

## Endbericht

DBU-Projekt: Nr. 30438

### Nachhaltige Ressourcenstrategien in Unternehmen:

Identifikation kritischer Rohstoffe und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen  
zur Umsetzung einer ressourceneffizienten Produktion

A. Tuma, A. Reller, A. Thorenz, C. Kolotzek, C. Helbig

Augsburg, Dezember 2014

Verantwortlicher Ansprechpartner: Prof. Dr. Axel Tuma  
Straße: Universitätsstr. 2  
PLZ / Ort: 86159 Augsburg  
Telefon: +49 (0) 821/ 598 4358  
Fax: +49 (0) 821/ 598 4353  
E-Mail: axel.tuma@wiwi.uni-augsburg.de  
Webseite: www.uni-augsburg.de/pscm

#### Projektpartner:

- Lehrstuhl für Production & Supply Chain Management der Universität Augsburg, Prof. Dr. Axel Tuma, Universitätsstr. 2, 86159 Augsburg
- Lehrstuhl für Ressourcenstrategie der Universität Augsburg, Prof. Dr. Armin Reller, Universitätsstr. 1 a, 86159 Augsburg
- BMK electronic solutions GmbH & Co. KG, Werner-von-Siemens-Str. 6, 86159 Augsburg
- LST Laser & Schalttechnik GmbH, Bahnhofstraße 44, 72639 Neuffen

#### Fachbeirat/Kooperationspartner:

- Framo Morat GmbH & Co. KG, Franz-Morat-Straße 6, 79871 Eisenbach
- Robert Bosch GmbH (Corporate Office Sustainability, Design for Environment), Postfach 10 60 50, 70049 Stuttgart
- Remondis Industrie Service GmbH & Co. KG, Heerstr. 29-43, 44563 Herne
- Prof. Dr. Bernd Wagner, Wissenschaftszentrum Umwelt der Universität Augsburg, Universitätsstr. 1 a, 86159 Augsburg

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>30348</b>	Referat	Fördersumme	<b>124.900€</b>
<b>Antragstitel</b>	<b>Nachhaltige Ressourcenstrategien in Unternehmen: Identifikation kritischer Rohstoffe und Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zur Umsetzung einer ressourceneffizienten Produktion</b>			
<b>Stichworte</b>	Identifikation kritischer Rohstoffe, Kritikalitätsbewertung, Ressourcenstrategie, Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX)			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
<b>18 Monate</b>	<b>01.04.2013</b>	<b>30.09.2014</b>	<b>1</b>	
Endbericht	Bis 31.12.2014			
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Universität Augsburg Lehrstuhl für Production & Supply Chain Management (Prof. Dr. Axel Tuma)		Tel	0821-598-4358
			Fax	0821-598-4353
	Universitätsstr. 2 86159 Augsburg		Projektleitung Dr. Andrea Thorenz	
			Bearbeiter Christoph Kolotzek	
<b>Kooperationspartner</b>	Lehrstuhl für Production & Supply Chain Management (Universität Augsburg) Lehrstuhl für Ressourcenstrategie (Universität Augsburg) BMK electronic solutions GmbH & Co. KG, Augsburg LST Laser- und Schalttechnik GmbH & Co. KG, Neuffen			

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

**Technologieunternehmen** sind auf die Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe auf besondere Weise angewiesen. So enthalten funktionale Baugruppen, wie sie z.B. in Steuergeräten oder elektronischen Schaltungen verbaut sind, heute **bis zu 60 verschiedene Elemente**. Die **Verfügbarkeit** entsprechender Rohstoffe ist oftmals **begrenzt**, ihr Vorkommen auf wenige Regionen beschränkt. Darüber hinaus ist die Förderung und Verarbeitung der Rohstoffe mit signifikanten ökologischen und sozialen Risiken verbunden. Aufgrund der üblicherweise niedrigen Wertschöpfungstiefe haben aber insbesondere **technologieorientierte KMUs** oftmals keine oder unvollständige Kenntnisse über die Zusammensetzung ihrer Produkte. Selbst wenn diese Informationen bekannt sind, so ist die Bewertung der **Kritikalität** der Rohstoffe aufgrund ihres mehrdimensionalen (**ökonomische, ökologische und soziale Kriterien**) und dynamischen Charakters (Erschließung neuer Fördergebiete) oftmals unzureichend.

Vor diesem Hintergrund wurde im Projekt ein **Leitfaden konzipiert**, der **Unternehmen** erstmals auf der Basis des **Standes der Wissenschaft zur Kritikalitätsforschung** in die Lage versetzt, ihre derzeitige Produktionssituation hinsichtlich der **Rohstoffrisiken zu bewerten** und entsprechende **Absicherungsmaßnahmen** zu treffen. Er umfasst sowohl Vorschläge zur organisatorischen Umsetzung einer Kritikalitätsanalyse im Unternehmen als auch ein Vorgehensmodell zu deren inhaltlichen Umsetzung. Darüber hinaus wird **erstmalig ein umfassendes Konzept** zur Kritikalitätsbewertung vorgestellt, das neben **ökonomischen auch ökologische und soziale Kriterien** umfasst.

## **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Der im Projektantrag dargelegte Arbeitsplan zur Umsetzung der Projektziele enthält vier Arbeitspakete. Gegenstand von Arbeitspaket 1 ist die Konzeption eines **Kritikalitätsassessments**, welches einen Bewertungsrahmen für die einzelnen Bauteile bzw. die darin enthaltenen Rohstoffe umfasst. Ziel des Arbeitspakets 2 ist die Erarbeitung eines **Vorgehensmodells zur Identifikation potentiell kritischer Inhaltsstoffe**. Dieses beinhaltet sowohl die Analyse betrieblicher Daten (Materialstammdaten, Stücklisten, Datenblätter einzelner Bauteile) als auch überbetrieblicher Daten (Rechercharbeit in Fachliteratur, Internet und Datenbanken) sowie Laboruntersuchungen. Gegenstand des Arbeitspakets 3 ist die **Diskussion von Handlungsalternativen zur Reduktion des Rohstoffrisikos**. Arbeitspaket 4 umfasst die Evaluierung, Präsentation und Dokumentation des Projekts.

## **Ergebnisse und Diskussion**

Die Projektstudie hat gezeigt, dass insbesondere für **KMUs eine Unterstützung bei der Umsetzung einer nachhaltigen Ressourcenstrategie essentiell** ist. Vor diesem Hintergrund bietet der erarbeitete Leitfaden technologieorientierten KMUs erstmals die Möglichkeit **auf Basis des aktuellen Standes der Kritikalitätsforschung** ihre ressourceninduzierten Risiken zu adressieren. Prinzipiell ergeben sich vier Aufgaben bzw. Herausforderungen für die Unternehmen. Zunächst sind im Rahmen einer **Vulnerabilitätsanalyse die strategischen Produkte zu identifizieren**. Die folgende Identifikation der Inhaltsstoffe der selektierten strategischen Produkte, Baugruppen und Technologien ist abhängig von der Marktmacht und Verortung des Unternehmens in der Supply Chain eine anspruchsvolle Aufgabe. Sie erfordert oftmals eine **Klassifikation der potentiell kritischen Bauteile** zur Komplexitätsreduktion. Sind die **Inhaltsstoffe nicht aus ERP-Daten ersichtlich, erfordert die Inhaltsstoffanalyse aufwendige Rechercharbeit bzw. Laboranalysen oder den Zugang zu kostenpflichtigen Datenbanken**. Dabei hat sich gezeigt, dass die aus Datenblättern oder Rechercharbeit gewonnenen Informationen hinsichtlich der Vollständigkeit den Laboranalysen bzw. der Datenbankrecherche unterlegen sind. Mit dem im Projekt erarbeiteten **Kritikalitätsassessment** steht den Unternehmen erstmals ein **quantitatives Bewertungsinstrument** zur Verfügung, welches **alle Nachhaltigkeitsdimensionen** umfasst. Der Analysegegenstand beschränkt sich zunächst im Wesentlichen auf Technologiemetalle. Die Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass die Methodik auch auf andere Stoffe, wie das Edelgas Helium, übertragbar ist. Bezüglich einer Übertragung der Methodik auf Nichtmetalle besteht noch Forschungsbedarf. Für die Bewertung von Bauteilen, die aus mehreren potentiell kritischen Elementen bestehen, werden verschiedene Aggregationsansätze evaluiert. Die Auswahl potentieller Handlungsoptionen zur Reduzierung des Rohstoffrisikos ist sehr unternehmensspezifisch. Die untersuchten Praxisfälle zeigen, dass effiziente einzelfallbezogene Lösungen relativ schnell gefunden werden können.

