

# ANALYSE KRITISCHER ROHSTOFFE DURCH METHODEN DER MULTIVARIATEN STATISTIK<sup>1</sup>

S. Glöser<sup>1</sup>, M. Faulstich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer ISI, Breslauerstr. 48, D-76139 Karlsruhe, e-mail: simon.gloeser@isi.fraunhofer.de

<sup>2</sup> CUTEC Institut an der TU Clausthal, Leibnizstr. 21, D-38678 Clausthal-Zellerfeld

**Keywords:** *Versorgungssicherheit, Quantifizierung der Rohstoffkritikalität, statistische Methoden zur Dimensionsreduzierung, Marktentwicklung, kritische Rohstoffe*

## 1 Einleitung

In einem Hochtechnologieland wie Deutschland ist die störungsfreie Versorgung mit Rohstoffen Voraussetzung für die erfolgreiche Produktion und Vermarktung von Spitzentechnologie und damit die Basis für eine nachhaltige Entwicklung der Wirtschaft. Wegen des hohen Anteils des verarbeitenden Gewerbes an der gesamten Wertschöpfung bei gleichzeitig hoher Rohstoffarmut, also nahezu vollständiger Importabhängigkeit, wird dem Thema der Versorgungssicherheit einiger für verschiedene Industriezweige essentieller metallischer und mineralischer Rohstoffe insbesondere in Deutschland hohe Bedeutung zugesprochen. In diesem Zusammenhang wird häufig die Kritikalität der Rohstoffe analysiert, d.h. das Zusammenspiel aus wirtschaftlicher Bedeutung eines Rohstoffes und seiner Versorgungssicherheit. Dabei werden Rohstoffe, die eine hohe wirtschaftliche Bedeutung haben, deren Versorgungssituation aber gleichzeitig stark risikobehaftet ist, als kritische Rohstoffe bezeichnet [1].

Aus historischer Sicht ließ sich die Versorgungssicherheit metallischer Rohstoffe 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, wobei in diesem Zusammenhang hauptsächlich von strategischen Rohstoffen gesprochen wurde [2]. Während in der Vergangenheit vorwiegend politische Konflikte den Hintergrund für Debatten über die Sicherheit der Rohstoffversorgung bildeten, ist die heutige Diskussion wesentlich vielseitiger: Im Fokus stehen Rohstoffe für die zivile Nutzung, insbesondere in Anwendungsfeldern, die technologisch einen hohen Nutzen versprechen [3]. Daher werden die Begriffe „strategisch“ und „kritisch“ inzwischen stärker differenziert, wobei Rohstoffe für militärische bzw. verteidigungsrelevante Technologien als „strategisch“ klassifiziert werden (insbesondere im

---

<sup>1</sup> Erschienen in: 3. Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen, Nürnberg (Germany), 5./6. Februar 2014, Herausgegeben von Ulrich Teipel und Armin Reller, Fraunhofer Verlag 2014

angloamerikanischen Sprachgebrauch), während „kritische“ Rohstoffe die gesamte industrielle Wertschöpfung betreffen, obwohl es natürlich starke Überschneidungen zwischen beiden Bereichen gibt [3].

Da bezüglich kritischer Rohstoffe häufig von einer fixen, statischen Liste ausgegangen wird (z.B. die 14 kritischen Rohstoffe der EU27 [4]), wurde im deutschsprachigen Raum neuerdings der übergeordnete, flexibler auslegbare Begriff der „wirtschaftsstrategischen Rohstoffe“ eingeführt [5]. Im folgenden Beitrag werden allerdings ausschließlich quantitative Methoden zur Erfassung kritischer Rohstoffe betrachtet, weshalb hauptsächlich von kritischen Rohstoffen gesprochen wird. Dabei werden zunächst die Methoden und Ergebnisse verschiedener Kritikalitätsstudien verglichen. Die in den jeweiligen Studien als kritisch identifizierten Rohstoffe werden anschließend statistisch auf Ähnlichkeit untersucht und in verschiedene Cluster aufgeteilt. Dies erfolgt über dimensionsreduzierende Verfahren der Multivariaten Statistik, wie die Multidimensionale Skalierung, die Hierarchische Clusteranalyse und die Multiple Korrespondenzanalyse. Hierzu wurden verschiedenste für die Kritikalitätsbewertung relevanten Eigenschaften der Rohstoffe, insbesondere Markteigenschaften auf Nachfrage- und Angebotsseite in Betracht gezogen.

Zielsetzung dieses Beitrags ist es, die reine Risikobetrachtung der Kritikalitätsanalyse basierend auf der Aggregation verschiedener Indikatoren um statistische Methoden zum Clustern und zur Strukturanalyse zu erweitern. Abschließend wird in diesem Beitrag die Problematik der mangelnden Dynamik in den bisher rein statischen Methoden der Quantifizierung der Kritikalität von Rohstoffen diskutiert sowie aktuelle Entwicklungen im Bereich der Kritikalitätsanalyse dargestellt.

## 2 Aktuelle Studien zur Quantifizierung der Kritikalität von Rohstoffen im Vergleich

Zahlreiche Studien zur Quantifizierung der Rohstoff-Kritikalität wurden in jüngster Vergangenheit für unterschiedliche Länder und Wirtschaftsregionen unter Berücksichtigung verschiedener qualitativer und quantitativer Indikatoren angefertigt.

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) beschriebenen klassischen Risikobetrachtung aus der Ingenieurs- und Umweltwissenschaft herleiten. Das Risiko wird allgemein als Produkt aus Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit definiert. Dabei wird das Risiko häufig in einer Risiko-Matrix dargestellt, was sich - wie in Abb. 1 gezeigt - auf die Kritikalitätsbetrachtung übertragen lässt.

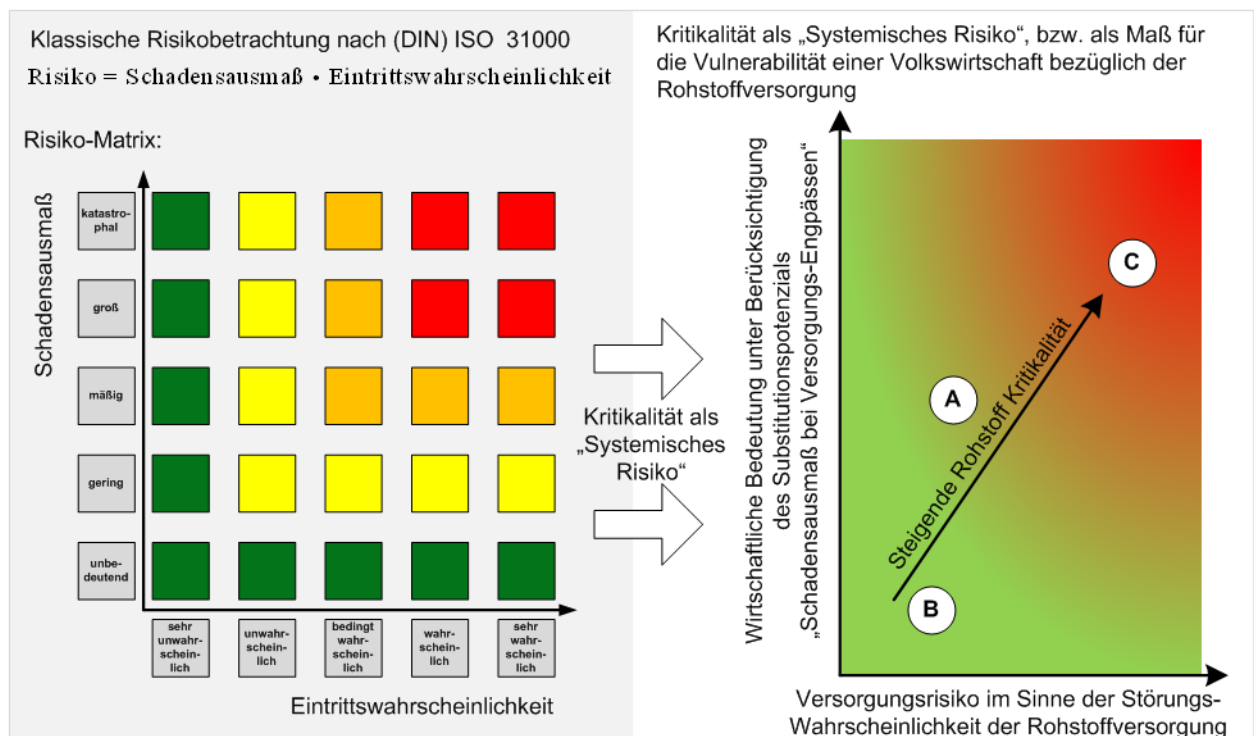


Abb. 1 Kritikalität im Sinne der Risikoanalyse [eigene Darstellung, nach 1]

Folgende Größen werden in aktuellen Studien zur Bewertung der Kritikalität der Rohstoffversorgung meist berücksichtigt [6], [7], [8]:

#### Versorgungsunsicherheit (Versorgungsrisiko)

- ⇒ Konzentration der Produktion auf Länder- und Unternehmensebene
- ⇒ Politische Stabilität der Förderländer
- ⇒ Alternative Versorgungsquellen
- ⇒ Recycling & Einsparpotenzial
- ⇒ Umweltrisiko beim Abbau und bei der Aufbereitung

#### Wirtschaftliche Bedeutung

- ⇒ Anteil betroffener Branchen an der gesamten Bruttowertschöpfung
- ⇒ Berücksichtigung kurzfristiger Substitutionspotenziale
- ⇒ Relevanz für strategische / politische Maßnahmen (z.B. Energiewende)

Zur Quantifizierung dienen dabei z.B. die „Worldwide Governance Indicators“ der World Bank, die als Maß der politischen Stabilität der Förderländer gelten, Konzentrationsmaße wie der Herfindahl-Hirschmann-Index zum Messen der Länderkonzentration der Rohstoffförderung, sowie Importquoten 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 (siehe unten), was erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse hat (vergl. Abschnitt 2.1ff, [9]).

Allerdings basieren nicht alle aktuellen Forschungsarbeiten zur Versorgungssicherheit wirtschaftsstrategischer Rohstoffe auf der zuvor erläuterten Kritikalitätsbetrachtung. Teilweise wurde ein einheitlicher Risiko- bzw. Kritikalitäts-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 [10]. Während die Risikoindex- und Kritikalitätsbetrachtungen rein statische Erhebungen darstellen, wurden auch dynamische Methoden entwickelt, mit deren Hilfe meist in verschiedenen Szenarien zukünftige Rohstoffbedarfe für unterschiedliche Märkte und Technologien dargestellt wurden. Ziel dieser Studien ist die Identifikation möglicher zukünftiger Versorgungsengpässe auf Grund starker technologiebasierter Nachfrageimpulse oder zu erwartenden Änderungen der Angebotssituation. Ein direkter Bezug zur Quantifizierung der Versorgungsrisiken besteht in diesen Ansätzen allerdings nicht. Insgesamt lassen sich bezüglich

aktueller Studien zur Sicherheit der Rohstoffversorgung die folgenden drei grundlegenden methodischen Ansätze zusammenfassen:

- ⇒ Reiner Risiko-Index / Indizes zur hierarchischen Bewertung des Versorgungsrisikos
- ⇒ Zweidimensionale Betrachtung in einer Kritikalitäts-Matrix
- ⇒ Zukünftige Nachfrageszenarien unter Berücksichtigung der Reserven, bzw. der Anpassungsfähigkeit der Angebotsseite an Impulse der Rohstoffnachfrage

In Tabelle 1 sind einige aktuellen Studien und Veröffentlichungen nach ihrer jeweilig zu Grunde gelegten Methodik kategorisiert.

Tabelle 1: Aktuelle Studien zur Versorgungssicherheit aufgeteilt nach angewandter Methodik, angelehnt an [9]

1. Risiko-Index / Indizes	2. Kritikalitäts-Matrix	3. Nachfrage-Szenarien
„Rohstoffsituation Bayern: Keine Zukunft ohne Rohstoffe“, (IW Consult 2009) [10]	„Kritische Rohstoffe für Deutschland“, IZT / adelphi (Erdmann et al. 2011) [11]	„Rohstoffe für Zukunftstechnologien“, Fraunhofer ISI / IZT (Angerer et al. 2009) [12]
„Sichere Energie- und Rohstoffversorgung“ (Bardt 2008) [13]	“Criticality of the Geological Copper Family” (Graedel et al. 2011)[14]	“Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential”, Öko Institut (Buchert et al. 2009) [15]
“Evaluating supply risks for mineral raw materials”, BGR (Sievers et al. 2010) [16]	“Critical raw materials for the EU”, European Commission Enterprise and Industries (EU Working Group 2010) [4]	“Assessing the long-term supply risks for mineral rawmaterials”, VW / BGR (Rosenau-Tornow et al. 2009) [17]
“Material Security: Ensuring resource availability for the UK economy”, Oakdene Hollins Ltd, (Morley, Eatherley 2008)	„Critical Materials Strategy“ (U.S. Department of Energy 2010) [18]	„Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen“, RWI, Fraunhofer ISI, BGR (Frondel et al. 2008) [19]
„Ressourcenstrategien für Hessen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen“ (Faulstich et al. 2011) [20]	“Design in an Era of Constrained Resources”, General Electrics (Duclos et al. 2008) [21]	“Mineral Supply and Demand into the 21st Century”, USGS (Kesler 2007) [22]
Critical Metals in Strategic Energy Technologies (Moss et al. 2011)	“Minerals, Critical Minerals, And the U.S. Economy” (National Research Council of the National Academics 2007) [1]	

Im Folgenden werden die Methoden und Hintergründe der in Tabelle 1 hervorgehobenen (eingerahmten) Studien kurz dargestellt, was für die anschließenden Auswertungen und Vergleiche der Ergebnisse vorteilhaft ist. Dabei werden insbesondere die Studien betrachtet, in denen als Screening-Methode eine möglichst große Zahl von Rohstoffen untersucht wurde.

