d.h. eine abrupte Unterbrechung der Rohstoffversorgung würde auch hier große Probleme schaffen (was der enorme Preisanstieg 2010 und 2011 zeigt), eine kontinuierliche Substitution aufgrund der steigenden Nachfrage seitens anderer Technologien (bei begrenzter Anpassung des Rohstoffangebots) wäre hier allerdings möglich. Dennoch überwiegen die Vorteile der Synchronmaschinen mit Permanentmagnet aufgrund des höheren Wirkungsgrades sowie der kompakteren Bauweise.

Im Vergleich zu den weiteren Anwendungsbereichen ist davon auszugehen, dass der PM-Synchronmotor im Bereich der Elektromobilität aufgrund der Volumen- und Gewichtseffizienz am entscheidendsten ist.

Insgesamt kann folglich davon ausgegangen werden, dass die Nachfrage nach NdFeB-Magneten für energieeffiziente, kompakte und wartungsarme Generatoren und Elektromotoren hoch bleiben wird. Eine verstärkte Diffusion der Elektromobilität könnte zu gewissen Engpässen und entsprechenden Anpassungsreaktionen führen, was mit dem hier vorgestellten Modell (vergl. Abbildung 6.11) in verschiedenen Szenarien sinnvoll abgebildet werden kann.

Da, wie zuvor erläutert, Dysprosium als schwere Seltene Erde hinsichtlich der Permanentmagnete für Traktionsmotoren den kritischsten Rohstoff darstellt, konzentriert sich die nachfolgende erweiterte Szenarioanalyse auf Dysprosium. Grundsätzlich ist für die zukünftige Entwicklung der Seltenerd-Förderung davon auszugehen, dass Bergbauprojekte mit einem hohen Anteil an schweren Seltenen Erden aufgrund des weit höheren Preisniveaus der Produktpalette einen entscheidenden Vorteil hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit haben, obwohl bei der Wirtschaftlichkeitsbewertung natürlich noch zahlreiche weitere Faktoren Einfluss haben, wie z.B. die Konzentration der seltenerdreichen Minerale oder deren Anteil an radioaktiven Nebenprodukten (insbesondere Thorium), die aufwendig und kostenintensiv entfernt werden müssen (vergl. z.B. Kingsnorth, 2014). Folglich ist davon auszugehen, dass der Anteil an schweren Seltenen Erden innerhalb der gesamten Seltenerd-Förderung tendenziell zunehmen wird. Für das Dysprosium-Angebot bedeutet dies, dass, wie in Abbildung 5.34 bereits aufgezeigt, der Anteil an der gesamten Seltenerd-Förderung zunimmt. Folglich bedeuten die in Abbildung 6.22 aufgezeigten Angebotsszenarien zur Entwicklung der Dysprosium-Verfügbarkeit nicht zwingend, dass die gesamte Seltenerd-Förderung im selben Maße wächst. Da Dysprosium ein Schlüsselement für verschiedene Zukunftstechnologien ist (direktangetriebene leistungsstarke Windturbinen, Elektromobilität, d.h. Hybrid- und reine Elektro-Pkw sowie Elektro-Zweiträder), ist von einer stärkeren Förderung auszugehen. Die Angebotsszenarien basieren auf einer jeweils linearen und polynomischen Fortschreibung der historischen Entwicklung.

Inwiefern es zu Knappheiten bei den in Abbildung 6.22 gezeigten Angebotsszenarien aufgrund der durch die Diffusion alternativer Antriebe getriebenen Nachfrageentwicklung (vergl. Szenarien in Abbildung 6.9) kommen kann, und wie entsprechende Anpassungsmechanismen am Markt aussehen könnten, wird anhand der

⁶Diese Aussage geht auf Mitarbeiter führender Automobilzulieferer zurück.

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

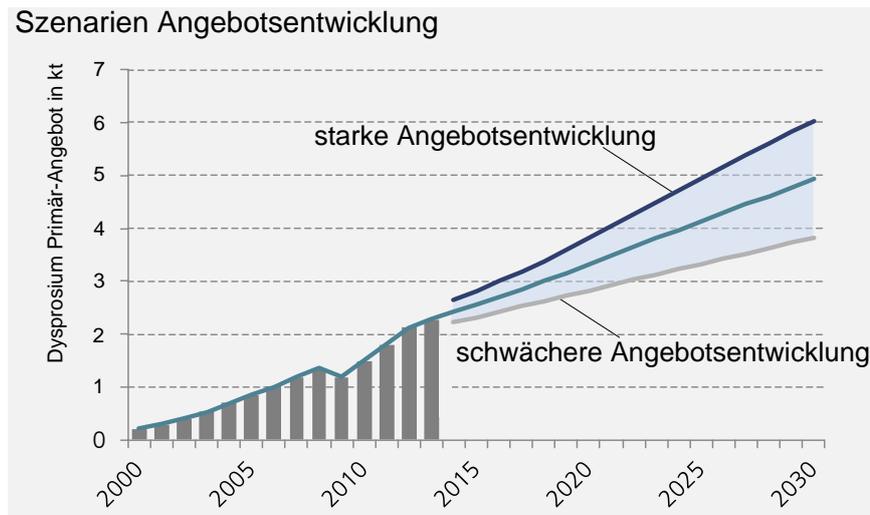


Abbildung 6.22. – Angebotsszenarien zur zukünftigen Verfügbarkeit von Dysprosium als Kuppelprodukt der gesamten Seltenerd-Förderung. Die Szenarien basieren jeweils auf einer linearen und einer polynomischen Trendfortschreibung.

Simulationsergebnisse nachfolgend aufgezeigt. Dabei werden die beiden Angebotsszenarien mit den beiden Szenarien zur Entwicklung alternativer Antriebe kombiniert. Insgesamt sind diese Modellergebnisse nicht als Prognose zukünftiger Entwicklungen zu verstehen, sondern sollen einen Überblick über die Modellfunktion und die entsprechenden Anpassungsmechanismen vermitteln. Grundsätzlich ist die Vorausschau auf technologische Entwicklungen mit extremen Fehlerspannen verbunden, Modelle nach dem hier vorgestellten Prinzip können allerdings ein gutes Verständnis für mögliche Anpassungsmechanismen am Markt vermitteln und so die Bereiche identifizieren, die von einer potenziellen Knappheit am stärksten betroffen wären. In allen betrachteten Szenarien wird von einer moderaten Effizienzsteigerung des Dysprosiumanteils in den entsprechenden Anwendungsbereichen ausgegangen. Dabei wird der verwendete Dysprosiumanteil im Bereich der Hybrid- und Batteriefahrzeuge bis 2030 auf durchschnittlich 5 % reduziert, der im Bereich Windenergie auf 3 % und die Verwendung von Dysprosium im allgemeinen Maschinenbau-Bereich auf durchschnittlich 2 % (bezogen auf die Magnetmasse, vergl. Abbildung 5.34 für aktuelle Massenanteile). Weiterhin besteht, wie zuvor beschrieben, auch im Bereich der Elektromobilität die Möglichkeit Asynchronmaschinen zu verwenden, obwohl diese insbesondere bei Volumen und Gewicht, bzw. Leistungsdichte klare Nachteile aufweisen. Dennoch ist davon auszugehen, dass vor allem bei rein elektrischen Pkw, bzw. Plug-in-Hybriden, diese bereits heute verwendete Technologie im Falle einer Knappheit von Dysprosium verstärkt zum Einsatz kommt.

Zunächst werden die Szenarien einer schwachen Diffusion der Elektromobilität betrachtet, d.h. batterieelektrische Fahrzeuge bleiben ein reines Nischenprodukt und lediglich Hybridantriebe setzen sich in den kommenden Jahren in nennenswertem Umfang am Markt durch (vergl. Abbildung 6.9 Szenario 1). Wie in den Abbildungen 6.23 und 6.24 dargestellt, hat selbst das Szenario einer schwachen Diffusion der Elektromobilität einen erheblichen Einfluss auf die Nachfrage nach Dysprosium. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Elektromotoren –bzw. Generatoren– der Hybridantriebe im Vergleich zu den Motoren

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

rein elektrischer Pkw nicht entscheidend kleiner dimensioniert sind (vergl. Abbildung 6.21), während die Batterien von Hybridfahrzeugen, da sie lediglich der Speicherung der Rekuperationsenergie dienen, um ein Vielfaches kleiner dimensioniert sind als bei batterieelektrischen Fahrzeugen (1-2 kWh im Vergleich zu 20-50 kWh, siehe Tabelle 6.2). D.h. auch wenn sich nur Hybridfahrzeuge verstärkt im Pkw-Markt durchsetzen, ist ein erheblicher Nachfrage-Impuls hinsichtlich des Bedarfs an NdFeB-Magneten und vor allem an Dysprosium zu erwarten, während die Auswirkungen auf die Nachfrage nach Li-Ionen-Batterien in diesem Szenario weit geringer ausfallen.

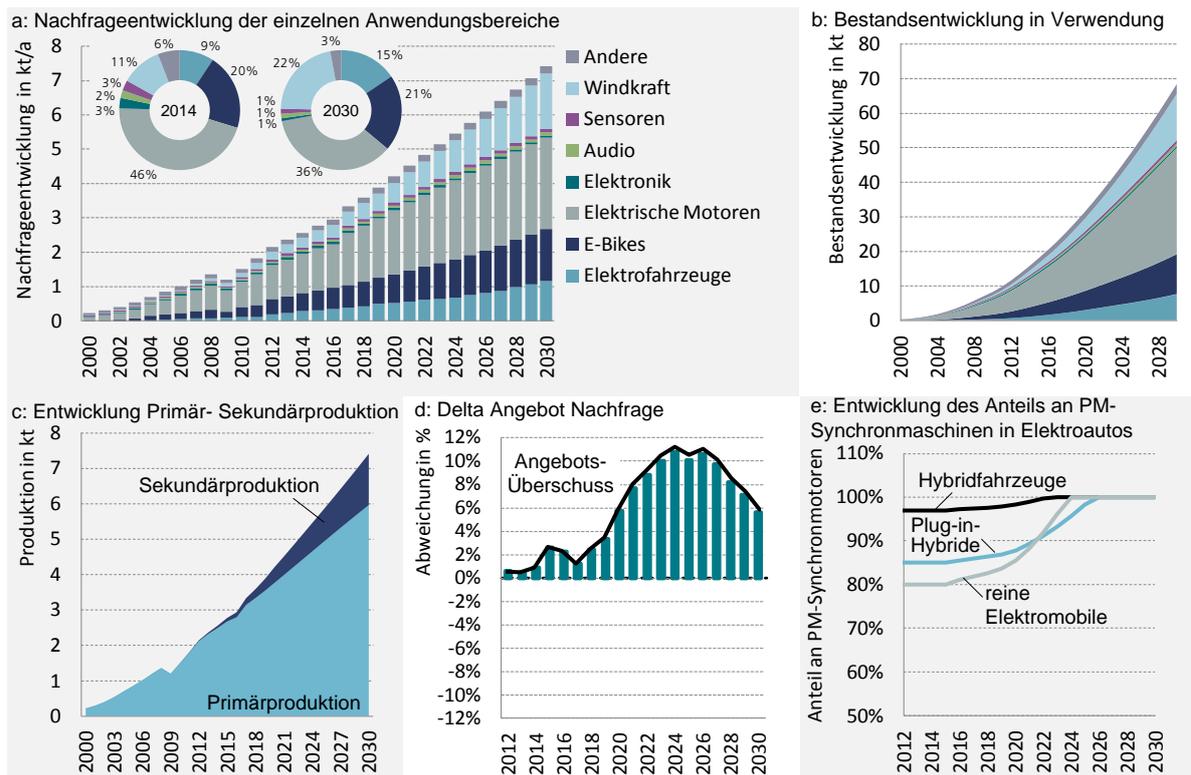


Abbildung 6.23. – Szenario starke Angebotsentwicklung Dy, schwache Diffusion alternativer Antriebe.

Wie in Abbildung 6.23 dargestellt, ist bei einer verhältnismäßig starken Entwicklung des Dysprosiumangebots, z.B. durch die Umsetzung neuer Minenprojekte mit hohem Anteil schwerer Seltener Erden, ein recht ausgeglichener Markt in absehbarer Zukunft zu erwarten, der sich in Richtung eines Angebotsüberschusses wandelt. Bei einer schwächeren Entwicklung des Dysprosiumangebots, was aufgrund des derzeitigen niedrigen Preisniveaus wahrscheinlicher erscheint, ist, wie Abbildung 6.24 zeigt, auch im Falle einer reinen Diffusion von Hybridantrieben im Pkw-Bereich in den kommenden Jahren von einem Dysprosiummangel auszugehen, der in den Bereichen der Windenergie, aber vor allem bei PM-Synchronmotoren im allgemeinen Maschinenbau zu den zuvor beschriebenen Substitutionseffekten führt. Diese Anpassungseffekte würden dann allerdings ausreichen, wieder in den Bereich einer Überschussituation zu kommen.

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

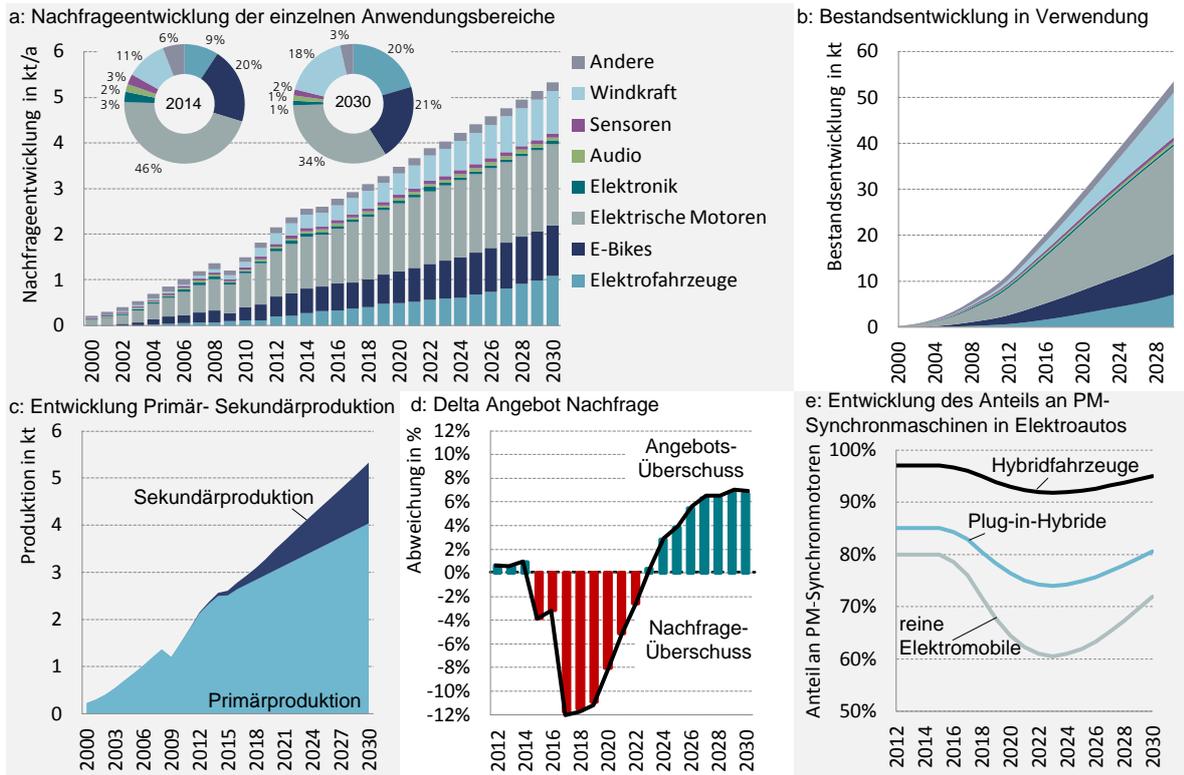


Abbildung 6.24. – Szenario schwache Angebotsentwicklung, schwache Diffusion alternativer Antriebe.

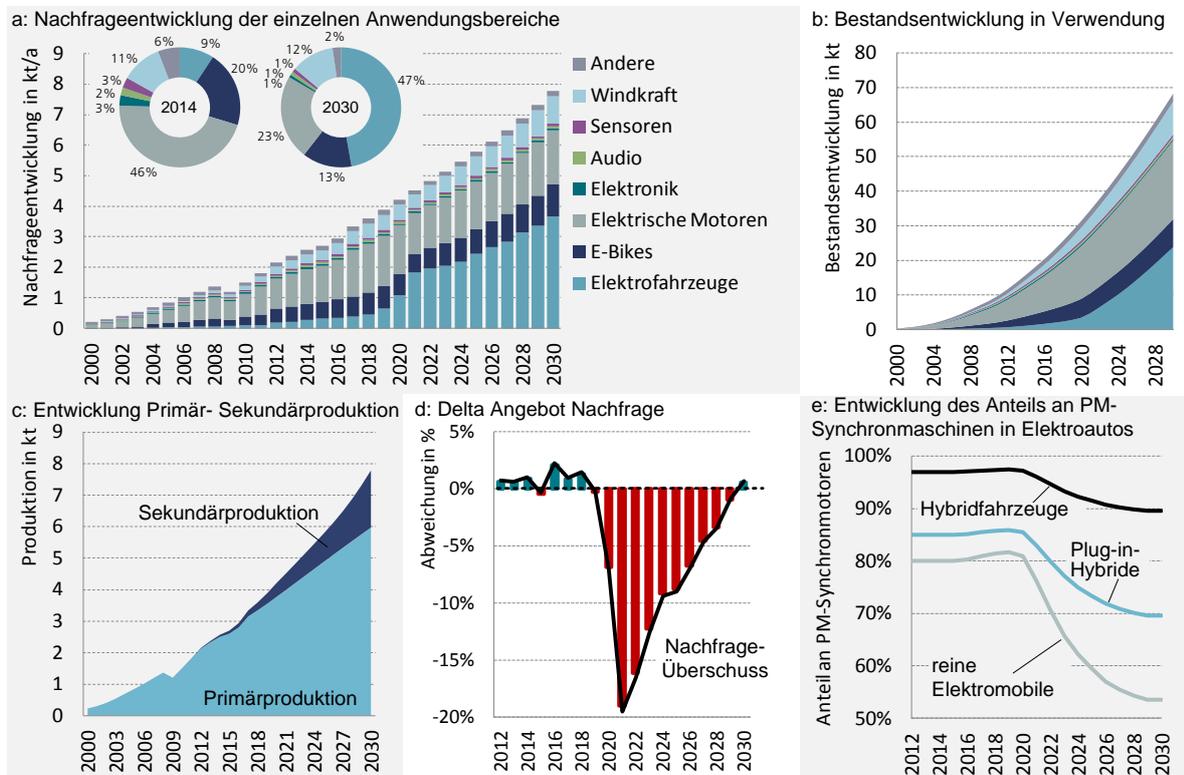


Abbildung 6.25. – Szenario starke Angebotsentwicklung Dy, starke Diffusion alternativer Antriebe.

6.3. Auswirkungen der Diffusion alternativer Fahrzeugantriebe auf die Rohstoffmärkte für Kobalt und Dysprosium

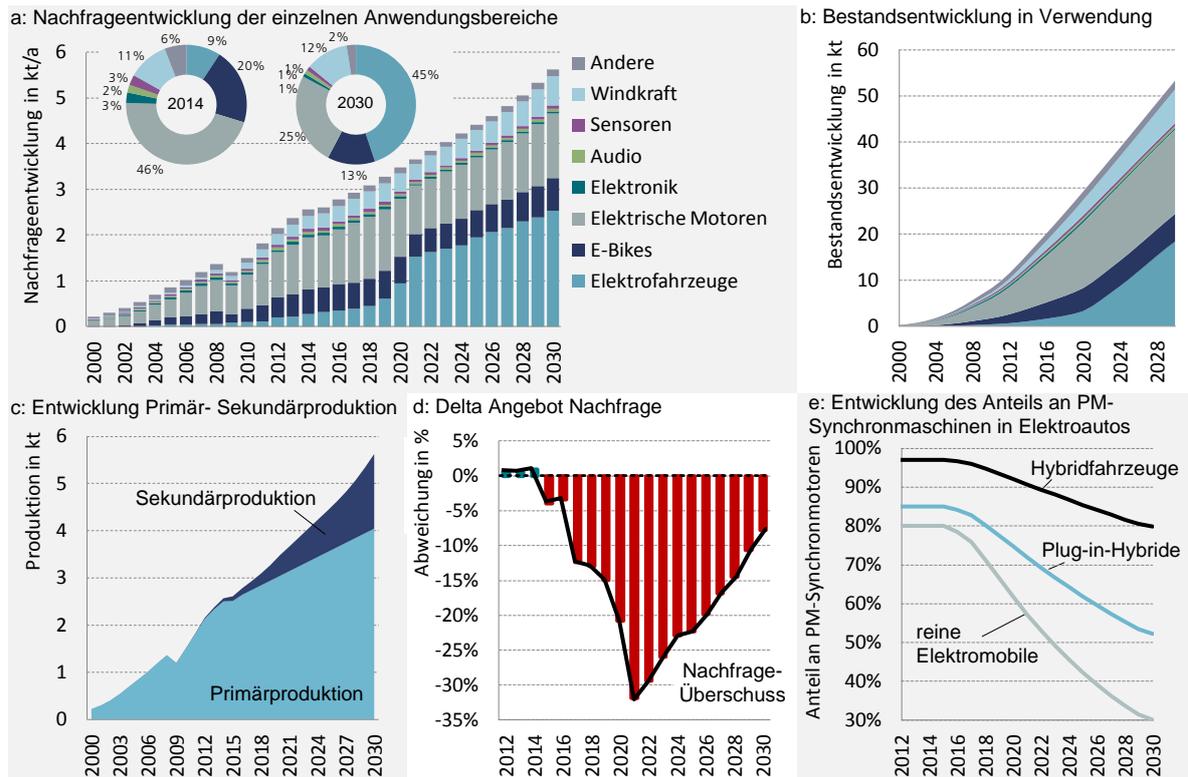


Abbildung 6.26. – Szenario schwache Angebotsentwicklung Dy, starke Diffusion alternativer Antriebe.

Hier zeigt sich bereits die hohe Sensitivität des Marktes auf technologische Nachfrageimpulse und entsprechende verzögerte Anpassungsmechanismen, die es kaum ermöglichen, ein dauerhaft ausgeglichenes Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage zu erreichen.

Eine verstärkte Entwicklung der Elektromobilität nach dem in Abbildung 6.9 beschriebenen Szenario 2 führt wie in den Abbildungen 6.25 und 6.26 dargestellt zu einer erheblichen Spannung auf dem Dysprosium-Markt und entsprechend zu stärkeren Anpassungsmechanismen, die sich erwartungsgemäß auch auf die Verwendung von PM-Synchronmotoren als Traktionsmotor in Elektroautos auswirken werden. Vor allem die starke Marktpenetration alternativer Antriebe ab 2020 (vergl. Abbildung 6.9) führt zu einem regelrechten Nachfragesprung nach Dysprosium, was selbst im Falle einer stärkeren Entwicklung des Dysprosiumangebots zu einem erheblichen Mangel führt (vergl. Abweichung Angebot/Nachfrage in Abbildungen 6.25d).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass der verhältnismäßig kleine Markt für Dysprosium sehr sensitiv auf die Entwicklung der Elektromobilität, aber auch auf andere Nachfrageimpulse, z.B. seitens der Windenergie reagieren wird. Die Tatsache, dass Seltene Erden grundsätzlich als Nebenprodukt bzw. im Verbund gewonnen werden, macht eine Anpassung des Angebots für Dysprosium auf eine rascher steigende Nachfrage kaum möglich. Zwar ist der Anteil der schweren SEE im Mineral aufgrund der weit höheren Preise ein entscheidendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit eines Bergbauprojekts, weshalb davon auszugehen ist, dass der Anteil schwerer Seltener Erden am Gesamtmix der Seltenerd-Förderung zunehmen wird. Angesichts des derzeit insgesamt sehr niedrigen Preisniveaus bleibt es allerdings abzuwarten, wo die Produktion außerhalb

6. Ergänzung der physischen Stoffströme um Marktdynamik und Rückkopplungseffekte

Chinas überhaupt wettbewerbsfähig ist. Es wird angenommen, dass der Bedarf an Magnetwerkstoffen, insbesondere Neodym und Praseodym, die zusammen ca. 25-30 % der derzeitigen Gesamtproduktion an SEO ausmachen, die treibende Kraft der Seltenerd-Förderung bilden wird. Da in den kommenden Jahren der Bedarf von Kleinstmotoren im Elektronikbereich tendenziell zurückgehen wird und größere Synchronmotoren und -Generatoren mit höheren Betriebstemperaturen und entsprechend höheren Dysprosiumanteilen im Bereich des Automobilbaus, der Windenergie, aber auch des allgemeinen Maschinenbaus in den Vordergrund rücken werden, wird die Versorgungslage mit Dysprosium angespannt bleiben. Diese Situation wird durch die Tatsache, dass die Konzentration der Produktion Chinas im Bereich schwerer SEE besonders hoch ist, zusätzlich verschärft. So ist die Steigerung der Ressourceneffizienz in Form der Reduzierung des Dysprosiumanteils in den NdFeB-Hochleistungsmagneten nicht nur aus wirtschaftlicher Sicht (durch die Kosteneinsparung), sondern auch aus versorgungsstrategischer Sicht ein entscheidender Schritt. Wie die Modellergebnisse zeigen, kann das Recycling obsoleter Synchronmotoren in Zukunft einen Beitrag zur globalen Versorgung leisten, der Gesamtbedarf wird durch rezykliertes Material allerdings nicht ansatzweise gedeckt werden können. Ideal wäre die Entwicklung alternativer Magnetwerkstoffe mit ähnlichen Eigenschaften wie NdFeB-Magnete und ohne Verwendung kritischer Metalle, Erfolge in dieser Richtung bleiben allerdings abzuwarten.

7. Ergänzende Risikobetrachtungen mit den systemdynamischen Modellen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erläutert (insbesondere Kapitel 2 und 3), ist bei der Analyse der Kritikalität von Rohstoffen klar zwischen Screeningmethoden und rohstoffspezifischen Modellen zu unterscheiden. Während Screeningmethoden auf Basis verschiedener Indikatoren eine breite Palette an Rohstoffen analysieren und vergleichen und diejenigen Rohstoffe, die im Vergleich zu anderen als besonders kritisch hervorstechen, identifizieren, dienen rohstoffspezifische Modelle dazu, die Transparenz und das Marktverhalten ausgesuchter Rohstoffe zu untersuchen und die Auswirkungen verschiedener Szenarien zu simulieren. In Kapitel 3 wurden statistische Ergänzungen zu den in Kapitel 2 beschriebenen Screeningmethoden vorgestellt und diskutiert sowie mögliche Ansätze zur indikatorbasierten Dynamisierung solcher Screeningmethoden innerhalb der Kritikalitätsmatrix diskutiert. Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, inwiefern die globalen Stoffstrom- und Marktmodelle sowie die regionalisierten Materialflussanalysen zur Verbesserung des Verständnisses über Rohstoffrisiken beitragen können.

7.1. Bewertung von Marktrisiken auf globaler Ebene

Wie in Kapitel 6 aufgezeigt bietet der System Dynamics Ansatz die Möglichkeit, globale Stoffstrommodelle um marktdynamische Effekte zu erweitern. Die gemeinsame Simulation von Angebots- und Nachfrageentwicklung unter Berücksichtigung von Anpassungseffekten auf beiden Seiten in Form von Rückkopplungsschleifen innerhalb der System Dynamics Umgebung ermöglicht eine einfache, aber verhältnismäßig realitätsnahe Modellierung der Zusammenhänge an Rohstoffmärkten. Dabei lassen sich sowohl das Prinzip der verzögerten Angebotsanpassung als typisches Problem der Märkte von Industriemetallen (vergl. Kapitel 4.3 bzw. 6.2), als auch verschiedene Formen der Nachfrageanpassung durch Substitution oder Effizienzsteigerungen (vergl. Kapitel 6.3) modellieren. Die in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnisse können folglich als erweiterte Szenarioanalysen verstanden werden, wobei die Modelle ein gutes Werkzeug bilden, um potenzielle zukünftige Marktentwicklungen besser einschätzen zu können.

Während die bisher betrachteten Szenarien allerdings von störungsfreien Entwicklungen ausgehen, also “normale” Wachstumsbedingungen von Nachfrage und Angebot untersuchen, lassen sich über die nachfrageseitigen Anpassungseffekte auch extreme Situationen aufgrund einer einmaligen Störung des Angebots simulieren. So können grundlegende Effekte, wie die extremen Preispeaks bei einigen Technologiemetallen über einfache Zusammenhänge in ihren Ansätzen erklärt werden. Natürlich sind die tatsächlichen Einflüsse

7. Ergänzende Risikobetrachtungen mit den systemdynamischen Modellen

auf Rohstoffmärkten weit umfangreicher und komplexer als die hier betrachteten stark vereinfachten Modelle, dennoch können einige Effekte relativ klar dargestellt werden.

