

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN  
Fakultät für Bauingenieurwesen  
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und  
Abfallwirtschaft  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Rechberger

Bachelorarbeit

# **Kritikalitätsbewertung von Rohstoffen und der Einfluss von Recycling**

Martin Morawetz  
martin.morawetz@docmanna.net  
Matr.Nr. 9625648  
Datum: 06.06.2016

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Kritikalität.....</b>	<b>6</b>
2.1	Worum handelt es sich?.....	6
2.2	Motivation und allgemeine Aspekte der Kritikalität.....	7
2.2.1	Begleitmetalle und Seltenerdmetalle ( <i>SEE</i> ).....	7
2.2.2	Umgang mit kritischen Rohstoffen.....	9
2.3	Strategien und Initiativen in Europa (EU).....	9
2.4	Allgemeine Ansätze zur Bestimmung der Kritikalität.....	10
2.4.1	Motivation.....	12
2.4.2	Umfang der Analyse.....	12
2.4.3	Methodologie.....	13
2.4.4	Ergebnisse der Analyse.....	15
2.4.5	Änderungen 2010-2013.....	16
2.4.6	Daten: Verfügbarkeit und Qualität [2].....	17
2.4.7	An die Analyse geknüpfte Empfehlungen.....	17
2.5	Recycling.....	18
2.5.1	Recycling-Raten ( <i>RR</i> ).....	19
2.5.2	Datenqualität und -Verfügbarkeit.....	20
2.5.3	Welche Aspekte werden durch Raten nicht abgedeckt?.....	21
2.6	Statistische Entropie Analyse ( <i>SEA</i> ) als möglicher Beitrag zur Kritikalitätsbewertung.....	21
2.6.1	Statistische Entropie.....	22
2.6.2	Anwendung der statistischen Entropie auf Materialströme.....	24
2.6.3	Anwendung der <i>SEA</i> auf Stoffflusssysteme ( <i>SFS</i> ).....	26
2.6.4	<i>SEA</i> und Recycling am Beispiel Kupfer [14].....	27
2.6.5	Weitere Aspekte anhand Chinas <i>Cu</i> -System [22].....	28
2.7	Überlegungen zur Nutzung der <i>SEA</i> zur Bildung eines Kritikalitätsindikators.....	29
2.7.1	Allgemeine Aspekte.....	30
2.8	Fazit.....	31

## Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Begleitmetalle.....	8
Abb. 2: Projektion in zwei Dimensionen [2].....	11
Abb. 3: Lage von Mineralien im „Kritikalitäts-Raum“ [8].....	11
Abb. 4: Kritikalitätsbewertung mithilfe voneinander unabhängiger Indikatoren (Multi-Indikator-Sets) [15].....	11
Abb. 5: die RC-Rate setzt den EoL-Schrott mit dem europäischen Konsum ins Verhältnis [1].....	14
Abb. 6: von der EU Kommission 2013 als kritisch eingestufte Mineralien [2].....	15
Abb. 7: Stoffströme, die für Ratendefinitionen herangezogen werden [11].....	19
Abb. 8: Stoffflusssystem [14].....	22
Abb. 9: Kurvenverlauf von $f(P) = -P(x) \cdot \log_2(P(x))$ .....	23
Abb. 10: Drei ausgezeichnete Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	23
Abb. 11: Verlauf der relativen statistischen Entropie entlang der Prozesskette [14] .....	25
Abb. 12: Stages definieren Materialstrom-Sets.....	26
Abb. 13: Kupferflüsse Europas im Jahr 1994 in Gg/y [14].....	27
Abb. 14: Verlauf der RSE für Cu entlang des SFS [14].....	28
Abb. 15: RSE-Verläufe für Cu.....	29
Abb. 16: Geschlossene Recyclingkette.....	31
Abb. 17: Offene Recyclingkette.....	31

## Verzeichnis der Abkürzungen

$C_i$	Konzentration des Stoffes $i$
CR	Old Scrap Collection Rate
EI	Economic Importance
EIP	European Innovation Partnership on Raw Materials
EM	Environmental Country Index
EoL	End-of-life
EoL-RR	End-of-life Recycling Rate
FeCr	Ferrochrom
F&M	Fabrication & Manufacture
GDP	Gross Domestic Product (dt. Bruttoinlandsprodukt)
H	Shannon Entropie
HHI	Herfindahl-Hirschmann-Index
$M_i$	Materialstrom in Gg Material / Jahr
RC	Recycled Content Rate
MFA	Material flow analysis (dt. SFA - Stoffflussanalyse)
OSR	Old Scrap Ratio
REE	Rare Earth Elements (dt. SEE – Seltene-Erden-Elemente)
RSE	Relative Statistische Entropie
RMI	Raw Materials Initiative
RR	Recycling Rate
$P_i$	Wahrscheinlichkeit für Eintritt des Ereignisses $i$
SEA	Statistische Entropie Analyse
SEE	Seltene Erdelemente (engl. REE - Rare Earth Elements)
SFA	Stoffflussanalyse (engl. MFA - Material flow analysis)
SFS	Stoffflusssystem
SCE, SKE	Stoffkonzentrierungseffizienz
SR	Supply Risk
WGI	Worldwide Governance Indicator
WM&R	Waste Management & Recycling
$X_i$	Stoff-Strom $i$ in Gg / Jahr

## 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. Diese Lücke könnte die „**Statistische Entropie Analyse**“ (SEA) füllen, da sie in der Lage ist die Dissipativität eines Systems zu quantifizieren und direkt auf Stoffflussanalysen (SFA) angewendet werden kann.

## 2 Kritikalität

### 2.1 Worum handelt es sich?

In der Kritikalität eines Rohstoffes im hier beschriebenen Sinn spiegelt sich dessen volkswirtschaftliche Bedeutung unter Berücksichtigung der Implikationen bei Beschaffung und Nutzung wider. Wesentliche Eigenheiten der Größe sind die Dynamik, die Relativität und die 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]. 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. Des Weiteren können, ungeachtet der Subjektivität, einige allgemeine Gemeinsamkeiten festgehalten werden [12]<sup>1</sup>:

- Das Risiko für Begleitmetalle ist höher als das des eigentlichen Metalls

1 eine Verallgemeinerung auf mineralische Rohstoffe sollte zulässig sein

- auf wenige Quellen konzentrierte Metalle sind riskanter als solche die über viele Quellen bezogen werden können
- Metalle, deren Nachfrage durch aufkommende Technologien beeinflusst werden, sind als riskanter einzuschätzen als solche mit voraussichtlich stabiler Nachfrage
- komplexes oder aufwendiges Metall-Recycling hebt das Risiko

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

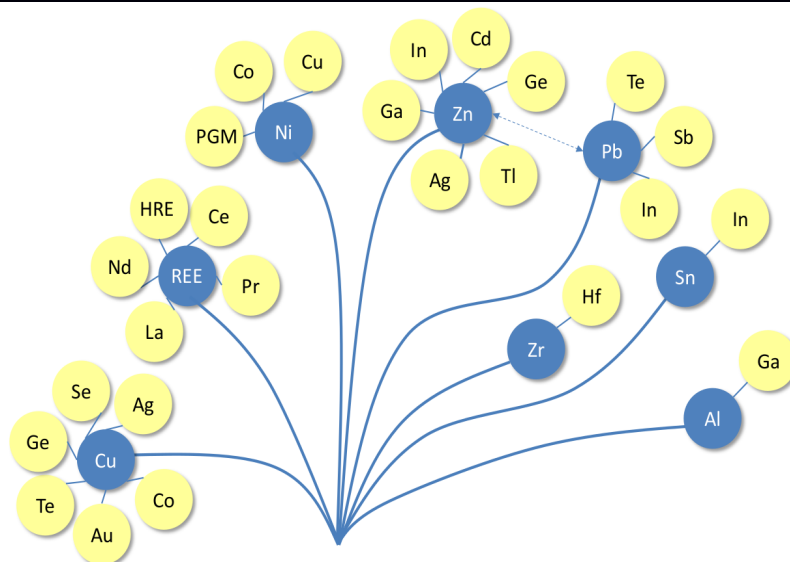
## 2.2 Motivation und allgemeine Aspekte der Kritikalität

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, 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.