## 2.1 USA: Critical Minerals and the US economy 2007

Diese Studie wurde von einem Ausschuss des U.S. National Research Councils (NRC) durchgeführt. Das „Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy“ wurde innerhalb der 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 [3]. In dieser Studie wurde erstmals die Kritikalitätsmatrix als Abstraktion der Risikobetrachtung wie in Abb. 1 dargestellt verwendet. Dabei basierte die Quantifizierung der Kritikalität 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) verortet.

Zur Bewertung der Vulnerabilität wurden die Auswirkungen von Versorgungsstörungen in den jeweiligen Anwendungsbereichen von einem Expertenausschuss auf einer Skala von 1 bis 4 bewertet. Diese Bewertung wurde anschließend mit dem Anteil der jeweiligen Anwendungen am Gesamtverbrauch des Rohstoffs in den USA gewichtet und aufsummiert. Die Ergebnisse der Studie sind in Abb. 2 dargestellt.

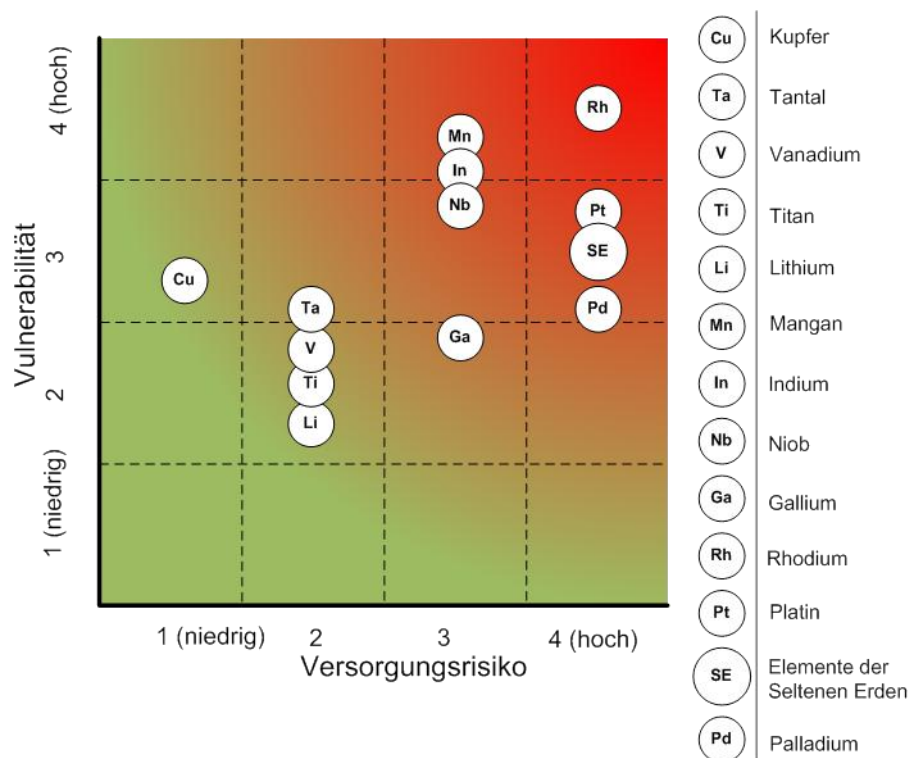
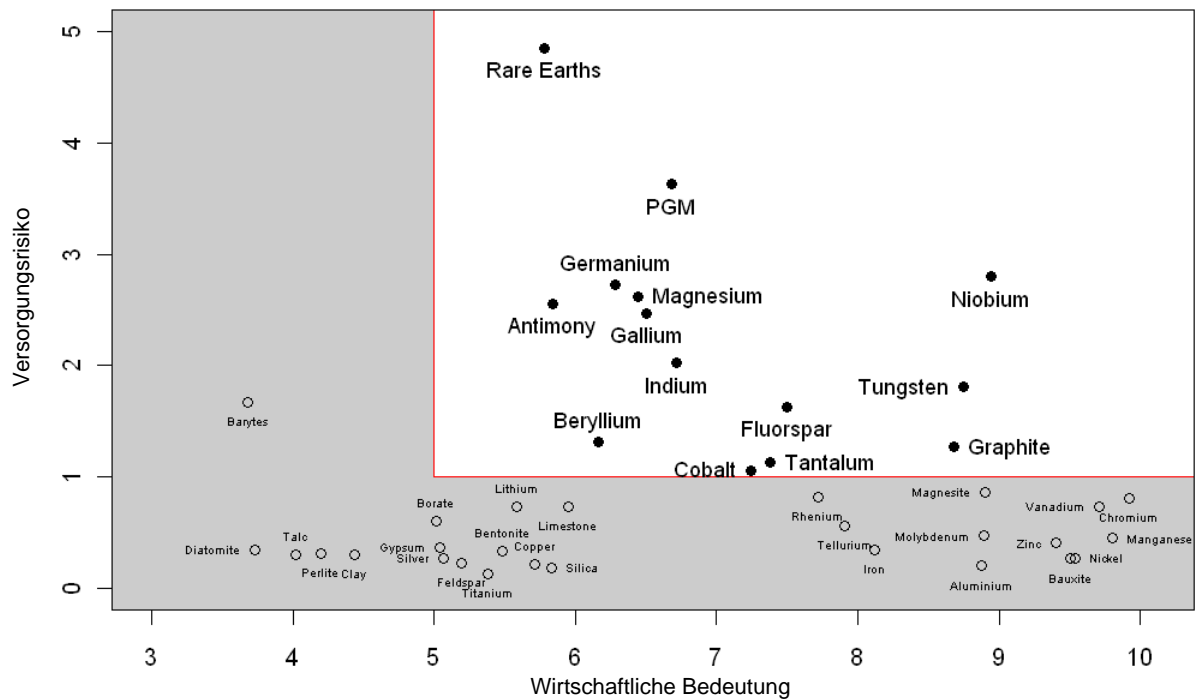


Abb. 2 Ergebnisse der NRC-Studie für die USA 2007 (NRC 2008, S. 65) [1]

## 2.2 Europäische Union: Critical raw materials for the EU 2010

Eine Expertengruppe der Europäischen Union („Ad hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials“), erarbeitete zwischen 2009 und 2010 eine Methode zur Analyse kritischer Rohstoffe für die EU. Wie in der Europäischen Rohstoffinitiative vorgesehen, sollte die Expertengruppe kritische Rohstoffe für die Europäische Wirtschaft identifizieren. Hierzu wurden 41 Industriemineralien und Metalle untersucht [3]. In Anlehnung an die vom NRC entwickelte Kritikalitätsmatrix wird ein Rohstoff als kritisch angesehen, wenn das Versorgungsrisiko und die wirtschaftlichen Folgen einer Versorgungsstörung beide als hoch angesehen werden. Allerdings basiert diese Studie im Gegensatz zur NRC-Studie auf einem rein quantitativen Ansatz, wobei die Dimensionen der Kritikalität nach dem in Abb. 3 dargestellten Algorithmus berechnet wurden. Das Ergebnis dieser Studie war die Identifikation von 14 kritischen Rohstoffen für die EU (vergl. Abb. 3).



$$\text{Versorgungsrisiko} = (1 - \rho_i) \cdot \sum_s (A_{is} \cdot \sigma_{is}) \cdot \sum_c (S_{ic}^2 \cdot \text{WGI}_c)$$

$\rho_i$  = EoL Recycling Input Rate (Anteil des postkonsumierten Sekundärmaterials an der Gesamtproduktion)

$\sum_s (A_{is} \cdot \sigma_{is})$  = Substituierbarkeitsfaktor,

mit  $A_{is}$ : Anteil des Verbrauchs von Rohstoff  $i$  in Industriesektor  $s$  und  $\sigma_{is}$ : Substituierbarkeit von Rohstoff  $i$  in Industriesektor  $S$

$\sum_c (S_{ic}^2 \cdot \text{WGI}_c)$  = Konzentrationsmaß der Produktion (Herfindahl Hirschmann Index) unter Berücksichtigung der politischen Stabilität der Produktionsländer

mit  $S_{ic}$ : Anteil der Produktion von Rohstoff  $i$  in Land  $c$  an der Weltproduktion und  $\text{WGI}_c$ : Durchschnittswert der Governance Indikatoren der Weltbank für Land  $c$

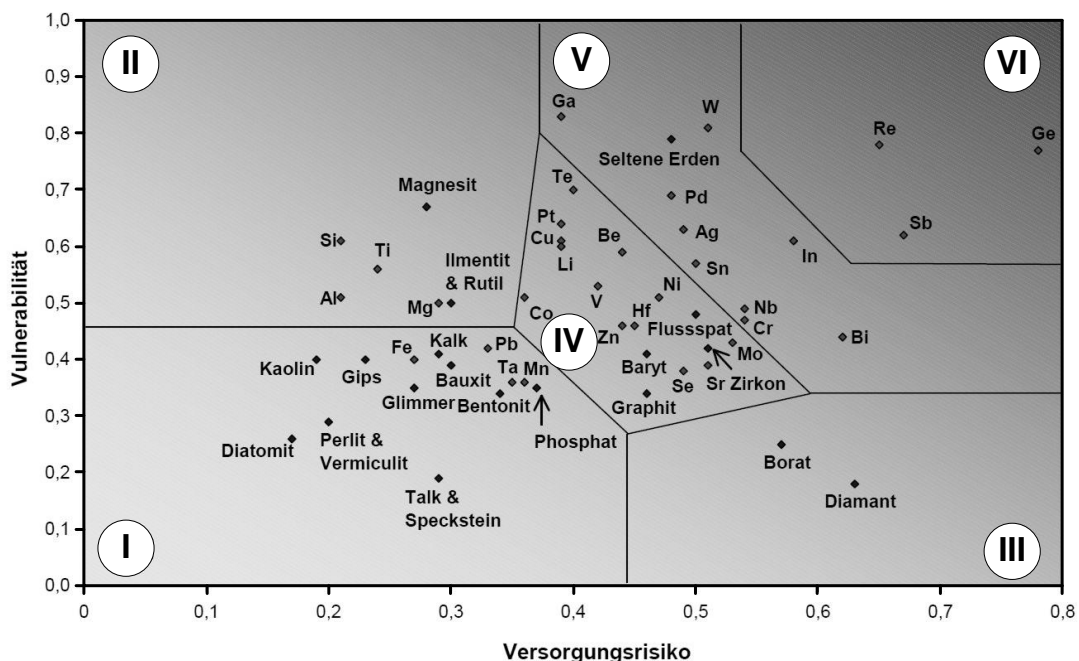
$$\text{Wirtschaftliche Bedeutung} = \frac{\sum_s (S_{is})}{\text{BIP}_{\text{EU27}}}$$

mit  $S_{is}$ : Bruttowertschöpfung des von Rohstoff  $i$  abhängigen Wirtschaftssektors (Megasektor) und  $\text{BIP}_{\text{EU27}}$ : Gesamtwertschöpfung der Europäischen Wirtschaft

Abb. 3 Ergebnisse und Methodik der EU Studie 2010 [4]

### 2.3 Deutschland: Kritische Rohstoffe für Deutschland 2011

Eine Studie zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen aus Sicht der deutschen Industrie wurde von der KfW Bankengruppe in Auftrag gegeben. Die Studie wurde von einem Konsortium aus dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) und adelphi durchgeführt und Ende 2011 veröffentlicht. Analysiert wurden 52 Rohstoffe. Als Ansatz zur Quantifizierung der Kritikalität wurde die von der NRC entwickelte Kritikalitätsmatrix gewählt. Wesentlicher Unterschied zur Studie der USA und der EU, ist die Methode zur Ermittlung der Koordinaten der einzelnen Rohstoffe innerhalb der Kritikalitätsmatrix [3]. Die zur Bewertung der Kritikalität herangezogenen Faktoren sowie deren Gewichtung und die Ergebnisse der Studie sind in Abb. 4 dargestellt.