Folglich lassen sich die Modelle neben den in Kapitel 6 beschriebenen störungsfreien Zukunftsszenarien auch dazu nutzen, die Reaktionen auf unerwartete Angebotsstörungen zu modellieren. Dies bildet die Verbindung zu den indikatorbasierten Screeningmethoden, in denen das Versorgungsrisiko in erster Linie als Eintrittswahrscheinlichkeit derartiger Störungen gesehen wird (vergl. Kapitel 2), und durch Indikatoren für die politische Stabilität der Förderländer, Produktionskonzentrationen und Importabhängigkeiten quantifiziert wird. Mit Hilfe der hier entwickelten Marktmodelle lässt sich die Anpassungsfähigkeit der Nachfrageseite und damit die Anfälligkeit des Marktes gegen Angebotsstörungen relativ klar darstellen. So kann gezeigt werden, dass bei vielen Technologiemetallen nicht nur die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versorgungsstörungen (vergl. Kritikalitätsstudien in Kapitel 2), sondern auch die Anpassungsfähigkeit bei sich abrupt ändernder Versorgungslage problematischer ist. Dieser Effekt wird in den indikatorbasierten Screeningmethoden meist über die Bewertung der Substitutionsfähigkeit einzelner Anwendungsbereiche berücksichtigt (vergl. z.B. Abschnitte 2.3.1 und 2.3.1) und lässt sich mit den hier entwickelten Marktmodellen auf globaler Ebene darstellen. Ähnliche Ansätze zur Bewertung der Resilienz (Widerstandsfähigkeit des Systems gegen externe Störungen) von Rohstoffversorgungssystemen auf Basis der System Dynamics Methodik wurden jüngst von Sprecher et al. (2015) vorgestellt.

Während Kupfer als klassisches Industriemetall in verschiedensten Bereichen, von Infrastruktur- und Bauwesen über Generatoren und Elektromotoren bis hin zu Elektronikanwendungen eingesetzt wird, sind Technologiemetalle wie Seltene Erden oder auch Kobalt, wie der Name bereits andeutet, stärker von der Entwicklung ganz bestimmter Technologien abhängig. Vor allem der Bausektor kann bei der Verwendung von Kupfer, sollte eine unerwartete Verknappung eintreten, rasch und einfach auf Alternativen zurückgreifen. So können Kupferdächer, Dachrinnen oder Fassaden, aber auch Heizungsrohre oder Klinken und Geländer aus Messing ohne Weiteres durch vorhandene Alternativmaterialien ersetzt werden. Diese rasche Anpassungsfähigkeit der Nachfrage bei unerwarteter Verknappung ermöglicht einen gewissen "Puffer" der Kupferversorgung, der dazu führt, dass extreme Preissteigerungen trotz einer unerwarteten Verknappung eher unwahrscheinlich erscheinen. Bei Technologiemetallen dagegen benötigt die Nachfrageanpassung eine gewisse Zeit zur Umstellung der Produktionsverfahren, aber auch zur grundlegenden Entwicklung alternativer Materialien. Diese verzögerte Anpassung der Nachfrage kann, bei einer unerwarteten Verknappung, vorübergehend zu extremen Preisausschlägen führen, da zunächst jeder Bereich auch weiterhin auf den Rohstoff angewiesen ist, um die eigene Bedarfsdeckung fürchten muss und daher zunächst bereit ist, sehr hohe Preise mitzugehen. Diese Effekte lassen sich in den hier vorgestellten Modellen über einfache Szenarien der kurzfristigen Rohstoffverknappung darstellen.

Wie in Abschnitt 5.2 erläutert, findet knapp 30 % des globalen Kupferbergbaus in Chile statt. Dort befinden sich auch die weltweit größten Kupferminen mit Kapazitäten von bis zu 1 Mio. t/a an Kupfergehalt in den Konzentraten (vergl. z.B. Lossin, 2012). Eine schlagartige Reduzierung des globalen Angebots um 10 %¹ sowie die Anpassungsreaktion am Kupfermarkt wird im folgenden Szenario modelliert (vergl. Abbildung 7.1).

¹z.B. aufgrund einer Naturkatastrophe

7.1. Bewertung von Marktrisiken auf globaler Ebene

Auf der Nachfrageseite ist die direkte Reaktion auf die Verknappung in Form einer Nachfrageanpassung insbesondere im Baubereich gut zu erkennen. Dieser “Puffer” verhindert einen extremen Preisanstieg (hier nur durch die Abweichung von Angebot und Nachfrage dargestellt) und sorgt für ein verhältnismäßig rasches Einpendeln des Marktes. So gesehen ist bei Kupfer nicht nur die Wahrscheinlichkeit derartiger Störungen geringer als bei den nachfolgend betrachteten Technologiemetallen, sondern auch deren Auswirkungen.

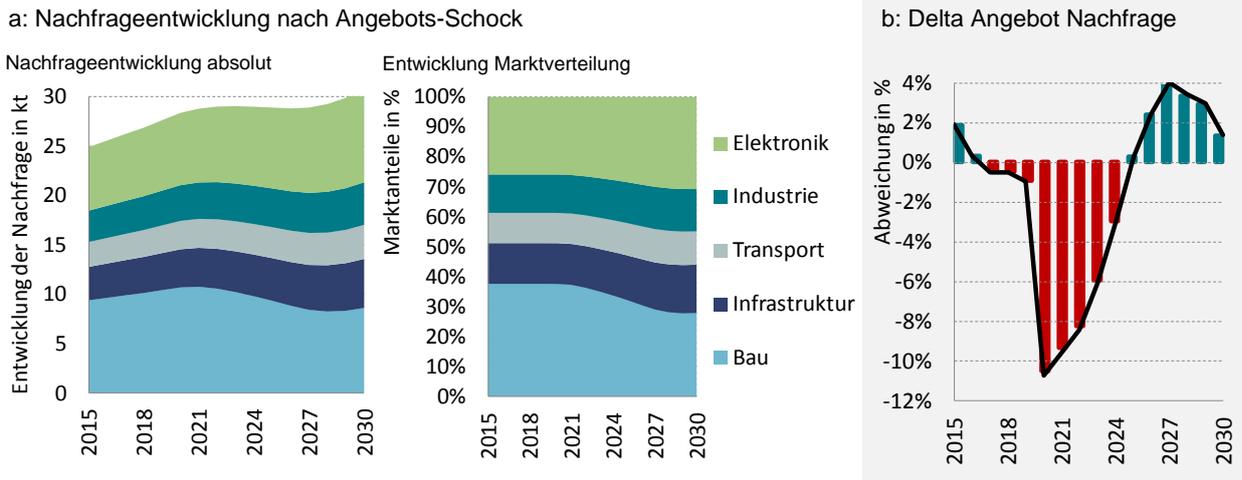


Abbildung 7.1. – Auswirkungen einer schlagartigen Verknappung des Angebots auf dem Kupfermarkt.

50% Prozent der globalen Kobaltproduktion (vergl. Abbildung 5.16) stammen aus der Demokratischen Republik Kongo, eine Region Afrikas, die immer wieder von politischen Konflikten und Unruhen geprägt ist. Aufgrund eines Bürgerkriegs gegen Ende der 1970er Jahre kam es bereits zu einer “Kobaltkrise”, die in den Jahren 1977-1979 zu einem Anstieg des Kobaltpreises um 500 % führte (siehe z.B. Alonso et al., 2007, vergl. hierzu auch Abschnitt 2.2). Angesichts der nach wie vor dominanten Stellung des Kongo im globalen Bergbau kobalthaltiger Erze und der politisch instabilen Lage des Landes (vergl. z.B. “World Governance Indicators” der Weltbank, Kaufmann et al., 2013) erscheint eine abrupte Störung der Kobaltversorgung nach wie vor möglich. Zwar bestehen, wie in Abschnitt 6.3.3 ausführlich erläutert, in verschiedenen Bereichen, insbesondere bei Li-Ionen-Akkus, inzwischen Alternativen zur reinen $LiCoO_2$ oder anderen kobalthaltigen Kathoden, dennoch wäre ein Ausweichen auf alternative Technologien mit einer erheblichen Zeitverzögerung zur Anpassung der Produktionslinien etc. verbunden. Weiterhin haben die nicht kobalthaltigen Kathodenmaterialien einige Nachteile (vergl. insbesondere Tabelle A.7), was vor allem bei der Verwendung in Elektronikanwendungen (Laptops, Mobiltelefone etc.) ein Ersetzen des Kobalts unwahrscheinlich erscheinen lässt. Ein direkter Puffer wie bei Kupfer besteht hier folglich nicht. Die verzögerte Nachfrageanpassung aufgrund einer Angebotsstörung lässt sich mit Hilfe des erweiterten Kobaltmodells relativ realitätsnah abbilden und zeigt die grundlegende Problematik der mangelnden Anpassungsfähigkeit der Nachfrage bei zahlreichen Technologiemetallen. Dabei wurde für das in Kapitel 6.3 vorgestellte Modell bei einer moderaten Entwicklung der Elektromobilität (mittlere Entwicklung aus den beiden Szenarien in Abbildung 6.9) zunächst von einer ausreichenden Primärversorgung mit Kobalt ausgegangen, bis eine schlagartige Ver-

7. Ergänzende Risikobetrachtungen mit den systemdynamischen Modellen

knappung von 10 % des Angebots einsetzt². Gut zu erkennen ist in Abbildung 7.2 die weit langsamere Anpassungsreaktion und die entsprechend längere Diskrepanz zwischen Angebot und Nachfrage, die durch die Diffusion der Elektromobilität nochmals verstärkt wird.

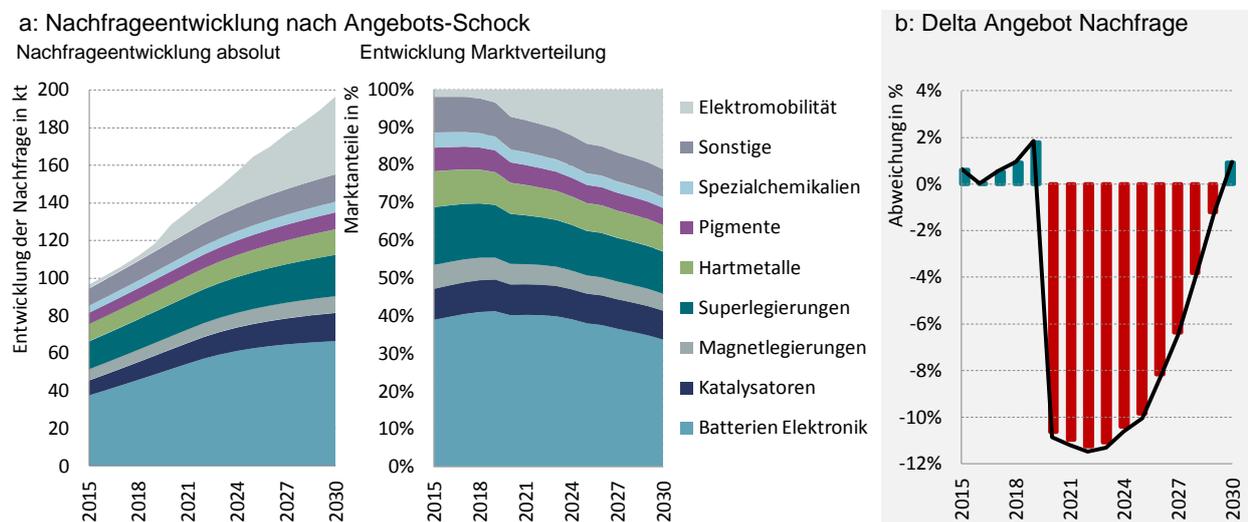


Abbildung 7.2. – Auswirkungen einer schlagartigen Verknappung des Angebots von Kobalt, z.B. aufgrund politischer Spannungen in der Demokratischen Republik Kongo.

Die Versorgungsproblematik mit Seltenen Erden und die Dominanz Chinas am Markt wurde bereits in Abschnitt 5.4 ausführlich diskutiert. Die jüngsten enormen Preispeaks unter Technologiemetallen verzeichnete der Markt von Seltenen Erden aufgrund einer Verschärfung der Exportrestriktionen seitens der chinesischen Regierung im Jahr 2010. Ein territorialer Konflikt mit Japan Ende 2010, der dazu führte, dass Japan, die am stärksten von Seltenen Erden abhängige Industrienation (vergl. Abschnitt 3.2), vorübergehend vollständig von der Seltenerd-Versorgung aus China abgeschnitten war, verstärkte die Angst westlicher Unternehmen vor Versorgungsengpässen, was die Nachfrage mit dem Ziel der Lagerbildung zusätzlich anheizte und wohl für die starke Preissteigerung im Verlauf des Jahres 2011 (vergl. Abbildung 3.8) mit verantwortlich war (vergl. z.B. Massari und Ruberti, 2013; Campbell, 2014). Zwar hat sich die Situation am Markt für Seltene Erden inzwischen entspannt und durch verzögerte Substitutionseffekt kann bei einigen Seltenen Erden, insbesondere bei den häufiger vorkommenden leichten Seltenen Erden, von einem Überangebot ausgegangen werden, dennoch bleibt die Lage angespannt, da nicht nur Export- und Produktionsrestriktionen seitens der chinesischen Regierung, sondern auch ein systematischeres Vorgehen gegen nicht autorisierten Bergbau erheblichen Einfluss auf den Markt nehmen kann, vor allem bei den schweren Seltenen Erden, deren Produktion nach wie vor von China dominiert wird und deren Abbau auf wenige Provinzen beschränkt ist (vergl. Abbildung 5.28). Die Auswirkungen einer schlagartigen Verknappung von Dysprosium um 10 % analog zu der zuvor beschriebenen Entwicklung für Kobalt, wird im folgenden Szenario abgebildet. Dabei zeigt sich ebenfalls die mangelnde kurzfristige Anpassungsfähigkeit der Nachfrage, insbesondere für alternative Antriebssysteme und für Windkraftanlagen.

²Dies ist lediglich als theoretisches Szenario zum Vergleich mit der Reaktion des Kupfermarktes zu verstehen.

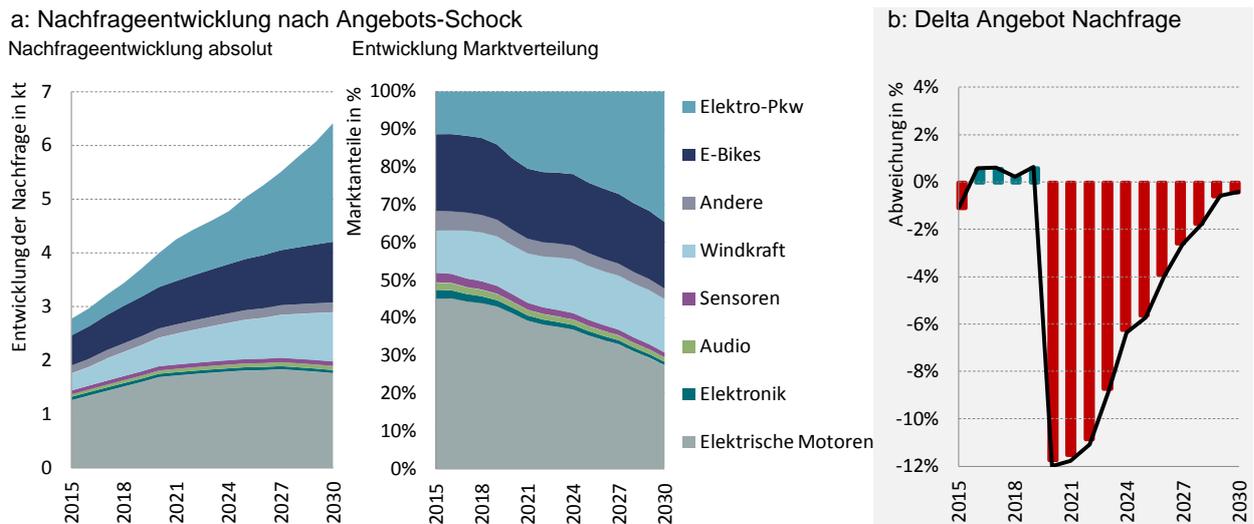


Abbildung 7.3. – Auswirkungen einer schlagartigen Verknappung des Angebots von Dysprosium, z.B. wegen eines konsequenteren Durchgreifens der chinesischen Zentralregierung gegen den teilweise inoffiziellen Bergbau im Süden Chinas (vergl. Abbildung 5.28).

Das Modell bildet lediglich den gesamten Weltmarkt ab, ohne zwischen chinesischer Produktion und westlichen Industrieländern zu unterscheiden. Tendenziell ist allerdings, wie die jüngste Versorgungskrise mit Seltenen Erden zeigt, mit einer stärkeren Betroffenheit der Industriesparten außerhalb Chinas zu rechnen. Da, wie in dem regionalen Stoffstrommodell für Neodym und Dysprosium gezeigt, das Recyclingpotenzial bei Weitem nicht ausreichen wird, um zukünftige Bedarfe zu decken, insbesondere in exportstarken Ländern wie Deutschland und Japan, erscheint die Erschließung neuer Rohstoffquellen außerhalb Chinas zur Sicherung der Rohstoffversorgung unumgänglich. Ähnlich wie im Falle von Kobalt, existieren auf europäischem Boden insbesondere in Skandinavien Lagerstätten von Seltenen Erden, die über einen hohen Anteil an schweren Seltenen Erden, vor allem Dysprosium, und geringen Mengen radioaktiver Nebenprodukte (Thorium) verfügen, was eine wirtschaftliche und verhältnismäßig umweltfreundliche Gewinnung ermöglicht³. Eine Erschließung dieser Lagerstätten, was bereits mit Hilfe europäischer Förderprogramme angegangen wird, erscheint zur Sicherung der Rohstoffversorgung für alternative, energieeffiziente Zukunftstechnologien unumgänglich. Für die systematische Nutzung dieser Lagerstätten spricht weiterhin die Tatsache, dass die PM-Synchron-Servomotoren auch im allgemeinen industriellen Anwendungsbereich vielfach Verwendung finden und weniger energieeffiziente Induktionsmotoren ersetzen könnten.

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung der Energieeffizienz bei elektrischen Maschinen in Verbindung mit dem geplanten Ausbau von Offshore-Windanlagen, bei denen PM-Direktantriebe einen klaren Vorteil gegenüber Induktionsgeneratoren aufweisen, ist von einer verstärkten Nachfrage nach NdFeB-Magneten auszugehen, die auch im Falle einer schwachen Verbreitung von alternativen Antriebssystemen den Bedarf aufrecht erhalten wird. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass auch Brennstoffzellenfahrzeuge, die langfristig batterieelektrische Fahrzeuge ablösen bzw. ergänzen könnten, auf Elektromotoren mit hohem Wirkungsgrad und hoher Leistungsdichte angewiesen sind. In diesem Zusammenhang bleibt die Sicherung der Versor-

³Hier wären vor allem die schwedischen Lagerstätten "Norra Kärr" und "Olserum" zu nennen (vergl. Tasman Metals Ltd., 2015).

7. Ergänzende Risikobetrachtungen mit den systemdynamischen Modellen

gung mit Seltenen Erden, insbesondere mit den Magnetwerkstoffen Neodym und Dysprosium, auch in den kommenden Jahren eine Herausforderung, die durch die inzwischen wieder auf Vorkrisenniveau gefallen niedrigen Preise zusätzlich erschwert wird. So haben die westlichen Unternehmen, die außerhalb Chinas Seltene Erden fördern (insbesondere Molycorp Inc. als Betreiber der Mountain Pass Mine in den USA und Lynas Inc. als australischer Seltenerd-Produzent) inzwischen mit starken Verlusten und der Insolvenz zu kämpfen⁴. Eine nahezu vollständige Abhängigkeit von China, wie sie vor 2010 bestand, gilt es allerdings unbedingt zu vermeiden.

So ist, wie hier gezeigt wurde, in den Märkten für Technologiemetalle die schlagartige Angebotsverknappung wegen der verzögerten Anpassungsfähigkeit der Rohstoffverwendung ein weit größeres Problem als die Konkurrenz zwischen einzelnen Technologien um bestimmte Rohstoffe, da wie in Kapitel 6.3 dargestellt, kontinuierliche Substitutionseffekte (insbesondere die funktionale Substitution durch die Verwendung alternativer Technologien) der Knappheit entgegenwirken. Bei einer schlagartigen Angebotsreduktion, wie sie hier simuliert wurde, werden die rohstoffabhängigen Branchen vor allem bei Technologiemetallen, da zunächst wenig Flexibilität der Nachfrage besteht, hart getroffen. Während die hier vorgestellten System Dynamics Modelle diese Effekte in ihrer Tendenz simulieren und erklären können, dienen die im ersten Teil dieser Arbeit (Kapitel 2) dargestellten Screeningmethoden der Identifikation derjenigen Rohstoffe, bei denen die Wahrscheinlichkeit kurzfristiger Angebotsstörungen besonders hoch ist.

⁴Molycorp Inc. leitete im Mai 2015 das Insolvenzverfahren ein und Lynas Inc. erwartet 2015 einen Verlust von über 20 Mio. US\$, was fast der Hälfte des Eigenkapitals entspricht (vergl. "Investor Relations" der jeweiligen Aktiengesellschaft).

7.2. Schnittpunkte zu ökonomischen Modellen auf regionaler Ebene

Die globalen Stoffstrommodelle sind durch die Erweiterung um marktdynamische Effekte, wie zuvor aufgezeigt, ein vielseitig einsetzbares Werkzeug zur Analyse zukünftiger Marktentwicklungen. Dagegen haben sich die regionalen Modelle in erster Linie dahingehend bewährt, Transparenz in die Verwendungsstrukturen und Verbrauchsmengen der betrachteten Rohstoffe entlang der Wertschöpfungskette zu bringen und durch die Simulation der Verwendungszyklen Recyclingpotenziale aufzuzeigen.

Das zukünftige Schrottaufkommen basiert hauptsächlich auf vergangenem und gegenwärtigem Materialverbrauch und kann daher relativ sicher prognostiziert werden. Die Vorausschau auf zukünftige Rohstoffbedarfe auf regionaler Ebene ist allerdings weitaus problematischer, da hier die Entwicklung einzelner Industriesparten berücksichtigt werden muss, was eine sehr genaue Betrachtung der jeweiligen Volkswirtschaft bzw. Wirtschaftsregion voraussetzt. Weiterhin basieren die derzeitigen Bewertungsansätze für die wirtschaftliche Bedeutung einzelner Rohstoffe hauptsächlich darauf, den Anteil der von potenziellen Engpässen betroffenen Branchen an der gesamten Bruttowertschöpfung zu bestimmen (vergl. z.B. den Ansatz der EU in Kapitel 2.3.1, bzw. European Commission, 2010b, 2014, oder auch die in Kapitel 3.2 vorgestellte relative wirtschaftliche Bedeutung als dynamische Screeningmethode), ohne die Vernetzungsstruktur der einzelnen Branchen und indirekte Effekte für z.B. industrienahe Dienstleistungssektoren zu berücksichtigen.

Durch die systematische Analyse der von den betrachteten Rohstoffen abhängigen Güter- und Produktklassen in den regionalen Stoffstrommodellen bietet sich eine potenzielle Schnittstelle zu sektoralen ökonomischen Modellen, wie Input-Output Modellen, da über die Güterklassifikation der Handelsdaten (HS oder CN Codes⁵) bzw. den Produktionsstatistiken der EU und seiner Mitgliedsländer (CPA Codes⁶) direkt auf die betroffene Branche geschlossen werden kann. Die europäischen Input-Output Tabellen und die seiner Mitgliedsländer sind nach der NACE Klassifizierung⁷, die unmittelbar aus der Produktklassifikation (CPA) hervorgeht, in 65 Wirtschaftssektoren unterteilt. Zwischen den HS Codes (bzw. CN Codes) zur Beschreibung der Handelsdaten und den CPA Codes für die Produktionsdaten bestehen Übergangstabellen (von Eurostat zur Verfügung gestellt), die eine Übertragung in die jeweils andere Klassifikation ermöglichen. Der Zusammenhang zwischen den in den Stoffstrommodellen verwendeten Güter- und Produktklassifikationen und den Wirtschaftssektoren ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

Eine Kopplung der Stoffstrommodelle mit ökonomischen Modellen würde eine bessere Darstellung möglicher gesamtwirtschaftlicher Folgen von Versorgungsstörungen bieten. Erste Ansätze der Nutzung von Input-Output Tabellen zur Quantifizierung der wirtschaftlichen Bedeutung bestimmter Rohstoffe wurden von Beylot und Villeneuve (2015) jüngst veröffentlicht. Auch bestehen Ansätze zur Analyse gesamtwirt-

⁵HS: Harmonized System - 6stellige Güterklassifikation zur Einteilung und Erfassung von Handelsdaten

CN: Combined Nomenclature - ergänzt 2 weitere Stellen an die HS codes und dient den lokalen Zollbehörden zur weiteren Unterteilung und Spezifizierung der HS Codes.

⁶CPA: Classification of Products by Activity ist die Produktklassifikation der europäischen Produktionsstatistik (Prodcop), die auch von den jeweiligen Statistikämtern der Mitgliedsländer verwendet wird (in Deutschland das Statistische Bundesamt DE-STATIS).

⁷NACE: "Nomenclature statistique des activités économiques dans la communauté européenne" ist die statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Union.

7. Ergänzende Risikobetrachtungen mit den systemdynamischen Modellen

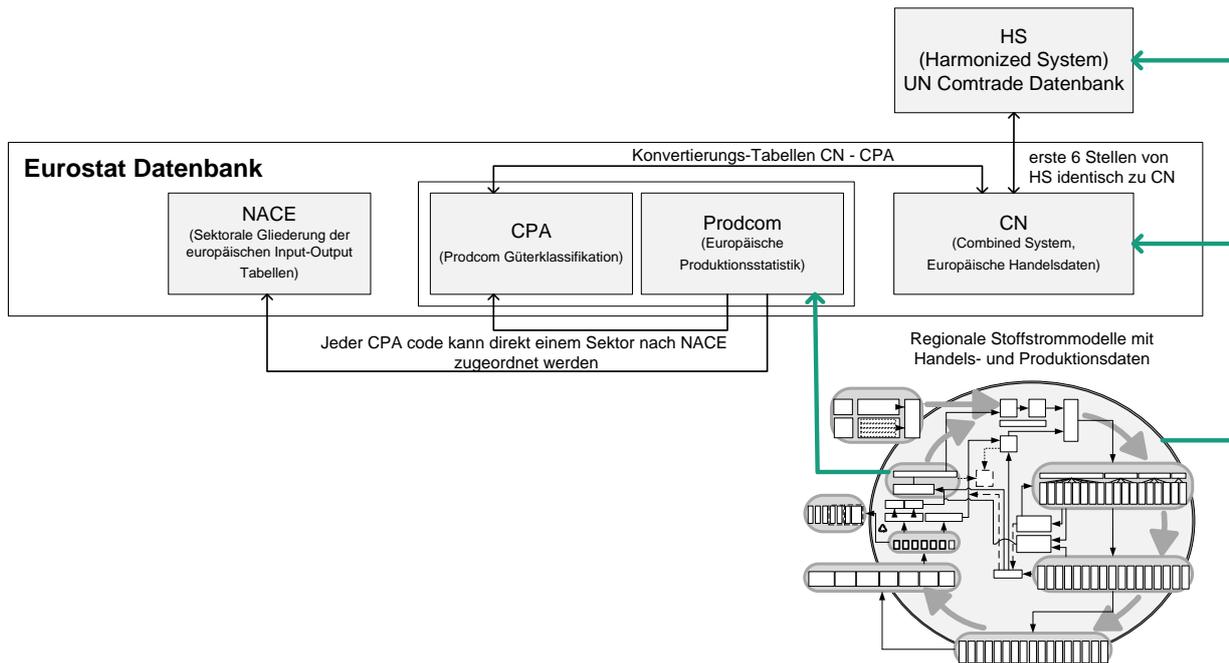


Abbildung 7.4. – Güterklassifikationen und Produktionsdaten in Zusammenhang mit Wirtschaftssectoren als potenzielle Schnittstelle der regionalen Stoffstrommodelle mit ökonomischen Modellen wie Input-Output Tabellen.

schaftlicher Effekte von Investitionen und Maßnahmen zur Steigerung der Ressourceneffizienz mit Hilfe von Input-Output Modellen (vergl. z.B. Pfaff und Sartorius, 2015), die durch eine Kopplung mit den hier beschriebenen Stoffstrommodellen um physische Massenströme erweitert werden könnten. Die Ergänzung von hauptsächlich auf monetären Größen basierenden ökonomischen Modelle um physische Materialflüsse bilden in den Fachbereichen “Industrial Ecology” und “Ecological Economics” insgesamt aktuelle wissenschaftliche Herausforderungen (vergl. hierzu z.B. Pauliuk et al., 2015). In der vorliegenden Arbeit ist dies allerdings als erster Ausblick auf die potenzielle Weiterentwicklung der regionalen Stoffstrommodelle zu verstehen und wird hier daher nur als theoretisches Konstrukt erwähnt.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend werden in den folgenden Abschnitten die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst sowie potenzielle zukünftige, auf die hier entwickelten Methoden aufbauende Forschungsarbeiten diskutiert.