### 2.2.1 Begleitmetalle und Seltenerdmetalle (*SEE*)

**Etliche** Metalle werden nur als Begleitmetalle produziert und sind als solche (wie auch unter 2.1 festgehalten) riskanter, weil die Verfügbarkeit und damit die Preislage stark von der Produktion des Hauptmetall**l** abhängt. Eine (unvollständige) Übersicht solcher Begleitmetalle ist in Abb. 1 dargestellt. Speziell Seltenerdmetalle sind davon betroffen. Die Seltenerdmetalle oder Seltene-Erden-Elemente (*SEE*, engl. Rare Earth Elements – *REE*) umfassen die Lanthanoide zuzüglich Scandium (*Sc*) und Yttrium (*Y*) und stellen eine Gruppe chemischer Elemente mit einer Reihe wichtiger Eigenschaften (elektronisch, magnetisch, optisch, katalytisch) dar.

*SEE* werden häufig in ihrer oxidischen Form abgetrennt und verkauft. Eingeteilt werden sie in „Leichte“ und „Schwere Seltene-Erdelemente“ (engl. *LREE*, bzw. *HREE*). *HREEs* sind generell seltener und treten oft in geringeren Konzentrationen auf. Häufig kommen sie in Mineralien vor, aus denen die Gewinnung eine Herausforderung darstellt [18].



**Abb. 1:** Begleitmetalle

Typisches Auftreten von Begleitmetallen (gelb) als grobe Übersicht. [10]

Ungeachtet des Ausdrucks „Seltenerdmetalle“ sind *SEE* weit weniger selten, als ihre Bezeichnung vermuten lässt. Beispielsweise kommen alle *SEE* häufiger in der Erdkruste als Silber vor und die vier verbreitetsten *SEE* sind stärker vertreten als Blei. Es wird vermutet, dass bisher nicht entdeckte Lager verhältnismäßig groß im Vergleich zum erwarteten Bedarf sind. Allerdings sind bisher entdeckte, abbaubare Konzentration seltener als für andere Erze [20]. Was macht also *SEE* zum Ziel von Kritikalitäts-Betrachtungen?

Mit den aufstrebenden Technologien der letzten Jahre ist die Bedeutung der *SEE* stark gestiegen. Die Nutzung reicht vom Legierungselement für Gusseisen über die Herstellung von Hochleistungsmagneten und Katalysatoren bis hin zur Verwendung in Neutronenabsorbern, Batterien und Brennstoffzellen [20].

Derzeitiger Hauptproduzent von *SEE* ist mit großem Abstand China. Der Anteil an der weltweiten Produktion wird mit ca. 97,5% angegeben (Stand 2014) und die Exportbedingungen werden sukzessive verschärft. Gleichzeitig sind aufgrund der teils sehr spezifischen Funktion und der Neuheit vieler Anwendungen oft keine Substitutions-Möglichkeiten bekannt. Auch findet Recycling derzeit so gut wie nicht statt (Bsp. *SEE*-Anteil von Batterien, *SEE*-Magnete [20]).

Die diesen Stoffen zugedachte, hohe Bedeutung zeigt sich auch daran, dass sich einige Kritikalitätsstudien ausschließlich den *SEE* widmen [18][19][20].



### 2.2.2 Umgang mit kritischen Rohstoffen

Wie geht man nun mit als kritisch eingestuften Rohstoffen um? Die, in diversen Studien angeführten Ziele und Maßnahmen behandeln im Wesentlichen folgende Bereiche (zB. in [21]).

- Durch effizientere Produktion und längere Lebensdauer den Materialbedarf senken.
- Das Ausweiten des Recyclings. Als Teil einer „Cradle to Cradle“-Philosophie sollte das Ziel vollständiges Recycling der Rohstoffe am Ende des Produktlebens sein.
- Anwendungsspezifisch Alternativen zu den kritischen Rohstoffen finden.
- Ausweitung und Optimierung der Landnutzung, bzw. lösen der Konkurrenz-Situation [1].

So offensichtlich diese Punkte sind, so schwierig ist ihre Umsetzung bzw. Weiterentwicklung. Der gesamte Produktlebenszyklus muss dabei berücksichtigt werden. Universitäten und Forschungseinrichtungen, Industrie und Regierungen als zentrale Stellen sind gefordert.

### 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>2</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].

---

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

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

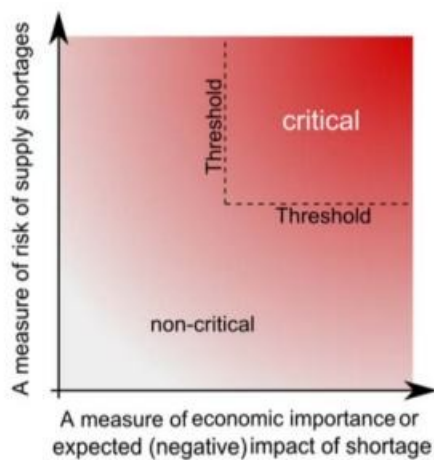
Mit dem Hauptziel alle Akteure der Interessensgruppe (Unternehmen, Forscher, Mitgliedsstaaten und NGOs) zusammen zu bringen wurde von der „**European Innovation Partnership on Raw Materials (EIP)**“ Initiative die „**Raw Materials Initiative stakeholder platform**“ aufgebaut. In Hinblick auf eine nachhaltige 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

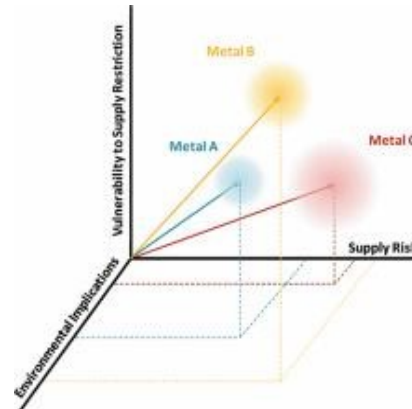
Im Zuge eines Reviews von Kritikalitäts-Assessments haben Erdmann und Graedel 4 Konzepte der Kritikalitätsbestimmung unterschieden: das Matrix-Konzept, das Index-Konzept, Multi Indikator Sets und die Supply/Demand-Analyse [7].

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 eines Rohstoffes als „kritisch“ ausreicht).



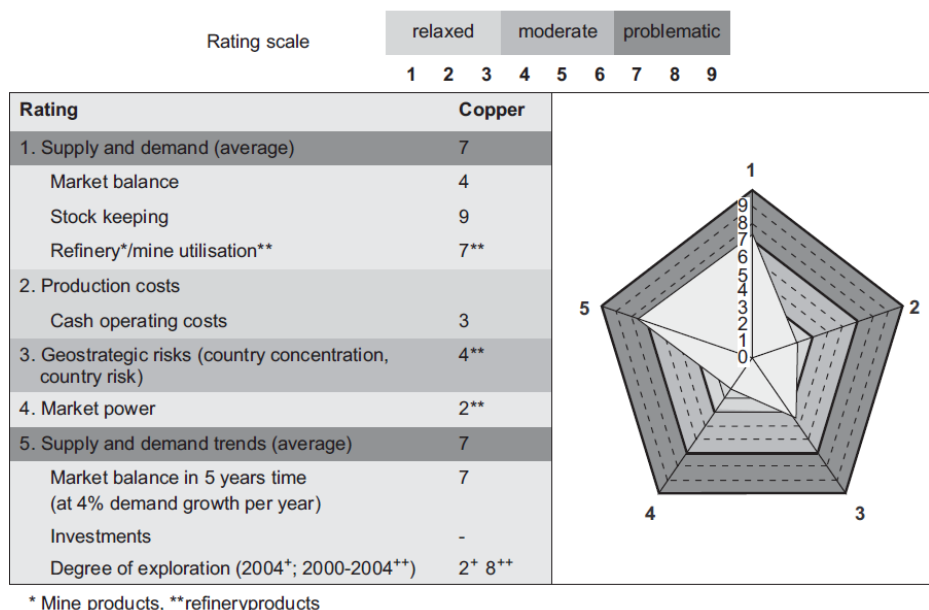
**Abb. 2:** Projektion in zwei Dimensionen [2]



**Abb. 3:** Lage von Mineralien im „Kritikalitäts-Raum“ [8]

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.