Versorgungsrisiko					
Vulnerabilität	Zeitliche Relevanz	Gewichtung	Versorgungsrisiko	Zeitliche Relevanz	Gewichtung
<b>Mengenrelevanz:</b>			<b>Länderrisiko</b>		
Anteil Deutschlands am Weltverbrauch (2008)	kurzfristig	25%	Länderrisiko für die Importe Deutschlands (2008)	kurzfristig	10%
Änderung des Anteils Deutschlands am Weltverbrauch (2004-2008)	kurzfristig	10%	Länderrisiko für die globale Produktion (2008)	kurzfristig	10%
Änderung der Importe Deutschlands (2004-2008)	kurzfristig	10%	Länderkonzentration der globalen Reserven (2008)	mittel- bis langfristig	10%
<b>Strategische Relevanz</b>			<b>Marktrisiko</b>		
Sensitivität der Wertschöpfungskette in Deutschland	mittel- bis langfristig	25%	Unternehmenskonzentration der globalen Produktion (2008)	kurzfristig	25%
Globaler Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien (2030)	mittel- bis langfristig	20%	Verhältnis von globalen Reserven zu globaler Produktion (2008)	mittel- bis langfristig	25%
Substituierbarkeit	mittel- bis langfristig	10%	<b>Strukturrisiko</b>		
			Anteil der globalen Haupt- und Nebenproduktion (2008)	mittel- bis langfristig	10%
			Recyclingfähigkeit (2008)	mittel- bis langfristig	10%

Abb. 4 Ergebnisse und Methodik der Studie "kritische Rohstoffe für Deutschland" 2011 [11]



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 meisten Indikatoren wurden rein quantitativ auf Basis von Produktionsdaten und Außenhandelsstatistiken erhoben. Auch einige qualitativen Faktoren, wie die Bewertung der Sensitivität der Wertschöpfungskette in Deutschland fließen in die Bewertung mit ein.

Die Kritikalitätsmatrix wurde in 6 Bereiche unterteilt, wobei die Bereiche V und VI als kritisch einzustufen sind (vergl. Abb. 4).

## 2.4 Bayern: Rohstoffsituation Bayern 2009

Die Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft hat 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 [3]. Durchgeführt wurde die Studie von der IW Consult GmbH unter Mitwirkung von Professor Reller, Universität Augsburg.

In der Studie wurden 37 Rohstoffe mithilfe eines Rohstoff-Risiko-Index bewertet, der sich aus qualitativen und quantitativen Kriterien zusammensetzt (vergl. Abb. 5). Entscheidend für die Gesamtbewertung ist die Summe der Bewertungen über die einzelnen Kriterien. Die für die bayerische Industrie als besonders problematisch identifizierten Rohstoffe sind in Abb. 5 dargestellt.

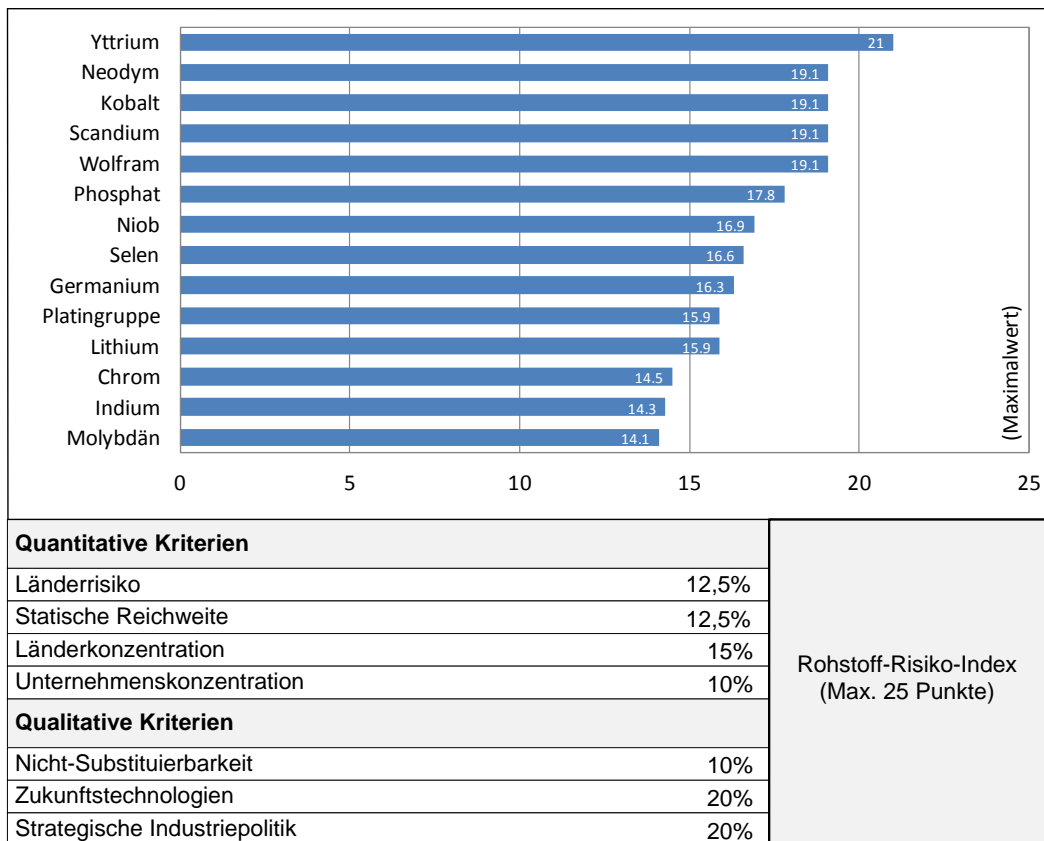


Abb. 5 Ergebnisse und Methodik der Studie "Rohstoffsituation Bayern 2009" [10]

## 2.5 Vergleich bisheriger Studien durch einheitliche Skalierung der Ergebnisse

Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt unterscheiden sich die bisherigen Studien bezüglich der Screening-Ergebnisse zu kritischen Rohstoffen erheblich, was nicht nur auf die regionalen Unterschiede, sondern auch auf die stark unterschiedlichen Methoden zurückzuführen ist. Da in den betrachteten Studien die Reihenfolge und Skalierung der Achsen in den Kritikalitätsdiagrammen (vgl. Abb. 2-4) sowie die Grenzen, die die kritischen Rohstoffe von den nicht kritischen unterscheiden, nicht einheitlich sind, wurden die Ergebnisse zur besseren Vergleichbarkeit und zur Hervorhebung der Unterschiede in eine einheitliche Matrix übertragen. Hierzu wurde die Kritikalität in direkter Anlehnung an die Risikodefinition (vergl. Abb. 1) als Produkt aus der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes und dessen Versorgungsrisiko definiert. Wie in Abb. 6 gezeigt, ergibt sich so eine Kritikalitätsfunktion, deren Höhenlinien in der Kritikalitätsmatrix jedem Punkt ein eindeutiges Kritikalitätsniveau zuordnen. Dies ermöglicht eine eindeutigere Quantifizierung der Kritikalität als die pauschal angesetzte Begrenzung in bisherigen Studien.

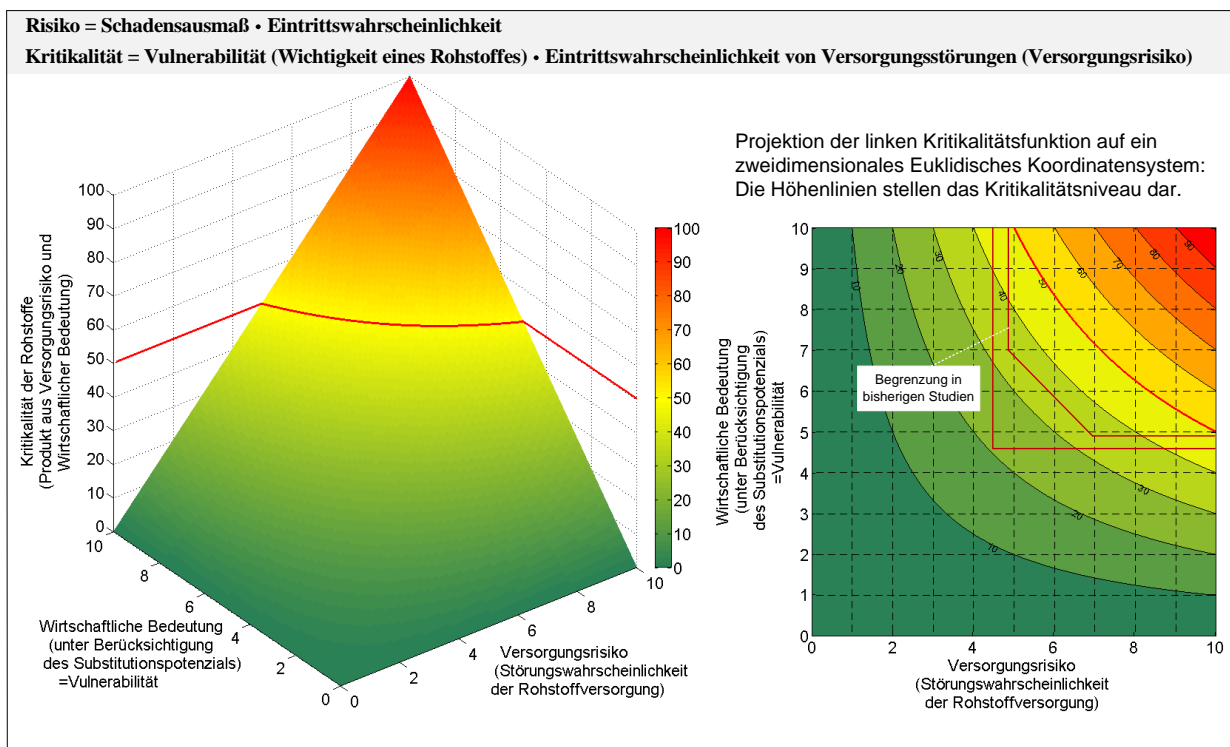


Abb. 6 Kritikalitätsfunktion im Sinne der Risikodefinition und die Kritikalitätsmatrix mit Höhenlinien

Die Ergebnisse der Übertragung der einzelnen Studien in eine einheitliche Kritikalitätsmatrix sind in Abb. 7 gezeigt. Die jeweiligen Koordinaten in den ursprünglichen Matrizen (2-4) wurden hierzu auf die Bereiche 0-10 skaliert. Über die Höhenlinien wird das Kritikalitätsniveau jedes Rohstoffes eindeutig quantifiziert, was sich in einem Histogramm ähnlich zu Abb. 5 darstellen lässt. Interessant ist, dass trotz der unterschiedlichen Methoden und regionalen Bezüge die

besonders kritischen Rohstoffe sehr ähnlich ausfallen. Inwiefern sich die unterschiedlichen kritischen Rohstoffe bezüglich ihrer die Kritikalitätsbewertung beeinflussenden Faktoren unterscheiden, bzw. welche Ähnlichkeiten bestehen, wird im Folgenden durch statistische Methoden analysiert.

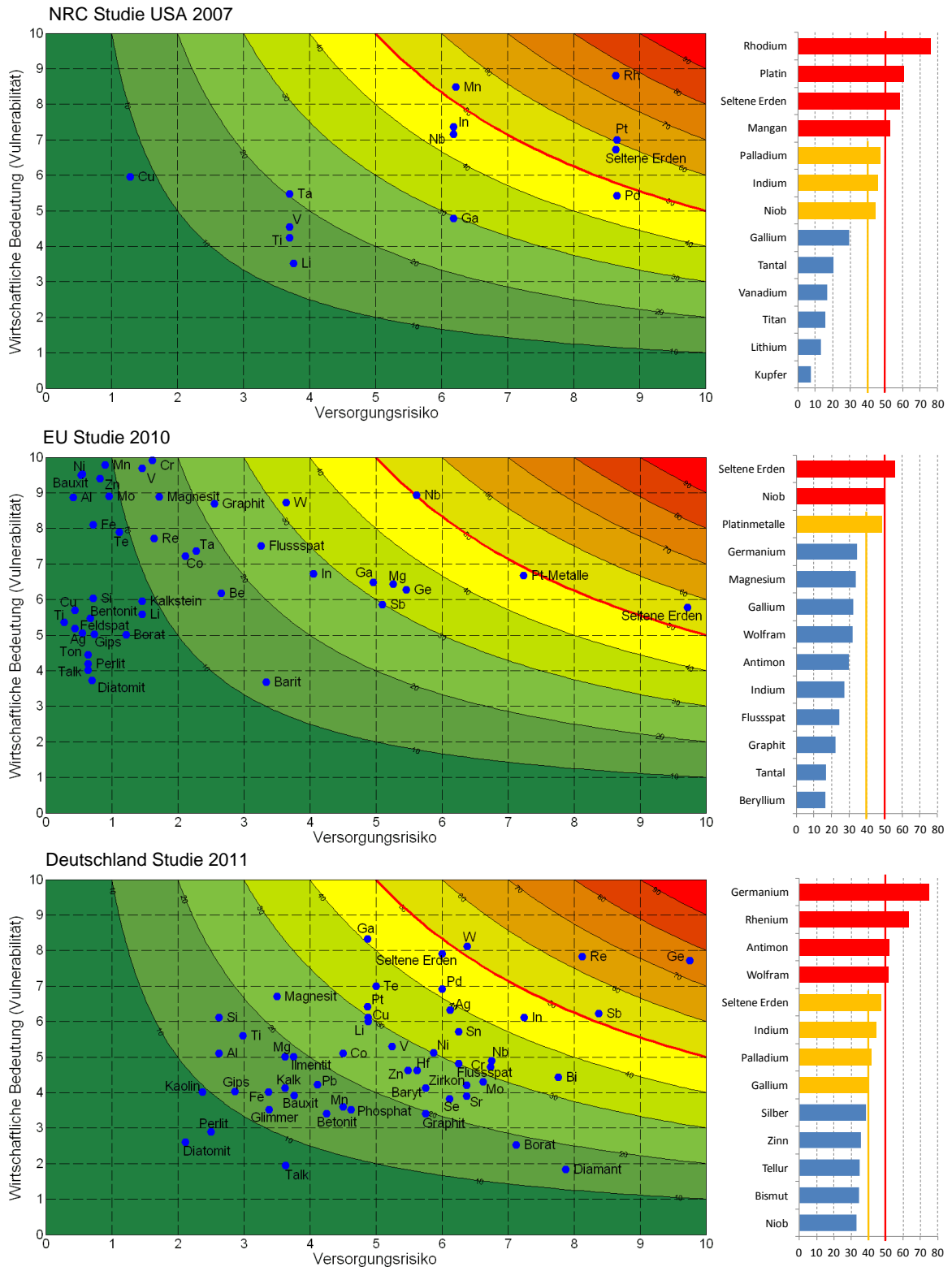


Abb. 7 Vergleich bisheriger Studien zur Kritikalität von Rohstoffen durch einheitliche Skalierung