8.1. Zusammenfassung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse

Das Ziel dieser Arbeit lag in der Entwicklung methodischer Ergänzungen bisheriger Ansätze zur Bewertung der Versorgungsrisiken und Kritikalität metallischer und mineralischer Rohstoffe, insbesondere hinsichtlich einer Berücksichtigung dynamischer Effekte. Die Analyse und der Vergleich der Vorgehensweisen und Methoden bisheriger Studien zeigt die Notwendigkeit einer klaren Trennung zwischen Screeningmethoden, die basierend auf verschiedenen Indikatoren größere Mengen an potenziell kritischen Rohstoffen untersuchen und rohstoffspezifischen Ansätzen, welche die Verwendungsstrukturen und mögliche zukünftigen Entwicklungen einzelner ausgewählter Rohstoffe betrachten. Für beide dieser grundlegenden Ansätze wurden in dieser Arbeit methodische Erweiterungen entwickelt.

Hinsichtlich der statischen Screeningmethoden (basierend auf der aktuellen Versorgungssituation) wurde der am häufigsten verwendete Ansatz der Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der klassischen Risikobetrachtung in einer Risikomatrix näher untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass insbesondere bei der Bestimmung der Liste der kritischen Rohstoffe durch die Europäische Kommission Inkonsistenzen hinsichtlich der Risikoniveaus innerhalb der Kritikalitätsmatrix bestehen, die es in Zukunft anzupassen gilt. Es stellt sich insgesamt die Frage, ob es sinnvoll ist, von einer fixen Liste an kritischen Rohstoffen auszugehen, die von einer relativ willkürlich gewählten Abgrenzung ausgeht, oder ob die Risikoniveaus innerhalb der Kritikalitätsmatrix nicht ausreichen, um eine hierarchische Struktur des Kritikalitätsniveaus aller betrachteten Rohstoffe aufzustellen.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass dimensionsreduzierende Verfahren der Multivariaten Statistik durchaus als Ergänzung zu statischen Multiindikatoransätzen herangezogen werden können, insbesondere zur Gruppierung und Clusterbildung einzelner Rohstoffgruppen. Bei der statistischen Analyse gemeinsam auftretender Markteigenschaften verschiedener Rohstoffe wurde festgestellt, dass statistisch signifikante, linearproportionale Zusammenhänge verschiedener Merkmalsausprägungen nur in Bereichen bestehen, die relativ naheliegend erscheinen, so z.B. der Zusammenhang zwischen globaler Produktionsmenge und dem physischen Handelsvolumen. Zwar können qualitative Tendenzen wie der Zusammenhang zwischen der Konzentration der Produktion auf Länderebene und der Preisvolatilität aufgezeigt werden, dennoch ist es kaum

8. Zusammenfassung und Ausblick

möglich allgemein gültige Gesetzmäßigkeiten zu definieren, was die Notwendigkeit einer individuellen Betrachtung einzelner Rohstoffkandidaten hinsichtlich physischer Verwendungsstrukturen und Marktdynamiken unterstreicht.

Bezüglich der Dynamisierung von indikatorbasierten Screeningmethoden wurden in dieser Arbeit Indices für die relative wirtschaftliche Bedeutung einzelner Rohstoffe basierend auf Handels- und Produktionsstatistiken entwickelt. Diese Indices betrachten die reine Mengenrelevanz verschiedener Rohstoffe in Form der Gewichtung des Verbrauchs der betrachteten Region am Weltverbrauch und sind angelehnt an Methoden aus dem Bereich der Innovationsökonomik. Durch die Analyse dieser Indices über die Zeit können auf einfache und nachvollziehbare Weise Entwicklungen hinsichtlich der Rohstoffabhängigkeiten einzelner Länder oder Regionen aufgezeigt werden. Der Vergleich der beiden Industrienationen Japan und Deutschland zeigt dabei eine sehr hohe Abhängigkeit Deutschlands von Wolfram, den Platingruppenmetallen sowie Bismut, während Japan besonders hohe Abhängigkeiten bezüglich Seltener Erden, Germanium und ebenfalls den Platinmetallen aufweist. Mit Hilfe dieser Indices lassen sich mit verhältnismäßig geringem Aufwand eindeutig quantifizierbare Abhängigkeiten und deren zeitliche Entwicklung aufzeigen, die zur Identifikation verschiedener Rohstoffkandidaten zur individuellen Betrachtung herangezogen werden können.

Wie in dieser Arbeit anhand verschiedener Beispiele gezeigt werden konnte, ist der System-Dynamics Ansatz sehr gut zur Modellierung von Rohstoffsystemen geeignet. Dies liegt insbesondere daran, dass durch die Beziehungen zwischen Bestands- und Flussvariablen sowohl detaillierte Modelle physischer Stoffströme und Produktlebenszyklen als auch dynamische Rückkopplungseffekte und verzögerte Anpassungsmechanismen auf Rohstoffmärkten modelliert werden können. Dabei hat sich die systematische Vorgehensweise, zunächst Stoffstrommodelle auf globaler Ebene zu entwickeln, die anschließend um marktdynamische Effekte erweitert wurden, als sinnvoll erwiesen. Während sich auf globaler Ebene Top-down-Ansätze zur Modellierung der Materialbestände in Verwendung und der offenen Kreislaufsysteme als passend erwiesen haben, wurde insbesondere bei den Technologiemetallen für die Modellierung der Kreislaufsysteme auf Länder- und regionaler Ebene auf produktspezifische Bottom-up-Ansätze zurückgegriffen.

Als Beispiel der Modellentwicklung für ein klassisches Industriemetall wurde in dieser Arbeit der Kupferkreislauf auf globaler und europäischer Ebene umgesetzt. Für das globale Kupfermodell wurde eine geschlossene Massenbilanz durch Anpassung der jährlichen Sammelquoten von Kupfer aus dem gesamten Schrottaufkommen an vorhandene Produktionsdaten für Raffinadekupfer und Kupferhalbzeuge realisiert. Mit Hilfe dieses Modells konnten verschiedene Recyclingquoten für Kupfer definiert werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Sammelquote von kupferhaltigen Schrotten bei ungefähr 65 % liegt, wobei knapp 50 % des insgesamt in obsoleten Produktströmen befindlichen Kupfers als Sekundärkupfer wieder in den Kreislauf eingeführt wird. Das europäische Kupfermodell basiert auf demselben Prinzip wie das globale Modell, allerdings mussten hier Handelsströme auf jeder Stufe der Wertschöpfung berücksichtigt werden. Dabei zeigt sich in Europa eine wesentlich höhere Sammelquote kupferhaltiger Schrotte von durchschnittlich knapp 80 % und eine Recyclingeffizienz der Altschrotte von ca. 65 %. Weiterhin werden ca. 55 % des in Europa verarbeiteten Kupfers aus Schrotten (Neu- und Altschrotte) gewonnen, wobei dieser Wert auf globaler Ebene lediglich bei 35 % liegt.

8.1. Zusammenfassung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse

Während Kupfer als klassisches Industriemetall über eine breite, globale Recyclinginfrastruktur verfügt, werden die meisten Technologiemetalle in weit geringerem Umfang, bzw. kaum rezykliert. Die Notwendigkeit der kontinuierlichen Anpassung der Abfallwirtschaft an den technologischen Wandel wird bei der Betrachtung des Kobaltkreislaufs deutlich. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, ist das Recycling von kobalthaltigen Hartmetallen und Superlegierungen breit etabliert und wird mit hoher Recyclingeffizienz auch durch direkte Beziehungen zwischen Produzenten (von Turbinen, Schneidewerkzeugen etc.) und kommerziellen Nutzern praktiziert. Durch den enormen Nachfrageschub nach Kobalt als Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Batterien in den vergangenen Jahren, was inzwischen für knapp 40 % des weltweit verwendeten Kobalts verantwortlich ist und die bisher nur geringe Sammlung von Altakkus aus Elektronikschrott, zeigt die globale Recyclingeffizienz von Kobalt im Schnitt aller Anwendungsbereiche eine klar fallende Tendenz. Das Potenzial der Rückgewinnung von Kobalt aus alten Li-Ionen-Akkus wird insbesondere bei Betrachtung des europäischen Kobaltkreislaufes sichtbar. Jährlich werden ca. 12 kt Primärkobalt in Form von kobalthaltigen Konzentraten nach Europa importiert und verarbeitet. Da die Batterieindustrie nahezu vollständig in Asien (China, Südkorea und Japan) angesiedelt ist, werden in Form von Elektronikgeräten (Mobiltelefone, Smartphones, Laptops, Tablets etc.) aber auch als Akkus für Werkzeug- und sonstige Maschinen sowie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge ca. 6 kt Kobalt importiert. Zwar ist das Schrottaufkommen durch die relativ lange Verweildauer der Geräte in Verwendung (weit mehr als die reine Nutzungsdauer) derzeit noch recht gering. In den kommenden Jahren ist allerdings, wie das europäische Kobaltmodell zeigt, von einem kontinuierlich steigenden Recyclingpotenzial auszugehen, was es durch die Etablierung geeigneter Sammelssysteme, die Vermeidung des Exports von Elektronikschrotten und die Schaffung zusätzlicher Anreize zur Abgabe von Elektronikaltgeräten (z.B. durch Pfandsysteme) auszuschöpfen gilt.

Die Informationslage zur genauen Produktionsmenge und Verwendungsstruktur von Seltenen Erden ist, wie hier ausführlich dargestellt wurde, mangelhaft. Dies liegt unter anderem daran, dass ein Großteil der Wertschöpfung in China stattfindet und dort offensichtlich erhebliche Unterschiede zwischen den von der Zentralregierung offiziell veröffentlichten Zahlen, die meist den Planvorgaben entsprechen, und den tatsächlichen Produktionszahlen bestehen. Besonders bei den verhältnismäßig knappen und hochpreisigen schweren Seltenen Erden, die hauptsächlich in den südlichen Provinzen Chinas abgebaut werden, ist von einer recht starken Abweichung zwischen offiziellen Zahlen und tatsächlichen Abbaumengen, also illegalem Bergbau, auszugehen. Dennoch sind relativ fundierte Zahlen zur Produktionsmenge von NdFeB-Magneten bekannt. Auf Basis dieser Produktionsmengen wurde das globale Stoffstrommodell für Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe aufgebaut. Wie hier gezeigt werden konnte, ist das globale Schrottaufkommen an NdFeB-Magneten derzeit nach wie vor von Kleinmotoren in Elektronikanwendungen (HDD-Festplatten für PCs und Laptops, CD- und DVD Player, Mobiltelefone, Kameras etc.) sowie von Audioanwendungen, vor allem in Kopfhörern, geprägt. Aufgrund der Problematik der Trennung ferromagnetischer Materialien von der Stahlfraktion in geschredderten Schrotten, findet derzeit kein Recycling von NdFeB-Magneten statt. In den kommenden Jahren werden aber immer mehr Servomotoren aus verschiedensten Maschinen (Pumpen, Aufzugmotoren, Waschmaschinen, sonstige Haushaltsgeräte) sowie Traktionsmotoren aus Hybrid- und Elektrofahrzeugen, oder Generatoren mit Permanentmagneten aus Windkraftanlagen das Schrottaufkommen prägen, während vor allem im Elektronikbereich durch neue Technologien wie die SSD-Festplatte, die

8. Zusammenfassung und Ausblick

keine beweglichen Teile mehr enthält, und die rückläufigen Produktionszahlen von CD- und DVD Laufwerken immer weniger NdFeB-Magnete verbaut werden. Auf Grund des relativ hohen Wertes dieser Magnete und der im Vergleich zu Elektronikanwendungen großen Magnetmasse (z.B. 1-3 kg in Traktionsmotoren von Elektrofahrzeugen), nicht zuletzt verstärkt durch den hohen Anteil an wertvollem Dysprosium zur Erhöhung der Temperaturbeständigkeit der Magnete, ist davon auszugehen, dass die Magnete aus größeren Elektromotoren und Generatoren in Zukunft vermehrt gesammelt und rezykliert werden. Da verschiedene Motorkonzepte mit und ohne Permanentmagnet (Käfigläufer-Asynchronmotor, Synchron-Induktionsmotor, PM-Synchronmotor, Reluktanzmotor etc.) sowie verschiedene Magnetmaterialien (NdFeB-Magnete, Ferrite) existieren, und das Motorkonzept von außen kaum ersichtlich ist, wäre eine gesetzlich vorgeschriebene Markierung der Motoren am Gehäuse für eine effiziente Sammlung von NdFeB-Magneten entscheidend.

Wie das Stoffstrommodell für NdFeB-Magnete in Deutschland gezeigt hat, kann das Recycling der Magnete einen erheblichen Beitrag zu den in Deutschland produzierten Magnetmengen leisten. Die starke, exportorientierte Automobil- und Maschinenbau-Industrie in Deutschland hat allerdings erheblichen Bedarf an NdFeB-Magneten, der zwar nicht eindeutig quantifizierbar ist, aber mit Sicherheit das Recyclingpotenzial in Deutschland bei weitem übersteigt. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass ein Großteil der in Deutschland produzierten Maschinen exportiert wird und auch der Anteil an Exporten gebrauchter Geräte (gebrauchte Pkw, alte Produktionsanlagen, leistungsschwächere Windanlagen in guter Lage, die durch größere Anlagen ersetzt werden) sehr hoch ist. So werden in Deutschland beispielsweise jährlich knapp 6 Mio. Pkw produziert, ca. 3 Mio. Pkw zugelassen, aber nur 0,5 Mio. Pkw verschrottet. Die restlichen ca. 2,5 Mio. Pkw werden als Gebrauchtwagen exportiert, was das Potenzial der Rückgewinnung enthaltener Magnete stark einschränkt.

Während die Stoffstrommodelle insbesondere auf regionaler Ebene bereits erhebliche Informationen zum versorgungsstrategisch bedeutsamen Potenzial des Beitrags von Sekundärmaterial zum gesamten Rohstoffverbrauch liefern, kann eine Ergänzung der globalen Modelle um marktdynamische Rückkopplungseffekte als Werkzeug zur fundierten, methodisch erweiterten Szenarioanalyse unter Berücksichtigung von Nachfrage- und Angebotsentwicklungen herangezogen werden. Dabei kann der qualitativ häufig beschriebene "Regelkreis der Rohstoffversorgung" quantitativ in den Modellen umgesetzt werden.

Eine entscheidende Charakteristik der Märkte von Industriemetallen ist die verzögerte Angebotsanpassung. Zwischen der Entscheidung der Investition in neue Abbau- und Produktionsstätten und dem tatsächlichen Beginn des Rohstoffabbaus vergehen fünf bis zehn Jahre für Planung, Bau und Installation benötigter Infrastruktur. Da, wie in der Literatur mehrfach beschrieben, Investitionsvolumen in Bergbauprojekte sehr eng mit dem aktuellen Preisniveau zusammenhängen, d.h. in Hochpreisphasen aufgrund besserer Markterwartungen auch mehr investiert wird, besteht die Tendenz zur Bildung von Preiszyklen ähnlich zum klassischen Schweinezyklus. Wie in dieser Arbeit anhand des Kupfermarktes gezeigt werden konnte, kann durch die Kopplung des globalen Stoffstrommodells mit einem einfachen Marktmodell, das die verzögerte Anpassung des Angebots berücksichtigt, bereits ein Simulationstool geschaffen werden, das grundlegende Marktmechanismen abbildet und für mittelfristige Marktprognosen herangezogen werden kann. So kann auf Basis der Erwartungen der Weltbank zur Entwicklung der Weltwirtschaft davon ausgegangen werden, dass

8.1. Zusammenfassung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse

der seit 2011 anhaltende Preisverfall mit dem Jahr 2016 seinen Tiefpunkt erreicht hat. Dennoch ist zunächst nicht mit einer signifikanten Erholung der Preise zu rechnen, da sich erst ab 2018 die rückläufigen Investitionen im Angebot niederschlagen. Diese Vorausschau basiert auf exogenen Annahmen zur wirtschaftlichen Entwicklung und ist grundsätzlich mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten. Dennoch konnte hier gezeigt werden, inwiefern System Dynamics Modelle zur Entwicklung eines besseren Marktverständnisses herangezogen werden können. Dies stellt eine sinnvolle Ergänzung zu bisherigen Studien dar, welche die erwartete Angebots- und Nachfrageentwicklung gegeneinander stellen, ohne entsprechende Anpassungsmechanismen zu berücksichtigen.

Zur Modellierung der Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebssysteme im Automobilmarkt auf die Nachfrage nach Kobalt als Kathodenmaterial für Li-Ionen-Batterien bzw. Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe für Traktionsmotoren, wurden die globalen dynamischen Stoffstrommodelle mit einem bereits vorhandenen Flottenmodell gekoppelt. Während Kupfer als klassisches Industriemetall über eine breite eigene Produktionsinfrastruktur verfügt und das Angebot sich zwar verzögert, aber grundsätzlich einer steigenden Nachfrage anpassen wird, ist Kobalt hauptsächlich (ca. 90 %) Nebenprodukt der Nickel- und Kupferproduktion wobei die Seltenen Erden Neodym und Dysprosium ausschließlich im Verbund mit weiteren geologisch vergesellschafteten Seltenen Erden abgebaut werden. Daher ist die Anpassungsfähigkeit des Angebots dieser Rohstoffe auf steigende Nachfrage nur in sehr begrenztem Umfang zu erwarten. Vielmehr ist davon auszugehen, dass es im Falle einer Verknappung durch starke Nachfrage seitens neuer Technologien zu einer Nachfrageanpassung in Form von materieller und funktionaler Substitution in anderen Bereichen kommen wird. Inwiefern derartige Anpassungsmechanismen aussehen könnten, lässt sich in verschiedenen Szenarien mit den hier vorgestellten Modellen darstellen. Dabei konnte insbesondere für Dysprosium, das für die Temperaturbeständigkeit der NdFeB-Magnete entscheidend ist, eine erhebliche Auswirkung des potenziellen Nachfrageimpulses seitens alternativer Antriebssysteme aufgezeigt werden. Trotz erwarteter Effizienzsteigerungen (identische Magneteigenschaften mit weniger Dysprosiemeinsatz), werden hier im Falle einer stärkeren Diffusion alternativer Antriebssysteme Anpassungen in anderen Bereichen durch Verwendung von Alternativtechnologien ohne NdFeB-Magnete (insbesondere bei Servomotoren im breiten industriellen Einsatz und im Bereich der Windenergie) stattfinden müssen.

Die Auswirkungen der Diffusion alternativer Antriebe auf den Kobaltmarkt sind, wie hier gezeigt wurde, etwas geringer als im Falle von Dysprosium. Dies liegt einerseits an den verhältnismäßig kleinen Batterien in Hybridfahrzeugen, die den Markt alternativer Antriebe dominieren werden, andererseits an bereits eintretenden Substitutionseffekten von Kobalt als Kathodenmaterial. Durch die verstärkte Substitution von reinen Kobaltdioxid-Kathoden im Bereich der Elektronikanwendungen (Laptops, Tablets etc.) mit nach wie vor kobalthaltigen Mischkathoden, deren Kobaltgehalt aber um über 60 % reduziert wurde, und einer verstärkten Verwendung von Eisenphosphat Kathoden im Automobilbereich wird einer Rohstoffknappheit entgegengewirkt.

Weiterhin konnte mit Hilfe der um Marktdynamik erweiterten Stoffstrommodelle die unterschiedliche Anpassungsfähigkeit der Nachfrage der betrachteten Märkte aufgezeigt werden. So besitzt der Kupfermarkt durch die breite Verwendung von Kupfer im Bausektor (Dächer, Dachrinnen, Fassaden, Messinggeländer,

8. Zusammenfassung und Ausblick

aber auch Heizungsrohre etc.) Nachfragebereiche, die im Falle einer unerwarteten Verknappung (z.B. auf Grund von Konflikten, Exportrestriktionen, Naturkatastrophen) und steigender Preise rasch auf Alternativwerkstoffe zurückgreifen können. Ein derartiger Puffer besteht bei Technologiemetallen nicht, da hier die Substitution mit einem weit höheren Aufwand für die Umstellung der Produktionsprozesse bzw. für die Entwicklung von Alternativwerkstoffen notwendig ist, der zu einer langsamen und verzögerten Nachfrageanpassung führt. Hierdurch lassen sich tendenziell die in den vergangenen Jahren auf den Märkten verschiedener Technologiemetalle (Tantal, Indium, Rhodium, Seltene Erden) beobachteten extremen Preisausschläge bei verhältnismäßig geringer Änderung des Angebots erklären. Auch diese Zusammenhänge können mit Hilfe der systemdynamischen Modelle, wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, dargestellt werden.

8.2. Ausblick auf zukünftige Forschungsarbeit

Wie zuvor erläutert, lag das Ziel dieser Arbeit in erster Linie darin, Methoden zur Verbesserung bisheriger Ansätze für die Bewertung von Versorgungsrisiken, aber auch zur Quantifizierung von Recyclingpotenzialen und für die Abschätzung zukünftiger Marktentwicklungen zu entwickeln und zu erproben. Die hier vorgestellten Ansätze können auf verschiedenste Weise in zukünftigen Arbeiten berücksichtigt werden.

So sollte die Kritikalitätsbewertung der EU unter Verwendung einer Kritikalitätsmatrix den hier aufgezeigten engen Zusammenhang zur klassischen Risikomatrix in Zukunft berücksichtigen und die angesetzte Methodik sowie die Liste der kritischen Rohstoffe entsprechend anpassen. Auch sollten die Prinzipien der hier vorgestellten systemdynamischen Marktmodelle unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen Angebot und Nachfrage in zukünftigen Studien stärker berücksichtigt werden. Wie in dieser Arbeit aufgezeigt wurde, basieren bisherige Ansätze zur Quantifizierung zukünftiger Rohstoffbedarfe häufig auf reinen nachfrageseitigen Betrachtungen, die keine Anpassungsmechanismen an den Rohstoffmärkten einbeziehen.

Insbesondere die regionalen Stoffstrommodelle sind sehr gut dazu geeignet, Recyclingpotenziale aufzuzeigen und durch den Vergleich des Bedarfs an Primärmaterial mit dem Potenzial der Rohstoffrückgewinnung aus obsoleten Produktströmen die versorgungsstrategische Relevanz des Recyclings zu quantifizieren. Diesbezüglich besteht nach wie vor erheblicher Bedarf an rohstoffspezifischen Untersuchungen. Während in dieser Arbeit die Verwendungsstrukturen einzelner Rohstoffe untersucht wurden, lassen sich mit derselben Methodik auch produktspezifische Potenzialanalysen durchführen. So ist das Recycling von Mobiltelefonen nicht nur wegen der enthaltenen Akkus zur Rückgewinnung von Kobalt, oder der Lautsprecher und Vibrationsmotoren zum Recycling der Magnetwerkstoffe, sondern auch zur potenziellen Wiederverwertung zahlreicher weiterer Metalle sinnvoll. Da grundsätzlich die Altprodukte als ganzes verarbeitet werden müssen, erscheinen insbesondere aus Sicht der Recyclingindustrie produktspezifische Modelle sinnvoll (vergl. Reuter und van Schaik, 2012), die auf gleiche Weise wie die hier vorgestellten rohstoffspezifischen Modelle über einfache Bottom-up-Ansätze umgesetzt werden können.

Insgesamt lassen sich die hier vorgestellten Methoden basierend auf dem System Dynamics Ansatz für verschiedenste Rohstoffe und rohstoffspezifische Fragestellungen insbesondere hinsichtlich der Modellie-

rung von Kreislaufsystemen, Produktlebenszyklen und Materialakkumulationen in Verwendung, aber auch zur Entwicklung von Marktmodellen und Werkzeugen für erweiterte Szenarioanalysen heranziehen. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze zur Bewertung der relativen wirtschaftlichen Bedeutung einzelner Rohstoffe ebenso wie die Ansätze in bisherigen Studien, die hauptsächlich darauf basieren die Gewichtung einzelner Branchen an der gesamten Bruttowertschöpfung zu berechnen, sind lediglich als grobes Screening einer größeren Menge an Rohstoffen zu verstehen. Obwohl es insgesamt sehr schwierig ist, die wirtschaftlichen Auswirkungen von Versorgungsstörungen abzusehen, bieten die regionalen Stoffstrommodelle durch die Güterklassifikationen der Handels- und Produktionsdaten Anknüpfungspunkte für ökonomische Input-Output Modelle, die die Vernetzung einzelner Branchen berücksichtigen und auf diese Weise fundierte Analysen potenzieller Auswirkungen von Versorgungsengpässen auf nationaler oder regionaler Ebene ermöglichen. Auch dies könnte Bestand zukünftiger Forschungsarbeiten werden.

A. Anhang

Analog zu den Beziehungen und Abhängigkeiten in der Primärproduktion treten auch im Recycling, wie Abbildung A.2 zeigt, typische Akkumulationen verschiedener Technologiemetalle in den Schredderfraktionen, Schlacken, Schlämmen, Aschen und Sekundärmaterialien der Hauptmetalle auf.

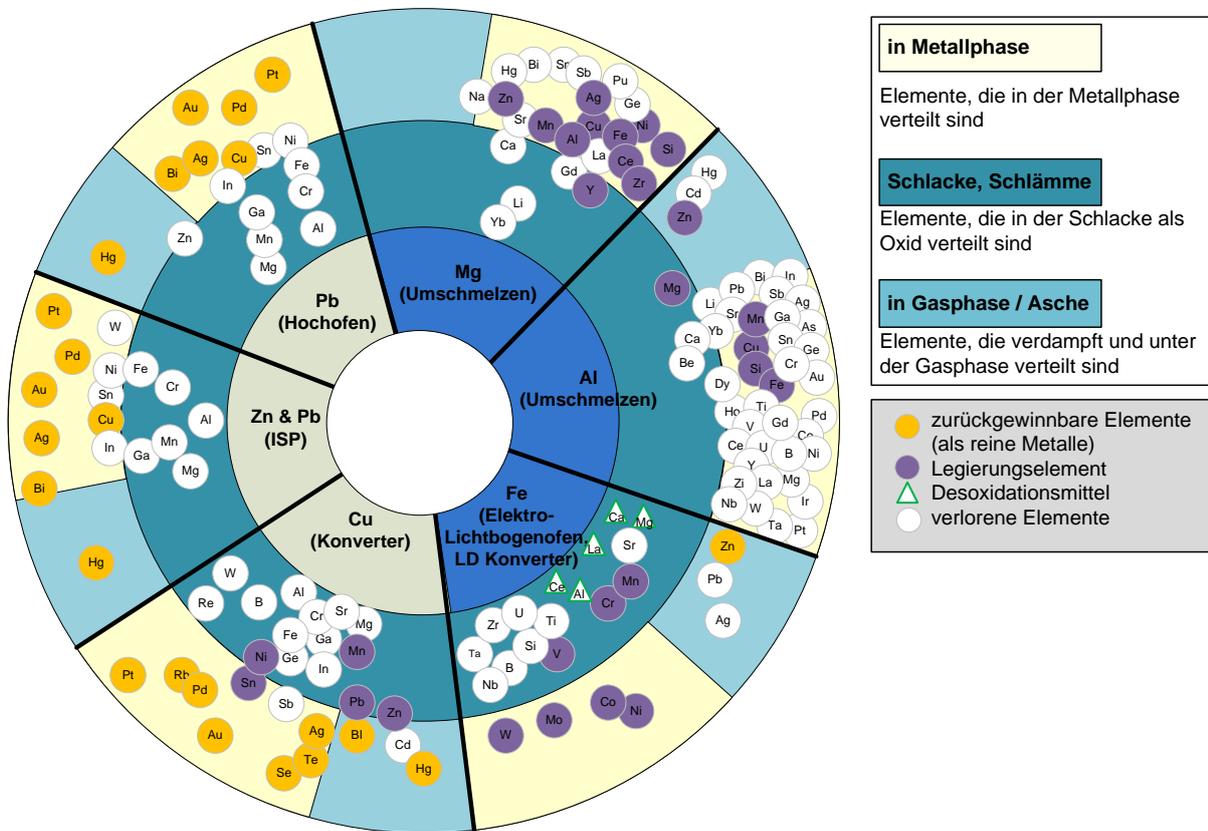


Abbildung A.2. – Akkumulation von Technologiemetallen in aktuellen Recyclingprozessen (vergl. Rotter, 2012).

A.2. Datentabellen und methodische Ergänzungen zu den statistischen Analysen

Zu den in Kapitel 3 durchgeführten statistischen Analysen und den im Verlauf der Arbeit erfolgten Trend- und Zeitreihenanalysen werden nachfolgend ergänzende Informationen und Daten gegeben.

