

# Bachelorarbeit

## Kritikalitätsbewertung von Rohstoffen und der Einfluss von Recycling

Martin Morawetz

[martin.morawetz@docmanna.net](mailto:martin.morawetz@docmanna.net)

Matr.Nr. 9625648

Datum: 26.05.2016

### Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich zum einen mit Definition und Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen, die einen wesentlichen Bestandteil der europäischen Rohstoff-Strategien darstellt und zum anderen mit dem Einfluss von Recycling. Aus den unterschiedlichen Motivationen ergeben sich verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Kritikalität, die erläutert werden. Hervorgehoben wird hierbei eine Studie der Europäischen Kommission aus dem Jahre 2014. Es wird herausgearbeitet in welcher Form Recycling derzeit berücksichtigt wird. Abschließend wird ein möglicher Beitrag der Statistischen Entropie Analyse (SEA) zur Bewertung der Kritikalität von Metallen diskutiert.

## 1 Einleitung

Rohstoffe und besonders Metalle sind essentiell für die industrielle Produktion. Aufgrund ihrer begrenzten Lagerstättenvorkommen, der geographischen Verteilung dieser Lagerstätten, stark steigender Nachfrage durch neue Technologien und weiterer Faktoren werden derzeit weltweit Strategien entworfen um die Rohstoffversorgung auch in Zukunft zu gewährleisten. Ein zentraler Aspekt ist dabei die Entwicklung von Methoden zur Abschätzung der **Kritikalität** von mineralischen Rohstoffen. So hat bspw. die EU eine Liste von 20 kritischen Rohstoffen erstellt, für die Strategien erarbeitet werden, um die zukünftige Versorgung der europäischen Industrie mit diesen Rohstoffen sichern zu können.

Kritikalität ist ein stark subjektiver Begriff. Bergbauunternehmen, Produzenten, Regierungen, Umweltorganisationen stellen unterschiedliche Ansprüche an diesen Begriff. Aus diesen unterschiedlichen Sichtweisen folgen unterschiedliche Methoden der Ermittlung der Kritikalität.

Ein wesentlicher Aspekt der Bewertung der „Gesamtkritikalität“ stellt das **Recycling** dar. Ganz Allgemein verringert ein hohes Maß an Recycling die

Kritikalität eines Stoffes, da so der Rohstoff-Bedarf zur Aufrechterhaltung des Stoffsystems verringert wird.

Die Nutzung von Rohstoffen in der Volkswirtschaft erfolgt dabei sehr unterschiedlich. So wird bspw. Kupfer in Österreich derart eingesetzt, dass es zu einem sehr hohen Anteil wieder rezykliert werden kann. Für andere Metalle liegt die Recyclingquote dagegen sehr tief, da sie eher dissipativ, d.h., in sehr geringen Konzentrationen eingesetzt werden, was das Recycling sehr aufwendig macht. Für eine Quantifizierung sind taugliche Indikatoren notwendig. Aus mehreren Gründen würde sich hier die „**Statistische Entropie Analyse**“ (SEA) anbieten.

## 2 Kritikalität

### 2.1 Worum handelt es sich?

In der Kritikalität eines Rohstoffes im hier beschriebenen Sinn spiegelt sich dessen Bedeutung unter Berücksichtigung der Implikationen bei Beschaffung und Nutzung wider. Wesentliche Eigenheiten der Größe sind ihre Dynamik, ihre Relativität und ihre Subjektivität:

Als **dynamische Größe** ist sie zeitlichen Änderungen unterworfen. Handelsbeziehungen, Umweltauflagen, politische Änderungen, technologische Entwicklungen und Änderungen der Nachfrage können die Kritikalität in kurzer Zeit stark beeinflussen. Nicht zuletzt deshalb wird die Kritikalitätsanalyse der europäischen Kommission alle drei Jahre aktualisiert [1],[2].

Die Kritikalität eines Rohstoffes liegt im Auge des Betrachters. Analysen haben daher eine entsprechende Abgrenzung des Umfanges wie beispielsweise auf eine wirtschaftliche Region oder ein Land (EU Report), einen Fokus auf bestimmte Technologien, auf Unternehmen, oder eher eine generellere, oft langfristige Sicht [2]S13. Unterschiedliche Fragestellungen erfordern mitunter unterschiedliche Herangehensweisen bei der Bestimmung der Kritikalität (s. 2.4). Es existiert kein absoluter Maßstab, die Kritikalität ist daher eine **relative Größe**.

Dynamik, Umfang und Relativität machen die Kritikalität zu einer recht **subjektiven Größe**, was zur Folge hat, dass sich die Vergleichbarkeit mitunter schwierig gestaltet. Selbst nach der gleichen Methodologie erstellte Analysen können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (im Wissen dessen haben [Graedel et al. (2012)] in ihrem Framework explizit die Möglichkeit gezielter Änderungen durch den User erlaubt. Einzelne Indikatoren können getauscht, gelöscht oder in ihrer Gewichtung verändert werden). Nichts desto trotz sind aber, auch wenn die Bestimmung der Kritikalität immer mit Subjektivität verbunden ist, die Ergebnisse **aufgrund der Rahmenbedingungen, der Methode, des Scopes** im Normalfall zu rechtfertigen. Desweiteren können, ungeachtet der Subjektivität, einige allgemeine Gemeinsamkeiten festgehalten werden ([10] - eine Verallgemeinerung auf mineralische Rohstoffe sollte zulässig sein):

- Das Risiko für Begleitmetalle ist höher als das des eigentlichen Metalls
- auf wenige Quellen konzentrierte Metalle sind riskanter als solche die über viele Quellen bezogen werden können
- komplexes oder aufwendiges Metall-Recycling hebt das Risiko
- Metalle deren Nachfrage durch aufkommende Technologien beeinflusst werden sind als riskanter einzuschätzen als solche mit voraussichtlich stabiler Nachfrage

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kritikalität letzten Endes durch die Methodologie festgelegt wird und in diesem Rahmen auch vergleichbar ist.