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Im Rahmen des Projektes wurden **vier Workshops** mit den Projektpartnern durchgeführt: am 23. April 2013 als Auftakt-Veranstaltung an der Universität Augsburg, am 24. Oktober 2013 bei der BMK solutions GmbH & Co. KG in Augsburg, am 1. Juli 2014 als Zwischenpräsentation an der Universität Augsburg sowie einen Abschlussworkshop am 25. November 2014 in der IHK Schwaben. Der Start des Projektes sowie der Abschlussworkshop wurden von der Presseabteilung der Universität Augsburg in Form von Pressemeldungen intern bzw. extern an die Medien verteilt. Ferner wurden die Ergebnisse auf dem „**Münchener Rohstoff-Frühstück**“ unter anderem vor Vertretern der Siemens AG, der Osram GmbH, der Wacker Chemie AG, der BMW AG und der Infineon AG sowie einem Vertreter der Rohstoffallianz GmbH am 15. Oktober 2013, 4. Februar 2014 und am 3. Juni 2014 diskutiert. Auf dem Abschlussworkshop wurden die Projektergebnisse mit Unternehmensvertretern der Region diskutiert. Am 26. November 2014 erfolgte eine Präsentation vor dem Zukunftskreis der IHK Schwaben. Die gewonnenen Ergebnisse wurden auf wissenschaftlicher Ebene auf den **Fachtagungen** „Green Electronics“ in Budapest (4.-6. November 2013), „EcoBalance“ in Tsukuba (27.-30. Oktober 2014, Japan) sowie auf der „Re-Source“ in Wien (4.-6. Dezember 2014) erörtert. Am 7. Januar 2015 werden die Endergebnisse auf der **Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 2015** präsentiert, zu der eine wissenschaftliche Publikation in den Proceedings erscheinen wird. In Kooperation mit dem Graduiertenkolleg „Ressourcenstrategische Konzepte für zukunftsfähige Energiesysteme (gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst)“ erschien der Artikel „Geopolitical Supply Risk of Raw Materials in Life Cycle Sustainability Assessments“ im **Journal of Industrial Ecology**. Es ist geplant, weitere Publikationen in hochrangigen Journals einzureichen.

## **Fazit**

Alle Projektziele wurden erreicht. Vor dem Hintergrund der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse ergibt sich weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf in 1.) Distribution, Evaluation und Adaption der Methodik auf weitere Unternehmen und Branchen, 2.) der **Erweiterung des Kritikalitätsassessments** hinsichtlich der zu bewertenden Stoffe auf **Nichtmetalle** und 3.) der **Erweiterung des Kritikalitätsassessments um weitere ökologische und soziale Indikatoren** (insbesondere Bewertung **dissipativer Verluste** im Wertschöpfungsprozess).

# Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>II.</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>III.</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Zusammenfassung der Projektergebnisse</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Einführung und Motivation</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>Vorgehensweise und Projektablauf</b> .....	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>Projektergebnisse</b> .....	<b>15</b>
4.1	Verfahren zur Umsetzung einer Vulnerabilitätsanalyse .....	17
4.2	Vorgehensweise zur Identifikation der Inhaltsstoffe .....	19
4.3	Methodik zur Bewertung der Rohstoffkritikalität.....	24
4.3.1	Ökonomische Kritikalitätsbewertung .....	26
4.3.1.1	Auswahl relevanter Indikatoren.....	26
4.3.1.2	Kategorisierung und Gewichtung der Indikatoren .....	30
4.3.2	Ökologische Kritikalitätsbewertung.....	33
4.3.3	Soziale Kritikalitätsbewertung .....	36
4.3.4	Strukturbaum zur Kritikalitätsbewertung.....	39
4.3.5	Aggregationsproblematik auf Produktebene .....	41
4.4	Bewertung betrieblicher Handlungsoptionen .....	44
4.4.1	Betriebswirtschaftliche Handlungsoptionen .....	45
4.4.2	Substitution als Handlungsoption .....	46
4.4.3	Kreislaufwirtschaft als Handlungsoption .....	47
4.4.4	Auswahl rohstoffbezogener Handlungsoptionen .....	48
4.5	Fallstudien mit den Praxispartnern .....	50
4.5.1	Funktionssubstitution am Anwendungsbeispiel BMK .....	51
4.5.2	Betriebswirtschaftliche Absicherung am Beispiel LST .....	55
<b>5</b>	<b>Veröffentlichungen und Vorträge</b> .....	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b> .....	<b>58</b>
<b>IV.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>60</b>
<b>V.</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>66</b>
V.1	Foliensatz des Leitfadens.....	66
V.2	Bauteilanalyse.....	77
V.3	Expertenfragebogen .....	85
V.4	Exemplarische Ergebnisse der Bauteilanalyse im Überblick.....	91

## I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Detaillierter Projektarbeitsplan .....	13
Abbildung 2: Projektstruktur .....	14
Abbildung 3: Methodik zur Umsetzung einer nachhaltigen Ressourcenstrategie.....	15
Abbildung 4: Reihenfolge der Prozessschritte im Überblick.....	15
Abbildung 5: Fragestellungen im Rahmen einer Vulnerabilitätsanalyse .....	17
Abbildung 6: Vorgehensmodell zur Vulnerabilitätsanalyse .....	18
Abbildung 7: Datenquellen zur Identifizierung von Inhaltsstoffen.....	19
Abbildung 8: Bewertung der Analyseinstrumente zur Identifikation von Inhaltsstoffen .....	20
Abbildung 9: Analysemöglichkeiten in Abhängigkeit der Verortung in der Supply Chain .....	21
Abbildung 10: Beispielhafte Zerlegung eines Tantalkondensators .....	23
Abbildung 11: Vollständiges Set von 27 Verfügbarkeitsindikatoren .....	28
Abbildung 12: Kategorisierung der ökonomischen Indikatoren .....	30
Abbildung 13: Strukturbaum für die Kritikalitätsbewertung eines Rohstoffes.....	39
Abbildung 14: Aggregationsproblematik bei der Bewertung komplexer Bauteile .....	41
Abbildung 15: Kreislaufwirtschaftsstrategien.....	48

## II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ergebnisse der EDX-Referenzmessung .....	22
Tabelle 2:	Ergebnisse der detaillierten Analyse eines Tantalkondensators .....	23
Tabelle 3:	Kritikalitätsstudien von 2006 bis 2014.....	25
Tabelle 4:	Kritikalitätsindikatoren aus den 19 untersuchten Kritikalitätsstudien .....	27
Tabelle 5:	Ökonomische Indikatoren .....	29
Tabelle 6:	Ergebnismatrix aller paarweisen Vergleiche .....	32
Tabelle 7:	Indikatorengewichtung.....	32
Tabelle 8:	Rangfolge der ökonomischen Indikatoren.....	33
Tabelle 9:	Bewertung der ökologischen Kritikalität am Beispiel von Gold.....	35
Tabelle 10:	Ergebnisse des Life Cycle Impact Assessments von Gold (ecoinvent Centre 2010). ..	36
Tabelle 11:	Die zehn Grundsätze des UN Global Compact .....	38
Tabelle 12:	Indikatoren zu den fünf quantifizierbaren Grundsätzen des UN Global Compact.....	39
Tabelle 13:	Bestimmung des Kritikalitäts-Index für den $(Nd,Dy)_2Fe_{14}B$ -Magneten mittels linearer Aggregation .....	43
Tabelle 14:	Bestimmung des Kritikalitäts-Index für den $(Nd,Dy)_2Fe_{14}B$ -Magneten mittels multiplikativer Aggregation .....	44
Tabelle 15:	Handlungsempfehlungen für Unternehmen .....	49
Tabelle 16:	Studien zu unternehmensspezifischen Handlungsoptionen .....	50
Tabelle 17:	Identifikation der Inhaltsstoffe eines Keramikcondensators.....	52
Tabelle 18:	Ökonomische Bewertung alternativer Kondensatoren .....	53
Tabelle 19:	Ökologische Bewertung alternativer Kondensatoren .....	54
Tabelle 20:	Soziale Bewertung alternativer Kondensatoren.....	54
Tabelle 21:	Ergebnisse aller drei Dimensionen der Kritikalitätsbewertung .....	55

### III. Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytical Hierarchy Process
BMK	BMK electronic solutions GmbH & Co. KG
CDX	Compliance Data Exchange
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ERP	Enterprise Resource Planning
FB	Fachbeirat
HDI	Human Development Index
HHI	Herfindahl-Hirschman-Index
IHS	Information Handling Services bzw. IHS Global Inc.
IMDS	International Material Data System
IT	Informationstechnologie
JRC	Joint Research Centre
KMU	Klein- und Mittelständisches Unternehmen
KV	Konsistenzverhältnis
LCA	Life Cycle Analysis
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LED	Light Emitting Diode
LST	LST Laster & Schalttechnik GmbH
PPI	Policy Potential Index
UA	Universität Augsburg
UNDP	United Nations Development Program
UNICEF	United Nations Children's Fund
USGS	United States Geological Survey
WGI	Worldwide Governance Indicators
WGI-PV	Worldwide Governance Indicators: Political Stability and Absence of Violence/Terrorism

## 1 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Material- und Ressourceneffizienz entwickelt sich zunehmend zu einem zentralen Kosten- und Erfolgsfaktor für die Industrie. Existierende und vermutete Knappheiten bestimmter Rohstoffe, steigende Materialkosten und die **Abhängigkeit Deutschlands** von Importen vieler Rohstoffe tragen dazu bei. Dies gilt in besonderem Maße für Unternehmen, deren Produkte von **Technologiemetallen** wie Indium, Gallium oder Seltenen Erden abhängen. Das **aktuelle Produktdesign** führt einerseits zu **strategischen Risiken, vermeidbaren Kosten** und damit zu einer **reduzierten Wettbewerbsfähigkeit**, andererseits ist die aktuelle Produktionsweise auch mit erheblichen **Umweltbelastungen** bei der Förderung und Veredelung entsprechender Rohstoffe sowie der Herstellung von Materialien und Vorprodukten verbunden. Gerade Klein- und Mittelständischen Unternehmen (**KMUs**) fehlt oftmals das Wissen, welche Rohstoffe in ihren Bauteilen enthalten sind, wie deren Verfügbarkeit zukünftig zu beurteilen ist und welche **Strategien zur Sicherung der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit** geeignet sind.