### 3 Methoden der Multivariaten Statistik zur Analyse kritischer Rohstoffe

Um einen Vergleich von Gemeinsamkeiten und Unterschiede, bzw. strukturellen Zusammenhängen der für die Kritikalitätsbewertung relevanten Eigenschaften zu bekommen, wurden verschiedene Methoden der Multivariaten Statistik auf die Rohstoffeigenschaften angewendet. Diese Methoden sollen keineswegs die Quantifizierung der Kritikalität in der Kritikalitätsmatrix ersetzen, sondern zusätzliche Erkenntnisse über Gemeinsamkeiten, Zusammenhänge und Unterschiede zwischen den Rohstoffen aufzeigen. Die hier vorgestellten Verfahren sind folglich als Ergänzung zur Kategorisierung und zum Clustern der Rohstoffe zu verstehen. Neben den als kritisch eingestuften Rohstoffen aus den zuvor vorgestellten Studien wurden in die Betrachtung weitere „klassischen“ Industriemetalle wie Kupfer, Aluminium, Nickel und Blei aufgenommen, um eine gewisse Referenz zu kritischen Rohstoffen zu bekommen. In die statistischen Analysen sind eindeutig quantifizierbare Eigenschaften, die in bisherigen Studien als für die Kritikalitätsbetrachtung relevant identifiziert wurden, eingeflossen (vergl. [7]). Die betrachteten Eigenschaften und die jeweilige Ausprägung bezüglich einzelner Rohstoffe sind in Abb. 8 dargestellt. Tabelle 2 liefert zusätzliche Informationen sowie Quellen bzw. die zu Grunde liegende Datenbasis.

*Tabelle 2: Erläuterung zu den Rohstoffeigenschaften zur statistischen Auswertung aus Abb. 8*

<b>Eigenschaft</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>Quellen / Datenbasis</b>
<b>A1.: Durchschnittspreis</b>	Jährlicher Durchschnitt der letzten 5 Jahre	Metal Bulletin, USGS, Asian Metal Pages
<b>A2.: Preisvolatilität</b>	Berechnet als Standardabweichung der jährlichen Durchschnittspreise der letzten 5 Jahre	Metal Bulletin, USGS, Asian Metal Pages
<b>A3.: Börsengehandelt?</b>	Bezieht sich auf die London Metal Exchange (LME)	LME, Metal Bulletin
<b>A4.: Minenproduktion</b>	Globale Primärproduktion der Rohstoffe	USGS, BGR
<b>A5.: Länderkonzentration</b>	Herfindahl Hirschmann Index der Länderproduktion	USGS, BGR
<b>A6.: Produktionswachstum</b>	Relatives Wachstum der vergangenen 10 Jahre	USGS, BGR
<b>A7.: Neben-/ Hauptprodukt</b>	1, wenn hauptsächlich eigene Infrastruktur	Ullmanns Enzyklop.
<b>A8.: Häufigkeit</b>	Häufigkeit in der kontinentalen Erdkruste in ppmw	CRC Handbook of Chemistry and Physics
<b>A9.: Reserven</b>	Schätzwert der Reserven in Jahren	USGS
<b>A10.: EoL Recycling Rate</b>	Schätzwert der EoL RR	UNEP
<b>A11.: Welthandel</b>	Summe aller Handelsströme von Rohstoff <sub>i</sub>	UN Comtrade
<b>A12.: Handelskonzentration</b>	HHI der globalen Exporte von Rohstoff <sub>i</sub>	UN Comtrade
<b>A13.: Technologien</b>	Anzahl der techn. Anwendungen, die die ersten 50% der Nachfrage ausmachen	EU Report, USGS [4]
<b>A14.: Korrelation</b>	Korrelationskoeffizient der Nachfrage mit der Weltwirtschaft nach Bravais/Pearson	World Bank
<b>A15.: Zukunftstechnologien</b>	Index basierend auf der Studie ‚Rohstoffe für Zukunftstechnologien‘, 0 wenn kein Wert in der Studie	Angerer et al. [12]
<b>A16.: Substitution</b>	Index der EU Studie für die ‚Nichtsubstituierbarkeit‘ 1, wenn nicht substituierbar	EU Report [4]

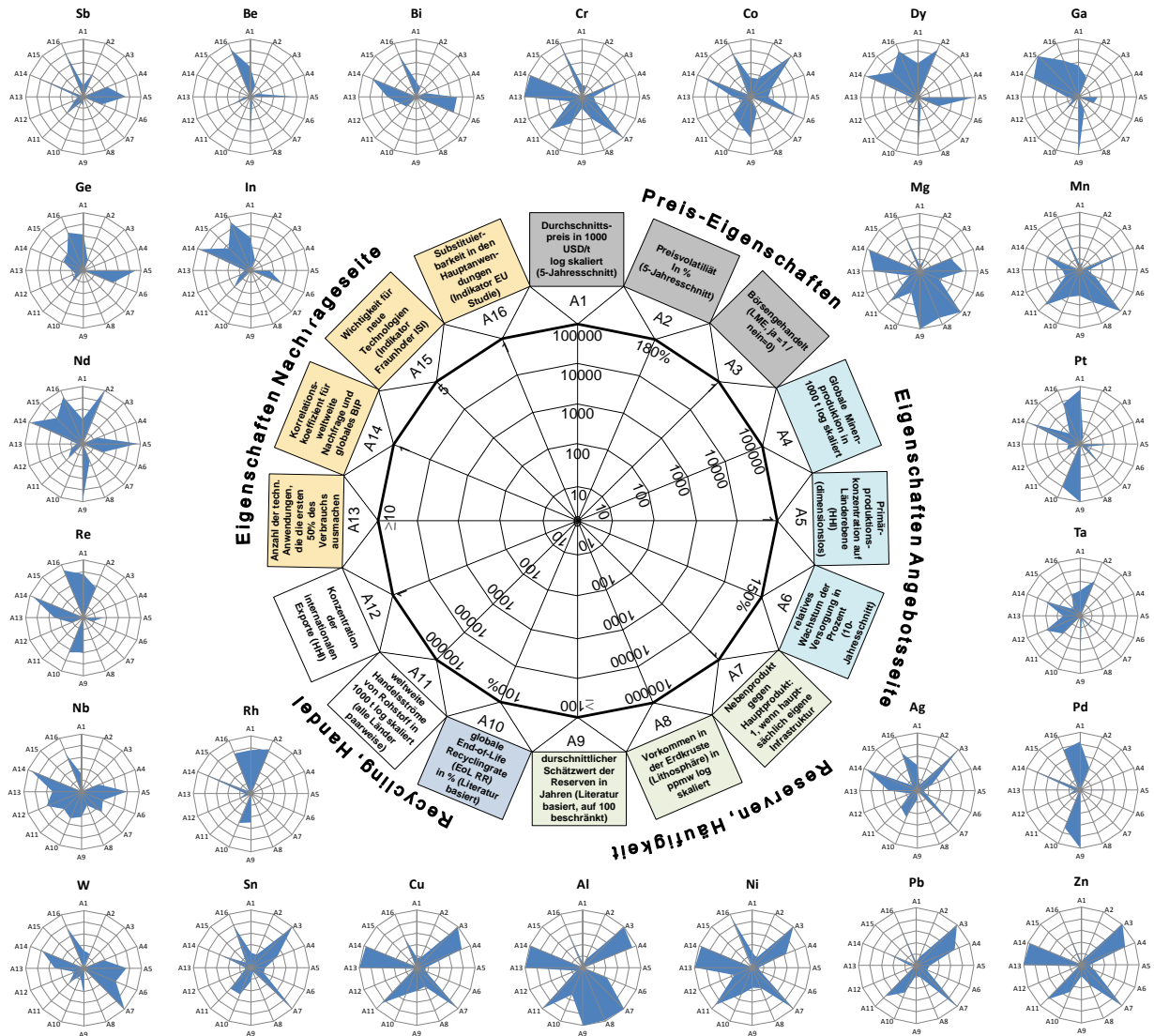


Abb. 8 Netzdiagramm mit Ausprägungen der einzelnen Rohstoffmerkmale

Egal ob in tabellarischer Form, oder in Netzdiagrammen wie in Abb. 8, auf Grund der Menge der Werte ist es schwer eine strukturelle Übersicht zu erlangen. Daher sind Verfahren zur Dimensionsreduzierung für die Aufbereitung und Analyse der Daten an dieser Stelle sinnvoll.

Der Fokus dieses Beitrags liegt in der Präsentation der Ergebnisse der verschiedenen statistischen Analyseansätze. Daher werden nachfolgend die angewendeten Algorithmen nur relativ kurz beschrieben und an entsprechender Stelle auf die jeweilige Fachliteratur verwiesen.

### 3.1 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 Merkmale) räumlich so anzuordnen, dass diejenigen Variablen mit hoher Ähnlichkeit möglichst nah beieinander liegen, während die

Variablen die sich unähnlich sind möglichst weit auseinander liegen. So lassen sich komplexe, unübersichtliche Datensätze optisch vereinfacht darstellen. Entscheidend ist bei der Skalierung folglich die Nähe der einzelnen Variablen zueinander, nicht deren Koordinaten (vergl. [23]).

Dabei wird die ursprüngliche Datentabelle mit den jeweiligen Merkmalsausprägungen über eine geeignete Distanzmetrik in eine Distanzmatrix überführt (vergl. Abb. 9). Diese Distanzmatrix wird dann über einen iterativen Optimierungsprozess auf die Ebene projiziert, wobei die in der Matrix angegebenen Distanzen möglichst genau durch die Distanzen in der Eben wiedergegeben werden.

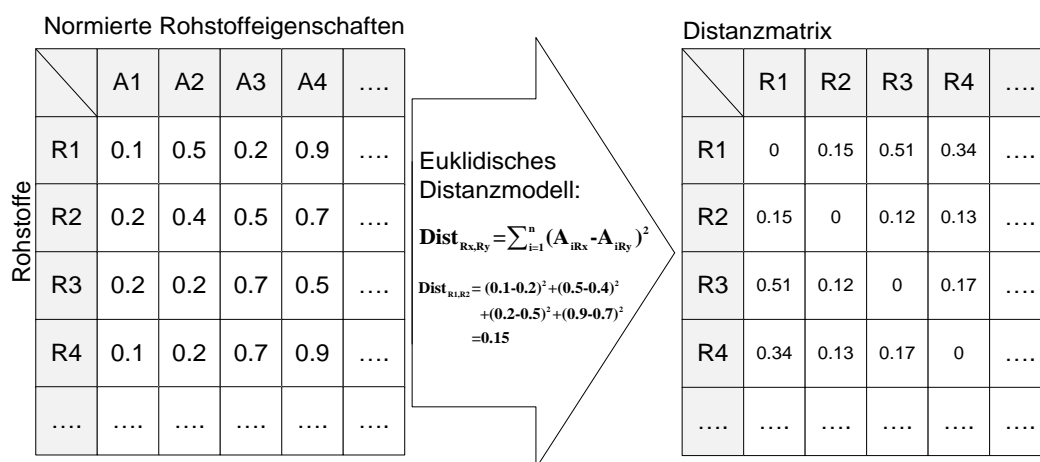


Abb. 9 Überführung der Datentabelle in eine Distanzmatrix über die Euklidische Distanzmetrik

Genau genommen ist die Multidimensionale Skalierung ein Überbegriff für ein ganzes Bündel von statistischen Verfahren zur Ähnlichkeitsstrukturanalyse, die sich bezüglich der Wahl des Distanzmodells (wie wird die Distanzmatrix berechnet) und der Darstellungsform unterscheiden [24].

Für die hier durchgeführten Analysen wurde die frei verfügbare Statistiksoftware R unter Verwendung eines Euklidischen Distanzmodells herangezogen.

Das Ergebnis der MDS bezüglich der in Abb. 8 dargestellten Daten ist in Abb. 10 wiedergegeben. Zu erkennen ist eine klare Abgrenzung der „Technologie-Metalle“, 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. Mangan, Chrom, Wolfram, Magnesium). Die in Abb. 8 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.