## 2.2 Motivation

Die Beweggründe für die Erstellung von Kritikalitätsanalysen sind in den allermeisten Fällen protektionistischer Natur. Es geht um das rechtzeitige Erkennen von möglichen Problemen bei der Rohstoff-Versorgung, und um in Folge eine zeitnahe Reaktion zu ermöglichen. Während die Wichtigkeit von Rohstoffen wie zB. Öl oder Gas schon lange im Bewusstsein verankert ist, ist die ungestörte, nachhaltige Versorgung mit mineralischen Rohstoffe erst in den letzten Jahre in den Fokus gerückt. Gründe dafür sind u. a. eine wachsende Bevölkerung und steigender Bedarf, immer raschere Technologieänderungen, zunehmende Konkurrenzsituationen durch aufstrebende Entwicklungs- und Schwellenländer **sowie** sinkende Erzkonzentrationen.

## 2.3 Strategien und Initiativen in Europa (EU)

Mehrere Initiativen und Strategien nehmen sich in Europa dem Themenkreis der Versorgung mit Rohstoffen und den Auswirkungen an.

Natürliche Ressourcen stellen das Rückgrat jeglicher Wirtschaft dar. Die unter Punkt 2.2 erwähnten Gründe erfordern einen nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen. Um dem zu begegnen hat die europäische Kommission 2005 die „**Sustainable use of Natural Resources**“ Strategie vorgeschlagen, deren Ziel es ist den Ressourcenkonsum und die damit verbundenen Auswirkungen nicht die Aufnahmekapazitäten der Umwelt übersteigen zu lassen und des weiteren Wirtschaftswachstum von Ressourcenbedarf zu entkoppeln [5].

Die im Jahre 2010 in Leben gerufene „**Europe 2020 Strategie**“ stellt die **europäische Wachstumsstrategie** für das kommende Jahrzehnt dar. Die fünf Hauptziele (Voll-) Beschäftigung, Bildung, Innovation, Forschung und Entwicklung und Reduktion der Armut sollen ein intelligentes, nachhaltiges und integratives<sup>1</sup> Wachstum ermöglichen. Getragen wird die Strategie von 7 Flaggschiff-Initiativen wie zB. der „A resource-efficient Europe“ Initiative, deren Ziel es ist ein Rahmenwerk für Richtlinien zur Unterstützung einer ressourceneffizienten Wirtschaft zu schaffen [2],[3].

Um dem steigenden Bedarf an Mineralien und den damit verknüpften Herausforderungen zu begegnen wurde 2008 von der **europäischen Kommission** die **Raw Materials Initiative (RMI)** ins Leben gerufen. Sie stellt im wesentlichen die **Europäische Strategie** in Bezug auf Rohstoffe in einem Wachstumsumfeld dar. Die drei Säulen, die der RMI zugrunde liegen sind:

- gewährleisten eines fairen Umfelds in Hinblick auf den Ressourcen-Zugriff in Drittländern
- die Unterstützung einer nachhaltige Versorgung
- die Steigerung der Ressourcen-Effizienz und die Förderung von Recycling

Die Programme der RMI umfassen u. a. (Rohstoff bezogene) Diplomatie, Handel, Entwicklung, nachhaltige Rohstoffversorgung, Forschung und Ressourcen-Effizienz. Ein Kernpunkt der RMI ist die Bestimmung von, als kritisch für die Wirtschaft der EU eingestuften Rohstoffen. Ein **wesentliches Ergebnis** sind die von einer Experten Arbeitsgruppe durchgeführten und 2010 erstmals

---

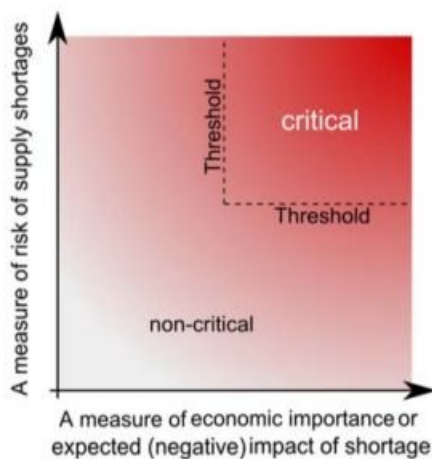
1 Integratives Wachstum bedeutet hier eine Wirtschaft mit hoher Beschäftigung und wirtschaftlichem, sozialem und territorialem Zusammenhalt.

veröffentlichten **Kritikalitätsanalysen** [1],[2] auf die in dieser Arbeit noch genauer eingegangen wird [6].

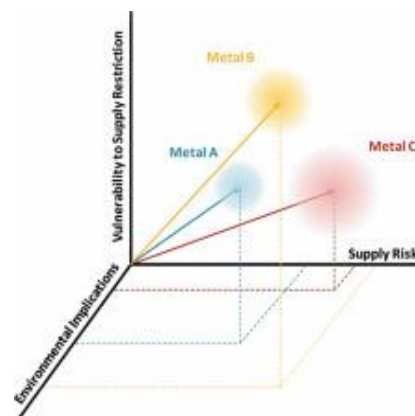
Mit dem Hauptziel alle Akteure der Interessensgruppe (Unternehmen, Forscher, Mitgliedsstaaten und NGOs) zusammen zu bringen wurde von der „**European Innovation Partnership on Raw Materials (EIP)**“ Initiative die „**Raw Materials Initiative stakeholder platform**“ aufgebaut. In Hinblick auf eine nachhaltige Rohstoffversorgung kommt dem EIP auch eine Rolle bei der Erreichung der Ziele der weiter oben erwähnten Flaggschiff-Initiative „A resource-efficient Europe“ zu [2],[6],[4].

## 2.4 Allgemeine Ansätze zur Bestimmung der Kritikalität

Im Zuge eines Reviews von Kritikalitäts-Assessments haben Erdmann und Graedel 4 Konzepte der Kritikalitätsbestimmung unterschieden: das Matrix-Konzept, das Index-Konzept, Multi Indikator Sets und die Supply/Demand-Analyse [7].