Vor diesem Hintergrund hat das **Resource Lab der Universität Augsburg** in Zusammenarbeit mit namhaften **Technologieunternehmen** und mit Unterstützung der „**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**“ einen Leitfaden zur Umsetzung nachhaltiger Ressourcenstrategien in Unternehmen entwickelt. Der Leitfaden ist so konzipiert, dass er Unternehmen in die Lage versetzt, ihre aktuelle Produktionssituation hinsichtlich der **Rohstoffabhängigkeit bzw. der Kritikalität** der eingesetzten **Rohstoffe** zu analysieren und entsprechende Maßnahmen zu treffen. Für tieferegehende Analysen sind spezielle Beratungsangebote bereitzustellen. Diese umfassen **laboranalytische Verfahren** (z.B. Bestimmung der Inhaltsstoffe von Bauteilen mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie), detaillierte **Kritikalitätsbewertungen** sowie Unterstützung zur Auswahl von Maßnahmen zur **Erhöhung der Ressourceneffizienz**.

Der entwickelte Leitfaden umfasst sowohl Vorschläge zur **organisatorischen Umsetzung** einer umfassenden **Kritikalitätsanalyse** im Unternehmen als auch ein **Vorgehensmodell** zu deren **inhaltlichen Umsetzung**. Letzteres besteht aus drei Schritten:

- Zunächst werden im Rahmen der **Vulnerabilitätsanalyse** die strategischen Produktgruppen des betrachteten Unternehmens bzw. die darin enthaltenen

Bauteile und, soweit unmittelbar ersichtlich, die Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe ermittelt. Kriterien hierfür sind etwa der Produktgruppenerlös, das unternehmensspezifische Alleinstellungsmerkmal oder das Zukunftspotential entsprechender Produkte. Zur Reduktion der Komplexität für die folgende Ermittlung der Inhaltsstoffe/Technologiemetalle werden die Baugruppen in Klassen potentiell gleicher Inhaltsstoffe unterteilt. Als Leitkriterium hat sich hierbei die **Funktion** herauskristallisiert. Repräsentanten der Klassen werden anschließend detailliert mit dem Ziel der **Identifikation strategischer Technologierohstoffe** untersucht. Hierzu werden Informationen aus den ERP-Systemen, Datenblättern sowie externen Datenbanken und laboranalytischen Verfahren (EDX-Analyse) herangezogen.

- In einem **zweiten Schritt** wird die Kritikalität der Bauteile bzw. der enthaltenen Technologiemetalle bewertet. Die Bewertung der **Rohstoffkritikalität** für die identifizierten Technologiemetalle umfasst drei Dimensionen. Auf **ökonomischer Ebene** erfolgt eine **Bewertung der Marktkonzentration** (Konzentration der Förderländer, Konzentration der Explorations- und Refiningunternehmen), **der politischen Stabilität, der zukünftigen Verfügbarkeit** (statische Reichweite der Reserven, statische Reichweite der Ressourcen, End-of-Life-Recyclingraten) und der **Nachfrageentwicklung** (Nachfrageanstieg durch Zukunftstechnologien, Substituierbarkeit, Koppelproduktion). Auf **ökologischer Ebene** werden gemäß des Standes der Wissenschaft die Auswirkungen der Förderung, Veredelung und Verwendung der Rohstoffe auf die **menschliche Gesundheit** entlang den Subkategorien „Human Toxicity“, „Climate Change“, „Ionising Radiation“, „Ozone Depletion“, „Particulate Matter Formation“ und „Photochemical Oxidant Formation“ sowie die **Wirkung auf die Biodiversität** entsprechend der Teilkategorien „Agricultural Land Occupation“, „Climate Change“, „Freshwater Ecotoxicity“, „Freshwater Eutrophication“, „Marine Ecotoxicity“, „Urban Land Occupation“, „Terrestrial Ecotoxicity“, „Terrestrial Acidification“ und „Natural Land Transformation“ analysiert. Die **soziale Bewertung** umfasst Indikatoren zur Messung von Kinderarbeit, Korruptionskontrolle und dem Recht auf freie Meinungsäußerung.

Zur Gewährleistung der Praktikabilität der Kritikalitätsbewertung auf Rohstoffebene werden die Indikatoren so ausgewählt, dass die erforderlichen Daten überwiegend aus öffentlich zugänglichen Datenbanken extrahiert werden können. Datenquellen für die ökonomischen Indikatoren sind das „**U.S. Geological Survey**“ und die **Weltbank**. Die Daten zur ökologischen Bewertung können der „**ecoinvent**“-Datenbank entnommen werden. Die soziale Bewertung beruht auf Daten der **Weltbank** bzw. auf Daten des Unternehmens **Maplecroft**.

Zur **Aggregation** der vier **ökonomischen Teilkriterien** (Konzentrationsrisiko, Politisches Risiko, Angebots- und Nachfragerisiko) bzw. deren Indikatoren wird ein **AHP-Ansatz (Analytical Hierarchy Process)** vorgeschlagen. Die entsprechenden Gewichtungsfaktoren wurden in interdisziplinären Expertenworkshops bzw. durch Expertenbefragung ermittelt. Die **ökologischen Teilkriterien bzw. Indikatoren** werden gemäß dem Stand der Wissenschaft auf Basis der **ReCiPe-Methode** auf sogenannte „Endpoint“-Werte aggregiert. Bezüglich der **sozialen Teilkriterien** wird das **Maximumprinzip** vorgeschlagen, d.h. das Teilkriterium mit der „schlechtesten“ Bewertung dominiert die Bewertung.

Im Sinne der **Transparenz der Ergebnisse** sowie der prinzipiellen Problematik ökonomische, ökologische und soziale Risiken zueinander abzuwägen, werden dem betrieblichen Entscheidungsträger alle Informationen disaggregiert zur Bewertung vorgelegt.

Da funktionelle Baugruppen und Produkte oftmals mehrere potentiell kritische Technologiemetalle beinhalten, werden dezidiert verschiedene Aggregationsmethoden zur Bestimmung einer Bauteilkritikalität untersucht. Die skizzierte Problemstellung tritt jedoch nur in Hinblick auf die ökonomische Dimension auf. Die „**Endpoint**“-Werte der **ökologischen Bewertung** lassen sich per Definition durch Summation aggregieren, Gleiches gilt für das **Maximumprinzip der sozialen Bewertung**. Bezogen auf die Aggregation der ökonomischen **Bewertung verschiedener Technologiemetalle** zeigen die Verwendung des **Maximumprinzips** sowie eine **Gewichtung nach Rohstoffkosten** die plausibelsten Ergebnisse. Eine Gewichtung mit Massenanteilen oder

Durchschnittswerten führt zu einer Fokussierung auf Elemente mit hohen Gewichtsanteilen, aber relativ niedriger ökonomischer „Kritikalität“.

- Auf Basis einer derartigen Bewertung werden in einem **dritten Schritt Handlungsempfehlungen zur Reduktion der unternehmensspezifischen Rohstoffrisiken** vorgeschlagen. Diese beziehen sich sowohl auf betriebswirtschaftliche Instrumente (**Integration weiterer Zulieferer, Ausgestaltung von Verträgen, Hedging**) als auch auf technische Maßnahmen (**Substitution von Funktionsmaterialien**).

Der gesamte Leitfaden bzw. das Vorgehensmodell zur Ermittlung der unternehmensspezifischen Rohstoffrisiken wurde anhand von umfangreichen **Fallbeispielen der Projektpartner** evaluiert. Darüber hinaus wurden alle **Ergebnisse auf Workshops mit Technologieunternehmen** diskutiert. Das Konzept zur Kritikalitätsbewertung bzw. die vorgeschlagene Aggregationslogik wurde/wird in **hochrangigen, internationalen Journals** veröffentlicht und auf **wissenschaftlichen Kongressen** diskutiert. Aktuelle Veröffentlichungen finden sich auf der Homepage des **Resource Lab** der Universität Augsburg (<http://www.resource-lab.de/projekte.html>).

## 2 Einführung und Motivation

Technologieunternehmen sind auf die Verfügbarkeit global kritischer Rohstoffe in besonderer Art und Weise angewiesen. So enthalten funktionale Baugruppen, wie sie z.B. in Steuergeräten oder elektronischen Schaltungen verbaut sind, heute bis zu 60 verschiedene Elemente (Graedel et al. 2013). Die Verfügbarkeit entsprechender Rohstoffe ist oftmals begrenzt, ihre Vorkommen auf wenige Regionen beschränkt. Darüber hinaus ist die Förderung und Verarbeitung der Rohstoffe mit signifikanten ökologischen und sozialen Risiken (vgl. Abbau von Coltan in Konfliktregionen im Kongo) verbunden. Vor diesem Hintergrund ist es gerade für Technologieunternehmen aus strategischen Gründen von zentraler Bedeutung, dezidierte Informationen über die eingesetzten erfolgskritischen Rohstoffe und deren Kritikalität zu erhalten. Aufgrund der üblicherweise niedrigen Wertschöpfungstiefe haben aber vor allem Klein- und Mittelständische Unternehmen (KMUs) oftmals keine oder nur unvollständige Kenntnisse über die Zusammensetzung ihrer Produkte oder Ersatzteile. Selbst wenn diese Informationen bekannt sind, so ist die Bewertung der Rohstoffe auf globaler Ebene aufgrund ihres mehrdimensionalen (ökonomische, ökologische und soziale Kriterien) und dynamischen Charakters (Erschließung neuer Fördergebiete, Entwicklung neuer Recyclingtechnologien) oftmals unzureichend.