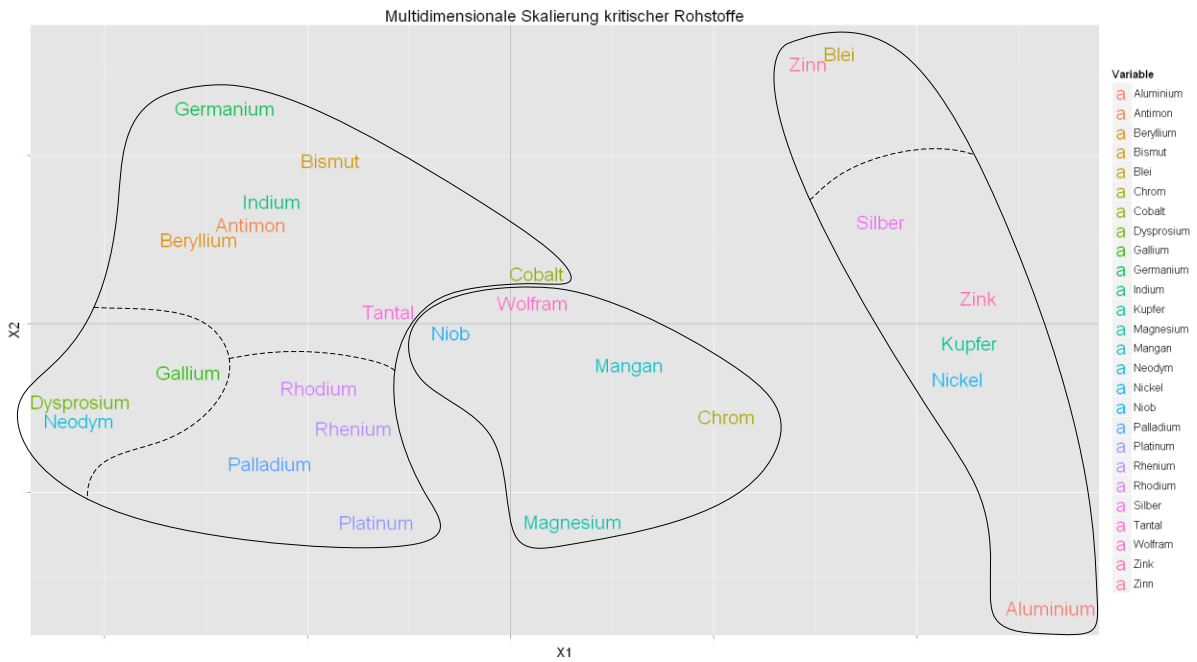


Abb. 10 Ergebnisse der Multidimensionalen Skalierung bezüglich der Merkmale in Abb. 8

### 3.2 Hierarchische Clusteranalyse

Die Hierarchische Clusteranalyse ist ähnlich zur MDS ein auf Distanzmatrizen basierendes Verfahren der Multivariaten Statistik. Es handelt sich ebenfalls um einen iterativen 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 [23]. Dadurch wird systematisch ein Dendrogramm (Ähnlichkeits-Baumstruktur) aufgebaut, wie in Abb. 11 dargestellt. Durch die Festlegung der Zahl der Cluster wird das Dendrogramm so unterteilt, dass die internen Elemente jedes Clusters möglichst homogen sind (siehe rote Kästchen in Abb. 11). Die Ergebnisse der hierarchischen Clusteranalyse sind direkt vergleichbar mit der Multidimensionalen Skalierung (vergl. Kreise in Abb. 10). Interessant ist dabei auch der Vergleich zwischen der Einteilung in 3 und der Einteilung in 6 verschiedene Cluster. Während die Gruppe der Legierungsmetalle in beiden Betrachtungen gleich bleibt, werden bei den Hightech-Metallen die Platingruppe zusammen mit Rhenium und die Seltenerdelemente (Neodym & Dysprosium) zusammen mit Gallium separat gruppiert. Kobalt wird am Rand der Hightech-Metalle angeordnet, obwohl eine unmittelbare Nähe zu den Legierungsmetallen besteht (vergl. MDS in Abb. 10).

Die einzelnen Verfahren der Hierarchischen Clusteranalyse unterscheiden sich bezüglich des gewählten Distanzmaßes und bezüglich des Fusionierungsalgorithmus, der den Zusammenschluss zu einzelnen Clustern regelt [23]. Für die hier durchgeführten Analysen

wurde ebenfalls die Statistiksoftware R unter Verwendung eines Euklidischen Distanzmodells herangezogen.

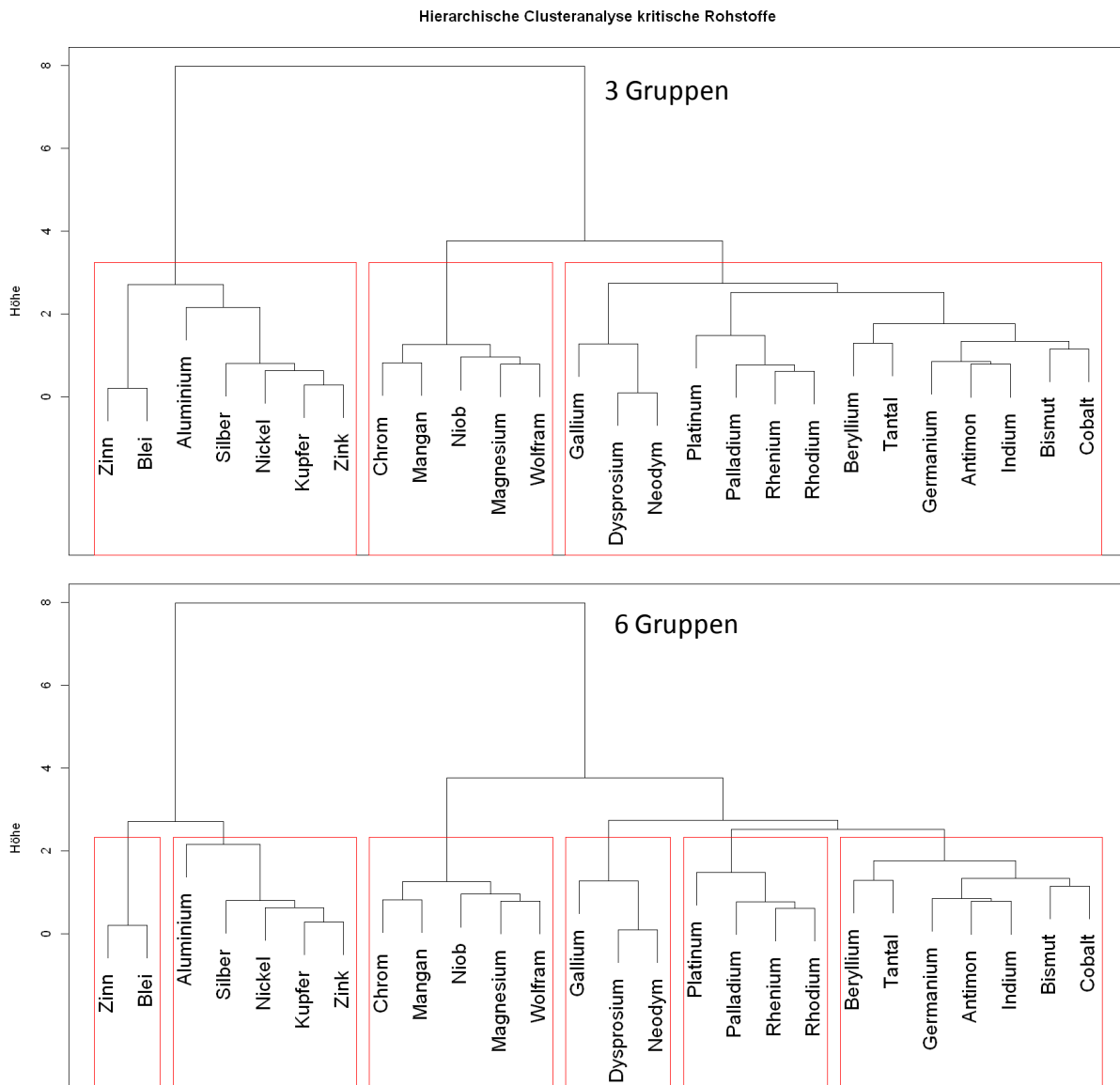


Abb. 11 Ergebnisse der hierarchischen, agglomerativen Clusteranalyse in einem Dendrogramm

### 3.3 Multiple Korrespondenzanalyse

Im Gegensatz zu den Verfahren der Clusteranalyse und der Multidimensionalen Skalierung bietet die Multiple Korrespondenzanalyse die Möglichkeit, qualitative Aspekte in die Untersuchung einfließen zu lassen. Dabei geht es nicht mehr um Ähnlichkeiten einzelner Objekte, sondern um die Frage, welche Merkmalsausprägungen häufig gemeinsam vorkommen. Im Falle der hier untersuchten Rohstoffe wurde jedem Rohstoff bezüglich der jeweiligen Eigenschaft in Abb. 8 das Attribut „hoch“, „mittel“ oder „niedrig“ zugeordnet, wobei die Skala im Netzdiagramm (Abb. 8) 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. Wie in Abb. 12 gezeigt, werden für die MCA (Multiple Correspondance Analysis) die einzelnen Merkmalsausprägungen in einer speziellen Kontingenztabelle, der sogenannten „Burtmatrix“ zusammengestellt. 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. [25]).

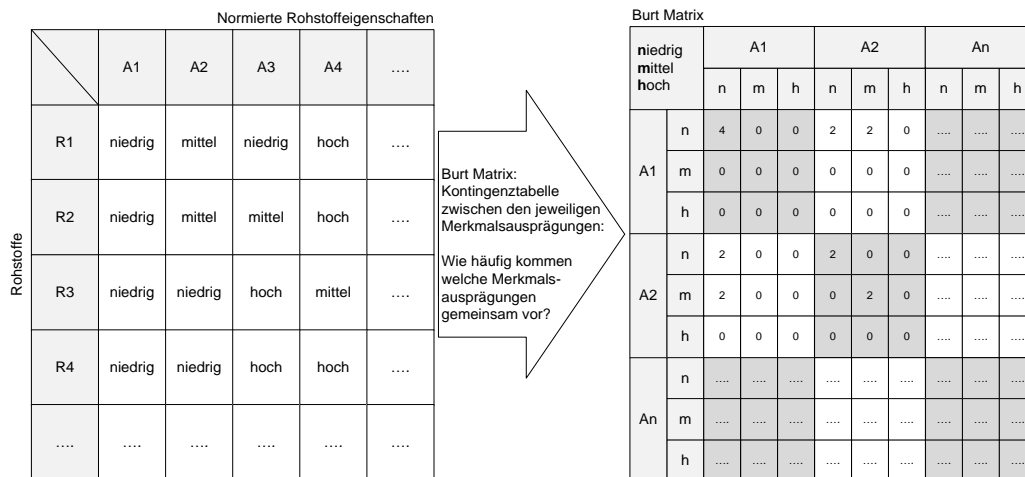


Abb. 12 Vorgehensweise zur Durchführung einer Multiplen Korrespondenzanalyse (MCA)

Auf diese Weise lassen sich Zusammenhänge aus relativ komplexen 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. Abb. 13). Natürlich ist zu überprüfen, inwiefern die aus den hier betrachteten Rohstoffen gewonnen Erkenntnisse allgemeine Gültigkeit haben, dennoch lassen sich in Abb. 13 sehr interessante Strukturen erkennen. Offensichtlich besteht ein sehr enger Zusammenhang zwischen der Produktionskonzentration und der Preisvolatilität (rot unterstrichen). Dabei ist zu beachten, dass die hier betrachtete Volatilität als die Standardabweichung vom Jahresdurchschnittspreis über die vergangenen 10 Jahre berechnet wurde (siehe Tabelle 2), also keine kurzfristigen Schwankungen, sondern extreme Schwankungen über die Jahre hinweg abbildet. Weiterhin lässt sich in Abb. 13 ein klarer Zusammenhang zwischen dem Produktionsniveau und der Frage, ob der Rohstoff an der Börse (hier nur LME<sup>2</sup> betrachtet) gehandelt wird erkennen. Auch haben die börsengehandelten Rohstoffe mit hohem Produktionsniveau tendenziell ein niedrigeres Preisniveau, was im Vergleich klassischer Industriemetalle mit Hightech-Metallen natürlich zu erwarten war.