**Abb. 4:** Kritikalitätsbewertung mithilfe voneinander unabhängiger Indikatoren (Multi-Indikator-Sets) [15]

Bei **Supply-Demand-Analysen** werden für unterschiedliche Szenarien Angebot und Nachfrage analysiert oder geschätzt.

#### 2.4.1 Motivation

Die gesamte Industrie ist in jedem Schritt der Versorgungskette 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.

#### 2.4.2 Umfang der Analyse

**Rohstoffe:** Die Analyse umfasste 2010 insgesamt 41 Metalle und industriell genutzte Minerale sowie verarbeitete/raffinierte Rohstoffe [1]. In der Aktualisierung von 2013 sind es bereits 54 Rohstoffe [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]. Aktualisierungen dieser Analyse erfolgen in kürzeren Abständen; 2013, also bereits nach 3 Jahren wurde die erste Aktualisierung durchgeführt [2].

### 2.4.3 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]. 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]!

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].

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:

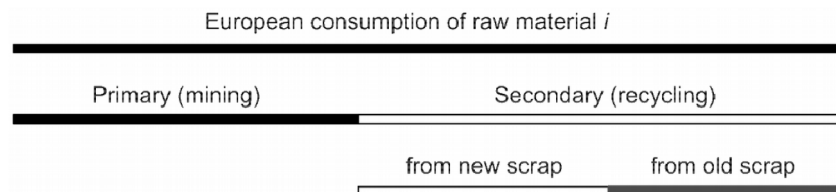
$$HHI_{WGI} = \sum_c (S_{ic})^2 WGI_c \quad (1)$$

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

Die Bestimmung der Austauschbarkeit  $\sigma_i$  einzelner Stoffe beruht auf Experten-Einschätzungen für jeden Verwendungszweck (*engl. End-use*) des Materials. Der Wertebereich reicht von 0,0 (vollständige Austauschbarkeit ohne zusätzlicher Kosten) bis 1,0 (keine Austauschbarkeit). 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.



**Abb. 5:** die RC-Rate setzt den EoL-Schrott mit dem europäischen Konsum ins Verhältnis [1]

Je stärker ein Material rezykliert wird, je höher also die Recyclingrate ist, desto geringer ist das Versorgungsrisiko. 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 („old scrap“ in Abb. 5) 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





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 eingestuften Stoffe enthalten [1].

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, 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]. 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.

#### 2.4.5 Änderungen 2010-2013<sup>3</sup>

Um eine direkte Vergleichbarkeit der beiden Analysen [1] und [2] zu gewährleisten wurden die Indikatoren beibehalten und die Kritikalitäts-Grenzwerte nicht geändert. 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]. 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].

#### **2.4.6 Daten: Verfügbarkeit und Qualität [2]**

Die notwendige Menge an Daten für die Erstellung einer Kritikalitätsanalyse wie [1], [2] ist groß und eine Schlüsselherausforderung ist die Beschaffung dieser Daten in geeigneter Qualität. 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 diene der UNEP-Recycling Report. Die dem Report zugrunde liegenden Datenquellen variieren sowohl was die Qualität als auch die Aktualität anbelangt [2]. Die wesentlichen Schwachpunkte bei der Ermittlung der Austauschbarkeit sind zum Einen die relativ schwache Datenbasis für Sekundär-Rohstoffe [2] und zum Anderen die Tatsache, dass Schätzungen Teil der Wertermittlung sind. Außerdem können sich durch die Verwendung der Endverbrauchs-Verteilung regionale Unterschiede auswirken (siehe Wirtschaftliche Bedeutung).

#### **2.4.7 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 und eine diesbezügliche Erhöhung der Transparenz.
- 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.

## 2.5 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, die anschließende Verarbeitung 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]. Damit muss der zeitliche Unterschied zwischen Produktion und Gebrauchsende überbrückt werden.

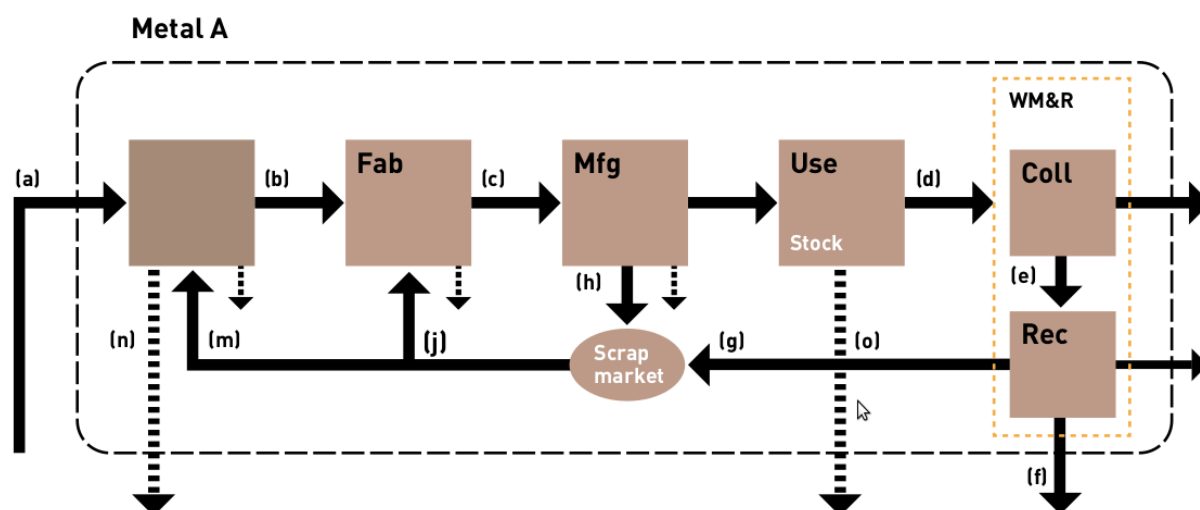
Recycling ist klarerweise immer eine wirtschaftliche Frage - der recycelte Rohstoff steht in Konkurrenz zum, durch Abbau natürlicher Lager gewonnenen, Rohstoff. Nur Müll, der ausreichend ökonomischen Wert hat wird auch recycelt

was wiederum eine entsprechend effizient arbeitende Recycling-Infrastruktur impliziert.

Zu erwähnen ist die unterschiedliche Dynamik einzelner Rohstoffe - die Verweilzeiten der zu recycelnden Rohstoffe in den Lagern variieren stark. Das reicht von höchstens ein paar Jahren bei Indium in elektronischen Geräten bis zu mehreren Jahrzehnten im Falle von Baustahl. Auch die Zugänglichkeit spielt hier eine Rolle. Beispielsweise ist Industriemüll leichter erreichbar als der von Privathaushalten.

In Kritikalitätsanalysen wird, neben Kosten und Stoffmengen, das Recycling meist in Form von Raten berücksichtigt. Im Folgenden wird darauf eingegangen welche Raten es gibt und wie sie bestimmt werden, wie die Datenbasis aussieht und welche Aspekte damit bei Kritikalitätsanalysen berücksichtigt bzw. welche nicht berücksichtigt werden.