**Abb. 1:** Projektion in zwei Dimensionen [2]S20.



**Abb. 2:** Lage von Mineralien im „Kritikalitäts-Raum“ [8]

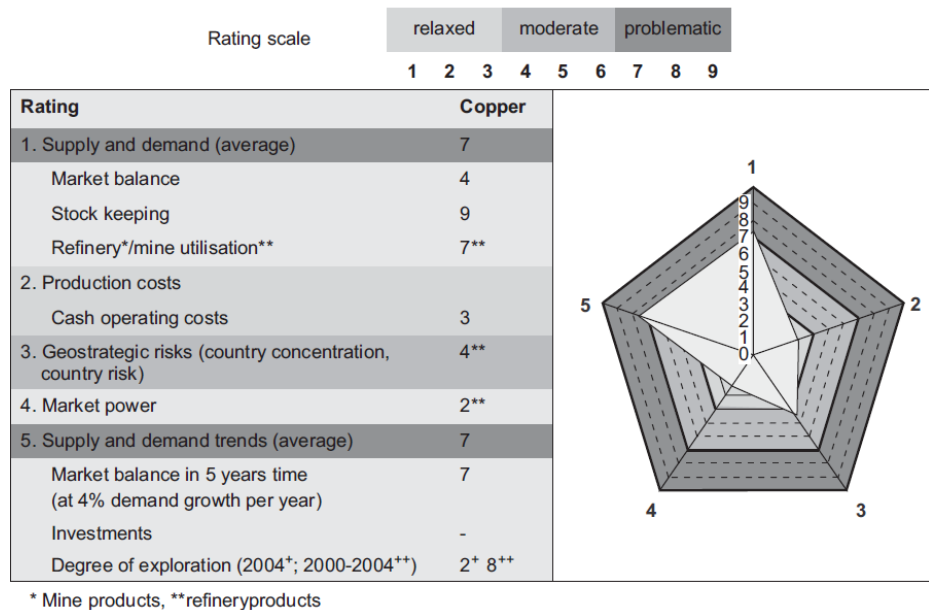
Das **Matrix Konzept** liefert als Ergebnis einen Punkt im zwei- oder dreidimensionalen „Kritikalitäts-Raum“. Jede der Raumachsen für sich bewertet dabei einen Teilaspekt der Kritikalität. Übliche Dimensionen sind das Versorgungsrisiko, Umweltauswirkungen und der Bedarf. Den Achsen wiederum liegen oft mehrere Indikatoren zugrunde. Als prominente Beispiele für die Verwendung eines Matrix-Konzeptes können [1], [2] und [8] genannt werden.

Üblicherweise beeinflussen einander die Achsen nicht (denkbar wäre, dass mit beispielsweise wachsender wirtschaftlicher Bedeutung ein geringeres Versorgungsrisiko für eine Bewertung **als** eines Rohstoffes als „kritisch“ ausreicht).

Beim **Index-Konzept** werden verschiedene Indikatoren zu einem einzelnen Gesamt-Risiko-Index zusammengefasst.

Im Gegensatz dazu werden bei Verwendung von **Multi-Indikator-Sets** verschiedene voneinander unabhängige Indikatoren für eine Gesamtbewertung der Kritikalität eingesetzt. Dabei kommt es zu keiner Aggregation dieser Indikatoren.

**ToDo:** **Supply-Demand-Analyse**, Beispiel+Aussage.



**Abb. 3:** Kritikalitätsbewertung mithilfe voneinander unabhängiger Indikatoren (Multi-Indikator-Sets) [14]

## 2.5 Die europäische Methode der Kritikalitätsbestimmung [1],[2]

### 2.5.1 Motivation

Die gesamte Industrie ist in jedem Schritt der Versorgungs-Kette von mineralischen Rohstoffen abhängig – schließlich wird **alles** aus Rohstoffen hergestellt. Schätzungen zufolge beruhen in der EU 30 Mio. Jobs direkt auf dem Zugang zu mineralischen (nicht-Energie-) Rohstoffen. Gleichzeitig werden nur 9% davon in der EU produziert, der Rest muss importiert werden (was nicht bedeutet, dass in Europa nur für 9% Rohstoffquellen vorhanden wären). Von den in weiterer Folge als kritisch eingestuften Rohstoffen kommen weniger als 3% aus der EU. **Weitere Gründe** werden in [1] genannt:

- Die Komplexität moderner Produkte wächst beständig (beispielsweise ist die Anzahl der in Platinen verbauten Materialien in den letzten drei Jahrzehnten von einer Handvoll auf über 60 angewachsen)
- Zukünftige Technologien erfordern neue/andere Rohstoffe. Die immer raschere Entwicklung von Hightech Gütern führt zu Änderungen von Nachfragemustern
- Erhaltung der Konkurrenzfähigkeit
- Anregung von innereuropäischem Abbau mineralischer Rohstoffe
- Priorisierung von Bedarf (und daraus abgeleitete Aktionen)
- Unterstützung beim Aushandeln von Handelsübereinkommen
- Anreiz Recycling zu verstärken
- Hilfestellung bei der Definition von zukunftsweisenden EU-Richtlinien.

## 2.5.2 Umfang der Analyse

**Stoffe:** Die Analyse umfasste 2010 insgesamt 41 Metalle und industriell genutzte Minerale sowie prozessierte/raffinierte Rohstoffe [1]S22. In der Aktualisierung von 2013 sind es bereits 54 Stoffe [2]. Mit der Hinzunahme von Kautschuk und Holz wurden auch erstmals biotische Rohstoffe berücksichtigt.

**Zeithorizont:** Die Kritikalitätsanalyse wird für einen Zeithorizont von 10 Jahren durchgeführt, um einerseits zeitgemäß reagieren zu können, andererseits die mit wachsenden Zeiträumen verbundene starke Zunahme der Ungenauigkeiten in Grenzen zu halten [1]S23. Aktualisierungen dieser Analyse erfolgen in kürzeren Abständen; 2013, also bereits nach 3 Jahren wurde die erste Aktualisierung durchgeführt [2].

## 2.5.3 Methodologie

Es werden die Risiken „Versorgungsrisiko“ (engl. Supply risk) und „Umwelt Länder Risiko“ (engl. Environmental country risk) betrachtet. Den dritten wesentlichen Indikator stellt die „wirtschaftliche Bedeutung“ (engl.: Economic importance) dar. Diese drei aggregierten Indikatoren werden für jeden Rohstoff berechnet.