<sup>2</sup> Die London Metal Exchange ist die größte Rohstoffbörse Europas und einer der zentralen globalen Handelspunkte

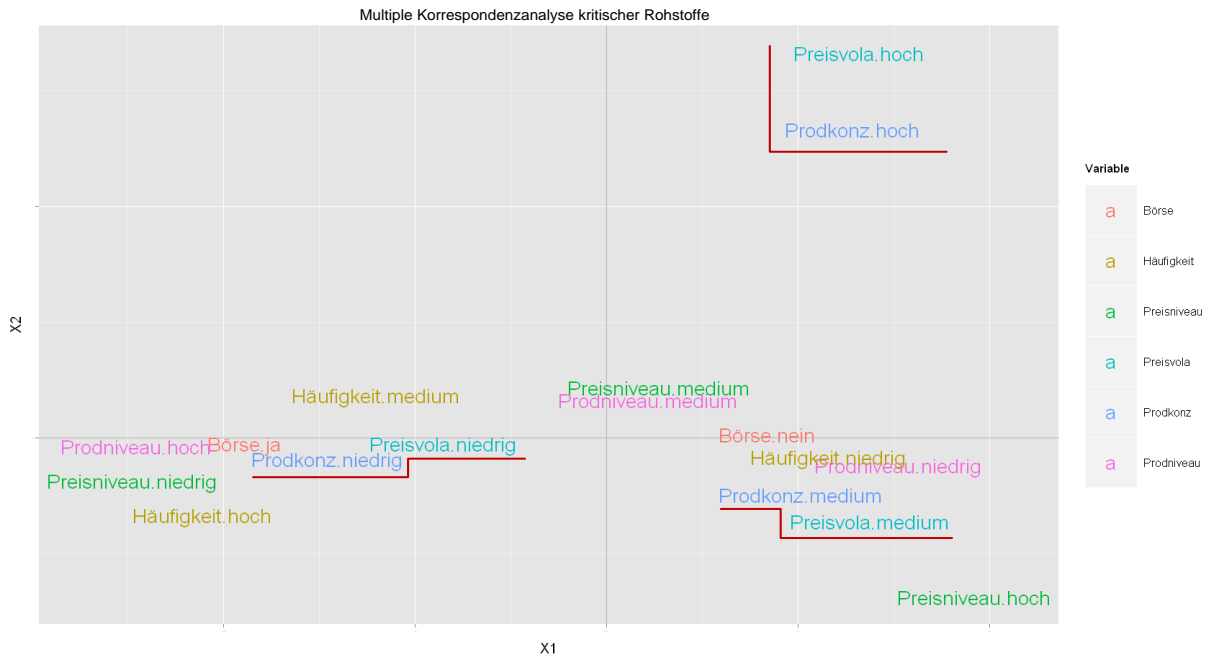


Abb. 13 Ergebnis der Multiplen Korrespondenzanalyse

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 Abb. 14 eine Multidimensionale Skalierung bezüglich der jährlichen Preisänderungsraten (Jahresdurchschnittspreise) zwischen 2001 und 2011 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.

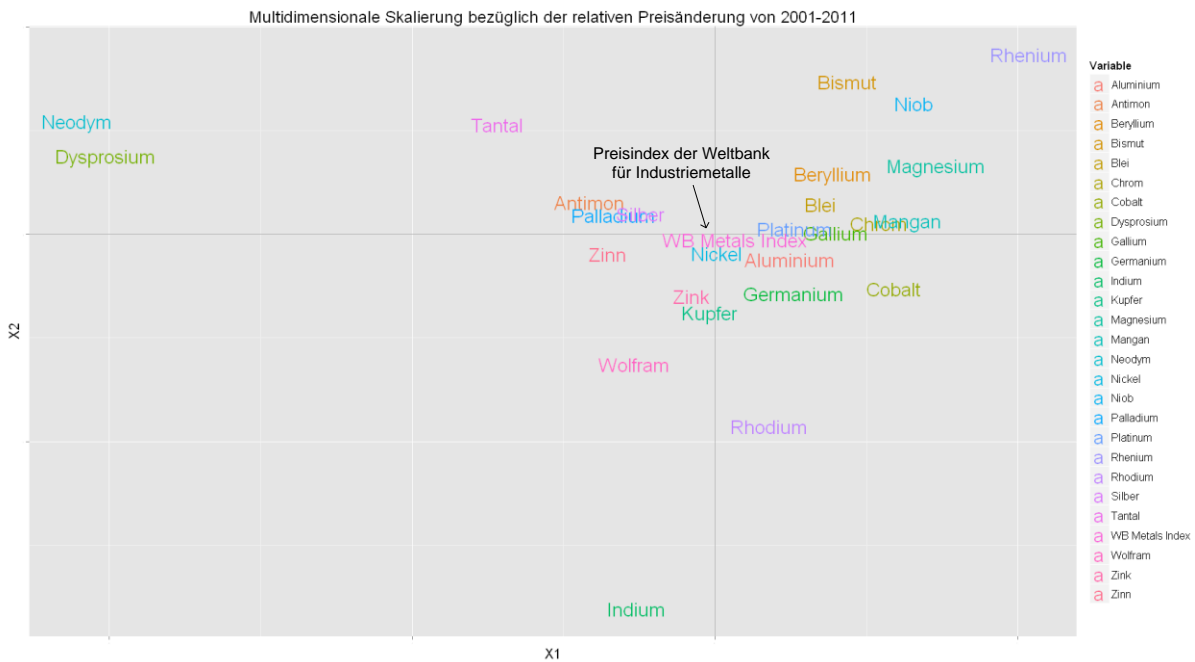


Abb. 14 Anwendung der Multidimensionalen Skalierung auf die Preisänderungsraten

## 4 Weiterentwicklung der Methoden zur Quantifizierung der Rohstoffkritikalität

Neben der Diskussion um eine sinnvolle Zusammenstellung und Aggregation von Indikatoren zur Quantifizierung der wirtschaftlichen Bedeutung bzw. des Versorgungsrisikos, zeigen aktuelle Forschungsarbeiten im Bereich der Rohstoffkritikalität sowohl eine Tendenz zur Einbeziehung zusätzlicher Dimensionen in die Kritikalitätsanalyse [6], [26] als auch Modellansätze zur Dynamisierung der Kritikalitätsbetrachtung [27], [28], [29]. Diese Tendenzen werden im Folgenden erläutert und diskutiert.

### 4.1 Mehrdimensionale Betrachtung

Bereits in der ersten Studie zu kritischen Rohstoffen der EU [4] wurde neben der eigentlichen Kritikalitätsmatrix (Abb. 3) als zusätzlicher Wert das Umweltrisiko, welches der Abbau und die Aufbereitung der jeweiligen Rohstoffe verursachen, ergänzend quantifiziert (vergl. Abb. 15).

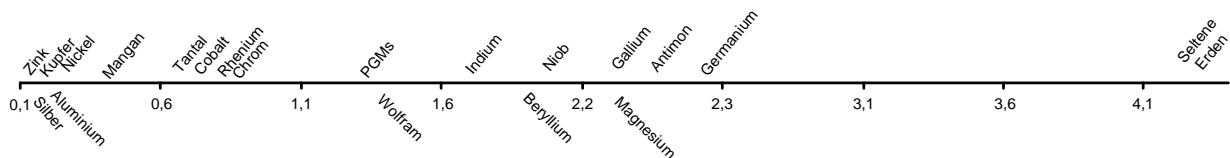


Abb. 15 Ergebnisse zur Quantifizierung des Umweltrisikos ausgewählter Rohstoffe aus der EU Studie

Graedel et al. [26], [6] erweiterten die ursprüngliche Matrix um die dritte Dimension des Umweltrisikos und definierten die Kritikalität als Länge des durch die Rohstoffpunkte aufgespannten Vektors (vergl. Abb. 16). Problematisch hierbei erscheinen allerdings zwei Punkte: Erstens ist dies eine Entfernung von der ursprünglichen Idee der Quantifizierung der Kritikalität in Anlehnung an die Risikodefinition, da durch die Vektorlänge ein additiver und kein multiplikativer Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen gegeben wird. Ein Rohstoff kann folglich auch nur auf Grund der starken Ausprägung einer Koordinate, also z.B. eines hohen Versorgungsrisikos ohne gleichzeitig hohe wirtschaftliche Bedeutung, als kritisch eingestuft werden. Zweitens sind die Dimension des Umweltrisikos und des Versorgungsrisikos nicht unabhängig voneinander. Eine hohe Umweltbelastung bei der Rohstoffgewinnung- und Aufbereitung kann, wie derzeit das Beispiel der Selten-Erden-Aufbereitung in Malaysia durch Lynas Corp. zeigt<sup>3</sup>, durchaus zu strengeren gesetzlichen Umweltauflagen und damit zu Einschränkungen der Versorgung führen.

<sup>3</sup> Wegen mangelnden Aufbereitungskonzepten der radioaktiven Stäube bei der Raffination von Seltenen Erden gibt es derzeit Reibungen zwischen der Lynas Corp. und malaysischen Behörden und Bürgerverbänden. vergl. [http://www.oeko.de/press/press\\_releases/dok/1484.php](http://www.oeko.de/press/press_releases/dok/1484.php)

Daher erscheint es sinnvoll, neben der Kritikalität als Zusammenspiel aus wirtschaftlicher Bedeutung und Versorgungsrisiko noch weitere Größen separat zu betrachten, die unter Umständen Einflüsse auf die Rohstoffversorgung haben könnten, die aber auch sonst auf volkswirtschaftlicher ebenso wie auf unternehmerischer Ebene relevant erscheinen. Wie in Abb. 17 gezeigt wäre eine separate Betrachtung des Preisrisikos, das in gewisser Weise mit dem Versorgungsrisiko einhergeht, aber zusätzlich die Gefahr stärkerer Preisschwankungen auf Basis historischer Volatilitäten und das Potenzial von Verknappung auf Grund rasch steigender Nachfrage berücksichtigt, sinnvoll. Im Versorgungsrisiko, das häufig in erster Linie Eigenschaften der Angebotsseite (Länderkonzentrationen, Unternehmenskonzentrationen) betrachtet, kommen Nachfrageentwicklungen und den Preis beeinflussende Markteigenschaften nicht ausreichend zur Geltung. Weiterhin erscheint aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit die Betrachtung des Umweltrisikos über die wirtschaftliche Bedeutung sinnvoll. So könnte die Diskrepanz zwischen wirtschaftlichen Interessen und Umweltschonung bei der Rohstoffgewinnung klarer aufgezeigt werden. Ähnliches gilt in Hinblick auf die soziale Nachhaltigkeit für eine Art „sozialethisches Risiko“, durch das die Problematik von Konfliktrohstoffen und Arbeitsbedingungen im Kleinbergbau quantifiziert wird (vgl. Abb. 17).

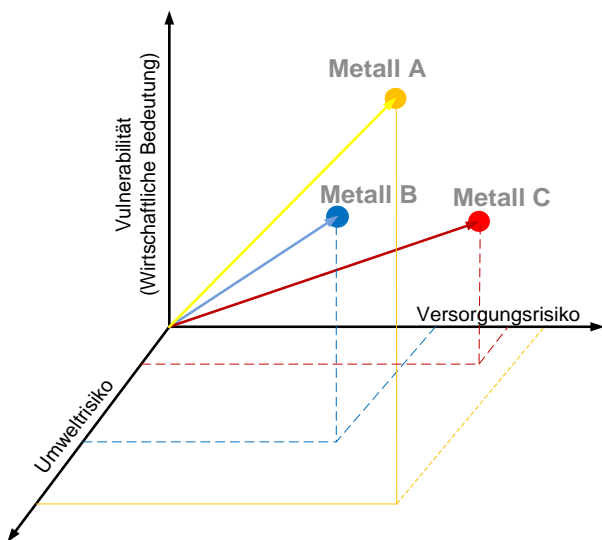


Abb. 16 Ergänzung der Umweltdimension und Berechnung der Kritikalität über die Vektorlänge [6]

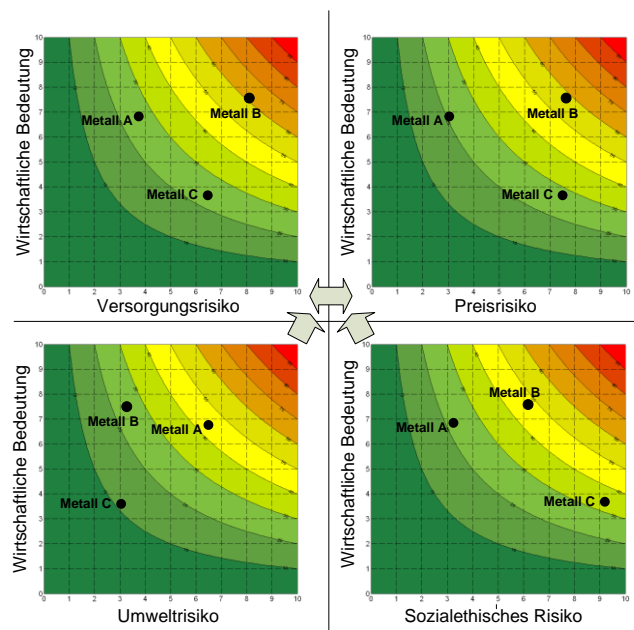


Abb. 17 Separate Betrachtung verschiedener Risiken über die Wirtschaftliche Bedeutung

#### 4.2 Dynamische Betrachtung – Rohstoffrisiken über die Zeit

Neben der Weiterentwicklung der Methodik zur Quantifizierung der Kritikalität verschiedener Rohstoffe steht die Notwendigkeit der Berücksichtigung zeitlicher Dynamik in den Analysen.

Wie Abb. 18-19 zeigen, besteht sowohl auf der Angebots- als auch auf der Nachfrageseite eine nicht vernachlässigbare Dynamik. Dabei bildet Abb. 18 die Konzentration der Abbauländer über die letzten 50 Jahre ab. Eine verstärkte Dynamik bei den Technologierohstoffen, die verhältnismäßig geringe Produktionsmengen aufweisen, ist klar ersichtlich.