### 2.5.1 Recycling-Raten ( $RR$ )



**Abb. 7:** Stoffströme, die für Ratendefinitionen herangezogen werden [11]

Die Hauptprozesse des Lebenszyklusses eines Metalls A sind als Boxen dargestellt, die Stoffströme als Pfeile. Fab = Fabrication, Mfg = Manufacturing, Use, Coll = Collection, Rec = Recycling. a = primär-Metall, d = end-of-life (EOL) Produkte, e = aus EOL-Produkten für Recycling gesammeltes Metall, f = für nicht funktionales Recycling abgetrenntes Metall, g = recyceltes EOL Metall, h = in der Produktherstellung anfallender Schrott (neuer Schrott, j = in Fabrikation verwendeter Schrott, m = in Produktion verwendeter Schrott

Recycling-Raten können auf unterschiedliche Art definiert werden. Interessant sind hier vor allem Raten, die nach dem Gebrauchsende ansetzen ([11], [13]):

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. Unter Verwendung der Stoffströme in Abb. 7 ist *CR* definiert als:

$$CR = e/d \quad (6)$$

Der Prozesskette folgend gibt die **Recycling Process Efficiency Rate** die Effizienz eines Recycling-Prozesses an:

$$\text{Recycling process efficiency rate} = g/e \quad (7)$$

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 ( $CR \cdot \text{Recycling Process Efficiency Rate}$ ):

$$EoL-RR = g/d \quad (8)$$

Davon zu unterscheiden ist das nicht-funktionale Recycling. Das Metall ist für funktionales Recycling nicht mehr zugänglich und wird als Verunreinigung in anderen Metallen mitgesammelt (zB. Kupfer in Stahllegierungen). Die beschreibende Rate ist analog zur *EoL-RR*:

$$\text{Non-functional EoL-RR} = f/d \quad (9)$$

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.

$$RC = (j+m)/(a+j+m) \quad (10)$$

Auf Länderebene ist die Ermittlung von *RC* 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 [11].

$$OSR = g/(g+h) \quad (11)$$

### 2.5.2 Datenqualität und -Verfügbarkeit<sup>4</sup>

Ein guter Teil der Recycling-Raten wurde von [11] übernommen<sup>5</sup>. Verfügbarkeit und Qualität publizierter Daten, sowie deren Zeitbereich variieren je nach Region, Produkt und verfügbarer Technologie. Brauchbare Schätzungen für Lager in der Anthroposphäre (in use stock) gibt es nur für Aluminium, Kupfer, Eisen und Blei [13]. Des weiteren werden signifikante Produktmengen in Schwellen- und Entwicklungsländer exportiert, wo beträchtliche Mengen informell recycelt

4 Die diesbezüglichen Aussagen beziehen sich auf die weiter oben detaillierter beschriebene Kritikalitäts-Analyse der RMI [1].

5 Bei Stoffen für die keine Informationen verfügbar waren wurde angenommen, dass kein Recycling stattfindet [1].

werden. Aus diesem Grund wurden statt exakter Recycling Raten von Experten fünf Bereiche gewählt<sup>6</sup> (>50%, >25-50%, >10-25%, 1-10% und <1%) [11].

### 2.5.3 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)
- 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]
- indirektes Recycling (Feldspat als solches wird nicht recycelt, Glas hingegen sehr viel) wird durch oben genannte Raten nicht berücksichtigt [1]
- Recycling-Raten decken zwangsläufig nur einen Teilaspekt des Stoffflusssystems ab

## 2.6 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 zur Analyse von *SFS* 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:

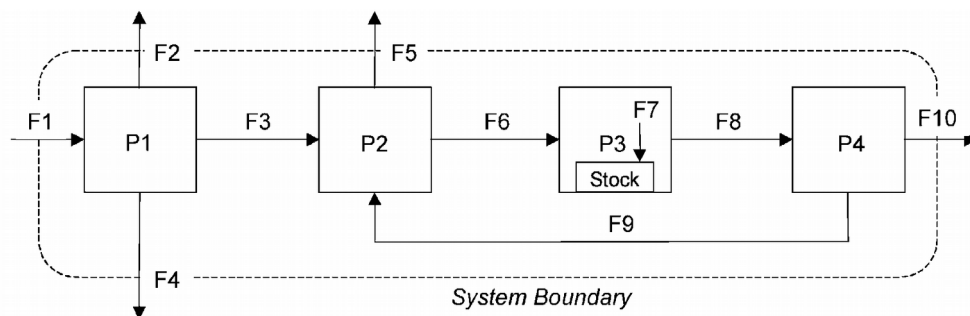
---

6 Nichts desto trotz wird das Ergebnis von den Verfassern als die beste zur Verfügung stehende Information bezeichnet.

- 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.

*SFA* liefern als Ergebnis ein System, das aus Prozessen und Stoffströmen besteht<sup>7</sup>. Prozesse verbinden Stoffströme und beeinflussen diese durch Transport, Transformation und Lagerung; durch Recyclingströme kommt es zu Rückkopplungseffekten. Eine typische Rohstoff-Prozesskette eines *SFS* beginnt bei der Produktion eines Rohstoffes und läuft über die weiteren Prozesse Produkterzeugung (engl. *Fabrication*) und Endverbrauch bis hin zum Abfallmanagement & Recycling Prozess (s. Abb.8).



**Abb.8:** Stoffflusssystem [14]

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

Die (in Abb.8 strichliert dargestellte) Systemgrenze stellt eine räumliche wie zeitliche Einschränkung dar und umfasst die betrachteten Prozesse.

Üblicherweise werden *SFA* für einen einjährigen Zeitbereich durchgeführt.

### 2.6.1 Statistische Entropie

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 (Shannon Entropie). Schließlich wurde von Rechberger die Anwendbarkeit und Adaptierung für *SFA* gezeigt. Angewandt auf Stoffströme ist

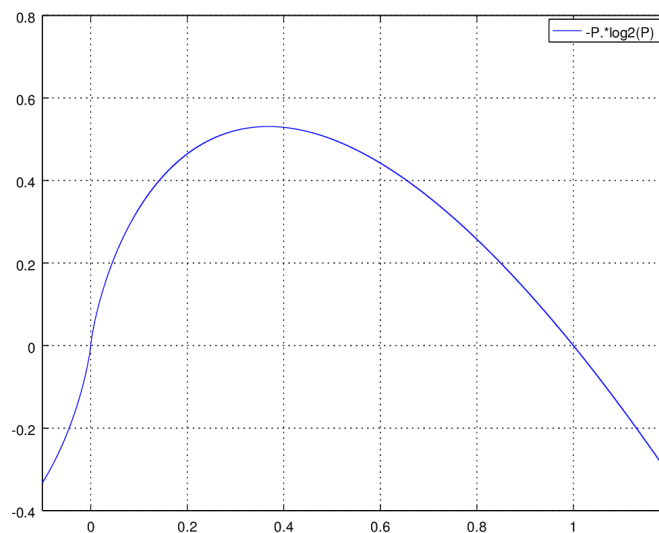
<sup>7</sup> „Stoffe/Substanzen“ können Elemente (zB. Kupfer, Chrom) oder Verbindungen (Wasser, Ferrochrom, Oxide, ...) sein. „Material“ bezeichnet Produkte oder Güter und setzt sich aus Stoffen/Substanzen zusammen. Die Verknüpfung der beiden Größen erfolgt über Konzentrationen.

die statistische Entropie ein Mittel, um die Fähigkeit eines Prozesses zur Stoffkonzentrierung oder Stoffverdünnung der untersuchten Substanz zu beschreiben.