A.2.1. Datengrundlage Multivariate Analysemethoden

Die in Kapitel 3 durchgeführten Multivariaten Analyse-Methoden basieren auf der in Tabelle A.1 zusammengefasste Datengrundlage.

Tabelle A.1. – Datenbasis der Clusteranalyse und der statistischen Auswertung Kapitel 3. Die Datenquellen werden in Tabelle 3.2 erläutert.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16
	1000\$/t	%	–	kt	–	%	–	ppmw	Jahre	%	kt	–	–	–	–	–
Sb	9	86,06%	0	175,2	0,71	0,52	0,00	0,20	16	0,11	147,39	0,15	1,00	0,91	0,00	0,88
Be	391	40,56%	0	5,03	0,79	0,00	0,00	2,80	70	0,01	0,75	0,36	1,00	0,00	0,00	0,89
Bi	22	31,68%	0	7,82	0,71	1,06	0,00	0,01	40	0,01	14,97	0,29	5,00	0,83	0,00	0,00
Cr	10	33,10%	0	7650	0,20	0,40	1,00	102	20	0,50	9367	0,21	10,00	0,97	0,01	0,99
Co	46	62,60%	1	88,76	0,31	1,37	0,00	25,00	70	0,50	128,61	0,15	3,00	0,90	0,40	0,83
Dy	961	166,33%	0	1,80	0,96	0,58	0,00	5,20	100	0,01	4,58	0,21	1,00	0,96	3,80	0,87
Ga	530	66,60%	0	0,26	0,33	0,42	0,00	19,00	100	0,01	36,20	0,11	2,00	0,84	6,09	0,68
Ge	1264	34,96%	0	0,11	0,91	0,82	0,00	1,50	5	0,01	36,20	0,15	2,00	0,38	2,44	0,71
In	653	36,51%	0	0,65	0,33	0,89	0,00	0,25	10	0,01	36,20	0,20	1,00	0,96	3,29	0,91
Mg	3	45,60%	0	754,8	0,76	0,54	1,00	23300	100	0,40	4826	0,20	8,00	0,96	0,00	0,82
Mn	3	29,93%	0	10795	0,15	0,44	1,00	950	44	0,50	18406	0,27	3,00	0,65	0,00	0,95
Nd	132	184,70%	0	21,68	0,96	0,58	0,00	41,50	100	0,01	53,39	0,21	1,00	0,96	3,82	0,87
Nb	33	13,74%	0	39,41	0,79	0,60	0,50	20	44	0,50	138,85	0,65	5,00	0,95	0,03	0,70
Pd	16192	77,60%	0	0,11	0,47	0,00	0,00	0,02	100	0,70	1,48	0,23	1,00	0,94	0,34	0,75
Pt	49295	24,80%	0	0,19	0,62	0,18	0,50	0,01	100	0,80	0,59	0,25	2,00	0,94	1,56	0,75
Re	5936	103,89%	0	0,04	0,35	0,24	0,00	0,00	60	0,65	0,15	0,22	5,00	0,94	0,00	0,89
Rh	6055	153,82%	0	0,11	0,47	0,00	0,00	0,00	50	0,55	0,15	0,22	1,00	0,91	0,34	0,75
Ag	159	19,66%	1	23,11	0,11	0,26	1,00	0,08	15	0,50	107,25	0,13	5,00	0,96	0,78	0,71
Ta	161	122,56%	0	0,64	0,18	0,00	0,50	2,00	70	0,01	138,85	0,65	3,00	0,67	1,01	0,40
W	34	49,45%	0	68,67	0,74	0,90	1,00	1,25	43	0,15	59	0,17	5,00	0,78	0,00	0,77
Sn	20	45,44%	1	249	0,24	0,35	1,00	2,30	23	0,50	357	0,13	1,00	0,55	0,77	0,00
Cu	7	36,90%	1	16860	0,15	0,24	1,00	60	40	0,50	24096	0,05	10,00	0,96	0,24	0,56
Al	2	32,17%	1	40752	0,00	0,67	1,00	82300	100	0,50	97031	0,13	10,00	0,99	0,00	0,70
Ni	19	34,16%	1	1404	0,10	0,20	1,00	84	35	0,50	39955	0,34	10,00	0,96	0,00	0,92
Pb	2	30,08%	1	4161	0,24	0,31	1,00	14	17	0,50	5317	0,04	1,00	0,54	0,00	0,00
Zn	2	22,26%	1	12150	0,14	0,38	1,00	70	19	0,50	16303	0,05	10,00	0,97	0,00	0,67

A.3. Zusatzinformationen zur System Dynamics Modellierung

Einige zusätzlichen Erläuterungen zur Methodik der systemdynamischen Modellierung werden nachfolgend zusammengefasst.

A.3.1. System Dynamics Softwarelösungen

Neben “Vensim”, was in dieser Arbeit verwendet wurde, existieren noch einige anderen Softwarelösungen, die für die System Dynamics Modellierung optimiert wurden. Diese werden im Folgenden mit kurzer Beschreibung aufgelistet:

STELLA/iThink¹

Die US-amerikanische Firma isee systems brachte in den 1980er Jahren mit der Software STELLA die erste Simulationssoftware mit einer grafischen Benutzeroberfläche auf den Markt. Zusammen mit der Software iThink zur speziellen Simulation von Geschäftsprozessen zeichnet sich STELLA vor allem durch den modularen Charakter der Modellierung aus. Einzelne Modellbausteine lassen sich so leicht in anderen Modellen wiederverwenden. Die Software dient sowohl zur Verhaltensbeschreibung existierender Systeme als auch zur Szenario-Planung und als Unterstützungssoftware in der Entscheidungsfindung und ist sowohl für Windows- als auch für Macintosh-Betriebssysteme erhältlich.

POWERSIM Studio²

Die Software POWERSIM der norwegischen Firma Powersim Software AS eignet sich besonders für komplexe Modelle mit mehreren beteiligten Personen. Trackingfunktionen, die Unterstützung von Teamarbeit und die einfache Anbindung an Unternehmenssoftware wie SAP oder an Datenbanken wie Access oder SQL unterstützen vor allem den Einsatz im Unternehmensumfeld.

AnyLogic³

AnyLogic vereinigt die drei etablierten Modellierungstechniken, systemdynamische, ereignisorientierte und agentenbasierte Modellierung. Der flexible Einsatz von AnyLogic wird dabei durch einen modularen Aufbau, durch Schnittstellen zu zahlreichen externen Datenbanken und durch eine Java basierte Programmierumgebung ergänzt. Diese erlaubt das Erstellen eines von der Entwicklungsumgebung unabhängigen Modells, welches als eigenständige Java-Applikation exportiert werden kann.

Matlab/Simulink⁴

Simulink ist eine Software des Herstellers The MathWorks und ist eine Modellentwicklungserweiterung der weit verbreiteten Mathe-Software und Entwicklungsumgebung MATLAB. Die im technisch-ingenieurwissenschaftlichen Bereich weit verbreitete Software (Signalverarbeitung, Regelungstechnik etc.) ermöglicht auch die Modellierung von klassischen System Dynamics Problemen. Die sehr vielseitige Entwicklungsumgebung ist allerdings nicht für diesen speziellen Anwendungsbereich optimiert, was den Einstieg in die Modellierung durchaus erschweren kann. Vorteil dieser Systemlösung ist allerdings das sehr umfangreiche Angebot an Optimierungsalgorithmen und vordefinierten Funktionen innerhalb der MATLAB Entwicklungsumgebung.

¹vergl. Herstellerwebseite: <http://www.iseesystems.com/>

²vergl. Herstellerwebseite: <http://www.powersim.com/>

³vergl. Herstellerwebseite: <http://www.anylogic.com/>

⁴vergl. Herstellerwebseite: <http://www.mathworks.de/products/simulink>

A.3.2. Optimierungsalgorithmus zur Kalibrierung der Modelle in Vensim

Der von der System Dynamics Software “Vensim” zur Verfügung gestellte Algorithmus zur Kalibrierung der Modelle anhand historischer Realdaten ist ein iterativer heuristischer Optimierungsprozess. Dabei wird das eigentliche Modell als “Black Box” gesehen, d.h. die im Modell definierten funktionalen Zusammenhänge spielen für die Optimierung keine Rolle. Es werden lediglich der Reihe nach optimale Werte der einzelnen Kalibrierparameter gesucht, mit dem Ziel die Abweichung zwischen tatsächlichen historischen Werten und Modellergebnissen zu minimieren. Der Optimierungsprozess basiert auf einem sogenannten “Powell Hill Climbing Algorithmus”. Powell (1964) entwickelte einen relativ einfachen Algorithmus zur Bestimmung lokaler Minima von mathematischen Funktionen, ohne diese differenzieren zu müssen. So lassen sich insbesondere bei komplexen und nicht kontinuierlichen Funktionen, wie sie in System Dynamics Modellen vorkommen, Extremwerte bestimmen. Der von Powell entwickelte Ansatz wurde im Laufe der Zeit weiterentwickelt (vergl. z.B. Brent, 2013, S.124 ff.) und für die computergestützte Modellierung optimiert. Brents “PRAXIS Algorithmus (PRincipal AXIS)” wurde unter anderem in den Programmiersprachen C und PASCAL implementiert (Gegenfurtner, 1992; Unlü und Kickmeier-Rust, 2008) und wird von “Vensim” als Standardoptimierer genutzt. Das grundlegende Prinzip der iterativen Modellkalibrierung ist in Abbildung A.3 dargestellt.

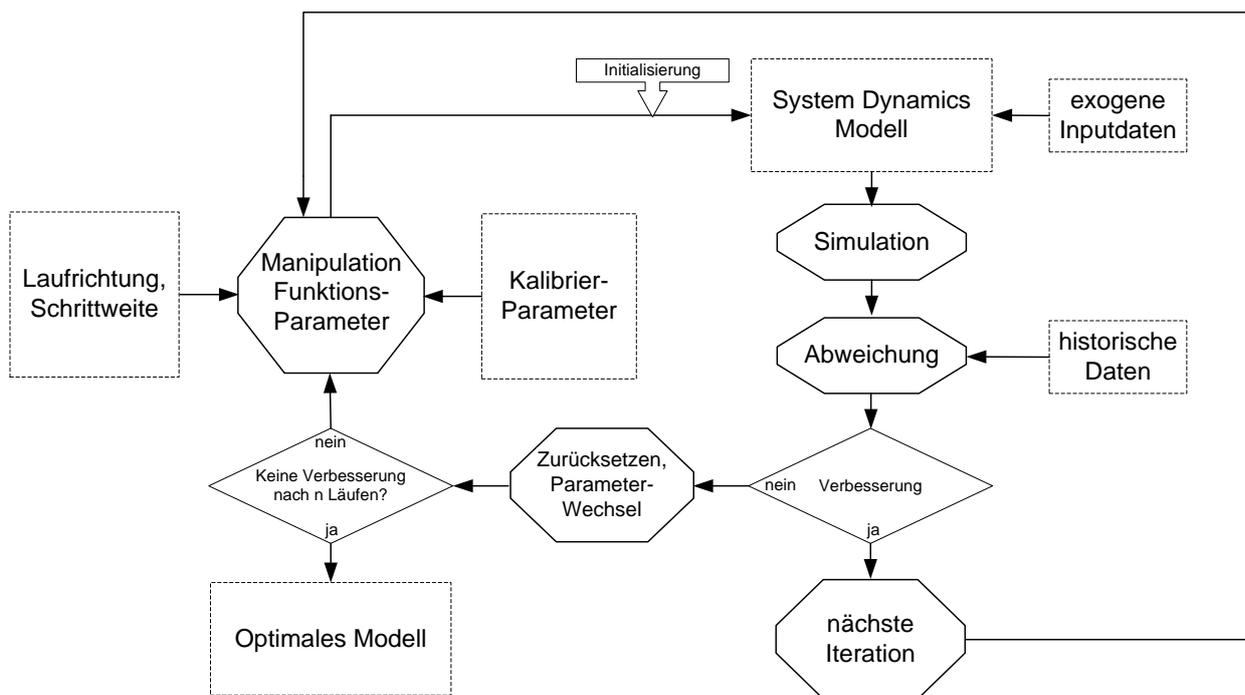


Abbildung A.3. – Kalibrier-Prozess nach Powell und Brent (vergl. Brent, 2013, S.124 ff.).

A.3.3. Mathematische Erläuterungen zu numerischen Lösungsmethoden von Differenzialgleichungen

Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, basiert der System Dynamics Ansatz aus mathematischer Sicht auf einem System von Differenzialgleichungen, die über verschiedene Integratoren ⁵ numerisch gelöst werden. Einen ergänzenden Einblick in die mathematischen Grundlagen zur numerischen Lösung von allgemeinen Differenzialgleichungen (DGLs) soll im Folgenden gegeben werden:

Neben den algebraischen Gleichungen, die im Allgemeinen durch eine konkrete Zahl gelöst werden, bilden Differenzialgleichungen ein umfangreiches Gebiet der analytischen Mathematik. Als Differenzialgleichung wird eine Gleichung zwischen einer Funktion, ihren Ableitungen und der in der Funktion auftretenden Variablen bezeichnet. Die exakte analytische Lösung einer Differenzialgleichung ist folglich eine stetige Funktion, die über ihre Ableitungen die vorgegebene Differenzialgleichung erfüllt (Benker, 2005, S.18). Der Grad einer Differenzialgleichung wird durch die höchste in der Gleichung auftretende Ableitung bestimmt. Eine Differenzialgleichung ersten Grades hängt folglich nur von der ersten Ableitung der Lösungsfunktion ab, während eine Differenzialgleichung n-ten Grades die n-te Ableitung der Lösungsfunktion beinhaltet. Häufig wird zusätzlich zwischen linearen- und nichtlinearen Differenzialgleichungen unterschieden, was in Gleichung A.1 verdeutlicht wird.

Weiterhin ist die Unterscheidung zwischen gewöhnlichen und partiellen Differenzialgleichungen zu erläutern. Während gewöhnliche Differenzialgleichungen lediglich eine unabhängige Variable enthalten, sind partielle Differenzialgleichungen von mehreren unabhängigen Variablen abhängig. In Gleichung A.1 sind die relevanten Formen von Differenzialgleichungen aufgeführt. Zu beachten ist hierbei, dass $y^n(x)$ die n-te Ableitung von y nach x darstellt. A ist eine allgemeine Konstante.

$$\begin{array}{ll}
 \frac{\partial y(x)}{\partial x} = A \cdot y(x) & \text{lineare gewöhnliche DGL 1. Grades} \\
 \frac{\partial y(x)}{\partial x} = f(x, y(x)) & \text{gewöhnliche DGL 1. Grades} \\
 \frac{\partial y(x)}{\partial x} = f(x, y(x), y^n(x)) & \text{gewöhnliche DGL n-ten Grades} \\
 \frac{\partial y(x, z)}{\partial z} = f(x, z, y(x, z), \frac{\partial y(x, z)}{\partial x}) & \text{partielle DGL 1. Grades mit zwei Variablen}
 \end{array} \tag{A.1}$$

Die Lösungsproblematik allgemeiner Differenzialgleichungen ist wesentlich höher als die algebraischer Problemstellungen. Häufig lassen sich Differenzialgleichungen nur numerisch, d.h. näherungsweise lösen. Über eine Differenzialgleichung werden Prozesse kontinuierlich innerhalb ihres Definitionsbereichs beschrieben. Durch die diskrete Beschreibung der Differenzialgleichung an einem bestimmten Punkt geht diese in eine Differenzengleichung über. Gewöhnliche Differenzialgleichungen lassen sich folglich durch Diskretisierung in Differenzengleichungen überführen, was bei numerischen Lösungsmethoden angesetzt wird.

Aus einem System Dynamics Modell resultieren Systeme aus Differenzialgleichungen erster Ordnung, die sich als reines Anfangswertproblem lösen lassen. Differenzialgleichungen höherer Ordnung sind durch die Vorgabe des reinen Anfangswertes meist nicht eindeutig lösbar, d.h. neben dem Anfangswert muss noch ein Randwert vorgegeben werden, sodass die Integration innerhalb vorgegebener Grenzen erfolgt. Dies ist für die System Dynamics Modellierung nicht relevant. Bei numerischen Lösungsmethoden wird zwischen expliziten und impliziten Methoden unterschieden, deren Grundprinzipien hier kurz vorgestellt werden. Ausgehend von der in Gleichung A.1 beschriebenen allgemeinen Differenzialgleichung erster Ordnung wird

⁵mathematische Algorithmen zur numerischen Lösung von allgemeinen Systemen aus Differenzialgleichungen

A.3. Zusatzinformationen zur System Dynamics Modellierung

versucht an einem diskreten Punkt x_i im Intervall $[a, b]$ den Wert von y näherungsweise zu bestimmen. Es ist ausreichend eine Differenzialgleichung erster Ordnung zu betrachten, da jede Differenzialgleichung n -ter Ordnung in ein System von n Differenzialgleichungen erster Ordnung überführt werden kann.

$$\begin{aligned} y'(x) &= f(x, y(x)) & x \in [a, b] \\ y(a) &= y_0 & \text{(Anfangswert)} \end{aligned} \quad (\text{A.2})$$

Zu beachten ist, dass y und f auch Vektoren sein können, also hier nicht eine einzige Differenzialgleichung, sondern ein System gewöhnlicher Differenzialgleichungen betrachtet wird. Um im oben genannten Beispiel y_{i+1} an der Stelle $x_{i+1} = x_i + h$ zu bestimmen, wird die Gleichung formal integriert.

$$y_{i+1} - y_i = \int_{x_i}^{x_{i+h}} f(x, y(x)) dx \quad (\text{A.3})$$

Zur näherungsweisen Lösung dieses Integrals gibt es vielfache Ansätze. Die einfachste Näherung bietet ein explizites Eulerverfahren, in dem das Integral durch seine Untermengen approximiert wird.

$$\int_{x_i}^{x_{i+h}} f(x, y(x)) dx \cong h \cdot f(x_i, y(x_i)) = h \cdot f(x_i, y_i) \quad (\text{A.4})$$

Dies führt dann zur folgenden Iteration:

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x_i, y_i) \quad (\text{A.5})$$

Zu lösen ist hier lediglich ein lineares Gleichungssystem, was den Vorteil expliziter Verfahren gegenüber impliziter Verfahren verdeutlicht. Bei Approximation des obigen Integrals über die Obersummen ergibt sich ein implizites Eulerverfahren, das die selbe Fehlergenauigkeit wie das explizite Verfahren liefert, allerdings aufwendiger zu lösen ist, da sich ein nichtlineares Gleichungssystem ergibt:

$$\int_{x_i}^{x_{i+h}} f(x, y(x)) dx \cong h \cdot f((x_i + h), y(x_i + h)) = h \cdot f(x_{i+1}, y_{i+1}) \quad (\text{A.6})$$

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x_{i+1}, y_{i+1}) \quad (\text{A.7})$$

Das hierbei entstehende nichtlineare Gleichungssystem muss wiederum iterativ mit Hilfe des Newtonverfahrens, einer Taylorreihe oder eines alternativen Verfahrens gelöst werden, was je nach Problemstellung einen erheblichen zusätzlichen Rechenaufwand bedeutet (vergl. z.B. Grüne, 2008, S.33 ff.).

Anstelle der Approximation über Ober- bzw. Untersummen bietet sich die Möglichkeit der verbesserten Näherung durch Anwendung der Mittelpunktsregel. Das verbesserte Eulerverfahren (auch Euler-Heun-Verfahren genannt) basiert auf der Anwendung der Trapezregel und wird häufig als einfacher Lösungsalgorithmus in gängiger Mathesoftware zur Verfügung gestellt.

$$\int_{x_i}^{x_{i+h}} f(x, y(x)) dx \cong \frac{h}{2} \cdot [f(x_i, y(x_i + h)) + f((x_i + h), y(x_i + h))] \quad (\text{A.8})$$

Runge-Kutta-Verfahren sind die am häufigsten verwendeten Verfahren zur numerischen Lösung von Differenzialgleichungen, bzw. von Systemen gewöhnlicher Differenzialgleichungen (Grüne, 2008, S.26). Sie basieren auf dem Prinzip, mehrere Rechenschritte zu kombinieren und so eine höhere Genauigkeit zu errei-

A. Anhang

chen. Runge-Kutta-Verfahren haben grundsätzlich folgende Form:

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot \sum_{m=1}^r (b_m \cdot k_m) \quad (\text{A.9})$$

$$k_m = f([x_i + c_n \cdot h], [y_i + \sum_{m=1}^r (a_{n,m} \cdot k_n)]) \quad (\text{A.10})$$

Die in der Gleichung benötigten Koeffizienten werden im Allgemeinen in einem Butcher-Schema angegeben, das wie folgt aussieht (Grüne, 2008, S.26):

$$\left| \begin{array}{cccc|cccc} c_1 & a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,r} & & & & \\ c_2 & a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,r} & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & & & \\ c_r & a_{r,1} & a_{r,2} & \cdots & a_{r,r} & & & & \\ \hline & b_1 & b_2 & \cdots & b_r - 1 & b_r & & & \end{array} \right|$$

Grundsätzlich gilt in dieser Darstellungsweise: $c_1 = 0$, $a_{n,m} = 0$ für $n \geq m$.

Runge-Kutta-Verfahren lassen sich sowohl explizit als auch implizit definieren. Abhängig von der Anzahl der kombinierten Rechenschritte wird die Ordnung des Verfahrens bestimmt.

Das klassische Runge-Kutta-Verfahren ist wie folgt definiert:

$$\begin{array}{c|cccc} 0 & & & & \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & & & \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & & \\ 1 & 0 & 0 & 1 & \\ \hline & \frac{1}{6} & \frac{2}{6} & \frac{2}{6} & \frac{1}{6} \end{array}$$

Ziel einer Näherung ist es, mit möglichst wenigen Funktionsauswertungen pro Schritt eine möglichst hohe Ordnung zu erreichen, da die Ordnung ausschlaggebend für die Genauigkeit der Näherung ist. Da mit steigender Anzahl der Ordnung des Verfahrens die Anzahl der minimal notwendigen Funktionsauswertungen überproportional steigt, während bei einem Verfahren 4. Ordnung lediglich mindestens 4 Stufen berechnet werden müssen, werden Verfahren 4. Ordnung häufig eingesetzt.

A.4. Handelsdaten

Ergänzende Informationen zur Erhebung der für die statistischen Auswertungen und regionalen Stoffstrommodelle relevanten Handelsdaten werden nachfolgend gegeben.

A.4.1. UN Comtrade für internationale Handelsdaten

Die Vereinten Nationen verfügen mit ihrer Datenbank zum Welthandel (UN Comtrade) über die umfassendste globale Handelsdatenbank. Diese auf dem Harmonized System (6-stellige HS Codes) basierende Datenbank wurde zur Auswertung der Handelsdaten herangezogen. Hierzu wurden alle Daten (pro Jahr ca. 6 Mio. Datensätze) in eine auf SQL basierende lokale Datenbank eingespeist und dort weiterverarbeitet. Die Struktur der Handelsdatenbank in Form eines "Entity Relation Diagrams (ERD)" ist in Abbildung A.4 dargestellt.

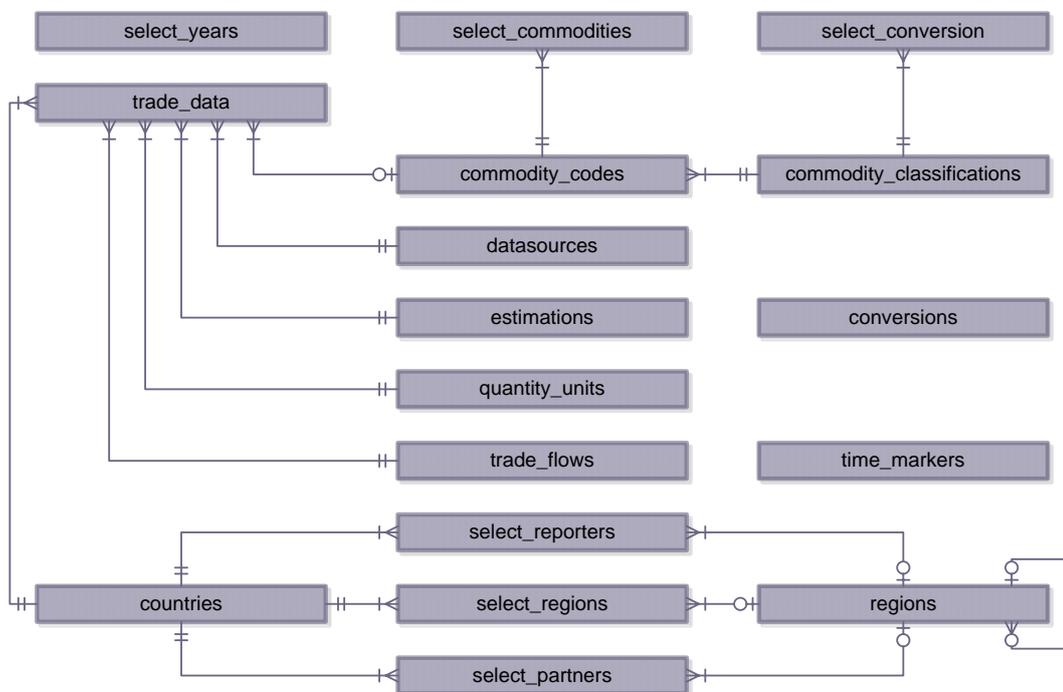


Abbildung A.4. – Struktur der Datenbank zur Analyse von Handelsströmen.

Insgesamt enthält die UN Comtrade Datenbank, bzw. die HS-Güterklassifikation aktuell über 6000 verschiedene Güterklassen. Die für die Rohstoffanalysen relevanten werden nachfolgend aufgelistet.

A.4.2. Güterklassifikationen (HS-Codes)

Die für die Rohstoffanalyse relevanten Güterklassifikationen (HS1992 Klassifikation, oder H0) sind in den folgenden Tabellen aufgelistet.

Tabelle A.2. – HS Codes der in verschiedenen Studien als kritisch identifizierten Rohstoffe als Datenbasis für die statistischen Analysen in Kapitel 3. Die Materialgehalte resultieren aus stöchiometrischen Verhältnissen oder basieren auf Literaturangaben (vergl. insbesondere UEIC, 2003)

Rohstoff	H0-Code	Beschreibung nach UN Comtrade	Gehalt in %
Antimon	261710	Antimony ores and concentrates	70
Antimon	282580	Antimony oxides	80
Antimon	811000	Antimony and articles thereof, including waste and scrap	100
Beryllium	811219	Beryllium, articles thereof, nes	100
Beryllium	811211	Beryllium, unwrought, waste or scrap/powders	100
Bismut	283422	Bismuth nitrates	55
Bismut	283693	Bismuth carbonate	82
Bismut	810600	Bismuth, articles thereof, waste or scrap	100
Chrom	283323	Chromium sulphates	26
Chrom	261000	Chromium ores and concentrates	33
Chrom	281910	Chromium trioxide	68
Chrom	281990	Chromium oxides, hydroxides except chromium trioxide	62
Chrom	811220	Chromium, articles thereof, waste or scrap/powders	100
Cobalt	260500	Cobalt ores and concentrates	20
Cobalt	282200	Cobalt oxides and hydroxides; commercial cobalt oxides	74
Cobalt	810510	Cobalt mattes and other intermediate products of cobalt metallurgy; unwrought cobalt; waste and scrap; powders	95
Cobalt	291523	Cobalt acetates	25
Gallium Indium Hafnium	811291	Rare metals nes, unwrought/waste or scrap (incl. Gallium, but not exclusive)	100
Germanium	282560	Germanium oxides and zirconium dioxide	79
Gallium Indium Hafnium	811299	Articles of rare metals nes	100
Germanium	811230	Germanium, articles thereof, waste or scrap/powders	100
Lithium	282520	Lithium oxide and hydroxide	40
Lithium	283691	Lithium carbonates	19
Magnesium	251910	Natural magnesium carbonate (magnesite)	29
Magnesium	251990	Magnesia, fused, dead-burned etc and magnesium oxide	60
Magnesium	281610	Magnesium hydroxide and peroxide	50
Magnesium	810411	Magnesium unwrought >99.8% pure	100
Magnesium	810419	Magnesium unwrought nes	100
Mangan	260200	Manganese ores, concentrates, iron ores >20% Manganes	50
Mangan	282010	Manganese dioxide	63
Mangan	282090	Manganese oxides other than manganese dioxide	70
Molybdän	261310	Molybdenum concentrates, roasted	67
Molybdän	261390	Molybdenum ores and concentrates except roasted	54
Molybdän	282570	Molybdenum oxides and hydroxides	70
Molybdän	810210	Molybdenum, powder	100
Molybdän	810291	Molybdenum, unwrought, bars/rods simply sintered,scra	100
Niob Tantal	261590	Niobium, tantalum and vanadium ores and concentrates	30
Niob Tantal	810310	Unwrought tantalum, including bars and rods obtained simply by sintering; waste and scrap; powders	100
Palladium	711021	Palladium unwrought or in powder form	100
Platin	711011	Platinum unwrought or in powder form	100
Platin-Gruppe	711041	Iridium, osmium and ruthenium unwrought or powder for	100
Platin-Gruppe	711031	Rhodium unwrought or in powder form	100
Seltene Erden	280530	Rare-earth metals, scandium and yttrium	100
Seltene Erden	284610	Cerium compounds	75

Seltene Erden	284690	Compounds, mixes of rare-earths, yttrium, scandium ne	80
Selen	280490	Selenium	100
Silber	261610	Silver ores and concentrates	20
Silber	284321	Silver nitrate	65
Silber	284329	Silver compounds other than silver nitrate	70
Silber	710610	Silver powder	100
Silber	710691	Silver in unwrought forms	100
Tellur	280450	Boron, Tellurium	100
Zinn	260900	Tin ores and concentrates	30
Zinn	800110	Tin not alloyed unwrought	100
Zinn	800120	Tin alloys unwrought	10
Titan	261400	Titanium ores and concentrates	50
Titan	282300	Titanium oxides	65
Titan	810810	Titanium, unwrought, waste or scrap, powders	100
Wolfram	261100	Tungsten ores and concentrates	68
Wolfram	810110	Powders, tungsten (wolfram)	100
Wolfram	810191	Tungsten unwrought, bars/rods simply sintered, scrap	100
Vanadium	282530	Vanadium oxides and hydroxides	60
Quecksilber	280540	Mercury	100
Gold	284330	Gold compounds	55
Gold	710811	Gold powder non-monetary	100
Gold	710812	Gold in unwrought forms non-monetary	100
Silizium	280461	Silicon, >99.99% pure	100
Silizium	280469	Silicon, <99.99% pure	98
Silizium	281122	Silicon dioxide	47
Silizium	284920	Silicon carbide	70
Vanadium	811240	Vanadium, articles thereof, waste or scrap/powders	100

Tabelle A.3. – HS Codes der unteren Wertschöpfungskette für Kupfer, vergl. Abbildung 5.14. Die Kupfergehalte der Legierungselemente und Halbzeuge wurden der Literatur entnommen (vergl. Wittmer et al., 2003; Wittmer, 2006). Für die Liste der kupferhaltigen Produkte und Materialgehalte am Ende der Wertschöpfungsstufe siehe Soulier, Glöser et. al. (2012).