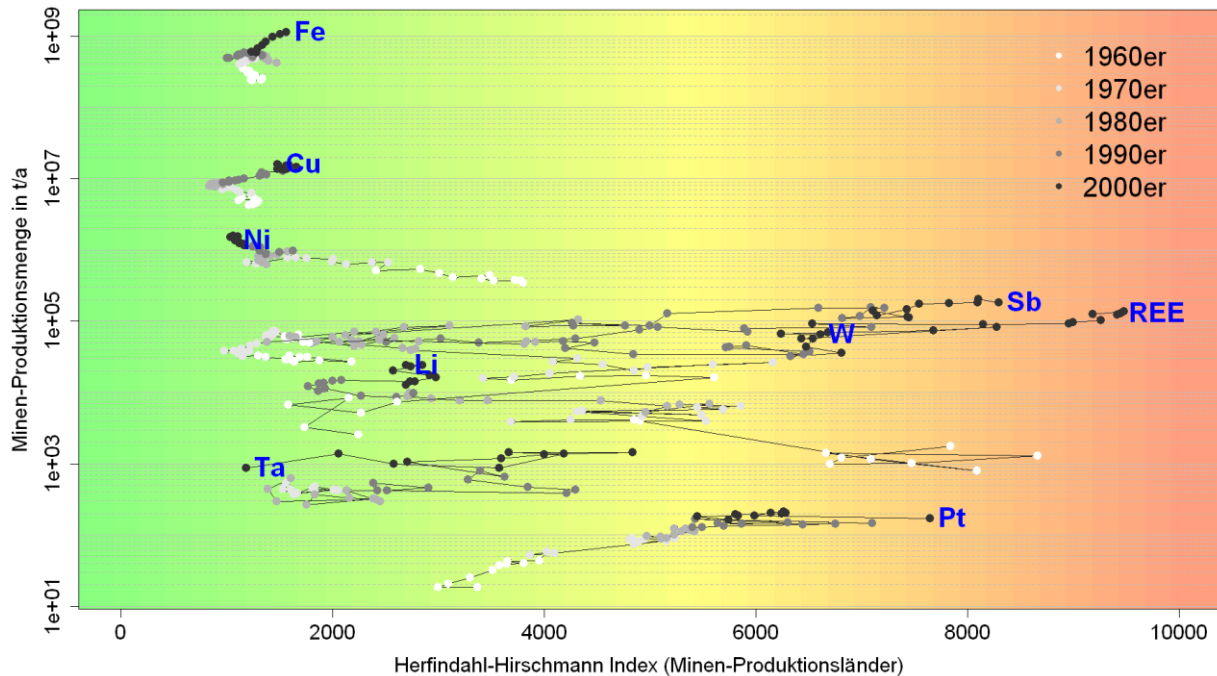


Abb. 18 Konzentration der Produktion über die vergangenen 50 Jahre, HHI skaliert von 0-10000 [3], [30]

Insbesondere bei diesen Rohstoffen muss in Zukunft von einem verstärkten Bedarf für bestimmte Technologien ausgegangen werden [12], [31]. Die Kombination des aktuellen Bedarfs der jeweiligen Rohstoffe in bestimmten Technologien und des prognostizierten Bedarfs 2030 mit dem Versorgungsrisiko aus der EU Studie (vergl. Abb. 3) ist in Abb. 19 dargestellt.

Zwar werden in bisherigen Kritikalitätsstudien teilweise entsprechende Indikatoren für mittel- bis langfristige Entwicklungen in die heutige Kritikalitätsanalyse einbezogen (vergl. Abb. 4, [6]), 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. Auch erscheint es nicht unproblematisch, die heutige Versorgungssituation mit unterschiedlichen Indikatoren zu bewerten als die mögliche zukünftige Versorgungssituation, da dabei offensichtlich unterschiedliche Aspekte verglichen werden und durch die einheitliche Darstellung in einer Kritikalitätsmatrix lediglich eine Übereinstimmung suggeriert wird. Um Aussagen über die zukünftige Entwicklung der Kritikalität eines Rohstoffes treffen zu können sollten folglich die zeitlichen Verläufe aller zu Grunde gelegten Indikatoren berücksichtigt werden.

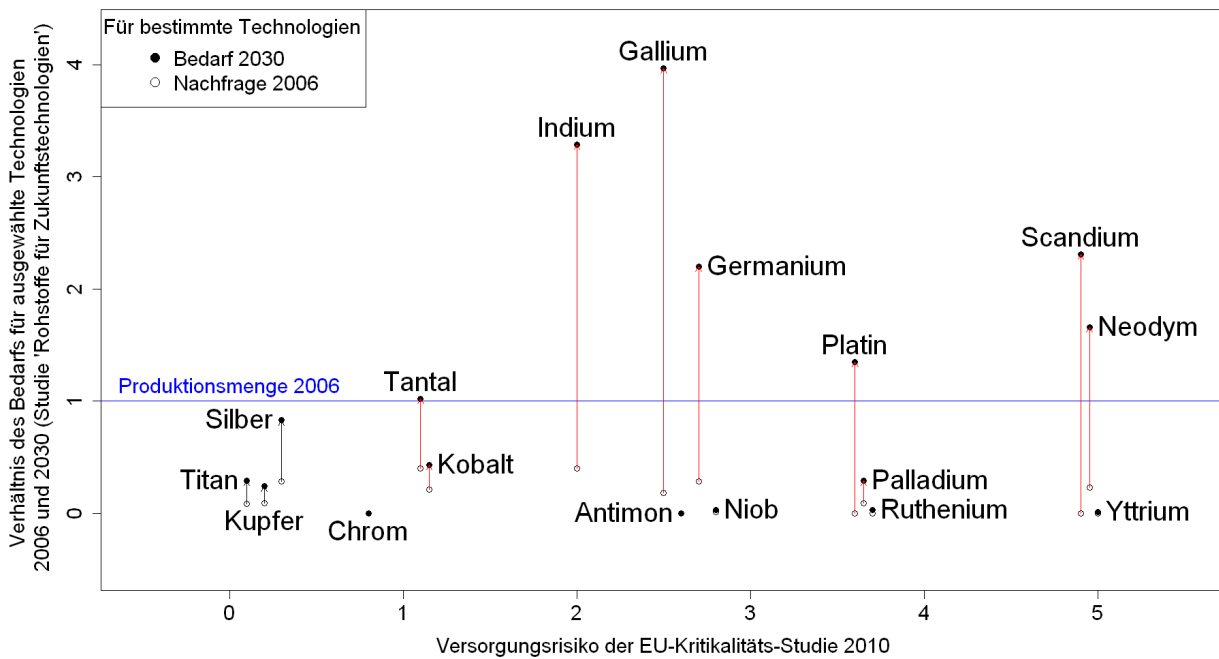


Abb. 19 Aktueller und zukünftiger Bedarf bestimmter Rohstoffe in ausgewählten Technologien [30]

Für die dynamische Betrachtung der Kritikalität scheint demnach zunächst eine Analyse der Entwicklung historischer Werte interessant, wobei die Indikatoren zu jedem Zeitpunkt nach dem Prinzip der statischen Analyse berechnet werden. Weiterhin gibt es erste Ansätze zur dynamischen Modellierung der Kritikalität [27], [28]. Beide Konzepte zur Dynamisierung der Kritikalitätsbetrachtung werden im Folgenden kurz dargestellt und diskutiert.

#### 4.2.1 Indikatorbasierte dynamische Analyse über historische Zeitreihen

Die größte Herausforderung bei der Betrachtung von Kritikalitätsverläufen über die Zeit ist die Erhebung der notwendigen Daten, die bereits bei statischen Analysen recht umfangreich ausfallen (vergl. Abb. 4). Ein verhältnismäßig einfacher Ansatz ist die Fokussierung auf die Mengenrelevanz von Rohstoffen unter Verwendung historischer Zeitreihen.

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 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. Weiterhin scheint ein Indikator sinnvoll, der den Anteil eines bestimmten Rohstoffes am Gesamtrohstoffimport eines Landes ins Verhältnis setzt mit dem Welthandel dieses Rohstoffes am Welthandel aller betrachteten Rohstoffe (vergl. Definitionen Abb. 20). Durch die Analyse von Handelsdaten nach dem zuvor beschriebenen Prinzip wurden, wie in Abb. 20 dargestellt, zwei Indikatoren berechnet, über die bereits relative Aussagen über die Wichtigkeit eines Rohstoffes für Deutschland und Japan getroffen werden

können. In den Handelsdaten wurden für jeden Rohstoff basierend auf der UN Comtrade Datenbank<sup>4</sup> die Güterklassifikationen (HS Codes) für Erze, chemische Zwischenprodukte (Oxide, Chloride, Carbonate etc.), sowie reine Metalle berücksichtigt. 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 es nur ca. 5% der Weltwirtschaft ausmacht, für ca. 20% aller Importe von Wolfram verantwortlich ist. D.h., Deutschland verbraucht 4 Mal mehr Wolfram, als man es auf Grund der Wirtschaftsleistung erwarten würde, folglich 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 PGM stark an Wichtigkeit gewonnen haben, was wohl in erster Linie auf die Verwendung in Autokatalysatoren zurückzuführen ist. Wolfram für Hochleistungslegierungen ist als Werkstoff in vielen Bereichen des Maschinenbaus wichtig.

Auf Basis der in Abb. 20 dargestellten Indikatoren wurden erste Werte für eine Kritikalitätsanalyse über die Zeitachse ermittelt. Dabei setzt sich die relative wirtschaftliche Bedeutung jeweils zur Hälfte aus den Indikatoren 1 und 2 in Abb. 20 zusammen, während das Versorgungsrisiko jeweils zur Hälfte aus der Produktionskonzentration auf Länderebene und der Konzentration der Importe berechnet wurde (jeweils über den HHI, vergl. Abb. 20). Alle Werte wurden auf die Skala von 1 bis 10 skaliert. Die Ergebnisse dieses recht einfachen, exemplarischen Ansatzes sind in Abb. 21 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 höhere Bedeutung haben können. Hier stößt die Analyse von Handelsdaten an ihre Grenzen, da eine stoffspezifische Nachverfolgung auf Grund des Aggregationsniveaus der Güterklassifikation (HS<sup>5</sup>, bzw. CN<sup>6</sup> Codes) nicht möglich ist.

---

<sup>4</sup> Größte weltweite Handelsdatenbank der Vereinten Nationen: <http://comtrade.un.org/>

<sup>5</sup> HS: Harmonized System – 6stellige Güterklassifikation zur Einteilung und Erfassung von Handelsdaten

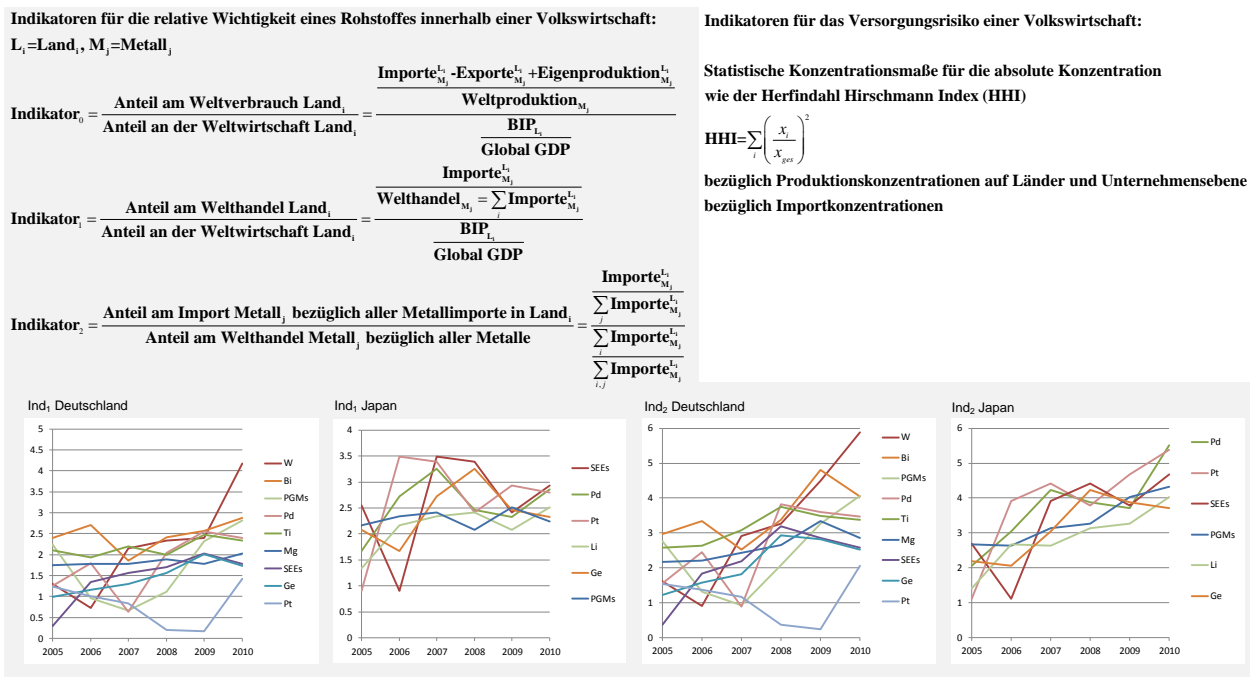


Abb. 20 Indikatoren zur Bewertung der relativen wirtschaftlichen Bedeutung über die Zeit am Beispiel von Deutschland und Japan