„**Wirtschaftliche Bedeutung**“ wird als gewichtete Summe sogenannter „Megasektoren“ ermittelt. Megasektoren stellen eine Zusammenfassung gleicher Sektoren einer Wertschöpfungskette dar. Die Überlegung dahinter ist, dass sich Engpässe innerhalb einer Wertschöpfungskette unmittelbar auf die ganze Kette auswirken. Es erschien daher sinnvoll den **wirtschaftlichen Wert** einer Kette mit der wirtschaftlichen Bedeutung eines Rohstoffes, der in dieser Kette Verwendung findet, zu verknüpfen. Beispiele solcher Megasektoren sind Papier, Nahrung, Getränke, Chemikalien, Straßentransport, Metalle, ... [1]S58. Die Bruttowerte  $Q_s$  dieser Sektoren werden, mit den Anteilen  $A_{is}$  eines Rohstoffes an diesem Sektor gewichtet, **aufsummiert** und auf das Bruttoinlandsprodukt (Gross Domestic Product - GDP) normiert:

$$EI_i = \frac{1}{GDP} \sum_s A_{is} Q_s \quad (0)$$

Ein Vorteil dieses Ansatzes ist die Unabhängigkeit von Marktgröße und Preis des einzelnen Rohstoffes. Stattdessen wird der Vorteil/Dienst/Nutzen für die produzierende Industrie bewertet.

Zukünftiger Bedarf fließt in diesen Indikator nicht ein [1]S32!

Das „**Versorgungsrisiko**“ umfasst die politisch-wirtschaftliche Stabilität der Produzentenländer unter Berücksichtigung des Levels der Konzentration der Produktion, des Substitutionspotentials und der Recyclingrate. Eine geologische Verfügbarkeit wird angesichts des gewählten Zeitrahmens nicht direkt berücksichtigt [2]S21.

Zur Bewertung der Konzentration der Produktion wird der „Herfindahl-Hirschmann-Index“  $HHI$  herangezogen. Eine Erhöhung des  $HHI$  weist auf eine Abnahme des Wettbewerbes, bzw. Zunahme von Marktdominanz hin. Dabei stellt  $S_{ic}$  den länderspezifischen Anteil des Landes  $c$  an der Weltproduktion dar. Der politischen Stabilität wird mit der Aggregation des „Worldwide Governance Indicators“  $WGI_c$  (Werte zwischen -2,5 und 2,5) für die produzierenden Länder Rechnung getragen:



$$HHI_{WGI} = \sum_c (S_{ic})^2 WGI_c \quad (1)$$

Um auf einen Wertebereich von 0 bis 10 zu kommen, muss Formel (1) noch modifiziert werden [1]S55.

Die Bestimmung der Austauschbarkeit  $\sigma_i$  einzelner Stoffe beruht auf Experten-Einschätzungen für jeden Verwendungszweck (engl. End-use) des Materials. Die Einzel-Austauschbarkeiten  $\sigma_{is}$  werden, wie schon bei der Bestimmung der wirtschaftlichen Bedeutung, mit den Anteilen  $A_{is}$  gewichtet und zu einem „Substitutability index“ aufsummiert:

$$\sigma_i = \sum_s A_{is} \sigma_{is} \quad (2)$$

Da die Versorgung mit Rohstoffen nicht nur von Primär- sondern auch Sekundär-Rohstoffen gedeckt wird, wird auch die Recyclingrate berücksichtigt. In dieser Analyse wird die „Recycled Content (RC) Rate“  $\rho_i$  verwendet. Sie stellt den Prozentsatz an neuem Metall, das nicht aus primärer Produktion **kommt dar**. Weiters wird nur Schrott aus EoL-Produkten berücksichtigt, aber kein Schrott der bei der Verarbeitung der Rohstoffe anfällt. **Dieser Schrott** wird auf den europäischen Konsum bezogen.

Die Aggregation der Einzelindikatoren führt zu einem Gesamt-Versorgungsrisiko-Indikator:

$$SR_i = \sigma_i (1 - \rho_i) HHI_{WGI} \quad (3)$$

Mit dieser Vorgehensweise wird natürlich nicht das gesamte Versorgungsrisiko abgedeckt. Als Beispiel sei hier die Konkurrenz um Landnutzung innerhalb der EU genannt, für die im Zuge der Analyse kein passender Indikator identifiziert werden konnte.

Mit dem **„Umwelt Länder Risiko“**, wird der Verschärfung von Umweltschutzbestimmungen, die den Rohstofffluss gefährden, Rechnung getragen. Ähnlich wie für die Berechnung des Versorgungsrisikos wird hier der sog. „Environmental Country Index“ ( $EM_i$ ) gebildet, um das länderspezifische Risiko darzustellen. Wieder wird der Level der Konzentration der Produktion, das Substitutionspotential und die Recyclingrate berücksichtigt:

$$EM_i = \sigma_i (1 - \rho_i) HHI_{EPI} \quad (4)$$

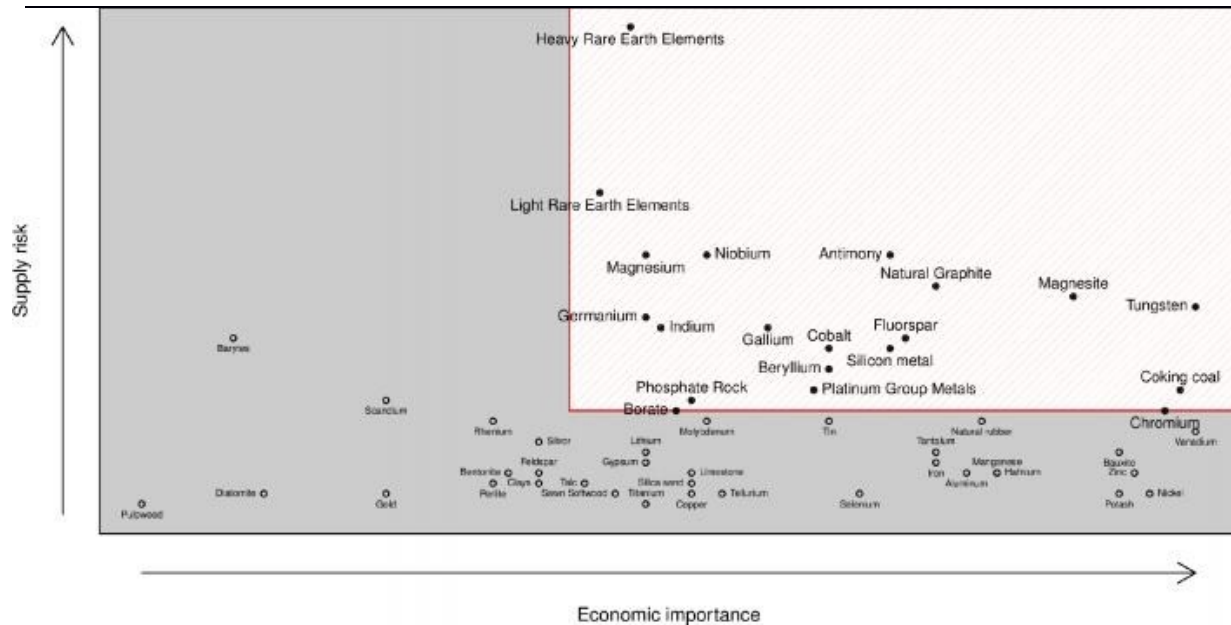
$HHI_{EPI}$  wird ebenfalls analog zu  $HHI_{WGI}$  gebildet:

$$HHI_{EPI} = \sum_c (S_{ic})^2 EPI_c \quad (5)$$

Anstelle des  $WGI$ s wird der Environmental Performance Index ( $EPI$ ) genutzt. Dieser Index reiht Länder anhand von 25 Performance-Indikatoren und bietet letztendlich eine Abschätzung wie nahe diese Länder an den Zielen ihrer Umweltrichtlinien sind.

#### 2.5.4 Ergebnisse der Analyse

Angeichts der **Limitierung auf 12 Seiten** und der nicht unmittelbaren Wichtigkeit für die vorliegende Arbeit werden nur die aufgrund des **Versorgungsrisikos** als kritisch eingestuften Rohstoffe präsentiert.



**Abb. 4:** von der EU Kommission 2013 als kritisch eingestufte Mineralien [2]

Mineralien, die links auf der X-Achse zu liegen kommen, sind nicht notwendigerweise weniger wichtig, die Auswirkungen von Versorgungsengpässen sind aber geringer [1]S33. Das Versorgungsrisiko der als kritisch eingestuft Rohstoffe rührt hauptsächlich von der Konzentration der Produktion auf China, Russland, der demokratischen Republik Kongo und Brasilien her. Zusätzlich sind diese Stoffe oft schwer zu ersetzen und haben niedrige Recycling Raten. Einige der kritischen Rohstoffe sind eigentlich Rohstoffgruppen, wie zB. PGM (platinum group metals) und Seltenerden. Bei Stoffen im linken unteren Bereich wird eine Änderung **zur Kritikalität hin** nach Ansicht der Autoren erst längerfristig wahrscheinlich.

In weiterer Folge wurde auch das **Umwelt-Länder-Risiko** auf einen möglichen Beitrag zur Liste der kritischen Rohstoffe **hin** betrachtet (bei entsprechender wirtschaftlicher Bedeutung kann sowohl das Versorgungsrisiko, als auch das Umwelt-Länder-Risiko einen Rohstoff als kritisch ausweisen). Wie sich zeigt sind alle aufgrund des Umwelt-Länder-Risikos kritischen Rohstoffe bereits in der Liste der aufgrund des Versorgungsrisikos als kritisch eingestuft Stoffe enthalten [1]S35.

Ein wesentlicher Aspekt, der nicht in die beschriebenen drei Indikatoren Eingang gefunden hat, aber für die Betrachtung eines 10 Jahres Zeithorizontes essentiell ist, ist die **zukünftige Entwicklung des Rohstoffbedarfes**. Hier wiederum sind es vor allem technologische Veränderungen. Das können Technologien sein die noch in der Entwicklung sind, oder etablierte Technologien die in neuen Produktbereichen zur Anwendung kommen. Um auf eine handhabbare Menge an betrachteten Rohstoffen zu kommen **bot sich an** diese aus einer, vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) in Auftrag gegebenen Studie zur Analyse des Einflusses material-intensiver neuer Technologien auf den Rohstoffverbrauch, **[Angerer et al.]** zu übernehmen. Auch die Technologien wurden entsprechend des erwarteten Einflusses auf den Rohstoffbedarf gewählt. Die Analyse erfolgte auf globalem Level, unter der Annahme, dass sich Europa generell technologischen Entwicklungen nicht verschließen kann [1]S39/40. Als Ergebnis wurde der Rohstoffbedarf



aufkommender Technologien des Jahres 2006 und des Jahres 2030, jeweils als Anteil der globalen Produktion von 2010, dargestellt. Dabei zeigt sich, dass beispielsweise Gallium einen Faktor 4 die Weltproduktion von 2010 übersteigen könnte (Faktor 20 des Bedarfs von 2006). Nicht berücksichtigt bei der Betrachtung der zukünftigen Entwicklung des Rohstoffbedarfs wurde das globale Wirtschaftswachstum. Bei einer angenommenen durchschnittlichen Rate von 3,8% würde der Wirtschaftsertrag und damit der Rohstoffbedarf zwischen 2006 und 2030 um den Faktor 2,4 ansteigen.

### 2.5.5 Änderungen 2010-2013

Eine der Empfehlungen, die als Teil der Analyse [1] veröffentlicht wurden, war es die Bewertung alle 5 Jahre zu aktualisieren (mittlerweile alle drei Jahre) und den Umfang auszuweiten. Die erste Iteration erfolgte bereits 2013. Methodologie und Indikatoren wurden beibehalten und die Kritikalitäts-Grenzwerte nicht geändert. Dadurch wird eine **direkte Vergleichbarkeit** der beiden Analysen **gewährleistet**. Einzig der „Environmental Performance Index“ EPI wurde aufgrund von Inkonsistenzen zwischen Indikatorwerten und tatsächlicher Performance nicht mehr für die Berechnung des Versorgungsrisikos (in Form des Umwelt-Länder-Risikos) herangezogen [2]S24. Die Liste von 41 Rohstoffen wurde auf 54 ausgeweitet und dabei die Gruppe der Seltenerden in Scandium und die Kategorien ‚schwer‘ und ‚leicht‘ aufgeteilt. Der Umfang wurde auf biotische Materialien **ausgeweitet**; es wurden drei biotische Materialien (=von erneuerbaren, biologischen Ressourcen abgeleitet; Gummi, Papierholz, geschnittenes Weichholz) aufgenommen. Die Analyse wurde detaillierter und mit höherer Datenqualität durchgeführt; Zukunftstrends und deren Auswirkungen auf Versorgung und Bedarf stärker miteinbezogen. Gegenüber den 14 kritischen Mineralien von 2010 wurden 2013 20 kritische Rohstoffe identifiziert. Drei 2010 noch als nicht kritisch eingestufte Mineralien sind 2013 kritisch geworden. Das es auch in die andere Richtung geht zeigt Tantal, das 2013 aufgrund eines geringeren Versorgungsrisikos (geringere Konzentration der Produktion) nicht mehr zu den kritischen Rohstoffen zählt. Drei der erstmals behandelten Rohstoffe wurden auf Anhieb als kritisch eingestuft (Kokereikoks, Phosphatgestein und Silizium) [2].