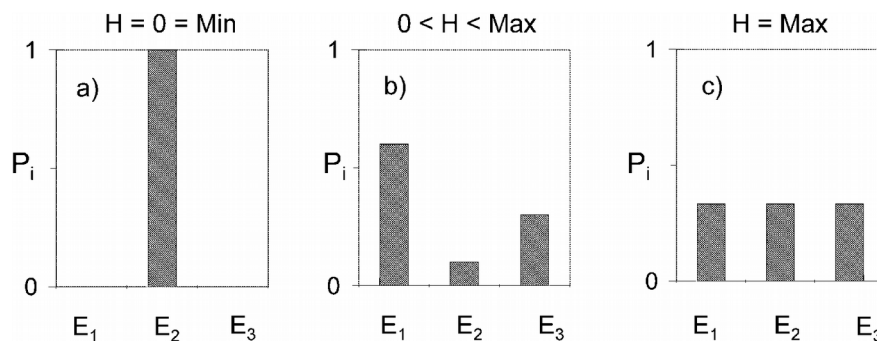
Die oben erwähnte Shannon Entropie  $H$  (Einheit bit) ist ein Maß für die Menge an Zufallsinformation, die in einer Informationsfolge steckt und ist durch die Gleichungen (12) und (13) definiert.  $P_i$  stellt die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Ereignisses  $i$  dar. Der Logarithmus zur Basis 2 von  $P_i$  (ld = Logarithmus dualis) repräsentiert den Informationsgehalt dieses Ereignisses.

$$H(P_i) = -\sum_{i=1}^k P_i \cdot \text{ld}(P_i) \geq 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^k P_i = 1 \quad (13)$$



**Abb. 9:** Kurvenverlauf von  $f(P) = -P(x) \cdot \log_2(P(x))$



**Abb. 10:** Drei ausgezeichnete Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Es ist hilfreich sich das Verhalten der Entropie für einige ausgewählte Verteilungen, wie dargestellt in Abb. 10, anzusehen. Abb. 10a zeigt zwei Ereignisse, die nie auftreten ( $P_i = 0$ ) und eines das immer auftritt ( $P_i = 1$ ). Da hier

für die Einzelereignisse  $E_i$  entweder der Informationsgehalt 0 ist ( $E_2$ ; keine Überraschung bei Auftretens des Ereignisses), oder die Eintrittswahrscheinlichkeit 0 ist ( $E_1, E_3$ ), ist auch die Entropie  $H = 0$ . Im Gegensatz dazu haben die Ereignisse in Abb. 10c alle die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit (maximale Überraschung bei Eintreten des Ereignisses). Dementsprechend nimmt  $H$  einen Maximalwert  $H_{max}$  an:

$$H_{max}(P) = -\lg(P) \quad (14)$$

### 2.6.2 Anwendung der statistischen Entropie auf Materialströme

An die Stelle der Ereignisse  $E_i$  und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten  $P_i$  treten Materialflüsse  $\dot{M}_i$  und deren Stoffkonzentrationen  $c_i$ . Eine weitere Größe ist der Stoffstrom  $\dot{X}_i$  des Stoffes  $i$ . Berücksichtigt werden müssen die im Normalfall unterschiedlichen Größen der Materialströme. Des weiteren ergibt die Summe der Stoffkonzentrationen  $c_i$  selten 1. Das führt zu folgenden Formelzusammenhängen<sup>8,9</sup> [16]:

$$\dot{X}_i = \dot{M}_i \cdot c_i \quad (15)$$

$$m_i = \frac{\dot{M}_i}{\sum_{i=1}^k \dot{X}_i} \quad (16)$$

$$H(c_i, m_i) = -\sum_{i=1}^k m_i \cdot c_i \cdot \lg(c_i) \geq 0 \quad (17)$$

Der Wertebereich für  $H(c_i, m_i)$  ist analog zur Shannon Entropie  $[0, H_{max}]$ .

Der Vergleichbarkeit wegen wird die statistische Entropie auf einen definierten Maximalwert bezogen und als „relative statistische Entropie“ ( $RSE$ ) mit einem Wertebereich von  $[0,1]$  dargestellt:

$$RSE = H_{rel}(c_i) \equiv \frac{H(c_i)}{H_{max}} \quad (18)$$

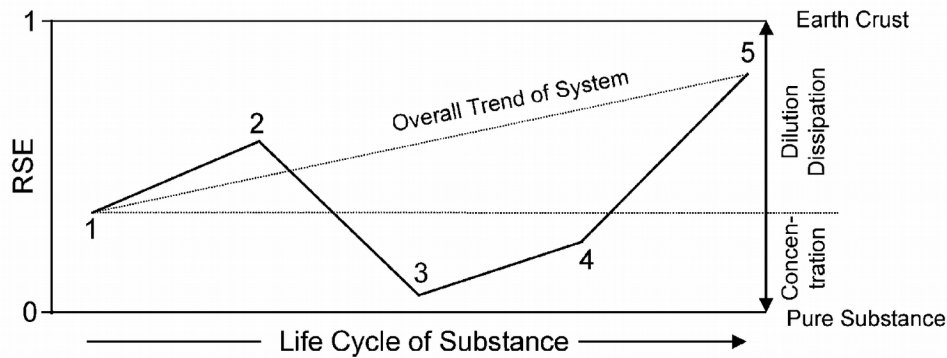
Der maximale  $RSE$ -Wert von 1 ergibt sich bei Gleichverteilung des Stoffes auf die einzelnen Stoffströme. Ist der Stoff nur in einem Stoffstrom und da in Reinform vorhanden wird der Minimalwert von 0 erhalten. Ein Vergleich der  $RSE$

8 Voraussetzung für die Gültigkeit der Formeln (15) und (17) ist die Angabe der Konzentrationen  $c_i$  als Massenbruch (zB. kg/kg oder Gt/Gt).

9 Emissionen, die von der Atmosphäre oder von Gewässern aufgenommen werden, stellen Spezialfälle dar, für deren Behandlung auf [16] verwiesen sei.



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. Eine Verdünnung des Stoffes führt zu einer positiven Änderung ( $H_{rel,INPUT} < H_{rel,OUTPUT}$ ), eine Konzentration zu einer negativen ( $H_{rel,INPUT} > H_{rel,OUTPUT}$ )<sup>10</sup>.



**Abb. 11:** Verlauf der relativen statistischen Entropie entlang der Prozesskette [14]

Mit Formel (19) sei die Stoffkonzentrierungseffizienz  $SKE$  definiert, die die Fähigkeit eines Prozesses oder Systems zur Konzentrierung eines Stoffes quantifizierbar macht:

$$SKE = SCE \equiv \frac{H_{rel,INPUT} - H_{rel,OUTPUT}}{H_{rel,INPUT}} \cdot 100 \quad (19)$$

Angewandt auf die gesamte Prozesskette führt Formel (19) zu:

$$\Delta RE_{total} = \Delta RE_{15} = \frac{RE_5 - RE_1}{RE_1} \cdot 100\% \quad (20)$$

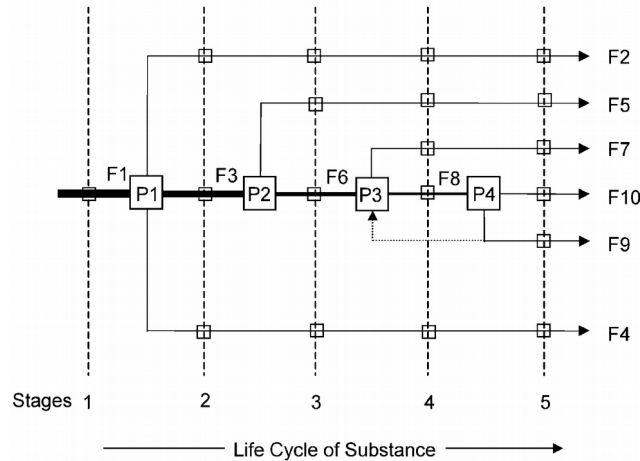
Ist  $\Delta RE_{total} > 0$  wird der Stoff innerhalb des Stoffsystems verdünnt, ist  $\Delta RE_{total} < 0$  wird der Stoff entlang der Prozesskette aufkonzentriert.

Zu erwähnen ist, dass Stoffkonzentrationen der Materialströme nicht zwingend Teil bereits durchgeführter  $SFA$  sind und gegebenenfalls eine Erweiterung um eben diese Konzentrationen notwendig ist. Das kann sich je nach Datenlage recht aufwendig gestalten.

10 An sich sinkt die  $RSE$  im Falle der Aufarbeitung der Eingangsstoffströme in sowohl höher als auch niedriger konzentrierte Ausgangsstoffströme. Das gilt allerdings nur, solange sich die Größe der Materialströme nicht ändert. Der Versuch die Senkung der Entropie infolge von Verdünnung durch Materialzufuhr zu erreichen („the solution for pollution is dilution“), führt indes genau zum Gegenteil – die Entropie steigt (sh. Glg. (17)).