Vor diesem Hintergrund hat das Resource Lab der Universität Augsburg in Zusammenarbeit mit namhaften Technologieunternehmen einen Leitfaden zur Umsetzung nachhaltiger Ressourcenstrategien in Unternehmen entwickelt. Der Leitfaden ist so konzipiert, dass er Unternehmen erstmals auf der Basis des Standes der Wissenschaft zur Kritikalitätsforschung in die Lage versetzt, ihre derzeitige Produktionssituation hinsichtlich der Rohstoffrisiken zu bewerten und entsprechende Absicherungsmaßnahmen zu treffen. Er umfasst sowohl Vorschläge zur organisatorischen Umsetzung einer umfassenden Kritikalitätsanalyse im Unternehmen als auch ein Vorgehensmodell zu deren inhaltlichen Umsetzung. Darüber hinaus wird erstmals ein umfassendes Konzept zur Kritikalitätsbewertung vorgestellt, das neben ökonomischen auch ökologische und soziale Kriterien umfasst.

### 3 Vorgehensweise und Projektablauf

Der im Projektantrag dargelegte Arbeitsplan zur Umsetzung der Projektziele enthält vier Arbeitspakete. Im ersten Arbeitspaket wird ein Kritikalitätsassessment zur Bewertung von Rohstoffrisiken strategischer Bauteile entwickelt. Die Bewertung beruht dabei auf ökonomischen, ökologischen und sozialen Kriterien. Zur Aggregation der ökonomischen Indikatoren wird ein AHP-Ansatz vorgeschlagen. Ziel des zweiten Arbeitspakets ist die Erarbeitung eines Vorgehensmodells zur Identifikation potentiell kritischer Inhaltsstoffe. Dieses umfasst sowohl die Analyse betrieblicher Daten (Materialstammdaten, Stücklisten, Entwicklungsinformationen, Datenblätter einzelner Bauteile) als auch überbetrieblicher Daten (Recherchearbeit in Fachliteratur, Internet und Datenbanken) sowie Laboruntersuchungen. Gegenstand des dritten Arbeitspaketes ist die Diskussion von Handlungsalternativen zur Reduktion des Rohstoffrisikos. Das vierte Arbeitspaket umfasst die Projektkoordination sowie die Dokumentation und Veröffentlichung der Projektergebnisse. Die vor dem Projektstart geplante und im Projektverlauf eingehaltene Aufteilung einzelner Arbeitspakete ist in Abbildung 1 dargestellt.

Arbeitspakete (AP)		Q2/2013	Q3/2013	Q4/2013	Q1/2014	Q2/2014	Q3/2014
<b>1.</b>	<b>Kritikalitätsbewertung und Formulierung von Aggregationsregeln</b>						
1.1	Auswahl, Definition und Spezifizierung der Kritikalitätsmerkmale	UA					
1.2	Entwicklung sozio-ökologischer Bewertungskriterien		UA, Bosch	UA, Bosch			
1.3	Aggregation und Gewichtung der Teilkriterien			UA			
<b>2.</b>	<b>Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Identifikation von Inhaltsstoffen</b>						
2.1	Identifikation und Analyse von vorhandenen betrieblichen und externen Datenquellen		UA, KMUs				
2.2	Laboruntersuchungen			UA	UA		
2.3	Entwicklung eines Vorgehensmodells für eine effiziente Identifikation von Inhaltsstoffen	UA		UA, KMUs			
<b>3.</b>	<b>Leitfaden zur Bewertung betrieblicher Handlungsoptionen</b>						
3.1	Auswahl von relevanten Produkten	UA, KMUs					
3.2	Erfassung und quantitative Bewertung von Handlungsoptionen				UA, Bosch KMUs	UA, Bosch KMUs	Bosch KMUs
3.3	Gezielte Visualisierung von Rohstoffinformationen und Handlungsoptionen					UA	UA
<b>4.</b>	<b>Evaluierung, Dokumentation und Präsentation</b>	UA	UA	UA	UA, Bosch KMUs	UA, Bosch KMUs	UA, Bosch KMUs

Abbildung 1: Detaillierter Projektarbeitsplan

Die inhaltliche Bearbeitung des Projektes wurde von der Universität Augsburg an den Lehrstühlen für Production & Supply Chain Management (Prof. Dr. Axel Tuma) und Ressourcenstrategie (Prof. Dr. Armin Reller) durchgeführt. Verantwortlich für das Projektmanagement war Dr. Andrea Thorenz. Als Projekt- und Anwendungspartner waren zwei KMUs aus der Elektro- und Metallindustrie eingebunden, die BMK electronic solutions GmbH & Co. KG und die LST Laser & Schalttechnik GmbH. Das Projekt wurde darüber hinaus von einem Fachbeirat inhaltlich unterstützt. Das Corporate Office Sustainability der Robert Bosch GmbH brachte seine Expertise im Bereich der ökologischen Bewertung von Produkten und Bauteilen ein. Ferner stellte es umfangreiches Wissen in Bezug auf die datenbasierte Ermittlung von Inhaltsstoffen zur Verfügung<sup>1</sup> und repräsentierte die Anforderungen großer Technologieunternehmen. Die Framo Morat GmbH & Co. KG ergänzte als Hersteller innovativer Antriebs- und Zahnradsysteme das Anforderungsprofil technologieorientierter KMUs. Technologische und ökonomische Aspekte des Recyclings als wesentliche Handlungsalternative zur Gewährleistung der Rohstoffverfügbarkeit wurden von der Remondis Industrie Service GmbH & Co. KG in das Projekt eingebracht. Prof. Dr. Wagner, wissenschaftlicher Direktor des Wissenschaftszentrums Umwelt (WZU) der Universität Augsburg, begleitete das Projekt auf wissenschaftlicher Ebene mit den Schwerpunkten Nachhaltigkeitsmanagement, Materialflussanalysen und Ökobilanzierung. Darüber hinaus unterstützte er das Projekt durch seine Expertise auf dem Gebiet der Adressierung sozialer Aspekte der Nachhaltigkeit. Die Projektstruktur ist in Abbildung 2 dargestellt.

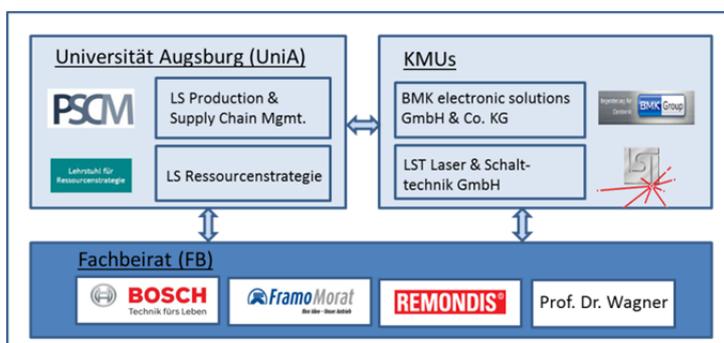
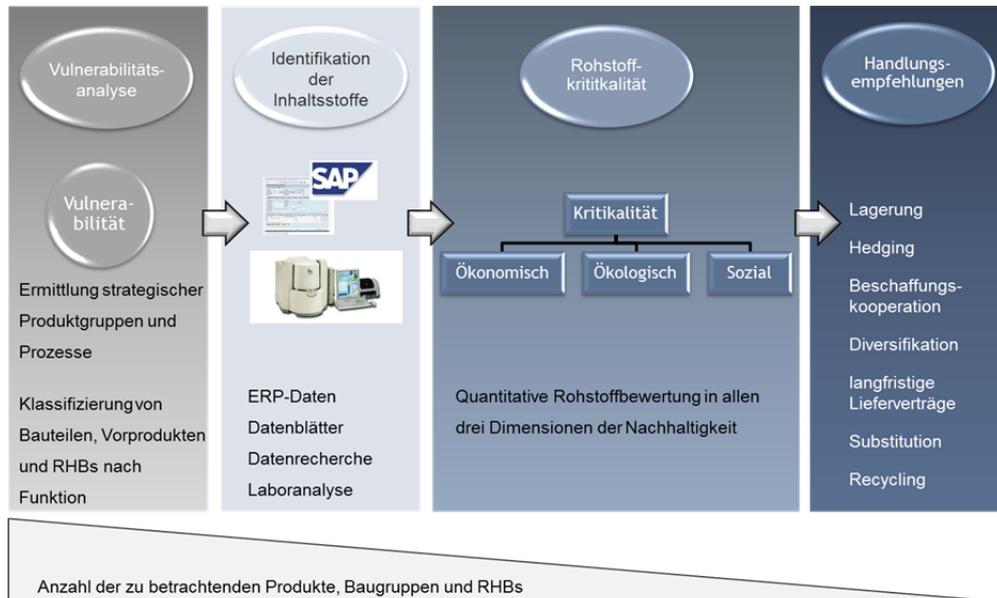


Abbildung 2: Projektstruktur

<sup>1</sup>Die Robert Bosch GmbH setzt zur Dokumentation der Inhaltsstoffe von Bauteilen die Datenbank IMDS aus der Automobilbranche ein.