### 2.5.6 Daten: Verfügbarkeit und Qualität [2]S27

Die notwendige Menge an Daten für die Erstellung einer Kritikalitätsanalyse wie [1], [2] ist **groß und** eine Schlüsselherausforderung ist es an diese Daten in geeigneter Qualität heranzukommen. Die Verfügbarkeit zusätzlicher oder aktuellerer Daten **sowie die Änderung der Datenqualität** kann die Liste stark beeinflussen. Für seltene oder wenig verwendete Metalle ist die Datenlage oft schlecht [8]. Für die Ermittlung der „**Wirtschaftliche Bedeutung**“ stellen regionale Unterschiede der Endverbrauchsdaten das Hauptproblem dar.

**Versorgungsrisiko:** Produktionsdaten sind für Metalle und einige industriell genutzte Mineralien generell in guter Qualität verfügbar, für manche Mineralien ist die Qualität schlechter. Bei der Auswahl der Daten wurde deren Qualität vor deren Aktualität gereiht. Als Quelle für Recycling Raten abiotischer Stoffe diente der UNEP-Recycling Report. Die dem Report zugrunde liegenden Datenquellen variieren **sowohl was die Qualität als auch die Aktualität anbelangt** [2]S27. Die wesentlichen Schwachpunkte bei der Ermittlung der Austauschbarkeit sind zum Einen die relativ schwache Datenbasis für Sekundär-Rohstoffe [2]S23 und zum

Anderen die Tatsache, **das** Schätzungen Teil der Wertermittlung sind. Außerdem können sich durch die Verwendung der Endverbrauchs-Verteilung regionale Unterschiede auswirken (siehe Wirtschaftliche Bedeutung).

### 2.5.7 An die Analyse geknüpfte Empfehlungen

Empfehlungen erfolgen auf mehreren Ebenen und **reicht** von Ausweitung des Analyseumfanges über die Entwicklung geeigneter Indikatoren und Hebung der Datenqualität bis hin zur Etablierung von Richtlinien:

- Verbesserung des Daten-/Analyse-Umfangs (zB. In Form von geologischen Studien und eines europäischen Rohstoff Jahrbuches).
- Hebung der Datenqualität (zB. durch zuverlässige statistische Erfassung der Fertigungsindustrie)
- Verwendung geeigneter Indikatoren um die Konkurrenz bei der Landnutzung zu bewerten.
- Mehr Untersuchungen zu Life-cycle assessments für Rohstoffe.
- Richtlinien die den Zugang zu den Primär-Rohstoffen (vor allem innerhalb der EU) sichern und Richtlinien, die Handel, Investitionen und fairen Wettbewerb (frei von Wettbewerbsverzerrung), ermöglichen.
- Recycling: Zweckgemäßes Sammeln als Alternative zu Lagerung in Haushalten (hibernating), Entsorgung in Deponien oder Verbrennung.
- Unterbinden illegaler Exporte von EoL-Produkten, die kritische Rohstoffe enthalten; Transparenz erhöhen. [1]S51
- Substitution (anhand der recht allgemeinen Empfehlung, die Forschung zu intensivieren, lässt sich erkennen, wie schwierig sich Substitution in der Praxis darstellt)
- Effizienz in der Materialverwertung: Ähnlich wie bei der Substitution sehr allgemein. Minimaler Materialbedarf für ein Produkt bei minimalen Materialverlusten.

## 2.6 Recycling

Das exponentielle Wachstum von Wirtschaft und Bevölkerung hat auch zu einer **Verschiebung der Lagerstätten** geführt. Während früher die verfügbaren Lager nahezu vollständig in der Erdkruste zu finden waren, ist heute bereits ein signifikanter Teil davon in der Anthroposphäre gelagert. Gleichzeitig nehmen die **Erzkonzentrationen** sukzessive ab [8]. Der mit höherem Aufwand und mit höheren Emissionen verbundene Abbau und die anschließende Prozessierung dieser Erze und die prinzipiell gestiegene Verfügbarkeit der Stoffe in der Anthroposphäre heben den Stellenwert von Recycling enorm. Je effizienter das Recycling für die betrachteten Rohstoffe umgesetzt ist, desto geringer fällt das Versorgungsrisiko und damit die Gesamtkritikalität aus. Aufgrund des Wachstums der Anzahl von Anwendungen, der Bevölkerung und des globalen Bedarfs wird jedoch auch in Zukunft der Abbau die Basis für die Rohstoffversorgung darstellen [1]S19. Damit muss der zeitliche Unterschied zwischen Produktion und Gebrauchsende überbrückt werden.

In Kritikalitätsanalysen wird, neben Kosten und Stoffmengen, das Recycling meist in Form von Raten berücksichtigt.

### 2.6.1 Recycling-Raten

Ev. Grafik+Formeln von [9]S16,17 dazu

Recycling-Raten können auf unterschiedliche Art definiert werden. Interessant sind hier vor allem Raten, die nach dem Gebrauchsende ansetzen, u. a. ([11]S45, [9]S17/18):

Die „**Old Scrap Collection Rate**“ (**CR**) gibt an wie viel des Altmetalls nach dem Einsammeln die Recycling-Prozesse erreicht (im Gegensatz zum Rest, der deponiert wird) und bewertet somit die Effizienz des Sammel-Prozesses.

Der Prozesskette **folgende** gibt die **Recycling Process Efficiency Rate** die Effizienz eines Recycling-Prozesses an.

Die „**End-of-life Recycling Rate**“ (**EoL-RR**) gibt die tatsächlich rezyklierte Menge eines Metalls bezogen auf das angefallene Altmetall an und umfasst damit die Sammel-Effizienz und die Recycling Prozess Effizienz ( $CR \cdot \text{Recycling Process Efficiency Rate}$ ).