Code	Beschreibung	Kupferanteil	Wertschöpfungsstufe
740811	Wire of refined copper >6mm wide	100 %	Halbzeuge
740819	Wire of refined copper <6mm wide	100 %	Halbzeuge
740821	Wire, copper-zinc base alloy	58 %	Halbzeuge
741300	Stranded copper wire/cable/plaits/etc, uninsulated	90 %	Halbzeuge
740710	Bars, rods & profiles of refined copper	100 %	Halbzeuge
740911	Plate, sheet, strip, refined copper, coil, t >0.15mm	100 %	Halbzeuge
740919	Plate, sheet, strip, refined copper, flat, t >0.15mm	100 %	Halbzeuge
741011	Foil of refined copper, not backed, t <0.15mm	100 %	Halbzeuge
741110	Pipes or tubes, refined copper	100 %	Halbzeuge
741210	Pipe & tube fittings, of refined copper	100 %	Halbzeuge
740610	Powders, copper, of non-lamellar structure	100 %	Halbzeuge
740620	Powders, copper, of lamellar structure and flakes	100 %	Halbzeuge
741991	Articles of copper, cast/moulded/stamped, nfw	95 %	Halbzeuge
740721	Bars, rods & profiles of copper-zinc base alloys	58 %	Halbzeuge
740722	Bar, rod, profiles, copper-nickel, copper-nickel-zinc	66 %	Halbzeuge
740729	Bars, rods & profiles, copper alloy nes	75 %	Halbzeuge
740822	Wire, copper-nickel or copper-nickel-zinc base alloy	66 %	Halbzeuge
740829	Wire, copper alloy, except nickel/zinc alloys	75 %	Halbzeuge
740921	Plate/sheet/strip, copper-zinc alloy, coil, t >0.15mm	58 %	Halbzeuge
740929	Plate/sheet/strip, copper-zinc alloy, flat, t >0.15m	58 %	Halbzeuge
740931	Plate/sheet/strip, copper-tin alloy, coil, t >0.15mm	85 %	Halbzeuge
740939	Plate/sheet/strip, copper-tin alloy, flat, >t >0.15m	85 %	Halbzeuge

A. Anhang

740940	Plate, sheet, strip, Copper nickel alloys, t >0.15mm	66 %	Halbzeuge
740990	Plate, sheet, strip, copper alloy nes, t >0.15mm	75 %	Halbzeuge
741012	Foil, copper alloy, not backed, t <0.15mm	75 %	Halbzeuge
741121	Pipes or tubes, copper-zinc base alloy	58 %	Halbzeuge
741122	Pipes or tubes, copper-nickel alloys	66 %	Halbzeuge
741129	Pipes or tubes, copper alloy except nickel/zinc alloy	75 %	Halbzeuge
741220	Pipe & tube fittings, of copper alloys	75 %	Halbzeuge
262030	Ash or residues containing mainly copper	10 %	Schrotte
740400	Copper/copper alloy waste or scrap	100 %	Schrotte
740110	Copper mattes	75 %	Rohkupfer
740120	Cement copper (precipitated copper)	75 %	Rohkupfer
260300	Copper ores and concentrates	30 %	Erze Konzentrate
740200	Unrefined copper, copper anodes, electrolytic refinin	95 %	Rohkupfer
740311	Copper cathodes and sections of cathodes unwrought	100 %	Raffinadekupfer
740312	Wire bars, copper, unwrought	100 %	Raffinadekupfer
740313	Billets, copper, unwrought	100 %	Raffinadekupfer
740319	Refined copper products, unwrought, nes	100 %	Raffinadekupfer
740321	Copper-zinc base alloys, unwrought	58 %	Kupferlegierungen
740322	Copper-tin base alloys, unwrought	85 %	Kupferlegierungen
740323	Copper-nickel, copper-nickel-zinc base alloy, unwrought	66 %	Kupferlegierungen
740329	Copper alloys, unwrought (other than master alloys)	75 %	Kupferlegierungen
740500	Master alloys of copper	60 %	Kupferlegierungen

Tabelle A.4. – Relevante HS Codes für die Analyse der Handelsströme von Kobalt (vergl. Abbildung 5.22).

Code	Beschreibung	Materialgehalt	Wertschöpfungsstufe
260500	Cobalt ores and concentrates	0,15	Erze/Konzentrate
282200	Cobalt oxides and hydroxides	0,78	Kobaltverbindungen
282734	Cobalt chloride	0,46	Kobaltverbindungen
291523	Cobalt acetates	0,3	Kobaltverbindungen
810510	Cobalt, unwrought, matte, waste or scrap, powders	0,9	Matte
810590	Cobalt, articles thereof, nes	1	Kobaltmetall
850730	Nickel-cadmium electric accumulators	—	NMH Akku
850740	Nickel-iron electric accumulators	—	NMH Akku
850780	Electric accumulators, nes	—	Akku
850790	Parts of electric accumulators, including separators	—	Akku

Tabelle A.5. – Relevante HS Codes für die Analyse des Handels mit Seltenen Erden und Magnetwerkstoffen.

Bezeichnung	HS Code	Description
Seltene Erden	280530	Rare-earth metals, scandium and yttrium
Seltene Erden	284610	Cerium compounds
Seltene Erden	284690	Compounds, mixes of rare-earths, yttrium, scandium ne
Seltene Erden	720299	Ferro-alloys, nes
Magnete	850511	Permanent magnets
Magnete	850519	Permanent magnets & arts. intended to become permanent magnets

A.5. Zusatzinformationen zu den dynamischen Stoffstrommodellen

Allgemeine Zusatzinformationen zu den dynamischen Stoffstrommodellen und insbesondere Ergänzungen zu den technischen Aspekten der unteren Wertschöpfungsstufen werden nachfolgend gelistet.

A.5.1. Kupfer

Während die technischen Verfahren der Kupfergewinnung und Aufbereitung für die dynamischen Stoffstrommodelle nur eine begrenzte Relevanz haben und daher in Kapitel 5.2 nur relativ knapp beschrieben wurden, wird an dieser Stelle durch vereinfachte Verfahrensfliessbilder ein grundlegender Überblick über die verschiedenen Routen der Primär- und Sekundärproduktion von Kupfer gegeben.

Kupfererze (sulfidisch und oxidisch) werden zunächst durch mechanisches Zerkleinern und Flotationsprozesse zu Kupferkonzentraten aufbereitet. Während für sulfidische Konzentrate, die den größten Teil der Kupfervorkommen ausmachen, in erster Linie die pyrometallurgische Verhüttung in einer Prozessfolge aus Schachtofen, Konverter und Anodenofen zur Kupfergewinnung verwendet wird, werden oxidische Konzentrate (ca. 20% der Kupfer-Primärproduktion, vergl. Glöser et al., 2013a) im Allgemeinen über eine hydrometallurgische Prozessroute verarbeitet. Dabei werden die Konzentrate direkt mit Schwefelsäure versetzt, durch eine Flüssigextraktion gereinigt und anschließend elektrolytisch zu Kupferkathoden verarbeitet (Lossin, 2012). Verunreinigte kupferhaltige Schrotte, insbesondere aus dem Elektronikbereich werden teilweise zusammen mit Kupferkonzentraten (Primärmaterial), teilweise separat im Konverter und Anodenofen zunächst zu Anodenmaterial verarbeitet, aus welchem anschließend elektrolytisch hochreines Kupfer gewonnen wird. Die vereinfachte Prozessführung zur Gewinnung von Reinstkupfer (Kathoden) ist in Abbildung A.5 dargestellt.

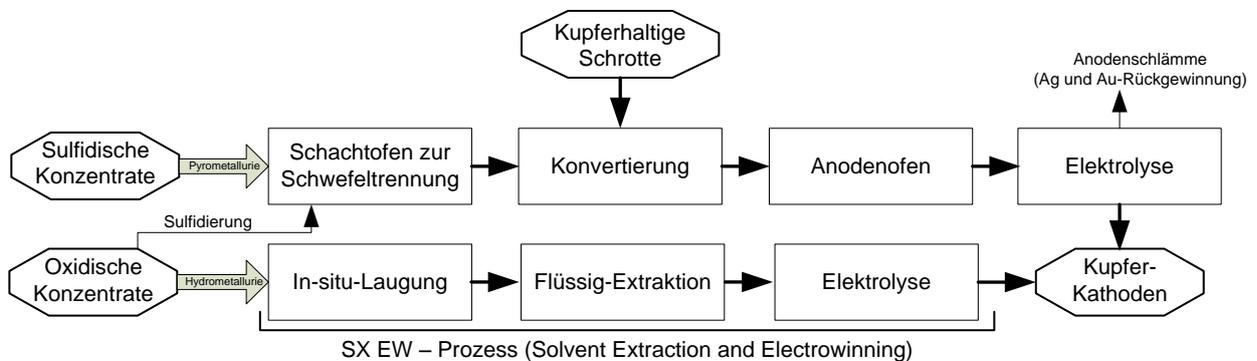
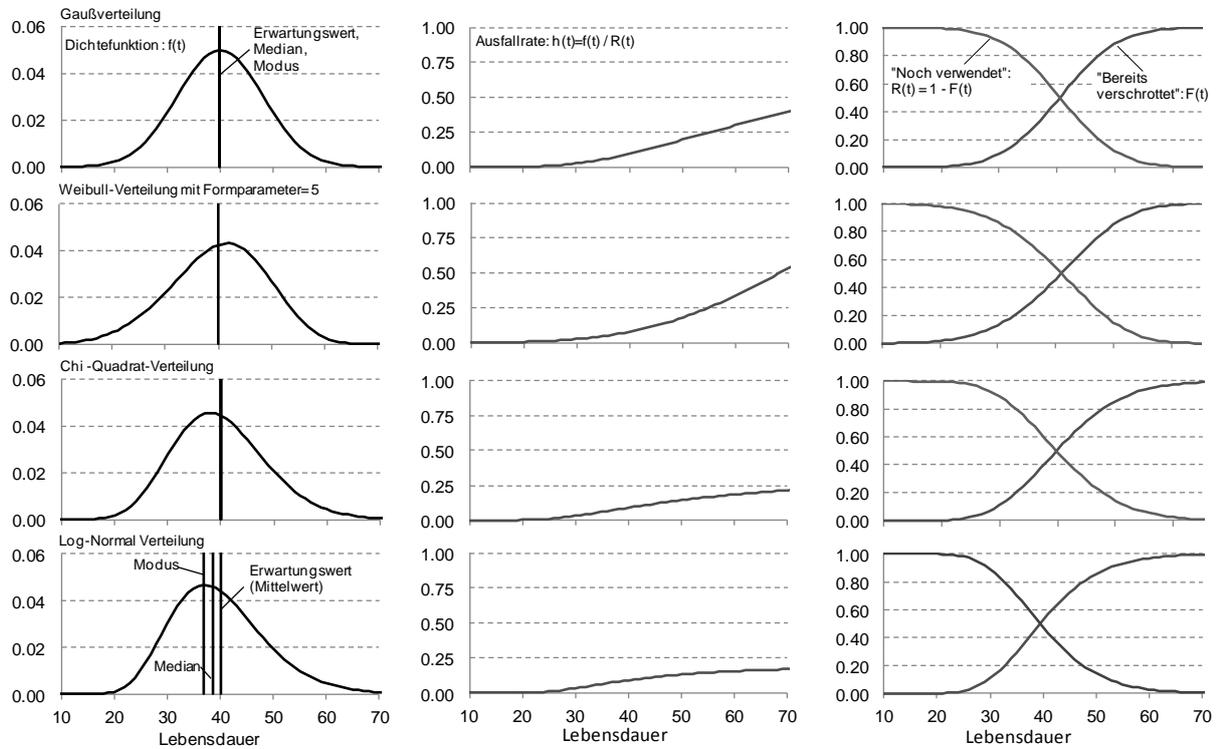


Abbildung A.5. – Vereinfachte Darstellung der Prozessrouten der Kupferproduktion (vergl. Lossin, 2008).

Neben den in den Stoffstrommodellen verwendeten Gaußschen Normalverteilungen zeigt Abbildung A.6 weitere klassischen Verteilfunktionen aus den Bereichen der Sicherheitstechnik und des Qualitätsmanagements.

A. Anhang



Typische Lebensdauererwartungen aus dem Bereich der Sicherheitstechnik und Qualitätssicherung (Dichtefunktionen):
 σ : Standardabweichung, μ : Erwartungswert

Normal-Verteilung (Gauß):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{3}{2}\left(\frac{x-\mu}{x}\right)^2}$$

Weibull-Verteilung:

$$f(x) = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{x}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{T}\right)^b} \text{ mit } t, T, b \geq 0 \text{ } b \text{ als Formfaktor und } T \text{ als Charakteristische Zeit}$$

Chi-Quadrat Verteilung:

$$f(x) = \frac{x^{\left(\frac{n-1}{2}\right)} e^{-\frac{x}{2}}}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}, \text{ } x > 0 \text{ mit } \Gamma \text{ als Gammafunktion: } \Gamma(n+1)=n!$$

Log-Normal Verteilung:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\left(\frac{\ln(x)-\mu}{2\sigma^2}\right)^2}$$

Berechnung der Ausfallrate:

Ausfallwahrscheinlichkeit:

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt$$

Überlebenswahrscheinlichkeit:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Ausfallrate (λ):

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Überlebensrate:

$$s(t) = 1 - h(t)$$

Abbildung A.6. – Typische Lebensdauererwartungen aus den Bereichen der Sicherheitstechnik und des Qualitätsmanagements (vergl. z.B. Kahle und Liebscher, 2013).

A.5.2. Kobalt

Ergänzende Informationen zu den Kobalt-Stoffstrommodellen in Abschnitt 5.3 und zum dynamischen Marktmodell in Abschnitt 6.3.3 werden nachfolgend gegeben. Wie in der Arbeit erläutert, wird Kobalt hauptsächlich als Nebenprodukt der Nickel- und Kupferproduktion gewonnen. Lediglich ca. 10 % der globalen Produktion von Kobalt erfolgt als Hauptprodukt (insbesondere aus hydrothermalen Erz- und Mineralgängen in Marokko und Kanada). Es existieren zahlreiche Prozesse zur Aufbereitung der Konzentrate und Gewinnung von Kobalt, die meisten Methoden zur Extraktion basieren jedoch auf hydrometallurgischen Prozessen, die grob aus folgenden Grundschritten bestehen (Donaldson und Beyersmann, 2000):

1. Auslaugen der Konzentrate zu einer kobalthaltigen Lösung
2. Trennung des Kobalts von anderen Metallionen in der Lösung
3. Reduktion der Kobaltionen durch Elektrolyse

Aufgrund der Vielzahl der verschiedenen Prozesse wird hier nur ein kurzer Überblick über ausgewählte, relevante Prozesse geliefert (vergl. Tabelle).

Tabelle A.6. – Prozesse zur Kobaltgewinnung (vergl. Donaldson und Beyersmann, 2000).

Art des Zwischenproduktes	Vorgehensweise zur Gewinnung des Kobalts
Nickel-Sulfid-Konzentrat	Sherrit Gordon Prozess (Ammoniak Drucklaugung) Outokumpu Prozess (Drucklaugung mit Schwefelsäure)
Laterit-Erze	Drucklaugung mit Schwefelsäure, dann Trennung des Kobalts in Form von Kobaltsulfid durch Lösungsmittelextraktion, abschließende Gewinnung des Kobalts durch Elektrolyseverfahren
Arsenid-Erze	Röstung zur Beseitigung des Arsens, Laugung mit Säure, Veredelung durch hydrometallurgische Verfahren, Kobaltgewinnung durch Elektrolyse
Kupfer-Kobalt-Konzentrat	siehe Gécamines-Prozess

Beispielhaft ist in Abbildung A.7 der sogenannte Gécamines-Prozess dargestellt, welcher genutzt wird, um Kobalt aus Kupfer-Kobalt-Konzentraten zu gewinnen. Diese Konzentrate finden sich in der DRK (Demokratische Republik Kongo) und in Sambia und stellen den Großteil der weltweit zur Weiterverarbeitung vorhandenen Konzentrate dar. Dabei findet in sogenannten Widerstandswirbelöfen zunächst eine Entschwefelung statt. Nach der Kupferelektrolyse (was das Hauptprodukt des Prozesses darstellt) wird das kobaltthaltige Elektrolyt weiterverarbeitet. Es folgen eine Ausfällung von Nickel und Zink und die abschließende Elektrolyse des Kobalts (vergl. Abbildung A.7).

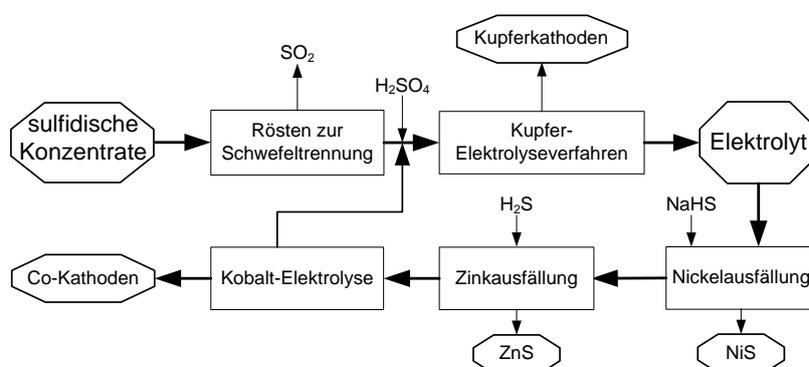


Abbildung A.7. – Herstellungsprozess von Kobalt nach dem Gécamines-Prozess (vergl. Donaldson und Beyersmann, 2000).

Kobalt als Kathodenmaterial

Die Vor- und Nachteile der in Kapitel 6.3.3 betrachteten Kathodenmaterialien für Li-Ionen-Batterien auf Basis einer qualitativen Metrik sind in Tabelle A.7 dargestellt (vergl. auch Abbildung 6.14a).

Tabelle A.7 zeigt qualitative Bewertungen der Stärken und Schwächen verschiedener Kathodenmaterialien für Li-Ionen-Batterien.

Tabelle A.7. – Bewertung der Eigenschaften der in den kommenden 10 Jahren relevanten Kathodenmaterialien für Li-Ionen-Batterien (vergl. Neumann, 2011). Nickel-Metall-Hydrid (NMH) Batterien, die für die erste Generation der Hybridfahrzeuge die dominante Technologie darstellten, werden inzwischen größtenteils durch neue Li-Ionen-Batteriesysteme (hauptsächlich NMC) ersetzt (vergl. Novinsky et al., 2014). Reine Co-Oxid-Kathoden (LCO) sind zwar nach wie vor das am häufigsten eingesetzte Kathodenmaterial, werden aber aus Sicherheitsgründen nur in Elektronikanwendungen verbaut und spielen für die Elektromobilität keine Rolle. Für die Gesamtwertung wurde die für die Elektromobilität besonders wichtige Eigenschaft der hohen Energiedichte doppelt gezählt.

(Eigenschaft)	Kosten	Spezifische Energie	Lebensdauer	Sicherheit	Spezifische Leistung	Gesamtbewertung
NMC (Nickel-Mangan-Kobalt)	4	4	5	3	3	23
LFP (Lithium-Eisen-Phosphat)	4	3	4	4	4	22
LCO (Lithium-Kobalt-Oxid)	2	5	4	1	5	22
NCA (Nickel-Kobalt-Aluminium)	2	4	4	2	3	19
LMO (Lithium-Mangan-Oxid)	3	2	3	4	4	18
NiMH (Nickel-Metall-Hydrid)	5	1	2	4	1	14
Gewichtung	1	2	1	1	1	

A.5.3. Seltene Erden

Zusatzinformationen zu Seltenen Erden als Ergänzung zu Kapitel 5.4 werden nachfolgend gegeben.

Gewinnung und Aufbereitung Seltener Erden

Wie in Abschnitt 5.4 erläutert, ist die Aufbereitung und Trennung der verschiedenen Seltenerd-Elemente sehr aufwendig und häufig mit erheblichen Umwelteinträgen verbunden. Die groben Prozessschritte werden nachfolgend dargestellt.

Die Aufbereitung der Seltenerd-Erze kann sich entsprechend den geologischen Bedingungen, Gesteinsarten und Mineralgehalte etc. in den verschiedenen Lagerstätten sehr unterschiedlich gestalten. Grundsätzlich lassen sich bei der Beschreibung der Gewinnung von Seltenen Erden folgende 3 Prozessschritte definieren (Kennedy, 2014):

1. Ausbringung der Konzentrate
2. Hydrometallurgische Verarbeitung zu SE-Chloriden
3. Trennung des SE-Gemisches

Die wichtigsten Erze zur wirtschaftlichen Förderung Seltener Erden sind Bastnäsit, Monazit und Xenotim. Während Bastnäsit und Monazit vor allem leichte Seltene Erden wie Lanthan, Cer und Neodym enthalten, werden aus Xenotim auch schwere Seltene Erden wie Yttrium, Dysprosium, Europium oder Terbium gewonnen. Wie in Abbildung A.8 dargestellt, werden die Konzentrate über hydrometallurgische Prozesse zunächst in SE-Chloride überführt. Aus der wässrigen Chlorid-Lösung erfolgt anschließend die Trennung (vergl. z.B. Kingsnorth, 2014; McGill, 2000).

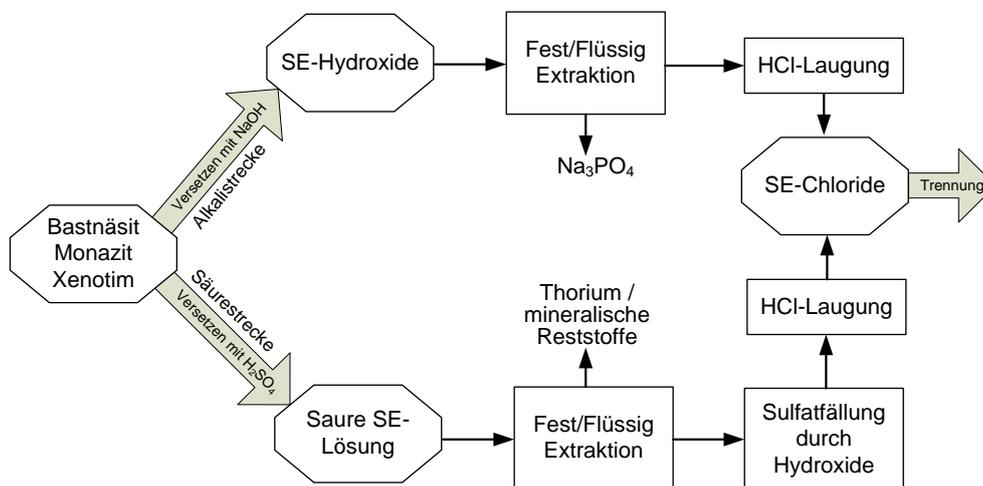


Abbildung A.8. – Aufbereitung der SE-Konzentrate (Bastnäsit, Monazit, Xenotim).

Die seltenerdreichen Tone im Süden Chinas werden meist direkt in den Minen aufgeschwämmt und mit Oxalsäure als SE-Oxalate ausgefällt. Alternativ besteht die Möglichkeit der Gewinnung von SE-Oxiden durch Calcinieren (vergl. Abbildung A.9). Da diese Prozesse direkt in den meist relativ kleinen häufig nicht offiziell genehmigten Abbaustätten stattfinden, sind hier die Umwelteinträge besonders hoch.

Auf Grund der hohen chemisch-physikalischen Ähnlichkeit zahlreicher Seltenerd-Elemente ist ihre Trennung ein sehr aufwendiger Prozess. Dabei werden sowohl Fällungs- und Kristallisationsprozesse als auch

A. Anhang

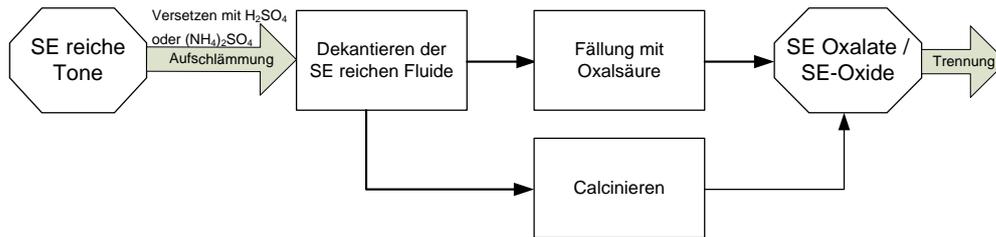


Abbildung A.9. – Aufbereitung der Tonminerale mit hohem Anteil an schweren SE (Kennedy, 2014).

flüssig/flüssig Extraktionsprozesse verwendet. Auf Grund der einfacheren Prozessführung ist die Flüssigextraktion (vergl. Abbildung A.10) vor allem bei großtechnischer Verarbeitung das häufigste Verfahren.

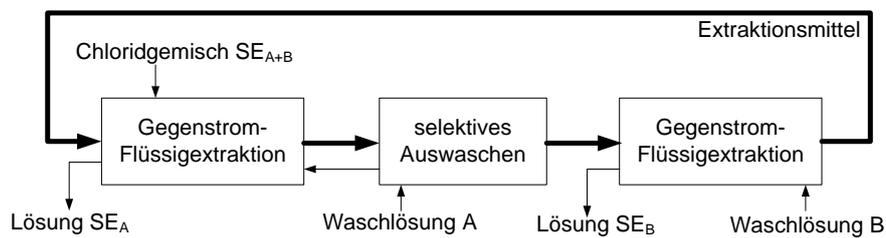


Abbildung A.10. – Trennung der Seltenen Erden durch Flüssigextraktion (siehe auch Kennedy, 2014).

Dabei werden über Kaskaden von Mischabsetzern nach dem Mixer-Settler Verfahren systematisch einzelne Seltenerd-Fractionen bis hin zu reinen Oxiden abgetrennt. Häufig werden auch Mischoxide direkt vermarktet (z.B. Pr / Nd Gemische als Magnetwerkstoff). Die üblichen Fraktionen bei der SE-Trennung sind in Abbildung A.11 dargestellt.

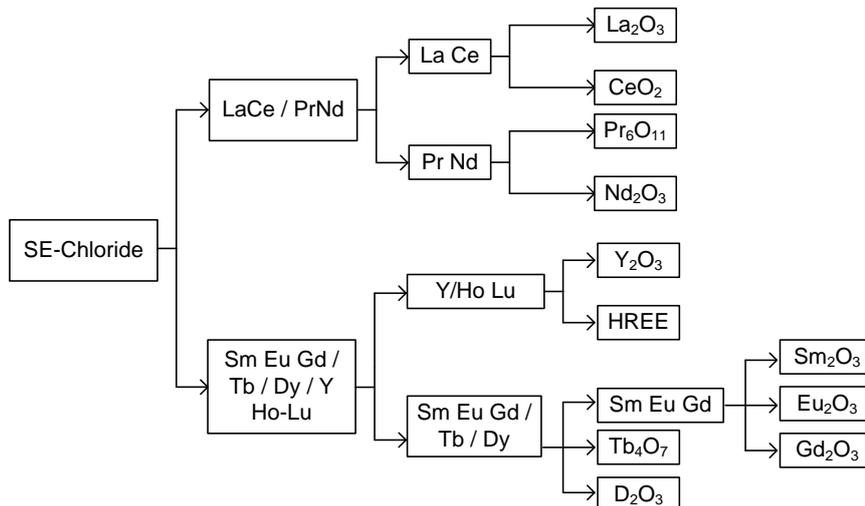


Abbildung A.11. – Trennstufen der Seltenen Erden bei der Extraktion (vergl. z.B. McGill, 2000).