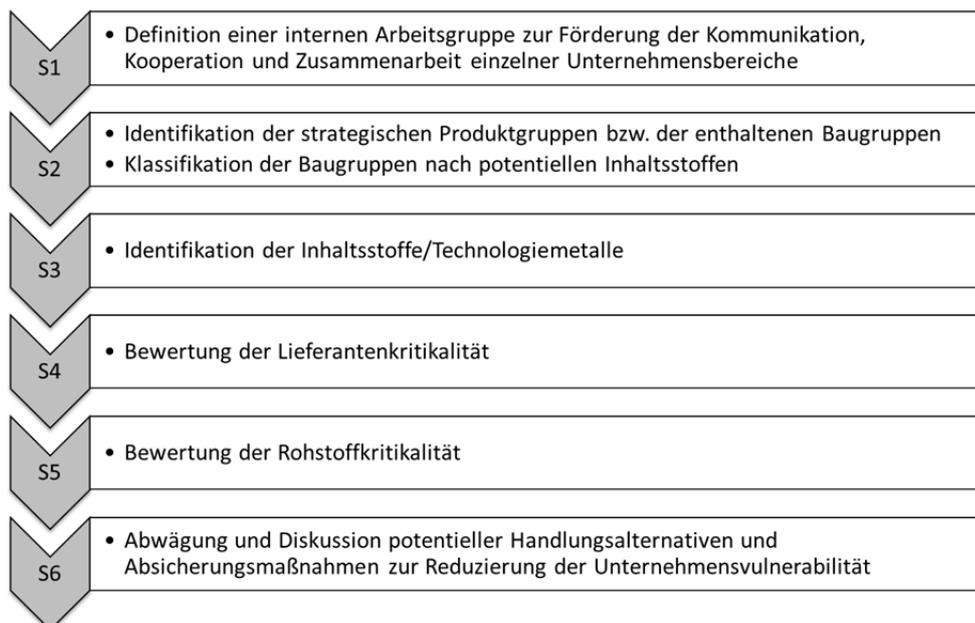
## 4 Projektergebnisse

Das zentrale Projektergebnis ist die Entwicklung eines Gesamtmodells zur Umsetzung einer nachhaltigen Ressourcenstrategie (vgl. Abbildung 3) in KMUs sowie die Erarbeitung eines entsprechenden Leitfadens (siehe Anlage V.1).



**Abbildung 3: Methodik zur Umsetzung einer nachhaltigen Ressourcenstrategie**

Dieser umfasst die in Abbildung 4 skizzierten Schritte. So werden Unternehmen befähigt, Projekte zur Erhöhung der Ressourceneffizienz durchzuführen.



**Abbildung 4: Reihenfolge der Prozessschritte im Überblick**

- Zu Projektstart ist eine Steuerungsgruppe zu konstituieren, bestehend aus Mitgliedern der Geschäftsleitung, Produktentwicklung und Beschaffung (S1). Diese ist gegebenenfalls um IT-Experten (zur Ermittlung von ERP-Daten) und externe Experten zu erweitern. Die Integration externer Fachleute ist insbesondere bei der erstmaligen Durchführung einer Kritikalitätsbewertung im Unternehmen sowie zur Durchführung intern nicht verfügbarer laboranalytischer Verfahren empfehlenswert bzw. notwendig.
- Die erste Aufgabe der Steuerungsgruppe liegt in der Identifikation strategischer Produkte und Komponenten im Sinne einer Vulnerabilitätsanalyse (S2). Zur Reduktion der Komplexität der nachfolgenden Schritte empfiehlt sich eine Klassifikation der zu betrachtenden Produkte und Bauteile. Als Leitkriterium dient hierbei die Funktionalität (z.B. Widerstand, Kondensator, Energiespeicher).
- Nach der Auswahl repräsentativer Bauteile sind deren Inhaltsstoffe auf Elementebene zu ermitteln (S3).
- Für die identifizierten Inhaltsstoffe (z.B. Technologiemetalle) sind die Lieferantenkritikalität (S4) sowie die Rohstoffkritikalität (S5) abzuschätzen. Da zur Bewertung der Lieferantenkritikalität bereits zahlreiche Indikatoren (z.B. Wiederbeschaffungszeit, Lieferzuverlässigkeit, etc.) existieren und ausreichend erforscht sind, fokussiert die vorliegende Studie auf die Bewertung der Rohstoffkritikalität.
- In einem letzten Schritt sind für die erfolgskritischen Produkte, Komponenten oder Technologien mit hoher Kritikalität Handlungsalternativen zu untersuchen (S6).

Nach einer detaillierten Darstellung der Projektergebnisse zu den Schritten „Vulnerabilitätsanalyse“, „Identifikation von Inhaltsstoffen“, „Bewertung der Rohstoffkritikalität“ und „Diskussion potentieller Handlungsalternativen“ werden die Projektergebnisse anhand zweier Fallstudien mit den Praxispartnern BMK electronic solutions GmbH & Co. KG und LST Laser & Schalttechnik GmbH diskutiert und evaluiert.

#### 4.1 Verfahren zur Umsetzung einer Vulnerabilitätsanalyse

Ziel der Vulnerabilitätsanalyse ist die Identifikation strategischer bzw. erfolgskritischer Produkte, Komponenten und Technologien. Grundlage hierfür ist eine Analyse des Produkt- und Technologieportfolios sowie der Stellung des Unternehmens in den jeweiligen Beschaffungsmärkten. Charakteristische Fragestellungen hierzu finden sich in Abbildung 5.

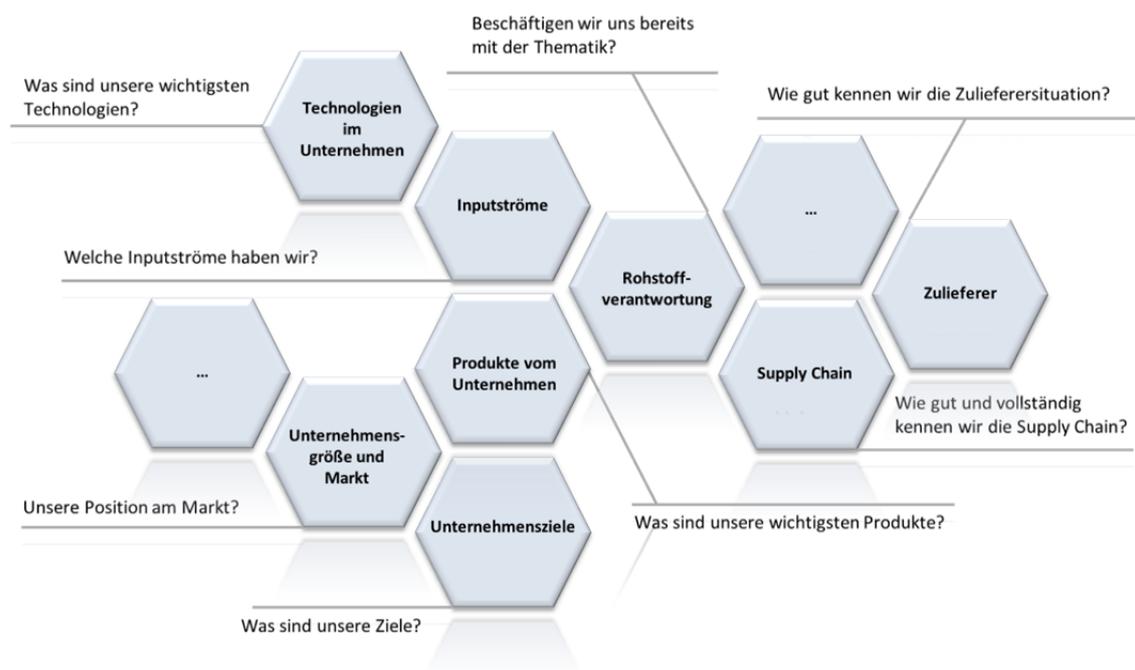
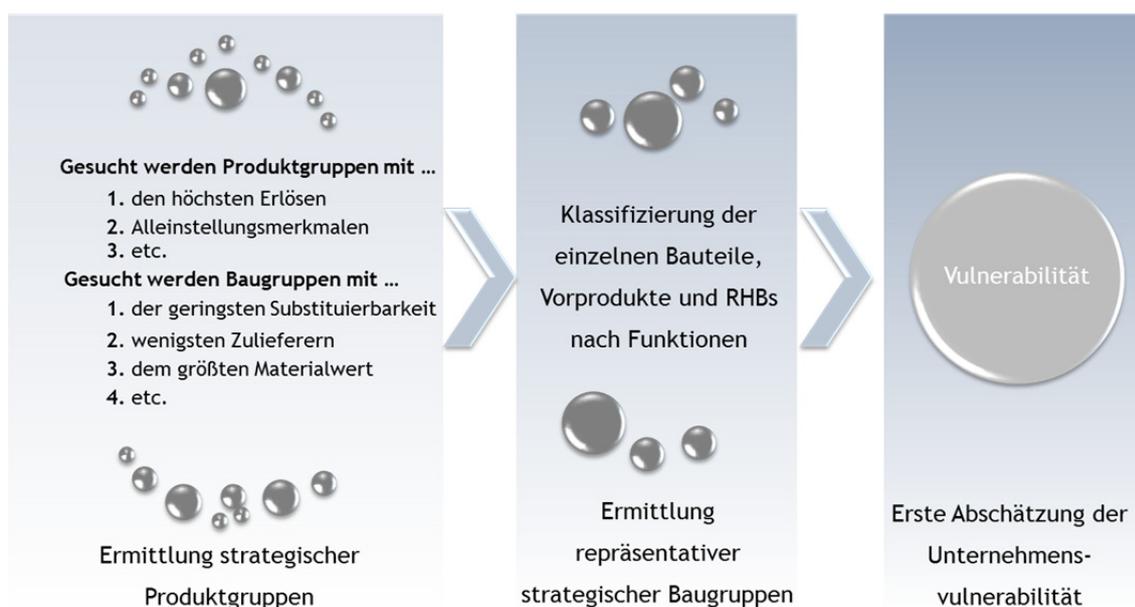