### 2.6.3 Anwendung der SEA auf Stoffflusssysteme (SFS)

Hier wird das Konzept der „Stages“ eingeführt. Diese stellen Schnittstellen zwischen den Prozessen dar und erfassen die, durch sie transformierten, Materialströme (Abb. 12).



**Abb. 12:** Stages definieren Materialstrom-Sets

Diese Sets werden zur Berechnung der RSE herangezogen. Für  $n$  Prozesse ergeben sich so  $n+1$  Stages.

Für das Set an erfassten Strömen einer Stage wird die RSE berechnet und für alle Stages durchgeführt ergibt das in weiterer Folge einen RSE-Verlauf wie zB. in Abb. 11 dargestellt.

Die erste Schnittstelle ist durch die Eingangsströme festgelegt (Materialstrom F1 in Abb.8). Die weiteren Stages (2-5 in Abb. 12) werden durch die Prozess-Ausgangsströme bestimmt. Eine Stage  $i$  erfasst den Ausgangsstrom von Prozess  $i-1$  und alle, nicht weiter vom System transformierten, Ausgangsströme der Prozesse davor. Solche Ströme sind Exportströme und Ströme in Lager. Recycling-Ströme werden als Exportströme behandelt. Sie beeinflussen den RSE-Verlauf der Prozesskette insofern, als die, die Entropie erhöhenden Ausschuss-Materialströme (Abraum, Schlacke, Emissionen, ...) entsprechende des Recyclingstromes geringer sind.

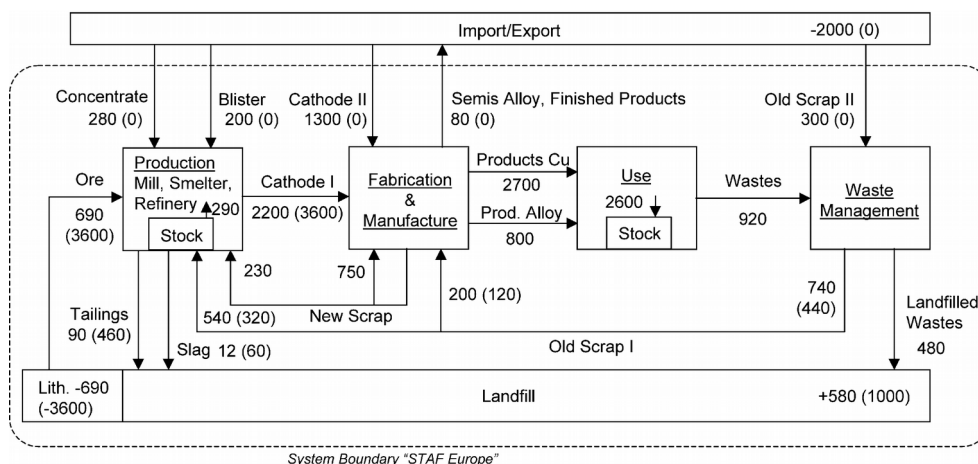
Weil  $H_{max}$  für die einzelnen Stages unterschiedlich ist, wird jene Entropie, die bei Erreichen einer durchschnittlichen Erdkrusten-Konzentration erreicht wird, als  $H_{max}$  festgelegt:

$$H_{max} = ld\left(\frac{1}{c_{EC}}\right) \quad (21)$$

Man erhält also, ausgehend von Materialströmen, die in den Produktionsprozess eintreten, in Form der Änderung der RSE eine Darstellung der Transformationen der Eingangs-Materialströme entlang der Prozesskette.

### 2.6.4 SEA und Recycling am Beispiel Kupfer [14]

Die dem Abschnitt zugrunde liegende SEA wurde 2002 publiziert. Die Daten für die SFA stammen aus dem Jahr 1994 und beschreiben den Kupferhaushalt Europas (Abb. 13).



**Abb. 13:** Kupferflüsse Europas im Jahr 1994 in Gg/y [14]

Die in Klammern angegebenen Cu-Ströme beschreiben ein versorgungsunabhängiges Szenario.

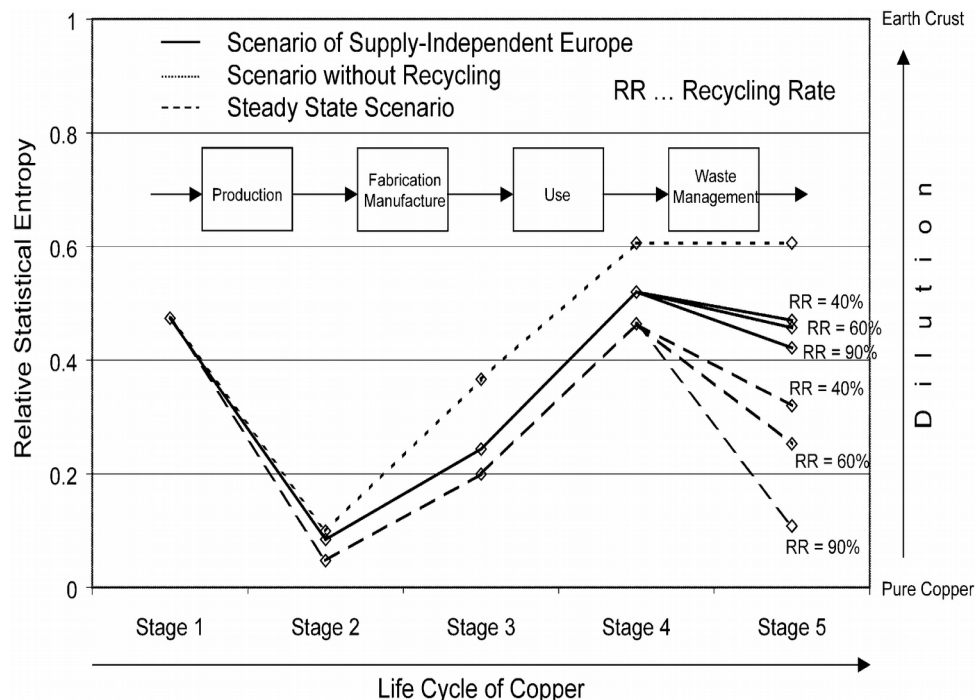
Der in Abb. 14 dargestellte RSE-Verlauf<sup>11</sup> stellt ein **schönes** Beispiel für einen Rohstoff dar, der hauptsächlich in relativ reiner Form benötigt wird. Dementsprechend führt der Produktionsprozess (Erz → Kupfer) zu einer starken Abnahme der RSE<sup>12</sup>. Die folgende Fabrikation von Halbzeug und Konsumgütern sorgt für einen deutlichen Anstieg der RSE. Eine weitere Verdünnung erfolgt durch die Übernahme in den Gebrauch und die Integration in die Infrastruktur, also das anthropogene Lager. Die Abtrennung des Kupfers im Abfallwirtschafts-Prozess bewirkt ein leichtes Sinken der RSE auf etwa das Niveau des Ausgangspunktes. Das System als gesamtes deckt gut die Hälfte des möglichen RSE-Bereiches ab.

In Abb. 14 sind für verschiedene Szenarien die Auswirkungen des Recyclings auf die RSE ersichtlich. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass Recycling jedenfalls ein Absenken der RSE zur Folge hat, da es im Zuge der Abtrennung und Aufbereitung des betrachteten Rohstoffes aus dem Abfallstrom im Normalfall zu einer **Aufkonzentrierung** kommt. Da im gegenständlichen Fall jedoch nur geringe Mengen an Kupfer den Abfallwirtschaftsprozess erreichten wäre auch ein hocheffizientes Abfallmanagement mit einer *EoL*-Recyclingrate von 90% nicht in der Lage gewesen den RSE-Wert entscheidend zu verbessern (durchgezogene Linie in Abb. 14). Wenn in Zukunft verstärkt auf die anthropogenen Lager zurückgegriffen wird, sich das gesamte System also in Richtung Nachhaltigkeit

<sup>11</sup> Importe und Exporte der SFA wurden herausgerechnet um ein versorgungsunabhängiges Europa darzustellen.