Verwendungsstrukturen Seltener Erden

Während in Kapitel 5.4 lediglich die zur Gruppe der Seltenen Erden gehörenden Elemente Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe näher betrachtet wurden, wird im Anschluss ein kurzer Überblick über die allgemeine Verwendungsstruktur Seltener Erden gegeben.

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Sc	Y
Batterielegierung	X															
Katalysatoren	X	X		X												
Keramik	X	X	X	X	X				X		X		X		X	X
Glas	X	X	X	X	X		X				X		X	X		
Poliermittel		X			X											
Magnete			X	X	X				X							
Metallurgie	X	X	X	X											X	X
Leuchtstoff, Pigmente	X	X			X	X	X	X			X		X		X	X
Sonstiges	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

X Hauptsächliche Verwendung
 X Geringe Verwendung

Abbildung A.12. – Verwendungsstrukturen der verschiedenen Seltenerd-Elemente (vergl. insbesondere Zepf, 2013, S.33).

Die wichtigsten Verwendungsstrukturen der Seltenerd-Elemente als Ergänzung zu Kapitel 5.4 sind in Abbildung A.12 nochmals aufgezeigt und werden nachfolgend erläutert:

Magnete:

Neben den NdFeB-Magneten, die hier ausführlich betrachtet wurden, existieren auf Seltenerd-Basis noch Samarium-Kobalt-Magnete (SmCo, vergl. Abbildung 5.29). Diese spielen allerdings im Vergleich zu NdFeB nur eine extrem untergeordnete Rolle und werden aufgrund des reversiblen Temperaturkoeffizienten vor allem bei Hochtemperaturanwendungen eingesetzt, die 200°C übersteigen, da hier NdFeB Magnete trotz hoher Beimischung von Dysprosium ungeeignet sind (vergl. Abbildung 5.30) und das Energieprodukt bei diesen Temperaturen ebenfalls höher liegt als bei NdFeB-Magneten. Da Samarium im Gemisch der Seltenerd-Produktion mit weniger als 1% nur gering vertreten ist (vergl. Abbildung 5.26), fehlt für diese Magnettechnologie auch die Rohstoffbasis für eine Massenherstellung (Gutfleisch et al., 2011).

Metallurgie:

Für die Herstellung verschiedener Metall-Legierungen werden vor allem Cer, Lanthan, Neodym und Praseodym, aber auch Scandium, Samarium und Yttrium verwendet. Es erscheint insgesamt schwierig den Seltenerd-Verbrauch der Eisen- und Stahlindustrie abzuschätzen, da die genauen Legierungszusammensetzungen nicht bekannt sind und häufig Seltenerd-Mischmetalle zum Einsatz kommen. Jedoch wird angenommen, dass beim Stahl- und Eisenguss, sowie in hochfesten, niederlegierten Stählen ca. 13.000 Tonnen Seltenerd-Oxide jährlich verwendet werden (vergl. z.B. Schüler et al., 2011). Weitere metallurgische Anwendungsbereiche von Seltenen Erden sind z.B. Aluminium- und Magnesiumlegierungen. Die geschätzte Gesamtnachfrage für Seltene Erden im Segment der Metallurgie wird

auf 25.000 Tonnen geschätzt und macht damit ca. ein Viertel der Verwendung von Seltenerd-Metallen aus. Zum Einsatz kommen hier allerdings hauptsächlich die niedrigpreisigen leichten Seltenen Erden (insbesondere Cer und Lanthan).

Batterien / Akkumulatoren:

Seltene Erden (vor allem Neodym und Cer) werden weiterhin in Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren (Ni-MH) verwendet. Dabei werden an der Anode als Metallhydrid spezielle Legierungen eingesetzt, die neben den Hauptbestandteilen Nickel, Mangan, Aluminium oder Kobalt auch Cer, Neodym und Praseodym enthalten (Buchert et al., 2013). Durch den steigenden Marktanteil von Lithium-Ionen-Batterien wird die Nachfrage nach NiMH Batterien allerdings erwartungsgemäß in den kommenden Jahren weiter zurückgehen, wodurch dieser Anwendungsbereich an Bedeutung verliert. Eine weitere Anwendung von Cer im Bereich der Energiespeicher bildet die Zink-Cer-Batterie, eine Hybrid-Flow-Batterie.

Katalysatoren:

Für Katalysatoren werden vor allem Cer und Lanthan verwendet, teilweise ergänzt durch Beimischung von Neodym und Praseodym. Wichtigster Anwendungsbereich sind dabei Cracking-Prozesse bei der Erdölraffination (Fluid Catalytic Cracking, FCC). Weiterhin wird Cer in nahezu allen Autokatalysatoren zur Leistungssteigerung der verbauten Platinmetalle, sowohl bei Ottomotoren, als auch für eine vollständige Verbrennung in Dieselmotoren (Diesel Oxidation Catalytic Converter DOC), eingesetzt (Roskill, 2011).

Keramik:

Der wichtigste Anwendungsbereich für seltenerdbasierte Keramikmaterialien ist die Elektronikindustrie. Hier werden vor allem keramische Kondensatoren, Halbleitermaterialien, oder Hochtemperatursupraleiter auf Seltenerd-Basis hergestellt. Weiter Anwendungsfelder sind die Lasertechnologie sowie die Beimischung von Seltenerd-Oxiden zur Stabilisierung der Gitterstruktur. Insgesamt sind dies sehr spezielle Anwendungsfelder, die mengenmäßig eine untergeordnete Rolle spielen (Schüler et al., 2011).

Gläser:

Seltene Erden werden in vielen Bereichen der Glasindustrie benötigt. Beispielsweise werden Gläser mit Hilfe von Seltenen Erden gefärbt. Cer färbt das Glas gelb und braun, Neodym rot und Europium pink. Cer wird weiterhin zur Steigerung der UV-Beständigkeit von Glasflaschen, Sonnenbrillen und für die Beschichtung von Solarzellen eingesetzt. Auch in der Optik, für Linsen und optische Filter, finden Seltene Erden Verwendung. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um Lanthan, Gadolinium und Praseodym. Cer-Oxid wird weiterhin in den Gläsern von Bildschirmen eingesetzt, wobei dieser Anwendungsbereich auf Grund der Verwendung alternativer Materialien eher rückläufig ist (Schüler et al., 2011).

Poliermittel:

Chemisch-mechanisches Polieren (CMP, engl: chemical mechanical polishing) ist ein Polierverfahren zur Bearbeitung von Wafern in der Elektronikindustrie, oder Linsen für optische Geräte. In den Polituren kommt häufig Cer-Oxid zum Einsatz (Roskill, 2011).

Leuchtstoffe:

Seltene Erden werden aufgrund ihrer einzigartigen spektrografischen Eigenschaften als Leuchtstoffe und Pigmente eingesetzt. In fast allen energieeffizienten Beleuchtungssystemen basieren die Leuchtstoffe auf Seltenerd-Elementen. Klassische Energiesparlampen (CFL Compact Fluorescent Lamps), Leuchtstoffröhren, LEDs, OLEDs, LCDs oder Plasmafernseher enthalten seltenerdbasierte Leuchtstoffe. Der prozentuale Anteil der weltweit verwendeten Seltenen Erden für dieses Segment ist mit

A.5. Zusatzinformationen zu den dynamischen Stoffstrommodellen

6% relativ klein. Aufgrund der Tatsache, dass hier fast nur schwere Seltene Erden (Yttrium, Europium und Terbium, aber auch Samarium, Erbium, Thulium, Gadolinium, and Lutetium) eingesetzt werden, ist wegen der entsprechend höheren Preise das Marktvolumen verhältnismäßig groß.

Sonstige:

Sonstige Anwendungen beinhalten insbesondere die breite Verwendung aller Seltenerd-Elemente im Bereich der Forschung und Entwicklung.

Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe

Ergänzende Informationen zu Neodym und Dysprosium als Magnetwerkstoffe werden nachfolgend gegeben.

Tabelle A.8. – Typische elektrische Kleinmotoren in konventionellen Pkw und ihre Motorleistung. Insbesondere der Lenkungsmotor für die Servolenkung sowie kleinere Motoren aus dem Komfortbereich (automatische Sitz-, Spiegel-, Schweinwerferverstellung etc.) basieren häufig auf NdFeB-Synchronmotoren (Wilde, 2008; Gieras, 2010, S.58 ff.).

Anwendung	Leistung in Watt	Bemerkung
Anlasser	1500	
Kraftstoffpumpe	50	
Kühlwasserpumpe	10	
Scheibenwaschpumpe	20	2 mal 10
Scheinwerfer + Nebelscheinwerfer (Leuchtweitenregulierung)	20	4 mal je 5
Innenraumheizung, Gebläse	120	
Klimaanlage, Kompressor	500	
Elektrischer Kühlerventilator Motorkühlung	200	
Automatische Kupplung / Getriebe	200	
ABS AFR FDR ESP Motoren	200	4 mal 50
Drosselklappe Regler	50	
Lenkungsmotor (Servolenkung)	1000	
Scheibenwischer	90	2 mal 45
Türschließer (Softclose automatic Heck)	50	
elektr. Fensterheber + Sonnendach	750	5 mal je 150
elektr. Rückspiegeleinstellung	200	2 mal 100
elektr. Sitzverstellung	880	8 mal je 110
elektr. Lenkradverstellung (Lenksäulenversteller)	50	
elektr. Gurtzuführung	20	2 mal je 10
elektr. Elemente Armaturenbrett (Navi, CD Player etc.)	10	
Zentralverriegelung	50	5 mal je 10
Sitzbelüftung	500	

A. Anhang

Tabelle A.9. – Aktuelle Windkraftanlagen der für den deutschen Markt relevanten Hersteller (Angaben wurden direkt den Produktblättern der jeweiligen Hersteller entnommen). Die Anlagen mit Getriebe sind mit “G” gekennzeichnet, diejenigen mit Permanentmagnet erregten Generatoren mit “PM”.

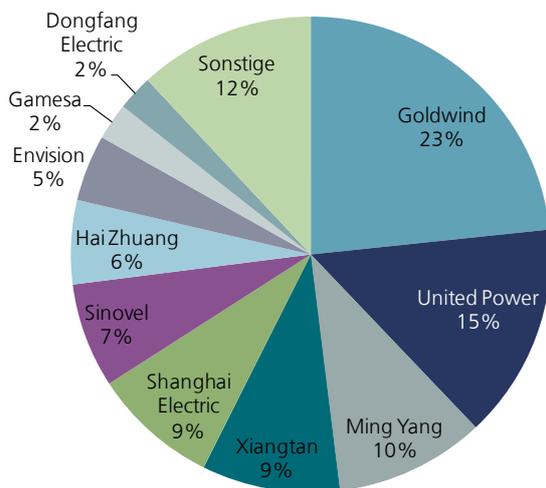
Vestas				Vensys (Goldwind)			
V80-2.0 MW	-	G	onshore	Vensys 100 (2.5 MW)	PM	-	onshore
V90-1.8 MW	-	G	onshore	Vensys 109 (2.5 MW)	PM	-	onshore
V90-2.0 MW	-	G	onshore	Vensys 112 (2.5 MW)	PM	-	onshore
V100-1.8 MW IEC S	-	G	onshore	Vensys 120 (3 MW)	PM	-	onshore
V100-2.0 MW IEC 2B	-	G	onshore	Repower/Senvion			
V105-3.3 MW	-	G	onshore-/offshore	MM82 (2 MW)	-	G	onshore
V110-2.0 MW IEC 3A	-	G	onshore	MM92 (2 MW)	-	G	onshore
V112-3.0 MW IEC 2A	PM	G	onshore	MM100 (1.8 MW)	-	G	onshore
V112-3.3 MW IEC 2A	-	G	onshore-/offshore	3.0-M122 (3 MW)	-	G	onshore
V112-3.3 MW IEC 1B	-	G	onshore-/offshore	3.2-M114 (3.2 MW)	-	G	onshore
V117-3.3 MW IEC 2A	-	G	onshore-/offshore	3.4-M104 (3.4 MW)	-	G	onshore-/offshore
V126-3.0 MW	PM	G	onshore-/offshore	5-M (5 MW)	-	G	onshore-/offshore
V126-3.3MW	-	G	onshore-/offshore	6.2-M126 (6.2 MW)	-	G	offshore
V164-8.0MW	PM	G	offshore	6.2-M152 (6.2 MW)	-	G	offshore
Nordex				Siemens			
N131 (3,0 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-82	-	G	
N117 (3,0 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-93	-	G	
N100 (3,3 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-101	-	G	
N117 (2,4 MW)	-	G	onshore	SWT-2.3-108	-	G	
N100 (2,5 MW)	-	G	onshore	SWT-3.0-101 (3 MW)	PM	-	onshore-/offshore
N90 (2,5 MW)	-	G	onshore	SWT-3.2-101 (3.2 MW)	PM	-	onshore-/offshore
N150/6000 (6MW)	PM	-	offshore	SWT-3.0-108 (3 MW)	PM	-	onshore-/offshore
Enercon (Direktantrieb mit Ringgenerator)				SWT-3.2-108 (3.2 MW)	PM	-	onshore-/offshore
E-70 (2 MW)	-	-	onshore	SWT-3.0-113 (3 MW)	PM	-	onshore-/offshore
E-82 (2 MW)	-	-	onshore	SWT-3.2-113 (3.2 MW)	PM	-	onshore-/offshore
E-92 (2.3 MW)	-	-	onshore	SWT-3.6-107	-	G	
E-101 (3 MW)	-	-	onshore	SWT-3.6-120	-	G	
E-115 (3 MW)	-	-	onshore	SWT-4.0-120	-	G	
E126-EP4 (4 MW)	-	-	onshore	SWT-4.0-130	-	G	
E-126 (7.5 MW)	-	-	onshore	SWT-6.0-154 (6 MW)	PM	-	offshore

A.5. Zusatzinformationen zu den dynamischen Stoffstrommodellen

Tabelle A.10. – Aktuelle Windkraftanlagen chinesischer Hersteller (Angaben wurden direkt den Produktblättern der jeweiligen Hersteller entnommen). Die Anlagen mit Getriebe sind mit “G” gekennzeichnet, diejenigen mit Permanentmagnet erregten Generatoren mit “PM”.

Goldwind			Guodian United Power		
GW70/1.5MW	PM	- onshore	UP6000-136 IIA 6MW	-	G offshore
GW77/1.5MW	PM	- onshore	UP-120/3000 IIIA 3MW	-	G onshore
GW82/1.5MW	PM	- onshore	UP-100/3000 IIA LT 3MW	PM	- offshore
GW87/1.5MW	PM	- onshore	UP-100/3000 IIA LT 3MW	-	G onshore
GW93/1.5MW	PM	- onshore	UP2000-103 IVB+ 2MW	-	G onshore
GW115/2.0MW	PM	- onshore	UP2000-96 IIIA 2MW	-	G onshore
GW90/2.5MW	PM	- onshore	UP1500-97 S 1.5MW	-	G onshore
GW100/2.5MW	PM	- onshore	UP1500-86 IIIB- 1.5MW	-	G onshore
GW103/2.5MW	PM	- onshore-/offshore	UP1500-82 IIIA/IIIA+ 1.5MW	-	G onshore
GW106/2.5MW	PM	- onshore-/offshore	UP1500-77 IIA/IIA+ 1.5MW	-	G onshore
Xiangtan			Ming Yang		
XE72-2 MW	PM	- onshore	MY1.5MW	-	G onshore
XE82-2 MW	PM	- onshore	SCD 2.5/3.0 MW	PM	G onshore-/offshore
XE87-2 MW	PM	- onshore			
XE93-2 MW	PM	- onshore			
XD115-5 MW	PM	- onshore			

a: Marktanteile nach Hersteller China



b: Marktanteile nach Hersteller Welt

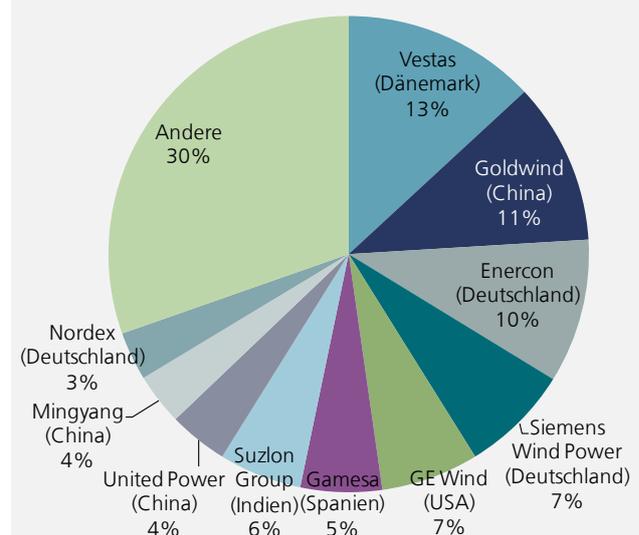


Abbildung A.13. – Marktanteile der Windkrafthersteller global und für China (Daten basieren auf dem Global Wind Energy Council, GWEC).

A.6. Im Zuge der Dissertation erfolgte Veröffentlichungen

Die im Zuge der Dissertation erfolgten Veröffentlichungen werden im Folgenden aufgelistet.

A.6.1. Peer-reviewed Journal Paper

- Glöser, S., Soulier, M., Tercero Espinoza, L.A. (2013). Dynamic analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators & uncertainty evaluation. *Environmental Science & Technology* 47, 6564-6572.
- Glöser, S., Tercero Espinoza, L., Gandenberger, C., Faulstich, M. (2015). Raw material criticality in the context of classical risk assessment. *Resources Policy* 44, 35-46.
- Glöser-Chahoud, S., Tercero Espinoza, L., Walz, R., Faulstich, M. (2016). Taking the step towards a more dynamic view on raw material criticality: an indicator based analysis for Germany and Japan, *Resources* 45, 1-16.
- Glöser-Chahoud, S., Hartwig, J., Wheat, D., Faulstich, M. (2017). The Cobweb Theorem and delays in adjusting supply in metals' markets, *System Dynamics Review* 33, 40-59.

A.6.2. Konferenzpaper und Beiträge in Sammelbänden

- Glöser, S., Faulstich, M. (2012). Quantitative analysis of the criticality of mineral and metallic raw materials based on a system dynamics approach, in: *Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, St. Gallen, Switzerland.
- Glöser, S., Soulier, M., Tercero Espinoza, L.A., Faulstich, M. (2013). Using dynamic stock and flow models for global and regional material and substance flow analysis, in: *Proceedings of the 31st International Conference of the System Dynamics Society*, Cambridge, Massachusetts.
- Glöser, S., Faulstich, M. (2014). Analyse kritischer Rohstoffe durch Methoden der Multivariaten Statistik, in: Teipel, U., Reller, A. (Herausgeber), *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Seiten 53-79.
- Glöser, S., Soulier, M., Tercero Espinoza, L., Faulstich, M., Goldmann, D. (2014). Dynamische Stoffstrommodellierung von Industriemetallen am Beispiel eines globalen und europäischen Kupfermodells, in: Teipel, U., Reller, A. (Herausgeber), *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Seiten 252-263.
- Glöser S; Hartwig, J (2015): The classical Cobweb Theorem and real commodity market behavior. Modeling delayed adjustment of supply in industrial metals' markets, in: *Proceedings of the 33rd International Conference of the System Dynamics Society*, Cambridge, Massachusetts.
- Glöser-Chahoud, S., Pfaff, M., Tercero Espinoza, L., Faulstich, M. (2016). Dynamische Materialflussanalyse der Magnetwerkstoffe Neodym und Dysprosium in Deutschland, in: Teipel, U., Reller, A. (Herausgeber), *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart.
- Glöser-Chahoud, S., Pfaff, M., Soulier, M. (2016). Modeling material flows, cumulative material demand and market dynamics of industrial metals within a system dynamics framework, in: *Proceedings of the 34th International Conference of the System Dynamics Society*, Delft, The Netherlands.

A.7. Lebenslauf

Ein aktueller Lebenslauf von Simon Glöser-Chahoud ist auf der folgenden Seite eingefügt.

Simon Glöser-Chahoud

Stettiner Straße 26
76139 Karlsruhe
Email: simon.gloeser@isi.fraunhofer.de

**Persönliche Daten:**

Geburtsdaten 01.08.1983 Kirchheim unter Teck
Staatsangehörigkeit deutsch
Familienstand verheiratet, 1 Kind

Akademischer Werdegang

Juni 2012 – Externe Promotion zum Thema „Quantitative Analyse der Kritikalität mineralischer und metal-
Mai 2017 lischer Rohstoffe unter Verwendung eines systemdynamischen Modell-Ansatzes“
Betreuung durch Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
(zunächst an der TU München, seit 2014 an der TU Clausthal)

- Bewertung von Versorgungsrisiken metallischer Rohstoffe
- Systemdynamische Modellierung der physischen Kreisläufe (Verwendungszyklen) und Märkte verschiedener Industriemetalle auf globaler und regionaler Ebene
- Simulation zukünftiger Rohstoffbedarfe unter Berücksichtigung des Recyclings auf Basis von Annahmen zur wirtschaftlichen bzw. technologischen Entwicklung

Oktober 2004 – Diplomstudium zum Wirtschaftsingenieur mit Fachrichtung Technische Chemie an der
Oktober 2010 Technischen Universität Berlin (TU Berlin)
Teilnahme an kürzeren Austauschprogrammen mit der École Centrale Nantes und Paris sowie Teilnahme an der Summerschool der Tongji Universität Shanghai

Berufliche Erfahrung:

seit März 2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Competence Center Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) in Karlsruhe
Mitarbeit in nationalen und internationalen Forschungsprojekten für Industrie und Politik mit dem Schwerpunkt der Rohstoffversorgung.

März – Diplomarbeit in der Evonik Degussa GmbH im Chemiepark Marl zum Thema:
September 2010 „Technoökonomische Prozessanalyse der Gewinnung von Fettsäuren und Fettsäuremethylestern aus pflanzlichen Ölen“

Juni – Sept. 2009 Auslandspraktikum bei Entreprise Ben Ayed, Tunis Tunesien (DAAD unterstützt)

September 2006 – Studentische Hilfskraft mit Lehraufgaben in Mikroökonomie am Lehrstuhl für Wirtschafts-
Oktober 2009 und Infrastrukturpolitik (WIP) TU Berlin

Oktober 2003 – Zivildienst beim Strahlenschutz des Universitätsklinikums Tübingen
Juli 2004

Schulbildung

1994 - 2003 Keplergymnasium Tübingen, Abschluss durch Abitur
Mathe und Chemie Leistungskurs

1990 - 1993 Besuch der International School Moshi, Tansania (britisches Grundschulsystem)

Karlsruhe, den 10.07.2017
Ort, Datum


Unterschrift

Literaturverzeichnis

- Abbasi, A., Tarighi, S., Badieli, A., 2012. A three-dimensional highly stable cobalt(ii) metal–organic framework based on terephthalic acid: synthesis, crystal structure, thermal and physical properties. *Transition Metal Chemistry* 37, 679–685.
- Achzet, B., Helbig, C., 2013. How to evaluate raw material supply risks—an overview. *Resources Policy* 38, 435–447.
- Achzet, B., Reller, A., Zepf, V., 2011. Materials critical to the energy industry. An introduction. Bericht. Universität Augsburg.
- ADAC Fahrzeugtechnik, 2013. Elektroautos: Marktübersicht und Kenndaten. Bericht. Allgemeiner Deutscher Automobilclub. München.
- AEA Technology, 2011. Raw materials critical to the Scottish economy. Bericht. Scotland and Northern Ireland Forum for Environmental Research. Edinburgh, Schottland.
- Agrawal, A., Sahu, K.K., 2010. Problems, prospects and current trends of copper recycling in India: An overview. *Resources Conservation & Recycling* 54, 401–416.
- Alonso, E., Gregory, J., Field, F., Kirchain, R., 2007. Material availability and the supply chain: Risks, effects, and responses. *Environmental Science & Technology* 41, 6649–6656.
- Alonso, E., Sherman, A.M., Wallington, T.J., Everson, M.P., Field, F.R., Roth, R., Kirchain, R.E., 2012a. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental Science & Technology* 46, 3406–3414.
- Alonso, E., Wallington, T., Sherman, A., Everson, M., Field, F., Roth, R., Kirchain, R., 2012b. An assessment of the rare earth element content of conventional and electric vehicles. Bericht. SAE Technical Paper.
- Anderson, E.W., Anderson, L.D., 1998. Strategic minerals: Resource geopolitics and global geo-economics. Wiley, Chichester, West Sussex, England and New York.
- Andersson, B.A., 2001. Material constraints on technology evolution: The case of scarce metals and emerging energy technologies. PhD Thesis (Dissertation), University Goeteborg, Göteborg, Schweden.
- Angerer, G., 2010. Zukunftstechnologien und Weltwirtschaft treiben die Märkte für Hightech-Metalle. *Chemie Ingenieur Technik* 82, 1955–1960.
- Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weideman, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., Marwede, M., 2009. Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Bericht. Fraunhofer ISI and IZT. Fraunhofer Verlag Stuttgart.
- APS, 2011. Energy Critical Elements: Securing Materials for Emerging Technologies: A Report by the APS panel on public affairs & the Materials Research Society. Bericht. Materials Research Society (MRS). Warrendale, USA.
- Auping, W., Pruyt, E., Kwakkel, J., 2012. Analyzing the uncertain future of copper with three exploratory

- system dynamics models, in: Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland.
- AURO, 2015. Kobalt als Trockner. Bericht. AURO Pflanzenchemie AG. Braunschweig.
- Avalon Rare Metals Inc., 2010. Rare Earth Information, Corporate and Project Information. Bericht. Avalon Rare Metals Inc. Toronto, Kanada.
- Ayres, R., Ayres, L., Rade, I., 2003. The Life Cycle of Copper, Its Co-Products and Byproducts. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- Ayres, R.U., 1997. Metals recycling: economic and environmental implications. Resources, Conservation and Recycling 21, 145–173.
- Ayres, R.U., Simonis, U.E., 1994. Industrial metabolism: Restructuring for sustainable development. United Nations University Press, Tokyo, Japan.
- Baccini, P., Bader, P. (Herausgeber), 1996. Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Baccini, P., Brunner, P.H. (Herausgeber), 2012. Metabolism of the anthroposphere: Analysis, evaluation, design. 2. ed. ed., MIT Press, Cambridge, USA.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., Weiber, R., 2011a. Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. 13. ed., Springer, Berlin / Heidelberg.
- Backhaus, K., Erichson, B., Weiber, R., 2011b. Fortgeschrittene multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin / Heidelberg.
- Bader, H.P., Schneidegger, R., Wittmer, D., Lichtensteiger, T., 2006. A dynamic (mmfa) model to describe the copper household in Switzerland, in: Bauwerke als Ressourcennutzer und Ressourcenspender in der langfristigen Entwicklung urbaner Systeme. Lichtensteiger, T., ETH Zürich, Seiten 27–52.
- Bardt, H., 2008. Sichere Energie- und Rohstoffversorgung: Herausforderung für Politik und Wirtschaft. Bericht. Institut der deutschen Wirtschaft / IW Consult. Köln.
- Bast, U., Treffer, F., Thürigen, C., Elwert, T., Marscheider-Weidemann, F., 2014. Recycling von Komponenten und strategischen Metallen aus elektrischen Fahrtrieben. Bericht. MORE (Motor Recycling), Projekt im Auftrag des BMBF.
- van Beers, D., Kapur, A., Graedel, T.E., 2007. Copper and zinc recycling in Australia: potential quantities and policy options. Cleaner Production 15, 862–877.
- Behrens, A., Giljum, S., Kovanda, J., Niza, S., 2007. The material basis of the global economy: World-wide patterns of natural resource extraction and their implications for sustainable resource use policies. Ecological Economics 64, 444 – 453. Special Section - Ecosystem Services and Agriculture Ecosystem Services and Agriculture.
- Benker, H., 2005. Differentialgleichungen mit MATHCAD und MATLAB. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Benner, S., 1876. Benner's Prophecies of Future Ups and Down in Prices: What years to make money on pig-iron, hogs, corn, and provisions. The Robert Clarke company, Cincinnati, USA.
- Bensch, S., Kolotzek, C., Helbig, C., Thorenz, A., Tuma, A., 2015. Decision support system for the sustainability assessment of critical raw materials in SMEs, in: 48th Hawaii International Conference. HICSS.
- Bergbäck, B., Johansson, K., Mohlander, U., 2001. Urban metal flows: A case study of Stockholm. review and conclusions. Water, Air, and Soil Pollution: Focus 1, 3–24.