Abbildung 5: Fragestellungen im Rahmen einer Vulnerabilitätsanalyse

Gesucht werden hierbei Produkt- und Baugruppen bzw. Inputstoffe mit:

- den höchsten Erlösen (Produktebene)
- dem größten Umsatzanteil (Produktebene)
- Alleinstellungsmerkmalen (Produktebene)
- dem größten Zukunftspotential (Produktebene)
- der größten Bedeutung für die Unternehmensstrategie (Produktebene)
- der geringsten Substituierbarkeit (Bauteil-/Stoffebene)
- den wenigsten Zulieferern (Bauteil-/Stoffebene)
- dem größten Materialwert (Bauteil-/Stoffebene)
- der geringsten Preiselastizität (Bauteil-/Stoffebene)
- der häufigsten Verwendung in unterschiedlichen Produkten (Bauteil-/Stoffebene)

Nach der „Identifikation strategischer Produkte und Bauteile“ sind diese zu klassifizieren. Die Projektergebnisse zeigen, dass die Anzahl der Klassen bei maximal 20 liegen sollte, um Aufwand und Kosten für die nachgeordneten Schritte zu begrenzen. Sind die Inhaltsstoffe der Produkte und Bauteile nicht unmittelbar aus ERP-Daten oder Bauteildatenblättern ersichtlich, empfiehlt es sich je nach geschätztem Analyseaufwand fünf bis zehn repräsentative Bauteile pro Klasse zur Detailanalyse auszuwählen. Grafisch veranschaulicht ist die Vorgehensweise in Abbildung 6.



**Abbildung 6: Vorgehensmodell zur Vulnerabilitätsanalyse**

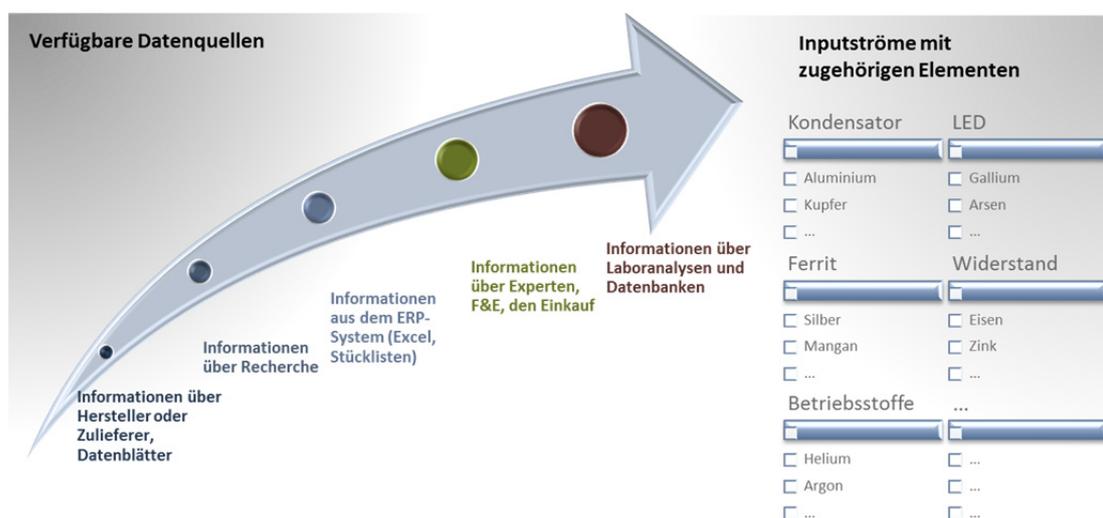
Bezogen auf die beteiligten Projektpartner zeigt die Vulnerabilitätsanalyse, dass:

- die Verletzbarkeit von LST Laser & Schalttechnik GmbH im Wesentlichen in den Ersatzteilen und Betriebsstoffen der verwendeten Laserschneidanlagen liegt. Während die Verfügbarkeit der Rohstoffe (Stahlbleche und Rohre) für einen Betrieb, der als Dienstleister agiert, prinzipiell als eher unkritisch zu bewerten ist, führt ein Lieferengpass bei den Ersatzteilen für die Laseroptik bzw. beim Schutzgas unmittelbar zu Produktionsausfällen.
- die BMK electronic solutions GmbH & Co. KG als Hersteller von kundenspezifischen, elektronischen Schaltungen auf die zuverlässige Verfügbarkeit kostengünstiger Bauteile (z.B. Kondensatoren, Widerstände, Energiespeicher) angewiesen ist. Problematisch in Bezug auf die spätere Analyse

ist hier die hohe Anzahl der potentiell zu betrachtenden Bauteile. Entsprechend wird eine Klassifikation anhand der Funktionalität vorgeschlagen.

## 4.2 Vorgehensweise zur Identifikation der Inhaltsstoffe

Nach der Identifikation strategischer Produkt- und Baugruppen sind deren Inhaltsstoffe zu ermitteln. Die Auswahl geeigneter Instrumente für diese Aufgabe hängt dabei von der „Verortung“ des Unternehmens in der Supply Chain bzw. dessen relativer Marktmacht, der spezifischen Datenverfügbarkeit sowie des intern verfügbaren Fachwissens ab. Die einzelnen Faktoren können in Abhängigkeit der untersuchten Produkte und Technologien stark variieren. Prinzipiell stehen zur Ermittlung der Inhaltsstoffe fünf Instrumentenkategorien zur Verfügung (vgl. Abbildung 7).



**Abbildung 7: Datenquellen zur Identifizierung von Inhaltsstoffen**

Die Kategorien „Analyse von Datenblättern und Hersteller-/Zulieferinformationen“ sowie „Auslesen interner ERP-Daten“ sind mit dem geringsten Arbeitsaufwand verbunden und liefern – soweit vorhanden – zuverlässige, allerdings oftmals nur unvollständige Daten.

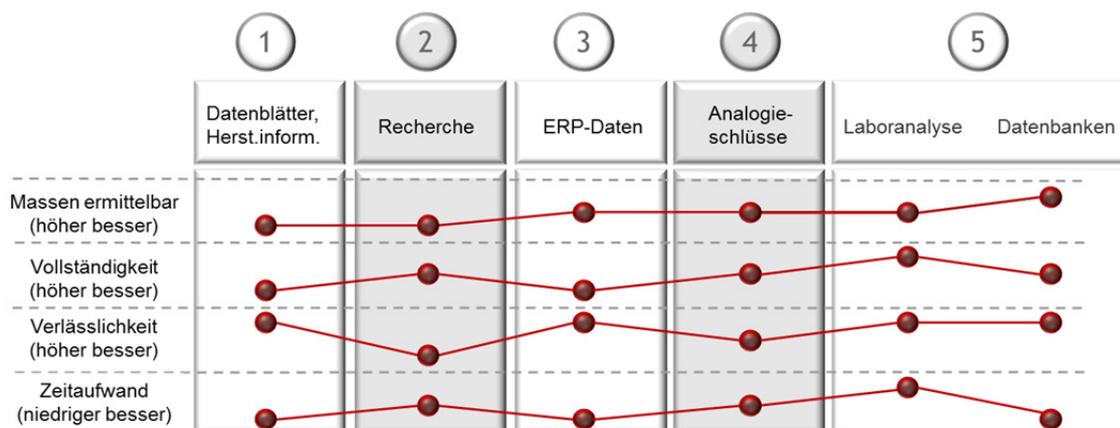
Die „Recherchearbeit“ ist im Vergleich deutlich aufwendiger, da sie ein umfangreiches Verständnis bezüglich der Funktionsweise eines Bauteils und dessen potentieller Inhaltsstoffe erfordert. Sofern keine unternehmensinternen Experten damit beauftragt werden, wird dieser Arbeitsschritt aus Zeitgründen insbesondere für KMUs in vielen Fällen nicht zu bewerkstelligen sein. Darüber hinaus ist festzustellen, dass der

Erkenntnisgewinn aus den Recherchearbeiten häufig begrenzt ist. Dies gilt vor allem für Bauteile mit Kunststoffanteilen.

Erkenntnisse aus der Kategorie „Analogieschlüsse oder Experteneinschätzungen“ sind relativ schnell zu gewinnen, können allerdings mit Unsicherheit behaftet sein.

Die letzte Kategorie umfasst die Auswertung primär überbetrieblicher Informationsquellen. Dabei benötigt die „Laboranalyse“ bei der Rohstoffidentifikation den größten Zeitaufwand, „Datenbanken“ – sofern vorhanden – den geringsten. In Bezug auf die Laboranalyse hat sich im Projekt aus Kosten- und Leistungsgründen die Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) zur schnellen Elementanalyse als Methode der Wahl herausgestellt. Bezogen auf die Verwendung von Datenbanken ist die Lieferantenselbstauskunfts-Datenbank der Firma IHS<sup>2</sup> zu erwähnen.

Abbildung 8 zeigt eine vergleichende Bewertung der Kosten- und Leistungsparameter der untersuchten Analyseinstrumente zur Identifikation von Inhaltsstoffen.