Die schon weiter oben beschriebene und in den Analysen [1] und [2] verwendete „**Recycled Content**“ (**RC**) Rate gibt den Anteil von Sekundär-Rohstoff an der Gesamtproduktionsmenge eines Rohstoffes an. Auf Länderebene ist die Ermittlung schwierig bis unmöglich, weil der Recycling-Anteil importierter Metalle üblicherweise nicht verfügbar ist.

„**Old Scrap Ratio**“ (**OSR**) ist der Anteil an altem Schrott im Gesamtschrottfluss [9]S9,S17.

### 2.6.2 Datenqualität und Datenverfügbarkeit<sup>2</sup>

#### **Mediocre Mischung**

Ein guter Teil der Recycling-Raten wurde von [9] übernommen<sup>3</sup>. Verfügbarkeit und Qualität publizierter Daten variieren so wie auch deren Zeitbereich je nach Region, Produkt und verfügbarer Technologie. Signifikante Produktmengen werden in Schwellen- und Entwicklungsländer exportiert, wo beträchtliche Mengen informell recycelt werden. Daher wurden statt exakter Recycling Raten von Experten fünf Bereiche gewählt (>50%, >25-50%, >10-25%, 1-10% und <1%) [9]S18.

Nichts desto trotz wird das Ergebnis von den Verfassern als die beste zur Verfügung stehende Information bezeichnet [9]S3.

### 2.6.3 Welche Aspekte werden durch Raten nicht abgedeckt?

Es ist naheliegend **auf Recycling-Raten für die Bildung von Kritikalitäts-Indikatoren** zurückzugreifen, da sie mit der Nachhaltigkeit des Rohstoffgebrauchs korrelieren. Nichts desto trotz ist es sinnvoll sich vor Augen zu halten welche sich auf die Kritikalität auswirkende Recycling-Aspekte durch Recycling-Raten nicht berücksichtigt werden:

- Lagerdynamik, durch Akkumulation des jeweiligen Rohstoffes und Änderung der Nachfrage verursacht, kann durch eine Rate, die ausschließlich den Status quo erfasst nicht abgebildet werden
- Das durch die Lagergröße, bzw. das gesamte Stoffflusssystem gegebene Recycling-Potential
- der dissipative Charakter des Rohstoffes (gegeben durch Konzentrationen in Produkten, im Lager bzw. im Abfallstrom)

<sup>2</sup> Die diesbezüglichen Aussagen beziehen sich auf die weiter oben detaillierter beschriebene Kritikalitäts-Analyse der RMI [1].

<sup>3</sup> Bei Stoffen für die keine Informationen verfügbar waren wurde angenommen, dass kein Recycling stattfindet [1].

- Bei Verwendung der Recycled Content (RC) Rate (wie in [1] und [2]) wird das durch den möglichen Export recyclebarer Stoffe entstehende Versorgungsrisiko nicht berücksichtigt [1]S26.
- indirektes Recycling (Feldspat als solches wird nicht recycelt, Glas hingegen sehr viel) wird durch oben genannte Raten nicht berücksichtigt [1]S26
- Recycling-Raten decken zwangsläufig nur einen Teilaspekt des Stoffflusssystems ab

## 2.7 Statistische Entropie Analyse (SEA) als möglicher Beitrag zur Kritikalitätsbewertung

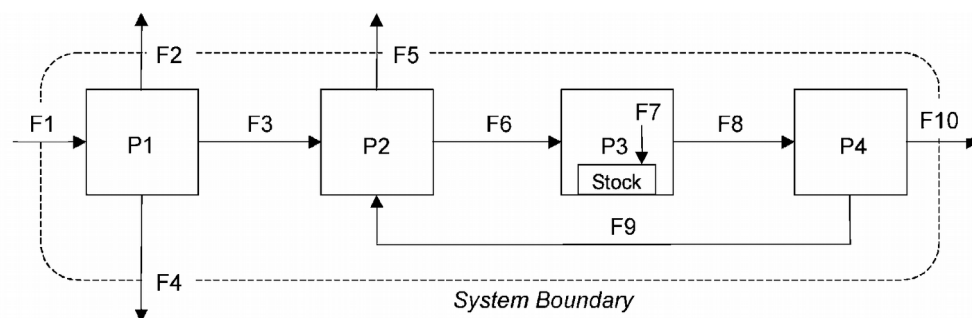
Analysen von Stoffflusssystemen (SFS) (in Form von „**Stoffflussanalysen**“ (**SFA**)) spielen eine wachsende Rolle als Entscheidungsgrundlage zur gezielten Einflussnahme im Management sowohl von wirtschaftlichen, als auch ökologischen Ressourcen. Der Metabolismus solcher Systeme ist aufgrund der beteiligten Prozesse, Stoffströme und Lager komplex und nicht zuletzt deshalb stellt die Interpretation der Ergebnisse weiterhin eine gewisse Schwierigkeit dar.

Eine der möglichen Methoden ist die „Statistical Entropy Analysis“ (SEA), angewendet auf SFA. Sie ist in der Lage ein solches System zu beschreiben und bietet sich aus mehreren Gründen als Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung als auch als Design-Werkzeug an:

- Geringer notwendiger Rechenaufwand
- Im Idealfall keine weitere Datenakquirierung notwendig
- Direkte Anwendbarkeit auf Datenbanken der SFA

Darüber hinaus kann ein Prozess, **ja die gesamte SFA** mit einem einzigen Messwert pro Stoff charakterisiert werden.

Eine typische Rohstoff-Prozesskette eines SFS beginnt bei der Produktion eines Rohstoffes und läuft über die weiteren Prozesse Produkterzeugung und Endverbrauch bis hin zum Abfallmanagement (s. Abb. 5). Prozesse verbinden Stoffströme und beeinflussen diese durch Transport, Transformation und Lagerung; durch Recyclingströme kommt es zu Rückkopplungseffekten.



**Abb. 5:** Stoffflusssystem [13]

P1..P4 stellen Prozesse dar, F1..F10 Stoffströme. Eine gebräuchliche Abfolge ist: P1 = Produktion, P2 = Fabrikation, P3 = Endverbrauch, P4 = Abfallmanagement & Recycling

Mathematische Grundlage für die Quantifizierung ist nun die statistische Entropiefunktion, die in Boltzmann's statistischer Beschreibung der thermodynamischen Entropie ihren Ursprung hat und später von Shannon in der Informationstheorie für die Messung des Informationsgehalts von Systemen entwickelt wurde. Schließlich wurde von Rechberger die Anwendbarkeit und Adaptierung für SFA gezeigt. Angewandt auf Stoffströme ist die statistische Entropie ein Mittel um die Fähigkeit eines Prozesses zur Stoffkonzentrierung oder Stoffverdünnung der untersuchten Substanz zu beschreiben.