- Bertram, M., Graedel, T.E., Rechberger, H., Spatari, S., 2002. The contemporary european copper cycle: waste management subsystem. *Ecological Economics* 42, 43 – 57.
- Beylot, A., Villeneuve, J., 2015. Assessing the national economic importance of metals: An input–output approach to the case of copper in france. *Resources Policy* 44, 161–165.
- BGS, 2012. Risk List of the British Geological Survey. Bericht. British Geological Survey. London, UK.
- Blasius, J., Greenacre, M.J., 2006. Multiple correspondence analysis and related methods: [International Conference on Correspondence Analysis and Related Methods (CARME 2003) held at the Universitat Pompeu Fabra in Barcelona from 29 June to 2 July 2003]. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, USA.
- Bleischwitz, R., Dittrich, M., Pierdicca, C., 2012. Coltan from Central Africa, international trade and implications for any certification. *Resources Policy* 37, 19–29.
- Boeck, M.d., 2003. Cobalt and antimony: genotoxicity and carcinogenicity. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis* 533, 135–152.
- Böni, H., Wäger, P., Figi, R., 2015. Rückgewinnung von kritischen Metallen wie Indium und Neodym aus Elektronikschrott auf der Stufe der manuellen und mechanischen Vorbehandlung, in: Thomé-Kozmiensky, K.J., Goldmann, D. (Herausgeber), *Recycling und Rohstoffe*, Band 8. TK, Neuruppin. Ausgabe 8, Seiten 443–462.
- Bossel, H., 1989. *Simulation dynamischer Systeme: Grundwissen, Methoden Programme*. Books on Demand, Norderstedt.
- Bowen, H.P., 1983. On the theoretical interpretation of indices of trade intensity and revealed comparative advantage. *Weltwirtschaftliches Archiv* 119, 464–472.
- Bradshaw, A.M., Reuter, B., Hamacher, T., 2013. The potential scarcity of rare elements for the energiewende. *Green* 3.
- Brémaud, P., 1999. Markov Chains: Gibbs Fields, Monte Carlo Simulation, and Queues. Ausgabe 31 von *Texts in Applied Mathematics*. Springer, New York, USA.
- Brent, R.P., 2013. *Algorithms for Minimization Without Derivatives*. Dover Books on Mathematics, Dover Publications, Newburyport, USA.
- Brunner, P.H., Ma, H.W., 2009. Substance flow analysis. *Journal of Industrial Ecology* 13, 11–14.
- Buchert, M., 2011. Rare Earths - a Bottleneck for future Wind Turbine Technologies? Bericht. Öko Institut e.V. Freiburg.
- Buchert, M., Manhart, A., Sutter, J., 2013. Untersuchung zu Seltenen Erden: Permanentmagnete im industriellen Einsatz in Baden-Württemberg. Bericht. Öko-Institut e.V. Freiburg.
- Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D., Neurohr, N., Hagelüken, L., 2009. Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential: Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. Bericht. Öko Institut e.V. Freiburg.
- Buchholz, P., Liedtke, M., Gernuks, M., 2010. Evaluating supply risk patterns and supply and demand trends for mineral raw materials: Assessment of the zinc market, in: Sinding-Larsen, R., Wellmer, F.W. (Herausgeber), *Non-renewable resource issues*. Springer, Dordrecht and London. International year of planet Earth, Seiten 157–181.
- Buchholz, P., Schmitz, M., 2010. Eingeschränkte Planungssicherheit: Die Rohstoffmärkte und die Verfügbarkeit von Primär- und Sekundärrohstoffen unterliegen weiterhin starken zyklischen Schwankungen. *ReSource* , 25–29.

- Buchner, H., Laner, D., Rechberger, H., Fellner, J., 2014. In-depth analysis of aluminum flows in Austria as a basis to increase resource efficiency. *Resources, Conservation and Recycling* 93, 112 – 123.
- Buijs, B., Sievers, H., Tercero Espinoza, L.A., 2012. Limits to the critical raw materials approach. *Proceedings of the ICE - Waste and Resource Management* 165, 201–208.
- Burchardt, L., 1971. Eine neue Quelle zu den Anfängen der Kriegswirtschaft in Deutschland 1914. *Tradition: Zeitschrift für Firmengeschichte und Unternehmerbiographie*, 72–77.
- Bustamante, M.L., Gaustad, G., Goe, M., 2014. Criticality research in the materials community. *JOM* 66, 2340–2342.
- Campbell, G.A., 2014. Rare earth metals: a strategic concern. *Mineral Economics* 27, 21–31.
- Campbell, P., 2008. System Cost Analysis for an Interior Permanent Magnet Motor. United States. Dept. of Energy and Distributed by the Office of Scientific and Technical Information, U.S. Dept. of Energy, Washington, D.C.
- Casadio, F., Bezúr, A., Fiedler, I., Muir, K., Trad, T., Maccagnola, S., 2012. Pablo Picasso to Jasper Johns: a Raman study of cobalt-based synthetic inorganic pigments. *Journal of Raman Spectroscopy* 43, 1761–1771.
- Chagnes, A., Pospiech, B., 2013. A brief review on hydrometallurgical technologies for recycling spent lithium-ion batteries. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 88, 1191–1199.
- Chancerel, P., 2010. Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment. Dissertation. TU Berlin.
- Chapman, A., Arendorf, J., Castella, T., Tercero Espinoza, L., Klug Stefan, Wichmann, E., 2013. Study on Critical Raw Materials at EU Level: Final Report. Bericht. European Commission. Brüssel, Belgien.
- Chau, K.T., Li Wenlong, 2014. Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles. *Int. J. Vehicle Design* 2014, 46–71.
- Chen, W.Q., Graedel, T., 2012. Anthropogenic cycles of the elements: A critical review. *Environmental Science & Technology* 46, 8574–8586.
- Christensen, P.P., 1989. Historical roots for ecological economics — biophysical versus allocative approaches. *Ecological Economics* 1, 17–36.
- Ciacci, L., Vassura, I., Passarini, F., 2017. Urban mines of copper: Size and potential for recycling in the EU. *Resources* 6, 6.
- Cleveland, W.S., 1981. Lowess: A program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. *American Statistician*, 54–54.
- Commission of the European Communities, 1975. The community's supplies of raw materials. Bericht. Commission of the European Communities. Brüssel, Belgien. URL: <http://aei.pitt.edu/1481/>.
- Committee on Science, 1984. The National Critical Materials Act of 1984. Bericht Public Law 98:373. Committee on Science and Technology, House of Representatives. Washington, D.C.
- Congressional Budget Office, 1983. Strategic and critical nonfuel minerals: problems and policy alternatives. Bericht. Congressional Budget Office, Congress of the United States. Washington, D.C.
- Constantinides, S., 2011. Help Needed for Clean Energy Initiatives. Bericht. Arnold Magnetic Technologies. New York USA.
- Constantinides, S., 2012. The Demand for Rare Earth Materials in Permanent Magnets. Bericht. Arnold Magnetic Technologies. New York USA.

- Constantinides, S., 2013. Magnet FAQs. Bericht. Arnold Magnetic Technologies. New York USA.
- Cullbrand, K., Olof, M., 2011. The Use of Potentially Critical Materials in Passenger Cars. Bericht. Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Division of Environmental Systems Analysis. Göteborg, Schweden.
- David G Haglund, 1984. Strategic minerals: A conceptual analysis. *Resources Policy* 10, 146–152.
- Degner, M., 2011. *Stahlfibel*. Verl. Stahleisen, Düsseldorf.
- Dewulf, J., Van der Vorst, Geert, Denturck, K., van Langenhove, H., Ghyoot, W., Tytgat, J., Vandeputte, K., 2010. Recycling rechargeable lithium ion batteries: Critical analysis of natural resource savings. *Resources, Conservation and Recycling* 54, 229–234.
- Donaldson, J.D., Beyersmann, D., 2000. Cobalt and cobalt compounds, in: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- Du, X., Graedel, T.E., 2011a. Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. *Journal of Industrial Ecology* 15, 836–843.
- Du, X., Graedel, T.E., 2011b. Uncovering the global life cycles of the rare earth elements. *Scientific reports* 1, 145.
- Duclos, S.J., Otto, J.P., Konitzer, D.G., 2008. Design in an era of constrained resources. *Mechanical Engineering* vol. 132, 36–40.
- Dunn, J.B., Gaines, L., Barnes, M., Wang, M., Sullivan, J., 2012. Material and energy flows in the materials production, assembly, and end-of-life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle. Bericht. Argonne National Laboratory (ANL). Chicago, USA.
- Dutta, Soumitra; Lanvin, B., 2013. The global innovation index 2013: The local dynamics of innovation. Bericht. Johnson Cornell University. New York, USA. URL: http://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/economics/gii/gii_2013.pdf.
- ECI, 2012. Copper Recycling. Bericht. European Copper Institute. Brüssel, Belgien. URL: <http://www.copperalliance.eu/about-copper/recycling>.
- Eckelmann, M.J., Daigo, I., 2008. Markov chain modeling of the global technological lifetime of copper. *Ecological Economics* 67, 265–273.
- Edmonds, M., 1995. *Stone tools and society: Working stone in Neolithic and Bronze Age Britain*. Batsford, London, UK.
- Edwards, F.R., 1988. Does futures trading increase stock market volatility? *Financial Analysts Journal* 44, 63–69.
- Eichholtz, D., Corni, G., Lehmann, J., Fleischer, H., Oertel, M., Puchert, B., Roth, K.H., 2003. *Geschichte der deutschen Kriegswirtschaft 1939-1945*. De Gruyter, Berlin.
- Eller, R., Heinrich, M., Perrot, R., Reif, M., 2010. *Management von Rohstoffrisiken: Strategien, Märkte und Produkte*. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- Elwert, T., Goldmann, D., 2014. Entwicklung eines hydrometallurgischen Recyclingverfahrens für NdFeB-Magnete, in: Kozmiensky-Thomé, K.J., Goldmann, D. (Herausgeber), *Recycling und Rohstoffe*, Band 7. TK-Vlg, Nietwerder, Seiten 147–159.
- E.M. Harper, Zhouwei Diao, Stefania Panousi, Philip Nuss, Matthew J. Eckelman, T.E. Graedel, 2015. The criticality of four nuclear energy metals. *Resources, Conservation and Recycling* 95, 193–201.
- Erdmann, L., Behrendt, S., Feil, M., 2011. *Kritische Rohstoffe für Deutschland: Identifikation aus Sicht*

- deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Bericht. IZT / adelphi im Auftrag der KfW. Berlin.
- Erdmann, L., Graedel, T.E., 2011. Criticality of non-fuel minerals: A review of major approaches and analyses. *Environmental Science & Technology* 45, 7620–7630.
- EuroMetaux, 2006. Recycling Rates of Metals. Bericht. European Association of Metals. Brüssel, Belgien.
- European Commission, 2008. The raw materials initiative - meeting our critical needs for growth and jobs in Europe. Bericht. European Commission, Brussels, Belgium.
- European Commission, 2010a. Annex V to the Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Bericht. European Commission (Enterprise and Industry), Brussels, Belgium.
- European Commission, 2010b. Critical raw materials for the EU. Bericht. European Commission (Enterprise and Industry), Brussels, Belgium.
- European Commission, 2012. Directive on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Bericht. European Commission, Brussels, Belgium.
- European Commission, 2014. Report on Critical raw materials for the EU. Bericht. European Commission (Enterprise and Industry), Brussels, Belgium.
- Evans, A.M., 2009. Ore geology and industrial minerals: An introduction. 3rd ed ed., Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- Exner, A., Lauk, C., Zittel, W., 2015. Sold futures? the global availability of metals and economic growth at the peripheries: Distribution and regulation in a degrowth perspective. *Antipode* 47, 342–359.
- Ezekiel, M., 1938. The cobweb theorem. *The Quarterly Journal of Economics* 1938, 255–280.
- Faulstich, M., 2010. r³ - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien: Informationspapier zum F- und E-Bedarf der gleichnamigen BMBF-Fördermaßnahme. Bericht. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Berlin.
- Faulstich, M., 2012. Sekundärrohstoffe - Die drei Leben eines Handys. Bericht. IHK Wirtschaftsforum. Frankfurt am Main.
- Faulstich, M., Pfeifer, S., Franke, M., Mocker, M., 2011a. Initialstudie - Ressourcenstrategie für Bayern unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen. Bericht. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit. München.
- Faulstich, M., Pfeifer, S., Franke, M., Mocker, M., 2011b. Ressourcenstrategie für Hessen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen. Bericht. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Wiesbaden.
- Fischer, P., 2014. Ende des Steinkohlenbergbaus im Ruhrrevier - Zeitplan und Herausforderungen. Bericht. RAG AG. Essen.
- Fizaine, F., 2013. Byproduct production of minor metals: Threat or opportunity for the development of clean technologies? the pv sector as an illustration. *Resources Policy* 38, 373–383.
- Ford, A., 1999. Modeling the environment: An introduction to system dynamics models of environmental systems. Island Press, Washington, D.C.
- Forrester, J.W., 1961. *Industrial Dynamics*. [reprint of first ed. 1961] ed., Martino Pub, Mansfield Centre, USA.
- Forrester, J.W., 1994. System dynamics, systems thinking, and soft OR. *System Dynamics Review* 10, 245–256.

- Franke, M., Kroop, S., Kaufhold, T., Lohmeyer, R., Mocker, M., Kranert, M., Böhme, L., Genslein, M., Clauss, D., Faulstich, M., 2014. Analyse kritischer Rohstoffe für die Landesstrategie Baden-Württemberg. Bericht. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Stuttgart.
- Fronde, M., Grösche, P., Huchtemann, D., Oberheitmann, A., Peters, J., Angerer, G., Sartorius, C., Buchholz, P., Röhling, S., Wagner, M., 2006. Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Bericht. RWI, BGR, Fraunhofer ISI. Berlin.
- Gale, N.H., Stos-Gale, Z.A., 2005. Zur Herkunft der Kupferbarren aus dem Schiffswrack von Uluburun und der spätbronzezeitliche Metallhandel im Mittelmeerraum. Bericht. Katalog der Ausstellung des Deutschen Bergbau-Museums Bochum – Das Schiff von Uluburun : Welthandel vor 3000 Jahren. Bochum.
- Gandenberger, C., 2011. Wie kritisch ist die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen? TAB-Brief Nr. 39 , 48–51.
- Gandenberger, C., Glöser, S., Marscheider-Weidemann, F., Ostertag, K., Walz, R., 2012. Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien: Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie: Innovationsreprot. Bericht. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Berlin.
- Gantner, O., Grimm, J., Hutner, Petra, Lubberger, Ariane, 2013. Wissenschaftliche Begleitung der Althandy-Sammelaktion "Handy clever entsorgen". Bericht. Universität Augsburg.
- Gardiner, A.H., Peet, T.E., 1917. The inscriptions of Sinai. Memoirs (Egypt Exploration Society), Egyptian Exploration Fund, Kairo, Egypt. URL: <http://books.google.de/books?id=fZ4YAQAAMAAJ>.
- Gegenfurtner, K., 1992. Praxis: Brent's algorithm for function minimization. Behavior Research Methods, Instruments, & Computers 24, 560–564.
- Geman, H., Smith, W.O., 2013. Theory of storage, inventory and volatility in the LME base metals. Resources Policy 38, 18–28.
- Gerbens, A., 2013. Cobalt Market Review 2012-2013. Bericht. Darton Commodities Limited. Guildford, England.
- Gerst, M.D., Graedel, T.E., 2008. In-use stocks of metals: Status and implications. Environmental Science & Technology 42, 7038–7045.
- Gieras, J., 2010. Permanent magnet motor technology: Design and applications. 3rd ed ed., CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- von Gleich, A., Gößling-Reisemann, S., 2008. Industrial Ecology: Erfolgreiche Wege zu nachhaltigen industriellen Systemen ; [dieses Buch basiert auf einer Ringvorlesung an der Universität Bremen]. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- Gleich, B., Achzet, B., Mayer, H., Rathgeber, A., 2013. An empirical approach to determine specific weights of driving factors for the price of commodities—a contribution to the measurement of the economic scarcity of minerals and metals. Resources Policy 38, 350–362.
- Glöser, S., Faulstich, M., 2012. Quantitative analysis of the criticality of mineral and metallic raw materials based on a system dynamics approach, in: Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland 2012.
- Glöser, S., Faulstich, M., 2014. Analyse kritischer Rohstoffe durch Methoden der Multivariaten Statistik, in: Teipel, U., Reller, A. (Herausgeber), Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Seiten 53–79.

- Glöser, S., Hartwig, J., 2015. The classical cobweb theorem and real commodity market behavior – modeling delayed adjustment of supply in industrial metals' markets, in: Proceedings of the 33rd International Conference of the System Dynamics Society, Cambridge, Massachusetts, Seiten 1–20.
- Glöser, S., Soulier, M., Tercero Espinoza, L., Faulstich, M., Goldmann, D., 2014. Dynamische Stoffstrommodellierung von Industriemetallen am Beispiel eines globalen und europäischen Kupfermodells, in: Teipel, U., Reller, A. (Herausgeber), Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Seiten 252–263.
- Glöser, S., Soulier, M., Tercero Espinoza, L.A., 2013a. Dynamic analysis of global copper flows. global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators & uncertainty evaluation. *Environmental Science & Technology* 47, 6564–6572.
- Glöser, S., Soulier, M., Tercero Espinoza, L.A., Faulstich, M., 2013b. Using dynamic stock and flow models for global and regional material and substance flow analysis, in: Proceedings of the 31st International Conference of the System Dynamics Society, Cambridge, Massachusetts, Seiten 1–20.
- Glöser, S., Tercero Espinoza, L., Gandenberger, C., Faulstich, M., 2015. Raw material criticality in the context of classical risk assessment. *Resources Policy* 44, 35–46.
- Gocht, W., 1983. *Wirtschaftsgeologie und Rohstoffpolitik: Unters., Erschliessung, Bewertung, Verteilung u. Nutzung mineral. Rohstoffe.* überarbeitete Auflage ed., Springer, Berlin Heidelberg.
- Goldmann, D., 2010. Recycling als Beitrag zur Rohstoffsicherung - neue strukturelle und technologische Herausforderungen. *Chemie Ingenieur Technik* 82, 1851–1860.
- Gottschalk, F., Scholz, R.W., Nowack, B., 2010. Probabilistic material flow modeling for assessing the environmental exposure to compounds: Methodology and an application to engineered nano-tio2 particles. *Environmental Modelling & Software* 25, 320–332.
- Graedel, T., Allwood, J., Birat, J.P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K., Sibley, S.F., Sonnemann, G., 2011a. Recycling rates of metals: a status report. Bericht. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.
- Graedel, T., Harper, E., Nassar, N., Nuss, P., Reck, B.K., 2015. Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, 4257–4262.
- Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K., Sibley, S.F., Sonnemann, G., 2011b. What do we know about metal recycling rates? *Journal of Industrial Ecology* 15, 355–366.
- Graedel, T.E., Barr, R., Chandler, C., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N.T., Schechner, D., Warren, S., Yang, M.y., Zhu, C., 2012. Criticality of the geological copper family: Methodology of metal criticality determination. *Environmental Science & Technology* 46, 1063–1070.
- Graedel, T.E., Bertram, M., Fuse, K., Gordon, R.B., Lifset, R., Rechberger, H., Spatari, S., 2002. The contemporary european copper cycle: The characterization of technological copper cycles. *Ecological Economics* 42, 9–26.
- Graedel, T.E., Nassar, N.T., 2013. The criticality of metals: a perspective for geologists. Geological Society, London, Special Publications .
- Graf, C., 2013. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien.* SpringerLink : Bücher, Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- Gröticke, I., 2014. Einsatz von System Dynamics zur Modellierung des globalen Kupfersystems. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen.

- Grüne, L., 2008. Numerische Methoden für gewöhnliche Differentialgleichungen (Numerische Mathematik II). Bericht. Mathematisches Institut Fakultät für Mathematik und Physik Universität Bayreuth.
- Grupp, H., 1997. Messung und Erklärung des Technischen Wandels: Grundzüge einer empirischen Innovationsökonomik. Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Gutfleisch, O., 2013. Permanent Magnets: Magnetic Materials for Energy. Bericht. Universität Darmstadt. URL: <http://magnetism.eu/esm/2013/slides/gutfleisch-slides1.pdf>.
- Gutfleisch, O., Willard, M.A., Brück, E., Chen, C.H., Sankar, S.G., Liu, J.P., 2011. Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials* 23, 821–842.
- Haan, P.d., Zah, R., 2013. Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. Ausgabe 59/2013 von *TA-SWISS / Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung*. Vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich.
- Habib, K., Schibye, P.K., Vestbø, A.P., Dall, O., Wenzel, H., 2014. Material flow analysis of ndfeb magnets for denmark: A comprehensive waste flow sampling and analysis approach. *Environmental Science & Technology* 48, 12229–12237.
- Habib, K., Wenzel, H., 2014. Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling. *Journal of Cleaner Production* 84, 348–359.
- Hagelüken, C., 2010. Lagerstätten auf Rädern: Intelligente Recyclingkonzepte könnten wesentlich zur Versorgungssicherheit bei Technologiemetallen beitragen. *ReSource* , 30–33.
- Hagelüken, C., 2014. Technologiemetalle - Systemische Voraussetzungen entlang der Recyclingkette, in: Kausch, P., Bertau, M., Gutzmer, J., Matschullat, J. (Herausgeber), *Strategische Rohstoffe - Risikovor-sorge*. Springer Spektrum, Berlin, Seiten 161–172.
- Hagelüken, C., Meskers, C.E., 2010. Complex life cycles of precious and special metals. *Linkages of sustainability* 4.
- Haglund, D.G., 1984. Strategic minerals. *Resources Policy* 10, 146–152.
- Haglund, D.G., 1986. The new geopolitics of minerals. *Political Geography Quarterly* 5, 221–240.
- Hanau, A., 1928. Die Prognose der Schweinepreise. Bericht 7. Vierteljahreshefte zur Konjunkturforschung. Berlin.
- Harper, E., Kavlal, G., Burmeister, M., Erbis, S., Espinoza, V., Nuss, P., Graedel, T., 2014. Criticality of the geological zinc, tin, and lead family. *Journal of Industrial Ecology* .
- Harper, E.M., Kavlak, G., Graedel, T.E., 2012. Tracking the metal of the goblins: Cobalt's cycle of use. *Environmental Science & Technology* 46, 1079–1086.
- Hatch, G., 2011. Critical Rare Earths: Global supply & demand projections and the leading contenders for new sources of supply. Bericht. Technology Metals Research (TMR). Carpentersville, IL, USA.
- Haynes, E., 1913. Metal alloy. Bericht. Patentschrift. US Patent 1,057,423.
- Helbig, C., Wietschel, L., Thorenz, A., Tuma, A., 2016. How to evaluate raw material vulnerability - an overview. *Resources Policy* 48, 13–24.
- Hirato, T., Daigo, I., Matsuno, Y., Adachi, Y., 2009. In-use stock of steel estimated by top-down approach and bottom-up approach. *ISIJ international* 49, 1967–1971.
- Hoenderdaal, S., Tercero Espinoza, L., Marscheider-Weidemann, F., Graus, W., 2013. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? *Energy* 49, 344–355.

- Hofmann, H., Kaufmann, R., Tschop, O., Widmer, R., Gauch, M., Haefeli, Ueli, Schwegler, Urs, 2013. E-Scooter: Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz : Schlussbericht 2013. Bericht. Bundesamt für Energie BFE. Bern.
- Humphreys, D., 1995. Whatever happened to security of supply? minerals policy in the post-cold war world. *Resources Policy* 21, 91–97.
- Humphreys, D., 2010a. The great metals boom: A retrospective. *Resources Policy* 35, 1–13.
- Humphreys, D., 2010b. Minerals: industry history and fault lines of conflict. *Polinares Working Paper* .
- Humphreys, D., 2012a. The causes and consequences of capacity ‘overshoot’ in mining. *Polinares Working Paper* .
- Humphreys, D., 2012b. Mining investment trends and implications for minerals availability. *Polinares Working Paper* .
- Hurst, C., 2010. China’s Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? Bericht. Institute for the Analysis of Global Security (IAGS). Washington, DC.
- ICSG, 2010. Copper Scrap Market Issues and Developments in the Semi-Fabricators Industry. Bericht. International Copper Study Group. Lissabon, Portugal.
- IEA, 2013. Technology Roadmap: Wind Energy. Bericht. International Energy Agency. Paris, Frankreich.
- IHK, 2013. Dodd-Frank Act und „Konfliktmineralien“: Umgang mit Offenlegungspflichten entlang der Lieferkette. Bericht. Industrie und Handelskammer. Frankfurt.
- Inchiosa, M., Jacobs, B., 2015. R erlebt derzeit eine immense Verbreitung. Heise Developer News: online. URL: <http://www.heise.de/developer/artikel/Mario-Inchiosa-und-Bill-Jacobs-zum-Potenzial-von-R-2572305.html>.
- INSG, 2014. The Global E-bike Market: INSG SECRETARIAT BRIEFING PAPER. Bericht. International Nickel Study Group. Lissabon, Portugal.
- International Standards Organization, 2009. Risk management – Principles and guidelines. Bericht 31000. ISO. URL: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=43170.
- Irwin, S.H., Sanders, D.R., Merrin, R.P., 2009. Devil or angel? the role of speculation in the recent commodity price boom (and bust). *Journal of Agricultural and Applied Economics* 41, 377–391.
- Jacobson, D.M., Turner, R.K., Challis, A., 1988. A reassessment of the strategic materials question. *Resources Policy* 14, 74–84.
- Johnson, J., Reck, B.K., Wang, T., Graedel, T.E., 2008. The energy benefit of stainless steel recycling. *Energy Policy* 36, 181–192.
- Kahle, W., Liebscher, E., 2013. Zuverlässigkeitsanalyse und Qualitätssicherung. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München.
- Kaplan, S., Garrick, J.B., 1981. On the quantitative definition of risk. *Risk Analysis* 1.1, 11–27.
- Kappmeier, F., 1999. Vom systemischen Denken zur Methode System Dynamics. Masterarbeit. Universität Stuttgart.
- Kaufhold, M., Jöckel, A., 2002. Permanenterregte Großmaschinen: Potenziale in der Oberklasse. *ETZ Antriebstechnik* , 2–7.
- Kaufmann, D., Kraay, A., Mastruzzi, M., 2013. The Worldwide Governance Indicators (WGI). Bericht. World Bank. Washington, D.C.
- Kausch, Peter; Bertau, M.G.J.M.J., 2014. Strategische Rohstoffe - Risikovorsorge: [Auswahl von Beiträgen

- der Tagungen: 4. Symposium Freiburger Innovationen zum Thema "Strategische Rohstoffe - Risikovor-sorge", 19.-20. April 2012, und Deutsch-Französische Tagung "Life and Innovation Cycles in the Field of Raw Materials Supply and Demand - a Transdisciplinary Approach", Orléans, April 2012]. Springer Spektrum, Berlin.
- Kennedy, D., 2014. Aufbereitung und Verarbeitung von Seltenerdmetallen, in: Kausch, P., Bertau, M., Gutzmer, J., Matschullat, J. (Herausgeber), *Strategische Rohstoffe - Risikovor-sorge*. Springer Spektrum, Berlin, Seiten 201–217.
- Kesicki, F., 2010. The third oil price surge – what’s different this time? *Energy Policy* 38, 1596–1606.
- Ketterer, B., Karl, U., Möst, D., Ulrich, S., 2009. Lithium-Ionen-Batterien: Stand der Technik und Anwen-dungspotenzial in Hybrid- und Elektrofahrzeugen. Bericht. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung I. Karlsruhe.
- Kingsnorth, D., 2014. Der globale Markt der Seltenen Erden - Ein Balanceakt, in: Kausch, P., Bertau, M., Gutzmer, J., Matschullat, J. (Herausgeber), *Strategische Rohstoffe - Risikovor-sorge*. Springer Spektrum, Berlin, Seiten 97–120.
- Kohlmeyer, R., Groke, M., Sander, K., Bergamos, M., 2015a. Perspektiven der zunehmenden Fahrzeu-gelektronik für das Altfahrzeugrecycling, in: Thomé-Kozmiensky, K.J., Goldmann, D. (Herausgeber), *Recycling und Rohstoffe*, Band 8. TK, Neuruppin. Ausgabe 8, Seiten 183–205.
- Kohlmeyer, R., Groke, M., Sander, K., Bergamos, M., 2015b. Rückgewinnung kritischer Metalle: Die Demontage von Elektro- und Elektronikkomponenten aus Altfahrzeugen für die stoffliche Verwertung kann einen wichtigen Beitrag zur Ressourceneffizienz leisten. *ReSource* , 27–37.
- Konietzko, S., 2011. Strategische Ressourcenplanung aus Abfallströmen am Beispiel von Lithium, in: Thomé-Kozmiensky, K., Goldmann, D. (Herausgeber), *Recycling und Rohstoffe*. TK, Neuruppin. Aus-gabe 4, Seiten 185–194.
- Konietzko, S., Gernuks, M., 2011. Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen: Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt. Bericht. Umbrella-Arbeitsgruppe Ressourcenverfügbarkeit.
- König, L., Gaube, J., 1983. Fischer-Tropsch-Synthese. Neuere Untersuchungen und Entwicklungen. *Chemie Ingenieur Technik* 55, 14–22.
- Krainer, R.E., 2012. Regulating wall street: The dodd–frank act and the new architecture of global finance, a review. *Journal of Financial Stability* 8, 121–133.
- Kühn, A., Glöser, S., 2012. System-based feedback analysis of e-mobility diffusion in china., in: *Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society*, St. Gallen, Switzerland 2012. System Dynamics Society, St. Gallen.
- Kühn, A., Glöser, S., 2013. The influence of potential raw material shortages on the market penetration of alternative drives: A case study for lithium and cobalt, in: *Proceedings of the World Conference on Traffic Research (WCTR)*, Rio de Janero, Brazil.
- Kwakkel, J., Auping, W., Pruyt, E., 2014. Comparing behavioral dynamics across models: the case of copper, in: *Proceedings of the 32st International Conference of the System Dynamics Society*, Delft, The Netherlands.
- Laner, D., Rechberger, H., Astrup, T., 2015. Applying fuzzy and probabilistic uncertainty concepts to the material flow analysis of palladium in austria. *Journal of Industrial Ecology* , n/a.
- Laufer, J., 2005. Von der Preussag zur TUI: Wege und Wandlungen eines Unternehmens ; 1923 - 2003. 1. Aufl. ed., Klartext, Essen.