**Abbildung 8: Bewertung der Analyseinstrumente zur Identifikation von Inhaltsstoffen**

Bezogen auf die Projektpartner ergeben sich im Rahmen der Identifikation der Inhaltsstoffe folgende Erkenntnisse:

- Im Fall LST Laser & Schalttechnik GmbH ist eine Analyse der ERP-Daten ausreichend, um Helium<sup>3</sup> als potentiell kritischen Betriebsstoff zu identifizieren.

<sup>2</sup>IHS: Information Handling Services. Weltweit tätiges Unternehmen für Analysen und Informationen.

<sup>3</sup>Die Verfügbarkeit des Edelgases Helium sowie weiterer Edelgase (z.B. He, Xe, Kr) ist ein aktuell intensiv diskutiertes Thema in der Elektronikindustrie.

Als „Inhaltsstoff“ der ebenfalls von der Geschäftsleitung vorab als vulnerabel eingeschätzten Laserlinse konnte mittels einer Analyse der Herstellerinformationen Zinkselenid identifiziert werden. Demgegenüber ergibt die Analyse der ERP- und Entwicklungsdaten bei dem zweiten betrachteten Unternehmen, BMK electronic solutions GmbH & Co. KG, keinen direkten Hinweis auf die Inhaltsstoffe in den eingesetzten elektronischen Bauteilen. Sie hilft aber bei der Klassifikation der im Weiteren zu untersuchenden Bauteile und führt somit zu einer erforderlichen Komplexitätsreduktion. Auf diese Weise konnten aus einigen tausend Bauteilen 60 unternehmensspezifisch relevante Referenzbauteile ermittelt und im Labor analysiert werden, 20 davon sehr detailliert.

- Eine Lieferanten- und Herstellerbefragung bei einzelnen Bauteilen in Bezug auf die verwendeten Rohstoffe stößt in stark kompetitiven Märkten an Grenzen. Dies gilt insbesondere für KMUs mit einer relativ begrenzten Marktmacht. Je weiter ein Unternehmen von den „Mining“-Prozessen in der Supply Chain entfernt ist, desto schwieriger ist die Ermittlung der in einem Produkt enthaltenen Inhaltsstoffe. Abbildung 9 stellt die Problematik grafisch dar. Ein vollständiger Rückschluss für den Produzenten des Beispielprodukts „Platine“ (repräsentiert BMK) ist hier nur mittels einer Laboranalyse möglich.

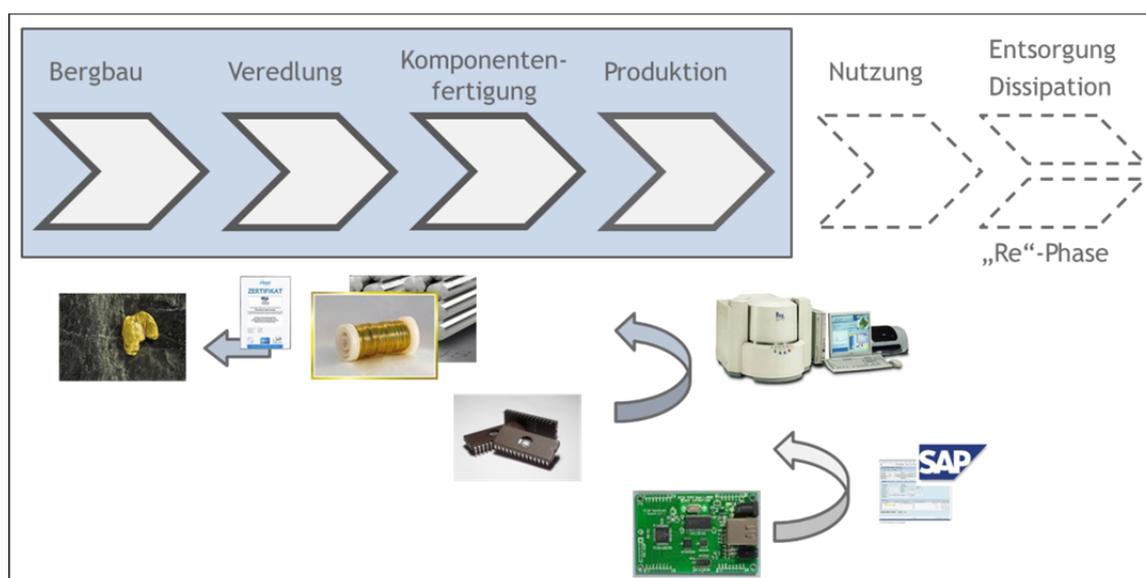


Abbildung 9: Analysemöglichkeiten in Abhängigkeit der Verortung in der Supply Chain

- Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit der Laboranalyse bzw. der Analyse von Datenblättern und Recherchearbeiten ist festzuhalten, dass bis zu 80% der Elemente eines Bauteils und insgesamt bis zu 60% aller mittels der Laboranalyse identifizierten Inhaltsstoffe nicht zuverlässig aus der Datenblattanalyse oder der Recherchearbeit zu identifizieren waren (siehe Anhang V.4).

Vor diesem Hintergrund wurden zur Abschätzung der Aussagekraft der Messergebnisse Referenzproben bekannter Zusammensetzung (Ag 100%, Bi 100%, Cu:Sb 90%:10%) analysiert. Das EDX-720/800HS der Firma Shimadzu<sup>4</sup> liefert hierbei sehr gute Ergebnisse, die in Tabelle 1 dargestellt sind.

**Tabelle 1: Ergebnisse der EDX-Referenzmessung**

Referenz	Messergebnisse (Gew.-%)			
Ag 100%	(96,11 ± 0,25) Ag <sup>5</sup>	(3,56 ± 0,02) K <sup>6</sup>	(0,11 ± 0,01) Fe <sup>7</sup>	(0,08 ± 0,01) Ge <sup>8</sup>
Bi 100%	(99,88 ± 0,35) Bi	(0,08 ± 0,02) Mn <sup>12</sup>	(0,04 ± 0,01) Cu <sup>10</sup>	
Cu:Sb 90%:10%	(89,77 ± 0,20) Cu	(10,01 ± 0,15) Sb	(0,13 ± 0,02) Ti <sup>9</sup>	(0,10 ± 0,01) Mn <sup>12</sup>

Zur vollständigen Verifizierung der Messdaten wurden in einem zweiten Schritt Bauteile bekannter Zusammensetzung (beinhaltete Elemente und deren Massenanteil) analysiert. Für die sorgfältige Analyse im Labor wurden die Bauteile bestmöglich in die Einzelkomponenten zerlegt, am Beispiel eines Tantalkondensators in Abbildung 10 dargestellt.

<sup>4</sup><http://www.shimadzu.de/edx-720800hs>

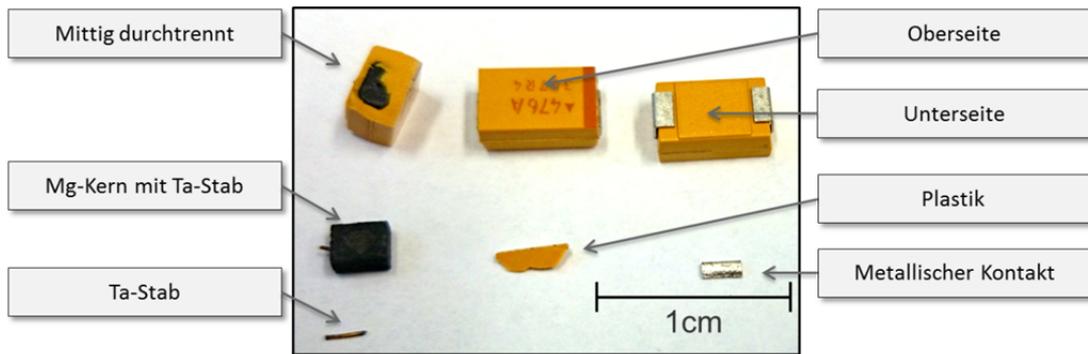
<sup>5</sup>Die Abweichungen bei der Silber-Messung können auf die zu groß gewählte Querschnittsfläche des Röntgenstrahls (Collimator 5 mm) zurückgeführt werden, so dass der Probenhalter der Silberreferenz teilweise mitgemessen wurde.

<sup>6</sup>Der geringe Kalium-Anteil ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf das Probenhaltermaterial zurückzuführen.

<sup>7</sup>Spuren von Eisen und Kupfer sind wahrscheinlich auf den Reinigungsprozess der Referenzproben vor der Messung zurückzuführen und können vernachlässigt werden.

<sup>8</sup>Spuren von Germanium sind auf die Referenzprobe zurückzuführen; direkt neben der Silber-Referenz befindet sich eine Germanium-Referenz.

<sup>9</sup>Spuren von Titan und Mangan könnten auf die Politurpaste zurückzuführen sein, mit der die Referenzproben für die Messung vorbereitet wurden.