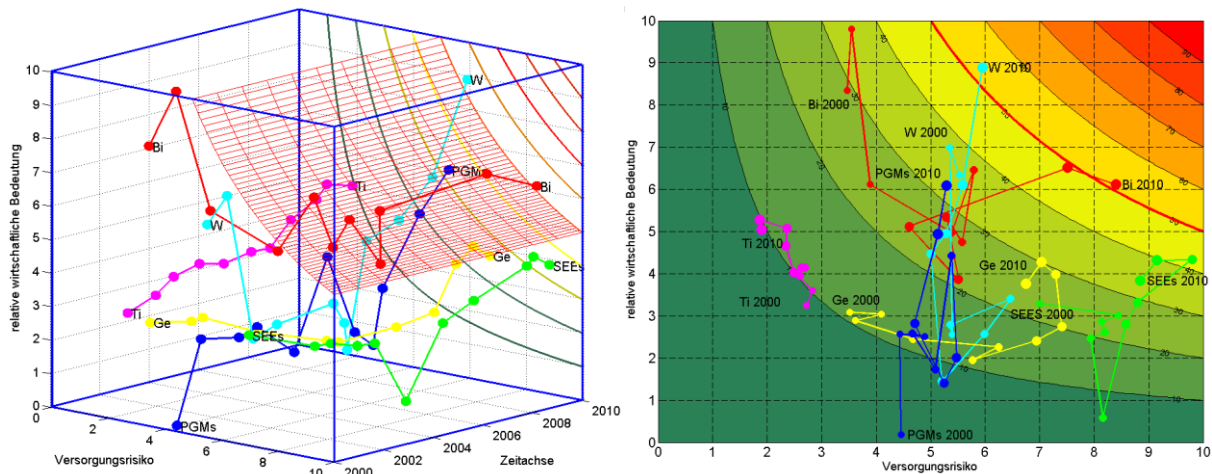


Abb. 21 Einfacher, indikatorbasierter Ansatz zur Erhebung der Kritikalität über den Zeitverlauf

Insgesamt eignen sich die hier vorgestellten Analysen konkreter Indikatoren über die Zeit als Screening-Methode zur groben Analyse mehrerer Rohstoffe und zum Vergleich der Versorgungssituation und des Rohstoffbedarfs verschiedener Länder und Regionen. Für Entscheidungsträger aus Politik und Industrie, deren Ziele die Ergreifung von Maßnahmen zur Reduzierung der Rohstoffkritikalität sind, bieten diese Screening-Methoden allerdings nicht ausreichend Informationen. Rohstoffspezifische Ansätze, die sowohl die globale als auch die inländische Wertschöpfungsstruktur abbilden sind hierzu notwendig.

<sup>6</sup> CN: Combined Nomenclature – ergänzt 2 weitere Stellen an die HS codes und dient den lokalen Zollbehörden zur weiteren Unterteilung und Spezifizierung der HS Codes



4.2.2 Modellbasierte dynamische Ansätze zur Kritikalitätsanalyse

Während die zuvor diskutierten Ansätze als Screening-Methoden zur Analyse einer größeren Zahl verschiedener metallischer und mineralischer Rohstoffe ausgelegt sind, gibt es inzwischen erste Ansätze zur dynamischen Modellierung der Kritikalität ganz konkret ausgewählter Rohstoffe. Dabei werden sowohl System-Dynamics [28], [29] als auch Agentenbasierte Modellierungsansätze [27] untersucht. Der Fokus dieser Modelle liegt allerdings in erster Linie auf der Schaffung höherer Transparenz bezüglich der globalen und nationalen Wertschöpfung verschiedener Technologiemetalle sowie in der Analyse deren Marktdynamik. Dennoch kann basierend auf derartigen Modellen die Entwicklung der Versorgungssituation verschiedener Rohstoffe im Zeitverlauf abgeleitet werden. Diese Ergebnisse sind grundlegend für Aussagen bezüglich der positiven wie negativen Änderung der Versorgungssituation strategischer Rohstoffe bzw. für die Bewertung bisheriger Maßnahmen zur Reduzierung des Rohstoffrisikos. Weiterhin wäre es möglich, bestehende Wechselwirkungen und Interdependenzen zwischen einzelnen Faktoren zu identifizieren und zu analysieren. Abb. 22 zeigt den Ansatz zur Verbindung von globalen und regionalisierten Stoffstrommodellen mit systemdynamischen Marktmodellen als Grundlage für die Extraktion der Versorgungssituation über den Zeitverlauf.

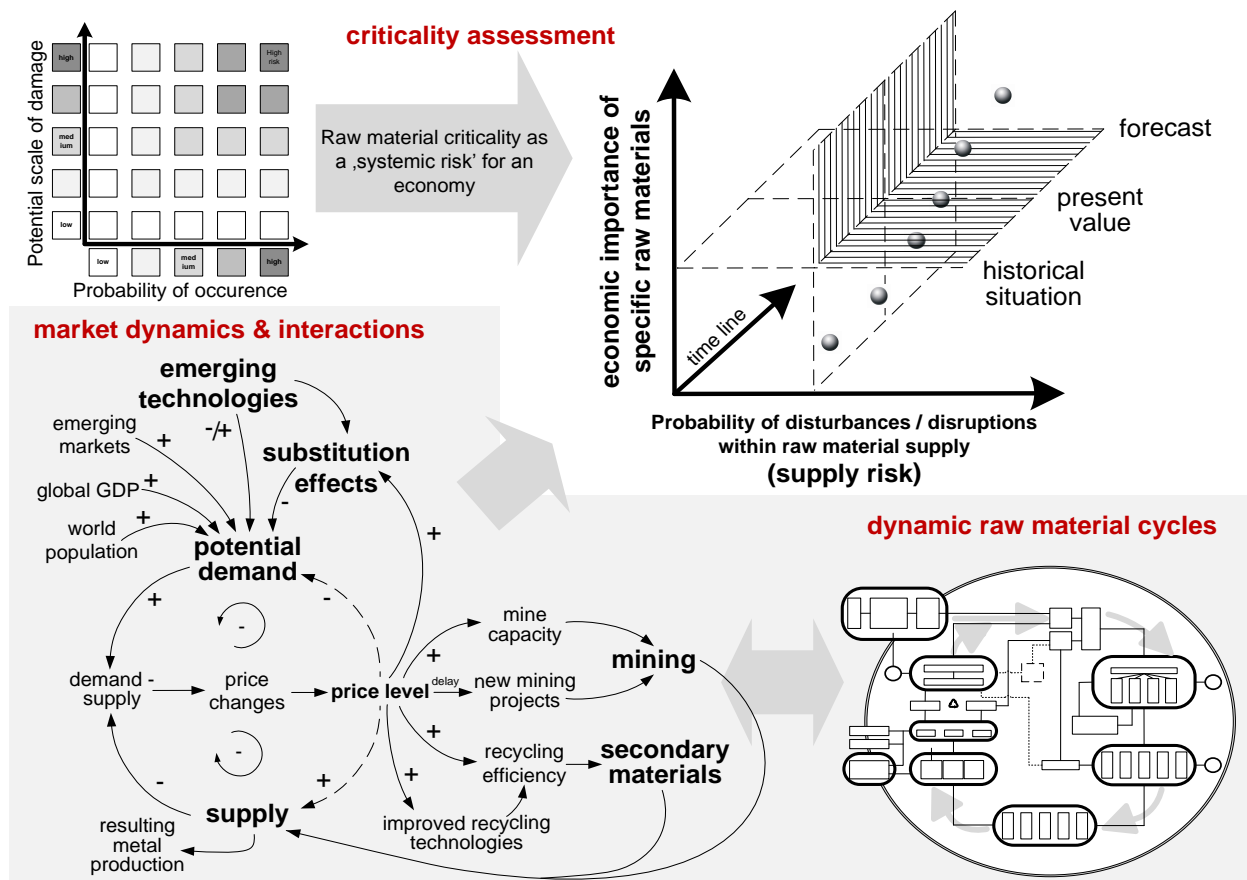


Abb. 22 Ansatz zur Kombination globaler und regionaler dynamischer Stoffstrommodelle mit systemdynamischen Marktmodellen als Grundlage zur Bewertung der Versorgungssituation bestimmter Rohstoffe über den Zeitverlauf [28], [29]

## 5 Literatur

- [1] *National Research Council: Minerals, Critical Minerals, And The U.S. Economy*; 2007.
- [2] *Haglund D.: Strategic minerals: A conceptual analysis. Resources Policy*; 1984.
- [3] *Gandenberger C., Glöser S., Marscheider-Weidemann F., Ostertag K., Walz R.:*  
Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien -  
Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie; 2012.
- [4] *Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials: Critical raw materials for the  
EU: European Commission*; 2010.
- [5] *Wellmer F.:* Was sind wirtschaftsstrategische Rohstoffe? In: Schriftenreihe der  
Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften; 2012, Heft 80, p. 120.
- [6] *Nassar NT., Barr R., Browning M., Diao Z., Friedlander E., Harper EM.:* Methodology  
of Metal Criticality Determination. Criticality of the Geological Copper Family. *Environ. Sci.  
Technol.* 2012.
- [7] *Achzet B., Helbig C.:* How to evaluate raw material supply risks—an overview.  
*Resources Policy* 2013.
- [8] *Melcher F., Wilken H.:* Die Verfügbarkeit von Hochtechnologie-Rohstoffen. *Chemie in  
unserer Zeit* 2013.
- [9] *Erdmann L., Graedel TE.:* Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major  
Approaches and Analyses. *Environ. Sci. Technol.* 2011.
- [10] *Bossardt B. et al.:* Rohstoffsituation Bayern - keine Zukunft ohne Rohstoffe: Strategien  
und Handlungsoptionen. München, 2011.
- [11] *Erdmann L., Behrendt S., Feil M.:* Kritische Rohstoffe für Deutschland: Identifikation  
aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren  
Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte, 2011.
- [12] *Angerer G., Erdmann L., Marscheider-Weideman F., Scharp M., Lüllmann A., Handke V.  
et al.:* Rohstoffe für Zukunftstechnologien: Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in  
rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, 2009.
- [13] *Bardt H.:* Sichere Energie- und Rohstoffversorgung: Herausforderung für Politik und  
Wirtschaft; Institut der deutschen Wirtschaft, 2008.
- [14] *Graedel TE., Barr R., Chandler C., Chase T., Choi J., Christoffersen L. et al. :* Criticality  
of the Geological Copper Family. Methodology of Metal Criticality Determination. *Environ. Sci.  
Technol.* 2012.

- [15] *Buchert M., Schüler D., Bleher D., Neurohr N., Hagelüken L.*: Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential: Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies 2009.
- [16] *Sievers H., Buchholz P., Huy D.*: Evaluating supply risks for mineral raw materials; 2010.
- [17] *Rosenau-Tornow D., Buchholz P., Riemann A., Wagner M.*: Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends. Resources Policy 2009.
- [18] *U. S. Department of Energy*: Critical Materials Strategy; 2010.
- [19] *Frondele, Auel, Grösche, Huchtemann, Oberheitmann, Peters et al.*: Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen; 2006.
- [20] *Faulstich M., Pfeifer S., Franke M., Mocker M.*: Ressourcenstrategie für Hessen unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen; 2011.
- [21] *Duclos SJ., Otto JP., Konitzer DG.*: Design in an Era of Constrained Resources. Mechanical Engineering 2008.
- [22] *Kesler SE.*: Mineral Supply and Demand into the 21st Century.
- [23] *Backhaus K, Erichson B, Plinke W, Weiber R.* Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung. 13th ed. Berlin [u.a.]: Springer; 2011.
- [24] *Borg I, Groenen PJF.*: Modern multidimensional scaling: Theory and applications. New York: Springer; op.2005.
- [25] *Blasius J., Greenacre MJ.*: 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.
- [26] *Graedel TE., Nassar NT.*: The criticality of metals: a perspective for geologists. Geological Society, London, Special Publications 2013.
- [27] *Knoeri C., Wäger PA., Stamp A., Althaus H., Weil M.*: Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand — With material flow supply modelling approaches. Science of The Total Environment 2013.
- [28] *Glöser S., Faulstich M.*: Quantitative Analysis of the Criticality of Mineral and Metallic Raw Materials Based on a System Dynamics Approach. Proceedings of the 30th International Conference of the System Dynamics Society, St. Gallen, Switzerland 2012.
- [29] *Glöser S., Soulier M., Tercero Espinoza L., Faulstich M.*: 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, USA 2013.

[30] *Buijs B., Sievers H., Tercero Espinoza L.:* Limits to the critical raw materials approach. Proceedings of the ICE - Waste and Resource Management 2012;165(4):201–8.

[31] *Teipel U., Angerer G.:* Zukunftstechnologien und Weltwirtschaft treiben die Märkte für Hightech-Metalle. Chemie Ingenieur Technik 2010.