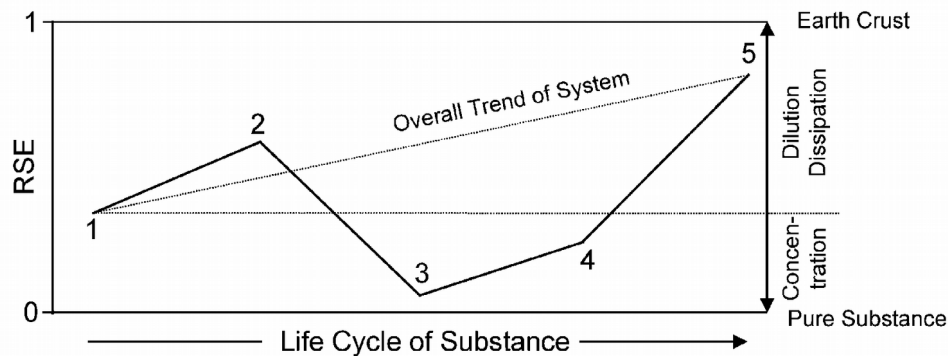


Abb. 6: Verlauf der relativen statistischen Entropie entlang der Prozesskette [13]

Ein Vergleich der statistischen Entropie der Eingangsströme mit jener der Ausgangsströme eines Prozesses zeigt dessen dissipativen Charakter und ermöglicht so eine unmittelbare Beurteilung von Maßnahmen, die entweder eine Veränderung der Konzentration, oder eine Verlagerung der Stoffflüsse ins Auge fasst. Analog dazu lässt sich die statistische Entropie für die gesamte Prozesskette bzw. das gesamte System ermitteln.

Der Vergleichbarkeit wegen wird die statistische Entropie auf einen definierten Maximalwert bezogen und als „relative statistische Entropie“ (RSE) dargestellt.

Üblicherweise werden SFAs für einen einjährigen Zeitbereich durchgeführt.

Die sogenannte „**Shannon Entropie**“,  $H$  (Einheit bit) liefert einen Messwert für eine Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Analog dazu lässt sich die RSE für die gesamte Prozesskette bzw. das gesamte System ermitteln. Für die dazu notwendigen Aufbereitungsschritte siehe 10,11.

Datengrundlage = SFA ev. um Konzentrationen erweitert.

## 2.8 SEA und Recycling

Recycling hat jedenfalls ein Absenken des RSE zur Folge.

Für einen geschlossenen, nachhaltigen Kreislauf müssen u. a. Input und Output des Endverbrauchs-Prozesses gleich groß und das Abfallmanagement hoch

effizient sein. (Je größer die Abfallströme, desto mehr wirkt sich das Abfallmanagement auf die RSE aus) (Das Inventar des Endverbrauch-Lagers muss bekannt sein und entsprechend effiziente Abfallmanagement-Technologie am Start)

## 2.9 Beispiele

### 2.9.1 Kupfer

Das Ergebnis einer solchen SFA, **um Stoffkonzentrationen erweitert**, stellt die Basis für die SEA dar.

## 2.10 Fazit

Die statistische Entropie ist ein Werkzeug um Konzentration und Verdünnung von Stoffen in Stoffflusssystemen zu quantifizieren und zu visualisieren. Zusammen mit weiteren Indikatoren (Energieverbrauch/Effizienz, Kosten) könnte sie einen wertvollen Beitrag zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen liefern.

## Literaturverzeichnis

- [1] Ad hoc Working Group – European Commission: *Critical raw materials for the EU*. European Commission, 2010
- [2] Ad hoc Working Group – European Commission: *Report on Critical raw materials for the EU*. European Commission, 2014
- [3] European Commission: *A resource-efficient Europe – Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy*  
[http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/pdf/resource\\_efficient\\_europe\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/resource-efficient-europe/pdf/resource_efficient_europe_en.pdf), 2011
- [4] European Commission: *Policy and strategy for raw materials*, [http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/policy-strategy/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/policy-strategy/index_en.htm)
- [5] European Commission: *Sustainable Use of Natural Resources*, <http://ec.europa.eu/environment/natres/index.htm>,
- [6] Chapman A., Arendorf J., Castella T., Thompson P., Willis P., Espinosa L.T., Klug S., Wichmann E.: *Study on Critical Raw Materials at EU Level – Final Report*, Oakdene Hollins and Fraunhofer ISI, 2013
- [7] Erdmann L., Graedel T.E.: *Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses*. Environ. Sci. Technol., 2011
- [8] Graedel T. E., Barr R., Chandler C., Chase T., Choi J., Christoffersen L., Friedlander, E., Henly C., Jun Ch., Nassar N. T., Schechner D., Warren S., Yang M., Zhu C.: *Methodology of Metal Criticality Determination*. Environ. Sc. and Tech., 2012
- [9] Graedel T.E., Allwood J., Birat J.-P., Reck B.K., Sibley S.F., Sonnemann G., Buchert M., Hagelüken C.: *Recycling Rates of Metals – A Status Report*. UNEP, International Resource Panel, 2011
- [10] Graedel T.E., Erdmann L.: *Will metal scarcity impede routine industrial use?* MRS Bulletin Volume 37, April 2012.
- [11] Reuter M. A., Hudson C., van Schaik A., Heiskanen K., Meskers C., Hagelüken C.: *Metal Recycling – Opportunities, Limits, Infrastructure*. UNEP, International Resource Panel, 2013
- [12] Johnson J., Schewel L., Graedel T.E.: *The Contemporary Anthropogenic Chromium Cycle*. Environ. Sc. and Tech. 40/22, S.7060 – 7069, 2006
- [13] Rechberger H., Graedel T.E.: *The contemporary European copper cycle*. Ecological Economics 42, pp. 59-72, 2002
- [14] 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. Resour. Policy 34 (4), 161-175, 2009*

## **Anhang**

Ein möglicher Anhang sollte direkt nach dem Literaturverzeichnis ohne Seitenumbruch angeführt werden.

Die Zeile „Anhang“ verwendet die Formatvorlage *Überschrift Lit+Anh.*