- Le Billon, P., 2001. The political ecology of war: natural resources and armed conflicts. *Political Geography* 20, 561–584.
- Leamy, H., 1985. National critical materials act: Call for involvement in new council designated as national watchdog of materials research activities. *MRS Bulletin* 1985, 21–25.
- Legislative Council, 1939. Strategic and Critical Materials Stock Piling Act. Bericht 50 U.S.C. 98. Office of the Legislative Council, U.S. House of Representatives. Washington, D.C.
- Lossin, A., 2008. *Chemische Technik: Prozesse und Produkte - Band 6a: Metalle*. Wiley VCH, Weinheim.
- Lossin, A., 2012. Copper. *ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Wiley-VCH, Weinheim Vol. 10, 164–233.
- Lüdtke, H., 1995. Vier Dimensionen von Lebensstilen. Zur Anwendung der Cluster- und Korrespondenzanalyse. *Angewandte Sozialforschung* 19, 77–92.
- Malik, K., 2013. *Human Development Report: The rise of the South: Human progress in a diverse world*. Ausgabe 2013. United Nations Development Programm, New York, USA.
- Malthus, T.R., 1798. *An essay on the principle of population*. St. Paul's Church-Yard London, UK.
- Manchester, F., Sakai, T., Hazama, T., Miyamura, H., Kuriyama, N., Kato, A., Ishikawa, H., 1991. Rare-earth-based alloy electrodes for a nickel-metal hydride battery. *Journal of the Less Common Metals* 172, 1175 – 1184.
- Marklines, 2015. Marklines automotive industry portal: Statistics database. online. URL: <http://www.marklines.com/en/>.
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Hummen, T., Erdmann, L., Tercero Espinoza, L.A., Angerer, G., Marwede, M., Benecke, S., 2016. *Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016: Auftragsstudie*. Ausgabe 28 von *DERA Rohstoffinformationen*. DERA, Hannover.
- Martens, H., 2011. *Recyclingtechnik - Lehrbuch für Lehre und Praxis*. Springer Spektrum Akademischer Verlag, Berlin.
- Massari, S., Ruberti, M., 2013. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy* 38, 36–43.
- Mayer, H., Gleich, B., 2015. Measuring criticality of raw materials: An empirical approach assessing the supply risk dimension of commodity criticality. *Natural Resources* 06, 56–78.
- McGill, I., 2000. Rare earth elements, in: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany.
- Meadows, D.H., 1972. *The Limits to growth: A report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. 2. ed. ed., Universe Books, New York, USA.
- Melcher, F., Wilken, H., 2013. Die Verfügbarkeit von Hochtechnologie-Rohstoffen. *Chemie in unserer Zeit* 47, 32–49.
- Meyer, R., 1969. Geschichtliches, in: Meyer, R. (Herausgeber), *Kobalt*. Springer Berlin Heidelberg. Ausgabe C-o / A / 1 von *Co. Kobalt. Cobalt (System-Nr. 58)*, Seiten 1–220.
- Minerals4EU, 2014. European minerals yearbook - data for cobalt. online. URL: http://minerals4eu.brgm-rec.fr/m4eu-yearbook/theme_selection.html.
- Morley, N., Eatherley, D., 2008. *Material Security - Ensuring resource availability for the UK economy: UK Environment Agency and Department for Business Enterprise*. Bericht. Oakdene Hollins Ltd., Aylesbury, England.

- Mortensen, U., 2009. Einführung in die Korrespondenzanalyse. Vorlesungsunterlagen im Fachbereich Statistik der Westfälische Wilhelms-Universität Münster 23, 56.
- Moss, R.L., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J., 2011. Critical Metals in Strategic Energy Technologies: Assessing Rare Metals as Supply Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Bericht. JRC Scientific and Technical Reports. European Commission, Brussels Belgium.
- Moss, R.L., Tzimas, Willis, P., Arendorf, J., Tercero Espinoza, L., 2013. Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector: Assessing Rare Metals as Supply Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Bericht. JRC Scientific and Technical Reports. European Commission, Brussels Belgium.
- Müller, E., Hilty, L.M., Widmer, R., Schlupe, M., Faulstich, M., 2014. Modeling metal stocks and flows: A review of dynamic material flow analysis methods. *Environmental Science & Technology*, 140204134136005.
- Nansai, K., Nakajima, K., Kagawa, S., Kondo, Y., Suh, S., Shigetomi, Y., Oshita, Y., 2014. Global flows of critical metals necessary for low-carbon technologies: the case of neodymium, cobalt, and platinum. *Environmental Science & Technology* 48, 1391–1400.
- Nassar, N.T., Barr, R., Browning, M., Diao, Z., Friedlander, E., Harper, E.M., Henly, C., Kavlak, G., Kwatra, S., Jun, C., Warren, S., Yang, M.y., Graedel, T.E., 2012a. Criticality of the geological copper family. *Environmental Science & Technology* 46, 1071–1078.
- Nassar, N.T., Barr, R., Browning, M., Diao, Z., Friedlander, E., Harper, E.M., Henly, C., Kavlak, G., Kwatra, S., Jun, C., Warren, S., Yang, M.y., Graedel, T.E., 2012b. Methodology of metal criticality determination: Criticality of the geological copper family. *Environmental Science & Technology* 46, 1071–1078.
- Nassar, N.T., Graedel, T.E., Harper, E.M., 2015. By-product metals are technologically essential but have problematic supply. *Science Advances* 1, e1400180.
- Neumann, G., 2011. Lithium-Akkumulatoren: Stand der Technik und zukünftige Entwicklungen. *Chemie Ingenieur Technik* 83, 2042–2050.
- Norgate, T.E., Jahanshahi, S., Rankin, W.J., 2007. Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production* 15, 838–848.
- Novinsky, P., Glöser, S., Kühn, A., Walz, R., 2014. Modeling the feedback of battery raw material shortages on the technological development of lithium-ion-batteries and the diffusion of alternative automotive drives: a system dynamics approach, in: *Proceedings of the 32nd International Conference of the System Dynamics Society*, Delft, Netherlands, Seiten 1–17.
- NRC, 2008. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy: Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy. Bericht. Committee on Earth Resources, National Research Council. Washington DC.
- Nuss, P., Harper, E.M., Nassar, N.T., Reck, B.K., Graedel, T.E., 2014. Criticality of iron and its principal alloying elements. *Environmental Science & Technology* 48, 4171–4177.
- Olivetti, E., Field, F., Kirchain, R., 2015. Understanding dynamic availability risk of critical materials: The role and evolution of market analysis and modeling. *MRS Energy & Sustainability* 2.
- Panousi, S., Harper, E.M., Nuss, P., Eckelman, M.J., Hakimian, A., Graedel, T.E., 2015. Criticality of seven specialty metals. *Journal of Industrial Ecology*, n/a.
- Parthemore, C., 2011. Elements of security: Mitigating the risks of U.S. dependence on critical minerals. Center for a New American Security, Washington DC.

- Patiño Douce, Alberto E., 2015. Metallic mineral resources in the twenty-first century. i. historical extraction trends and expected demand. *Natural Resources Research* .
- Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D.B., 2013. Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling* 71, 22–30.
- Pauliuk, S., Wood, R., Hertwich, E.G., 2015. Dynamic models of fixed capital stocks and their application in industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology* 19, 104–116.
- Peiró, L.T., Méndez, G.V., Ayres, R.U., 2013. Material flow analysis of scarce metals: Sources, functions, end-uses and aspects for future supply. *Environmental Science & Technology* 47, 2939–2947.
- Pfaff, M., Sartorius, C., 2015. Economy-wide rebound effects for non-energetic raw materials. *Ecological Economics* 118, 132–139.
- Pflüger, F., 2010. Der neue Rohstoff-Imperialismus. Bericht. *Die Welt* (Onlineausgabe). URL: http://www.welt.de/welt_print/debatte/article9101049/Der-neue-Rohstoff-Imperialismus.html.
- Piersig, W., 2010. Die sieben Metalle der Antike: Gold, Silber, Kupfer, Zinn, Blei, Eisen, Quecksilber: Beiträge zur Technikgeschichte (5). GRIN Verlag GmbH, München.
- Piersig, W., 2011. Kupfer - Metall der Antike, Gegenwart, Zukunft, Fonds für Technik, Kultur, Kunst: Beitrag zur Technikgeschichte. Ausgabe 11. GRIN Verlag GmbH, München.
- Pilarsky, G., 2014. Wirtschaft am Rohstofftropf: Der Kampf um die wichtigsten mineralischen Ressourcen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Pillot, C., 2013. The Worldwide rechargeable Battery Market 2010-2025. Bericht. avicenne Energy. Paris, Frankreich.
- Porri, I., 2013. Cobalt Facts. Bericht. Cobalt Development Institute. Brüssel, Belgien. URL: <http://www.thecdi.com/cobalt-stats>.
- Powell, M.J.D., 1964. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal* 7, 155–162.
- Pruyt, E., 2007. Dealing with uncertainties? combining system dynamics with multiple criteria decision analysis or with exploratory modelling, in: *Proceedings of the 25th International Conference of the System Dynamics Society*, Boston, Massachusetts.
- Qiang, Y., Zhong-wu, L., 2006. An analysis of contemporary copper recycling in china. *The Chinese Journal of Process Engineering* 6, 683–690.
- 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. *Environmental science & technology* 47, 10129–10136.
- Reif, K., 2010. Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe. Springer Vieweg, Berlin.
- Renz, L., 2014. Rohstoffimperialismus: Deutsche und europäische Entwicklungspolitik im Dienste von Wirtschaft und Machtpolitik. Bericht 1. IMI-Studie Informationsstelle Militarisierung e.V. URL: http://www.imi-online.de/download/2014_01_renz_web.pdf.
- Research and Markets, 2014. Global and Chinese NdFeB Industry Report, 2014-2018. Bericht. Research and Markets Ltd.. Dublin, Ireland.
- Reuter, B., Riedl, J., Hamacher, T., Lienkamp, M., Bradshaw, A.M., 2013a. Future resource availability for the production of lithium-ion vehicle batteries. *Research Gate* .

- Reuter, M., Hudson, C., Van Schaik, A., Heiskanen, K., Meskers, C., Hagelüken, C., 2013b. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. Bericht. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.
- Reuter, M., van Schaik, A., 2012. Opportunities and limits of recycling: A dynamic-model-based analysis. *MRS Bulletin* 37, 339–347.
- Reuter, M.A., 1998. The simulation of industrial ecosystems. *Minerals Engineering* 11, 891–918.
- Ricardo, D., 1821. On the principles of political economy and taxation. London, UK.
- Robinson, A.L., 1986. Congress critical of foot-dragging on critical materials. *SCIENCE* 234, 20–21.
- Rochlin, L.L., 2003. Magnesium alloys containing rare earth metals: Structure and properties. Ausgabe 3 von *Advances in metallic alloys*. Taylor & Francis, London.
- Roelich, K., Dawson, D.A., Purnell, P., Knoeri, C., Revell, R., Busch, J., Steinberger, J.K., 2014. Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions: A case of low carbon electricity. *Applied Energy* 123, 378–386.
- Rosenau-Tornow, D., Buchholz, P., Riemann, A., Wagner, M., 2009. Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends. *Resources Policy* 34, 161–175.
- Roskill, 2007. Roskill Information Services Ltd.: The Economics of Cobalt: 11th Edition. Bericht. Roskill Information Services Ltd.. London, England.
- Roskill, 2011. Roskill Information Services Ltd.: Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015: A quick introductory guide to rare earths. Bericht. Roskill Information Services Ltd.. London, England.
- Rosumek, P., 1982. Technischer Fortschritt und Rationalisierung im antiken Bergbau.. Ausgabe 102 von *Zeitschrift der Savigny-Stiftung für Rechtsgeschichte. Romanistische Abteilung*. Rudolf Habelt Verlag, Bonn.
- Rothengatter, W., 2008. Makro kompakt: Grundzüge der Makroökonomik. Physica-Lehrbuch, Physica-Verl. and Springer, Heidelberg.
- Rotter, V.S., 2012. Rohstoffsicherung durch Recycling: Präsentation auf dem IHK-DERA Rohstoffdialog. Bericht. TU Berlin.
- Ruhrberg, M., 2006. Assessing the recycling efficiency of copper from end-of-life products in Western Europe. *Resources, Conservation and Recycling* 48, 141–165.
- Salvi, O., Debray, B., 2006. A global view on aramis, a risk assessment methodology for industries in the framework of the seveso ii directive. *Journal of Hazardous Materials* 130, 187–199.
- Sander, K., Schilling, S., 2010. Transboundary shipment of waste electrical and electronic equipment / electronic scrap –Optimization of material flows and control. Bericht. OEKOPOL GmbH. Hamburg.
- Sato, J., Omori, T., Oikawa, K., Ohnuma, I., Kainuma, R., Ishida, K., 2006. Cobalt-base high-temperature alloys. *Science (New York, N.Y.)* 312, 90–91.
- Schade, W., Zanker, W., Kühn, A., Kinkel, S., Jäger, A., Hettesheimer, T., Schmall, T., 2012. Arbeitsbericht Nr.152 - Zukunft der Automobilindustrie. Bericht. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB). Berlin.
- Schlesinger, M.E., King, M.J., Sole, K.C., Davenport, W.G., 2011. Extractive metallurgy of copper. Elsevier.
- Schmitz, H., 1984. Werkstoffkunde Stahl: Band 1: Grundlagen. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Schmitz, M., Buchholz, P., Huy, D., Sievers, H., 2012. Rohstoffsicherung und Beschaffung bei steigenden

- Preisen und zunehmenden Versorgungsrisiken, Präsentation. Bericht. Deutsche Rohstoffagentur (DERA). Berlin. URL: <http://www.detmold.ihk.de/datei/tabledoc/949>.
- Schneider, H., 2012. Geschichte der antiken Technik. Ausgabe 2432 von *Beck'sche Reihe C.-H.-Beck-Wissen*. 2., durchgesehene Aufl. ed., Beck, München.
- Schneider, W., 2008. Praktische Regelungstechnik: Ein Lehr- und Übungsbuch für Nicht-Elektrotechniker ; mit 72 Tabellen. Studium. 3., vollst. überarb. und erw. Aufl. ed., Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- Scholz, R.W., Wellmer, F.W., 2013. Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: What we may learn from the case of phosphorus? *Global Environmental Change* 23, 11–27.
- Schüler, D., Buchert, M., Schüler, Liu, R., Dittrich, S., Merz, C., 2011. Study on Rare Earths and Their Recycling: Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament. Bericht. Öko-Institut e.V. Freiburg.
- Schulze, R., Buchert, M., 2016. Estimates of global recycling potentials from NdFeB magnet material. *Resources, Conservation and Recycling* 113, 12–27.
- Senge, P.M., Klostermann, M., 2006. Die fünfte Disziplin: Kunst und Praxis der lernenden Organisation. 10. Aufl. ed., Klett-Cotta, Stuttgart.
- Sievers, H., Tercero, L., 2012. European dependence on and concentration tendencies of the material production. *Polinares Working Paper* 3/2012.
- Simon, B., Weil, M., 2013. Analysis of materials and energy flows of different lithium ion traction batteries. *Revue de Métallurgie* 110, 65–76.
- Smith, K., 2013. Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster. 6th ed ed., Routledge, Abingdon, USA.
- Smith, N.J., Jobling, P., Thompson, S., Merna, T., 2014. Managing risk in construction projects. Third edition ed., Wiley-Blackwell, Chichester, England.
- Solar, S., Shields, D., Miller, M., 2009. Mineral policy in the era of sustainable development: historical context and future content. *Materials and Geoenvironment* 2009, 304–321.
- Sommer, P., Rotter, V.S., Ueberschaar, M., 2015. Battery related cobalt and REE flows in WEEE treatment. *Waste management* (New York, N.Y.) .
- Soulier, M., Glöser, S., Tercero Espinoza, L.A., 2012. Development of a European copper flow model (Phase 2): Final report to the International Copper Association, Ltd. Unveröffentlichtes Dokument. Bericht. Fraunhofer ISI. Karlsruhe.
- Spath, D., Rothfuss, F., Herrmann, F., Voigt, S., Brand, M., Fischer, S., 2011. Strukturstudie BWe mobil 2011: Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität. Bericht. Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH. Stuttgart.
- Speirs, J., Hourri, Y., Gross, R., 2013. Materials Availability: Comparison of material criticality studies: methodologies and results. Bericht. UK Energy Research Centre. London, UK.
- Sprecher, B., Daigo, I., Murakami, S., Kleijn, R., Vos, M., Kramer, G.J., 2015. Framework for resilience in material supply chains, with a case study from the 2010 rare earth crisis. *Environmental Science & Technology* , 150522091540000.
- Sprecher, B., Kleijn, R., Kramer, G.J., 2014. Recycling potential of neodymium: the case of computer hard disk drives. *Environmental Science & Technology* 48, 9506–9513.
- SRU, 2012. Umweltgutachten 2012- Verantwortung in einer begrenzten Welt. Bericht. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin.

- Stepanek, C., Walter, M., Rathgeber, A., 2013. Is the convenience yield a good indicator of a commodity's supply risk? *Resources Policy* 38, 395–405.
- Sterman, J., 2000. *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill, Boston, USA.
- Stier, H.E., Aner, E., 1985. *Großer Atlas zur Weltgeschichte*. Westermann, Braunschweig.
- Stürmer, M., Hagen, J.v., 2012. Der Einfluss des Wirtschaftswachstums aufstrebender Industrienationen auf die Märkte mineralischer Rohstoffe. Ausgabe 11 von *DERA-Rohstoffinformationen*. Stand: April 2012 ed., Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Berlin.
- Sverdrup, H.U., Ragnarsdottir, K.V., Koca, D., 2014. On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves. *Resources, Conservation and Recycling* 87, 158–174.
- Swiss Center of Life Cycle Inventory, 2015. *ecoinvent: LCI database*. URL: <http://www.ecoinvent.org/>.
- Tanimoto, A.H., Gabarrell Durany, X., Villalba, G., Caldeira Pires, A., 2010. Material flow accounting of the copper cycle in brazil. *Resources, Conservation and Recycling* 55, 20–28.
- Tasman Metals Ltd., 2015. *Strategic metals, strategic locations*. Bericht. Tasman Metals Ltd.. Vancouver, Canada. URL: http://www.tasmanmetals.com/i/pdf/TSM_Presentation.pdf.
- Tercero, L., 2012. *The role of emerging technologies in rapidly changing demand for mineral raw materials*. Polinares Working Paper .
- Tercero Espinoza, L.A., Hummen, T., Brunot, A., Hovestad, A., Pena Garay, I., Velte, D., Smuk, L., Todorovic, J., Van der Eijk, C., Joce, C., 2013. *Critical Raw Materials Substitution Profiles*. Bericht. Joint Research Council EU. Brüssel, Belgien.
- Thielmann, A., Sauer, A., Isenmann, R., Wietschel, M., Plötz, P., 2012. *Produkt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030*. Bericht. Technologie-Roadmapping am Fraunhofer ISI: Konzepte-Methoden-Praxisbeispiele. Karlsruhe.
- Thomé-Kozmiensky, K.J., 1995. *Verfahren und Stoffe in der Kreislaufwirtschaft*. Verlag für Energie und Umwelttechnik, Berlin.
- Tilton, J.E., Humphreys, D., Radetzki, M., 2011. Investor demand and spot commodity prices. *Resources Policy* 36, 187–195.
- Tilton, J.E., Lagos, G., 2007. Assessing the long-run availability of copper. *Resources Policy* 32, 19–23.
- Troitzsch, U., 1987. *Die Technik: Von den Anfängen bis zur Gegenwart*. Überarb. lizenzausg ed., Unipart-Verl, Stuttgart.
- U. S. DoE, 2010. *Critical Materials Strategy: 2010*. Bericht. U. S. Department of Energy. Washington, DC.
- U. S. DoE, 2011. *Critical Materials Strategy: 2011*. Bericht. U. S. Department of Energy. Washington, DC.
- UBA, 2012. *Jahresbericht über die Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahr 2012*. Bericht. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin / Dessau.
- UEIC, 2003. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Umberto, 2015. *Ökobilanzen und Environmental Product Declaration (EPD) mit professioneller Software*, ifu Hamburg GmbH. URL: <http://www.umberto.de/de/versionen/umberto-nxt-lca/>.
- Unlü, A., Kickmeier-Rust, M., 2008. Implementation and applications of a three-round user strategy for

- improved principal axis minimization. *Journal of Applied Quantitative Methods* .
- U.S. Council on International Economic Policy, 1974. Special report: critical imported materials. Bericht. U.S. Council on International Economic Policy, Executive Office of the President. Washington D.C.
- USGS, 2011. Rare Earth Elements - End Use and Recyclability: Scientific Investigations Report 5094. Bericht. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA.
- USGS, 2012a. Cobalt Statistics and Information. Bericht. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA.
- USGS, 2012b. Copper Statistics and Information. Bericht. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA.
- USGS, 2013. Minerals Yearbook: Rare Earths. Bericht. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA.
- USGS, 2014. Mineral Commodity Summaries. Bericht. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA.
- Vaimann, Toomas; Kallaste, A.K.A.B.A., 2013. Magnetic properties of reduced Dy: NdFeB permanent magnets and their usage in electrical machines, in: Proceedings of the AFRICON 2013, Seiten 1–5. pointe-Aux-Piments, Mauritius, 2013.
- van Vuuren, D., Strengers, B., de Vries, H., 1999. Long-term perspectives on world metal use—a system-dynamics model. *Resources Policy* 25, 239–255.
- vbw, 2009. Rohstoffsituation Bayern: Keine Zukunft ohne Rohstoffe: Strategien und Handlungsoptionen. Bericht. Verband der Bayerischen Wirtschaft e.V. (vbw). München.
- vbw, 2012. Rohstoffversorgung langfristig sichern: Verband der Bayerischen Wirtschaft e.V. Bericht. Verband der Bayerischen Wirtschaft e.V. (vbw). München.
- VDA, 2000-2013. Tatsachen und Zahlen. Bericht. Verband der deutschen Automobilindustrie. Frankfurt am Main.
- Verhoef, E., Dijkema, G.P., Reuter, M.A., 2004. Process knowledge, system dynamics, and metal ecology. *Journal of Industrial Ecology* , 23–43.
- Wallasch, A.K., Ekkert, M., Rehfeldt, K., 2014. Status des Windenergieausbaus in Deutschland: Zusätzliche Auswertungen und Daten für das Jahr 2014. Bericht. Deutsch Wind Guard GmbH. Varel.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., 2011. Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen. Springer Vieweg + Teubner Verlag, Berlin.
- Walz, R., Marscheider-Weidemann, F., 2011. Technology-specific absorptive capacities for green technologies in newly industrialising countries. *International Journal of Technology and Globalisation* 5, 212–229.
- Ward, W.A., 1991. Early contacts between egypt, canaan, and sinai: Remarks on the paper by amnon ben-tor. *Bulletin of the American Schools of Oriental Research* 1991, 11–26.
- Webster, B.Y., 2011. Understanding & Comparing Risk. Bericht. RELIABILITY WEB.COM. online Quelle. URL: http://reliabilityweb.com/articles/entry/understanding_and_comparing_risk/.
- Wehrspohn, R.B., 2014. Leitprojekt Kritikalität Seltener Erden. Bericht. Fraunhofer Gesellschaft. München. URL: <http://www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-initiativen/fraunhofer-leitprojekte/fraunhofer-seltene-erden.html>.
- Weickhmann, M., 2013. Weniger Seltene Erden in Magneten für Hybridfahrzeuge. *Elektronik: Automotive Sonderausgabe Elektromobilität* 1, 41–43.
- Weinert, J., Ma, C., Yang, X., Cherry, C., 2007. Electric two-wheelers in china: Effect on travel behavior, mode shift, and user safety perceptions in a medium-sized city. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2038, 62–68. arXiv:<http://dx.doi.org/10.3141/2038-08>.

- Weiser, A., Lang, D.J., Schomerus, T., Stamp, A., 2015. Understanding the modes of use and availability of critical metals – an expert-based scenario analysis for the case of indium. *Journal of Cleaner Production* 94, 376–393.
- Wellmer, F.W., 2008. Auslandsaktivitäten der Metallgesellschaft AG in Exploration und Bergbau – Bericht eines Zeitzeugen. *Bergbau*, 160–169.
- Wellmer, F.W., 2012. Was sind wirtschaftsstrategische Rohstoffe?, in: *Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*. DGG. Ausgabe 80, 2012, Seite 120.
- Wellmer, F.W., Dalheimer, M., 2012. The feedback control cycle as regulator of past and future mineral supply. *Mineralium Deposita* 47, 713–729.
- Westphal, L., Kuchta, K., 2012. Permanentmagnete in Elektrogeräten: Möglichkeiten und Grenzen bei der Erfassung und dem Recycling. Bericht. Technische Universität Hamburg-Harburg. Hamburg.
- Westphal, L., Kuchta, K., 2013. Versorgungsengpässen vorbeugen: Seltene Erden in Permanentmagneten können nicht gleichwertig substituiert werden, in: Reiser, B. (Herausgeber), *ReSource*. Rhombos-Verlag, Berlin. Ausgabe 4 2013, Seiten 10–15.
- Westphal, L., Kuchta K., Hobohm J., 2014. Permanentmagnete in der Feinkornaufbereitung von Elektro- und Elektronikgeräten, in: Teipel, U., Reller, A. (Herausgeber), *Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen: 05./06. Februar 2014 Neues Museum Nürnberg*. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, Seiten 243–250.
- Widmer, R., Du, X., Haag, O., Restrepo, E., Wäger, P.A., 2015. Scarce metals in conventional passenger vehicles and end-of-life vehicle shredder output. *Environmental Science & Technology* 49, 4591–4599.
- Wilde, A., 2008. NdFeB Magnets in the Context of Automotive Applications. Bericht. Robert Bosch GmbH. Stuttgart. URL: http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/20080702_alexandrawilde.pdf.
- Wilson, A., McMahon, F., Cervantes, M., 2013. Global Mining Survey - Results for 2012/2013: Policy Potential Index 2013. Bericht. Fraser Institute. Montreal, Kanada.
- Wittmer, D., 2006. Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt - Ein methodischer Beitrag zur Exploration urbaner Lagerstätten. Dissertation. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Zürich.
- Wittmer, D., Lichtensteiger, T., Baccini, P., 2003. Copper exploration in urban mining., in: *Proceedings of Copper 2003, The 5th International Conference*, Santiago, Chile.
- Wübbecke, J., 2013. Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry. *Resources Policy* 38, 384–394.
- Yale Center for Environmental Law and Policy, 2014. Environmental Performance Index - Summary for Policy Makers. Bericht. Yale University.
- Zepf, V., 2013. Rare earth elements: A new approach to the nexus of supply, demand and use - as exemplified by the use of neodymium in permanent magnets. Springer theses, Springer, Berlin.
- Ziemann, S., Grunwald, A., Schebek, L., Müller, D., Weil, M., 2013. The future of mobility and its critical raw materials. *Revue de Métallurgie* 110, 47–54.
- Ziemann, S., Schebek, L., 2010. Substitution knapper Metalle - ein Ausweg aus der Rohstoffknappheit? *Chemie Ingenieur Technik* 82, 1965–1975.