<sup>12</sup> Durch den Anfall von Schlacke und Abraum erreicht die RSE nicht 0.

und geschlossenen Kreislauf bewegt (Steady state scenario in Abb. 14), wird eine höhere Recyclingrate auch deutlich größeren Einfluss zeigen. Bei völligem Verzicht auf Recycling würden alle *RSE*-Werte höher sein (punktierte Linie in Abb. 14).



**Abb. 14:** Verlauf der *RSE* für Cu entlang des *SFS* [14]

Erwähnenswert ist auch die deutliche Erhöhung der Recyclingeffizienz und damit des *RSE* durch importierten Schrott (nicht in der Grafik dargestellt).

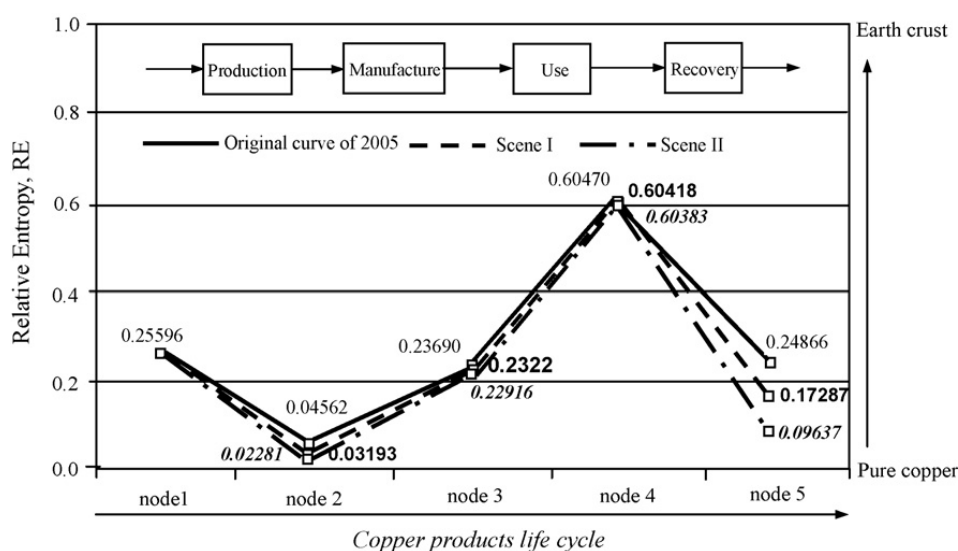
### 2.6.5 Weitere Aspekte anhand Chinas *Cu*-System [22]

Um zwei wesentliche Punkte der *SEA* zu beleuchten, nämlich die Problematik der Vergleichbarkeit und das Potenzial als Vergleichswerkzeug, wird in Folge eine Studie vorgestellt, die ebenfalls für Kupfer und nach der gleichen Methode (Rechberger) wie für das europäische *Cu*-System von 1994 durchgeführt wurde. Q. Yue hat für die Jahre 2002 und 2005 in Form einer *SEA* das *Cu*-System Chinas analysiert. In weiterer Folge wurden sowohl die Ergebnisse der beiden Jahre miteinander, als auch der *RSE*-Verlauf mit dem des europäischen Systems verglichen. Interessant ist vor allem zweiteres<sup>13</sup>. Betrachtet man ausschließlich das Ergebnis, lässt sich eine deutliche Abweichung zu [14] feststellen, die nicht nur den regionalen (und zeitlichen) Unterschieden geschuldet ist und ein Beispiel für die bereits angesprochene Problematik der Vergleichbarkeit darstellt. Im Unterschied zur *SEA* für das Europa von 1994 wo ein Datensnapshot betrachtet wird, verfolgt diese Studie eine zu einem bestimmten Zeitpunkt produzierte

<sup>13</sup> Beim Vergleich der Jahre 2002 und 2005 zeigte sich, dass die Entropiewerte für das Jahr 2005, unter anderem aufgrund geringerer Abraum- und Schlackeströme, durchwegs geringer ausfielen. Details dazu sh. [22].

Menge Kupfer entlang der Prozesskette. Dadurch fällt die durch Füllung des Endverbrauchslager bedingte Reduktion der Abfallströme weg und die entropiesenkenden Auswirkungen des W&M Prozesses kommen verstärkt zu Tragen. Hier wäre eine Normierung der Methode empfehlenswert.

Weiters wurden zwei fiktive Szenarien behandelt um die Sensibilität des *RSE*-Verlaufs gegenüber Effizienzsteigerungen entlang der Prozesskette darzustellen. Für beide Szenarien wurde eine Verringerung der Schlacke- und Abraum-Verluste, eine Erhöhung der Eol-RR und eine Erhöhung des *Cu*-Gehaltes im *Cu*-Schrott angenommen. Im Szenario 2 wurde im Vergleich zu Szenario 1 stärker an der Effizienzschraube gedreht. Die Ergebnisse sind in Abb. 15 dargestellt. Wie zu erwarten kommt es zu Absenkungen der Entropie an den Stages 2,3 und 5; Maßnahmen die zu einer Effizienzsteigerung führen sind klar am *RSE*-Verlauf erkennbar und zeigen das Potenzial als Vergleichswerkzeug.



**Abb. 15:** RSE-Verläufe für Cu

Erwähnenswert ist ev. noch dass Konzentrationswerte vereinzelt von [Brunner und Rechberger, 2004] übernommen wurden, was man dahingehend deuten könnte, dass Konzentrationen (wie bereits erwähnt) eine der Hürden hinsichtlich der Anforderungen an die Daten darstellt.

## 2.7 Überlegungen zur Nutzung der SEA zur Bildung eines Kritikalitätsindikators

Die folgenden Überlegungen zu einer möglichen Verwendung einer SEA als Bewertungstool zielen auf eine Integration in die weiter oben beschriebene europäische Methode der Kritikalitätsbestimmung ab. Hierbei sind die neuralgischen Punkte bei Bestimmung des Versorgungsrisikos zu finden. Da sich die SEA, sowie die Verwendung von Recyclingraten in ihrer Bedeutung

überschneiden ist zu klären, ob eine *SEA* die Nutzung von *RR* ergänzen oder ersetzen sollte. Eine *RR* ist etwas sehr Konkretes, das nur einen Aspekt berücksichtigt (wie viel bekomme ich zurück), wohingegen in der *SEA* weit mehr Information steckt, die dadurch auch einen größeren Interpretationsspielraum bietet. Betroffen wäre jedenfalls Formel (3) ( $SR_i = \sigma_i(1 - \rho_i)HHI_{WGI}$ ).

### 2.7.1 Allgemeine Aspekte

Für eine Eignung der *SEA* als Indikator muss eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen bei Berechnung für *SFS* unterschiedlicher Rohstoffe gegeben sein. In diesem Zusammenhang ist wichtig festzuhalten, dass der *RSE*-Verlauf per se keine Aussage über die Effizienz des Stoffkreislaufes zulässt. Zum Einen ist der, zum Erreichen eines *RSE*-Wertes notwendige Ressourcenaufwand (Energie, andere Rohstoffe) nicht bekannt (man sollte in marktwirtschaftlich geprägten Ökonomien allerdings schon aus Konkurrenzgründen eine gewisse wirtschaftliche Effizienz voraussetzen können). Zum Anderen ist die, für die Produktherstellung notwendige Konzentration des Rohstoffes nicht immer gleich. Gut erkennen lässt sich das anhand eines Vergleichs von Kupfer und Chrom. Im Gegensatz zu *Cu* ist bei *Cr* hohe Reinheit für die meisten Anwendungen (zB. *Cr* als Legierungselement in Edelstählen) nicht erforderlich. Hauptsächlich wird im Produktionsschritt Chromit<sup>14</sup> mit einem mittleren Chromgehalt von 30% zu Ferrochrom (*FeCr*) reduziert. Der Chromgehalt von *FeCr* liegt meist um die 60% *Cr*. *FeCr* ist hinsichtlich der Menge mit Abstand der Haupt-Chromrohstoff<sup>15</sup> [23]. Das führt zwangsläufig zu höheren *RSE*-Werten. Daraus auf eine geringere Effizienz oder eine höhere Kritikalität zu schließen wäre nicht zulässig. Ein Kritikalitätsindikator muss das jedenfalls berücksichtigen. Alternativ könnte man die *SEA* für den jeweils im Produkt relevanten Rohstoff erstellen; im Falle von *Cr* also auch für *FeCr*. Das hätte jedoch den Nachteil, dass die Anzahl der als kritisch zu beurteilenden Rohstoffe steigen würde.

Ein weiterer Aspekt ist die Berücksichtigung der Nachhaltigkeit. Man könnte meinen, dass im Sinne eines geschlossenen Kreislaufes die *RSE* der Stage 5 sich wieder der *RSE* der Stage 2 annähern müsste und das ist durchaus eine vertretbare Ansicht. Mittel dazu sind, ohne die Prozesskette und die beteiligten Ströme selbst zu ändern, wie bereits erwähnt zum einen die nachhaltige Nutzung der anthropogenen Lager und zum anderen die effiziente Rückgewinnung des Rohstoffes aus dem Abfallstrom. Nachhaltige Nutzung bedeutet hier, dass der in

14 Chromit bezeichnet, was am Weltmarkt als Chromerz verkauft und oft als  $FeO \cdot Cr_2O_3$  beschrieben wird

15 In geringeren Mengen werden noch *chemical grade ore*, *refractory ore* und Gießereisand (engl. *foundry sand*) hergestellt [23].

den Endverbrauch gelangende Materialstrom gleich groß wie der daraus in den *W&M*-Prozess eintretenden Abfallstrom ist. Weiters müsste danach getrachtet werden Abflüsse als Teil offener Recyclingketten<sup>16</sup> zu minimieren. Die Verringerung der *RSE* von Stage 5 als Kriterium für Kritikalität.

Ein Ansatz der die gerade behandelten zwei Punkte (unterschiedliche erforderliche Stoffkonzentrationen, Nachhaltigkeit) berücksichtigt wäre es möglicherweise mit relativen Werten zu arbeiten. Es ließe sich beispielsweise die *RSE* auf die geringstmögliche *RSE* beziehen. Das Kriterium könnte sein: wieweit wird mit Stage 5 die *RSE* wieder in Richtung der *RSE* von Stage 2 gebracht? Erreicht wäre das durch einen Vergleich der *SKE* von Stage 5→2 zur *SKE* von Stage 2→4.

Ein weiterer Punkt ist die nicht immer gegebene Sinnhaftigkeit der Rezyklierung bis hin zu den Ausgangsstoffen. Als Beispiel sei hier noch einmal Glas genannt: Glas wird in großem Umfang rezykliert, jedoch zB. nicht der Glasrohstoff Feldspat (indirektes Recycling). Dieser Aspekt wird auch durch Recyclingraten nicht erfasst. Das nicht stattfindende Recycling beeinflusst den Feldspat-*RSE*-Verlauf, sollte sich in diesem Fall aber idealerweise nicht negativ auf die Kritikalität auswirken. Hier ist zu hinterfragen inwieweit es durch einen sensiblen Indikator zu einer ungleichen Bewertung unterschiedlicher Stoffe kommt und für wieviel Stoffe dieser Fall in welchem Ausmaß eintritt.

Eine Grundvoraussetzung für den Einsatz zur Kritikalitätsbestimmung ist die Verfügbarkeit der *SFS* für alle relevanten Stoffe und darauf aufbauend die Durchführung der *SEA* für diese Stoffe. Eine größere Anzahl an *SEA* ist auch für die Indikator-Entwicklung notwendig, da nur so eine Praxistauglichkeit ermittelt werden kann.

## 2.8 Fazit

Gerade für die Gewährleistung wirtschaftlicher Stabilität in großen Wirtschaftsräumen sind Kritikalitätsanalysen immer mehr ein unverzichtbares Werkzeug. Sie stellen die Grundlage für längerfristige, richtungsweisende Entscheidungen dar, bzw. ermöglichen diese überhaupt. Eine der Maßnahmen,

16 Im Falle einer offenen Recyclingkette kann, im Gegensatz zur geschlossenen Recyclingkette, der rezyklierte Abfall von Produkt A nicht mehr für die Produktion von Produkt A verwendet werden, sehr wohl aber für Produkt B.

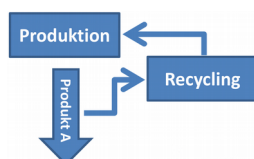


Abb. 16:  
Geschlossene  
Recyclingkette

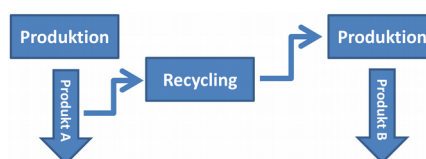


Abb. 17: Offene Recyclingkette



die Kritikalität von Rohstoffen zu senken ist Recycling. Mit dem zunehmenden Anwachsen der anthropogenen Lager, bzw. deren Nutzung wächst der Einfluss des Recyclings auf die Etablierung von nachhaltigen Stoffkreisläufen.

Die statistische Entropie ist ein Werkzeug um Konzentration und Verdünnung von Stoffen in Stoffflusssystemen zu quantifizieren und zu visualisieren. Gemeinsam mit zusätzlichen Informationen wie den Stromgrößen, dem Energieverbrauch bzw. der Effizienz und den Kosten könnte sie einen wertvollen Beitrag zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen liefern. Als große Stärke würde der Autor die Verwendung als Werkzeug zur Überprüfung und anschaulichen Darstellung der Wirksamkeit gesetzter Maßnahmen sehen, da in diesem Fall klar ist, welche Maßnahmen zu welchen Entropie-Änderungen geführt haben.

## 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., Harper E.M., Nassar N.T., Nuss P., Reck B.K.: *Criticality of metals and metalloids*, Center for Industrial Ecology, Yale University, New Haven, 2015
- [10] 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 – Supporting Information*. Environ. Sc. and Tech., 2012
- [11] 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
- [12] Graedel T.E., Erdmann L.: *Will metal scarcity impede routine industrial use?* MRS Bulletin Volume 37, April 2012.
- [13] Reuter M. A., Hudson C., van Schaik A., Heiskanen K., Meskers C., Hagelüken C.: *Metal Recycling – Opportunities, Limits, Infrastructure*. UNEP, International Resource Panel, 2013
- [14] Rechberger H., Graedel T.E.: *The contemporary European copper cycle*. Ecological Economics 42, pp. 59-72, 2002
- [15] 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
- [16] Rechberger H., Brunner P.: *A new, entropy based method to support waste and resource management decisions*. Environ. Sc. and Tech. 36, pp. 809-816, 2002
- [17] Johnson J., Schewel L., Graedel T.E.: *The Contemporary Anthropogenic Chromium Cycle*. Environ. Sc. and Tech. 40/22, pp. 7060 - 7069, 2006a
- [18] Hatch G.P.: *Critical Rare Earths: Global supply & demand projections and the leading contenders for new sources of supply*. Technology Metals Research, LLC, 2011
- [19] Bauer D., Diamond D., Li J., McKittrick M., Sandalow D., Telleen P.: *CRITICAL MATERIALS STRATEGY*. U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011
- [20] Kara H., Chapman A., Crichton T., Willis P., Morley N.: *Lanthanide Resources and Alternatives*, Oakdene Hollins, 2010
- [21] Wouters H., Bol D.: *Material Scarcity*, Stichting Materials innovation institute (M2i), 2009
- [22] Yue Q., Lu Z.W., Zhi S.K.: *Copper cycle in China and its entropy analysis*, Resources, Conservation and Recycling 53 p.680-687, 2009
- [23] Jeremiah J., Schewel L., Graedel T.E.: *The Contemporary Anthropogenic Chromium Cycle*. Environ. Sc. and Tech. 40/22, pp. 7060 - 7069, 2006