**Abbildung 10: Beispielhafte Zerlegung eines Tantalkondensators**

Das Analyseergebnis des Tantalkondensators zeigt deutlich, dass alle metallischen Bestandteile identifiziert werden können. Zusätzlich entspricht der aus den Messungen ermittelte Massenanteil einzelner metallischer Inhaltsstoffe, zumindest in der Größenordnung, den zugehörigen Referenzwerten (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Ergebnisse der detaillierten Analyse eines Tantalkondensators**

Bauteil Tantalkondensator	Identifizierte Elemente (Gew.-%)								
	Ta	Si	Mn	Fe	Ni	Ag	Sn	Zn	Ti
Recherche	+	o	o	+	+	o	o	o	-
Datenbank	51	21	9	5	3	2	<1	-	-
Laboranalyse	2	17	59	5	3	<1	<1	3	3
Legende:	+: sehr wahrscheinlich enthalten   o: möglicherweise enthalten   -: nicht identifiziert								

Die realen Bauteilzusammensetzungen wurden von der Robert Bosch GmbH zur Verfügung gestellt und stammen aus der IMDS-Datenbank<sup>10</sup>, die allerdings nicht für alle KMUs zugänglich ist. Die IMDS-Datenbank steht ausschließlich für Zulieferer in der Automobilindustrie auf Anfrage zur Verfügung.

Als Alternative für KMUs zur IMDS-Datenbank sind kommerzielle Datenbanken mit Lieferantenselbstauskünften zu berücksichtigen. Zwei Beispiele hierfür sind die bereits erwähnte IHS- und die CDX<sup>11</sup>-Datenbank. Hiermit wird Unternehmen eine Datenbank zur Verfügung gestellt, in der beispielsweise einzelne Inhaltsstoffe eines Bauteils aufgelistet sind. In der im Rahmen des Projektes analysierten Stichprobe war für etwa ein Drittel aller Elektronikbauteile eine vollständige Deklaration (Elemente und Massenanteile)

<sup>10</sup>IMDS: International Material Data System

<sup>11</sup> CDX: Compliance Data Exchange, <https://public.cdssystem.com/de/web/cdx>

vorzufinden. Von 60 im Rahmen des Projektes im Labor untersuchten Elektronikbauteilen konnte für 20 Bauteile eine vollständige Deklaration in der IHS-Datenbank vorgefunden werden.

Unabhängig davon lässt die Identifikation verwendeter Rohstoffe keine direkte Schlussfolgerung über deren Herkunftsgebiet zu. Bei den Datenbanken für die Inhaltsstoffe ist unter Umständen eine Kennzeichnung der Verhüttungsbetriebe vorzufinden. Oftmals ist lediglich dem Verhütter oder Veredler bekannt, woher die entsprechenden Erze kommen bzw. ob diese beispielsweise den Regularien des Artikels 1502 des „Dodd-Frank-Acts“ (Verbot der un zertifizierten Verwendung von Konfliktmineralien für US-börsen gelistete Unternehmen) genügen. Hat ein Unternehmen einen Nachweis bezüglich der Unbedenklichkeit seiner Produkte zu erbringen, erfordert dies die Integration eines zertifizierten Verhüttungsbetriebs in die Supply Chain bzw. eine entsprechende Lieferkettenanalyse.

#### **4.3 Methodik zur Bewertung der Rohstoffkritikalität**

Nach der Identifikation der Inhalts- und Betriebsstoffe strategischer Produkte und Technologien sind diese zu bewerten. Die Bewertung erfolgt auf Elementebene und umfasst ökonomische, ökologische und soziale Kriterien. Sie baut auf dem Stand der Wissenschaft zur Kritikalitätsforschung auf, berücksichtigt dabei aber dezidiert die Belange von KMUs hinsichtlich Praktikabilität und Datenverfügbarkeit.

Zur Ermittlung des Standes der Wissenschaft werden im Rahmen einer vollständigen Literaturrecherche internationale Kritikalitätsstudien identifiziert und analysiert, die ein Rohstoffrisiko mittels ausgewählter Indikatoren bewerten. Tabelle 3 zeigt die Studien im Überblick.

Tabelle 3: Kritikalitätsstudien von 2006 bis 2014

Studie	Zielsetzung	Versorgungs- risiko	Verwund- barkeit	Ökologisches Risiko
Frondel et al. 2006	Kritische Materialien für Deutschland	ja	nein	teilweise
Behrendt et al. 2007	Erhöhung des Konfliktpotentials durch Rohstoffabbau	ja	nein	nein
Duclos et al. 2008	Kritische Rohstoffe für General Electric	ja	ja	nein
Morley und Eatherley 2008	Kritische Materialien für die UK-Wirtschaft	ja	nein	nein
U.S. National Research Council 2008	Kritische Minerale für die moderne US-Gesellschaft	ja	ja	teilweise
Angerer et al. 2009	Nachfragewachstum für Rohstoffe durch Zukunftstechnologien	ja	nein	nein
Buchert et al. 2009	Kritische Rohstoffe für Alternative Energietechnologien	ja	nein	nein
IW Consult 2011	Kritische Rohstoffe für die Bayerische Industrie	ja	nein	nein
Rosenau-Tornow et al. 2009	Langzeit-Versorgungsrisiken von Rohstoffen	ja	nein	nein
European Commission 2010	Kritische Materialien für die Europäische Union	ja	ja	ja
Thomason et al. 2010	Versorgungseingpässe für die USA im Kriegsfall	ja	nein	nein
U.S. Department of Energy (DOE) 2011	Kritische Rohstoffe für Alternative Energietechnologien	ja	ja	nein
Erdmann et al. 2011	Kritische Rohstoffe für Deutschland	ja	ja	nein
Graedel et al. 2012	Kritikalität von Metallen auf globalem, nationalem und Unternehmensniveau	ja	ja	ja
British Geological Survey (BGS) 2012	Versorgungskritikalität von Rohstoffen	ja	teilweise	nein
Moss et al. 2013	Kritische Rohstoffe für Alternative Energietechnologien	ja	nein	nein
Schneider et al. 2014	Versorgungskritikalität für Ökobilanzen	ja	nein	nein
Roelich et al. 2014	Bewertung einer dynamischen Materialkritikalität	ja	nein	nein
Bach et al. 2014	Bewertung von Ressourceneffizienz auf Produktebene	ja	ja	ja

Die Analyse zu internationalen Kritikalitätsstudien bezüglich der Bewertung des ökonomischen Risikos (auch Versorgungsrisiko genannt) zeigt, dass diese unterschiedlichen Gruppen und Themenschwerpunkten zugeordnet werden können. Die bedeutendsten Arbeiten auf diesem Gebiet sind bisher der Bericht des US-Amerikanischen National Research Council (USNRC) mit dem Fokus auf kritische Minerale für die US-Wirtschaft (U.S. National Research Council 2008), der Bericht der Europäischen Kommission über kritische Rohstoffe für die EU (European Commission 2014) und der Artikel bezüglich einer Bewertungsmethodik der Forschungsgruppe der

Yale Universität (Graedel et al. 2012). Die USNRC-Studie ist die erste, die den Begriff der Ressourcenkritikalität als Dualismus von Versorgungsrisiko und Rohstoffanfälligkeit ausarbeitete (U.S. National Research Council 2008). Die EU-Studie adaptiert diese Herangehensweise und bewertet, ausgehend von einer breiten Rohstoffbasis, einen Satz von zunächst 14, später 17 Rohstoffen als kritisch (European Commission 2010, European Commission 2014). Graedel et al. differenzieren die Bewertung auf eine betriebliche, nationale und globale Ebene (Graedel et al. 2012).

### **4.3.1 Ökonomische Kritikalitätsbewertung**

Die Methodik zur ökonomischen Kritikalitätsbewertung basiert auf der Auswertung der Literatur zur Bewertung des Versorgungsrisikos. Ziel ist die Identifikation eines entsprechenden Indikatorensets. Aus diesen werden durch mehrstufige Expertenbefragungen geeignete Indikatoren gemäß den Studienzielen selektiert, kategorisiert und gewichtet.

#### **4.3.1.1 Auswahl relevanter Indikatoren**

Auf Basis der durchgeführten Literaturanalyse konnten insgesamt 27 Indikatoren identifiziert werden, die in den Studien mindestens einmal zur Bewertung eines rohstoffbezogenen Versorgungsrisikos herangezogen wurden (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Kritikalitätsindikatoren aus den 19 untersuchten Kritikalitätsstudien

Indikator	Einheit	Datenquelle
Abiotischer Ressourcenverbrauch	kg Sb-Äq.	ecoinvent Centre 2010
Bergbauinvestitionen	USD/Tonne	SNL Metals & Mining 2014
Environmental Constraints	Index, qualitativ	Yale Center for Environmental Law and Policy 2014
Explorationsbudget	EUR	Mining Journals
Extremnaturereignisse	Index, qualitativ	TU Berlin Lehrstuhl Sustainable Engineering
Handelsbeschränkungen	%	Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI)
Häufigkeit in Erdkruste	ppm	Haynes 2014
Importabhängigkeit	%, Nettowert	U.S. Geological Survey 2014a, Experteneinschätzung
Koppelproduktion	%	SNL Metals & Mining 2014
Lagerhaltung	%	U.S. Geological Survey 2014a
Länderkonzentration	%, HHI	Deutsche Rohstoffagentur (DERA), U.S. Geological Survey 2014b, SNL Metals & Mining 2014, British Geological Survey (BGS), Reichl et al. 2014
Länderrisiko Politische Stabilität	Index, qualitativ	Kaufmann et al. 2010, Weltbank 2014
Länderrisiko Policy Potential	Index, qualitativ	Fraser Institute, Wilson et al. 2013
Länderrisiko Regulation	Index, qualitativ	Human Development Index, UNDP 2014
Marktbalance	Tonnen	U.S. Geological Survey 2014a
Nachfrageanstieg	qualitativ, %	European Commission 2010, U.S. Geological Survey 2014a, Angerer et al. 2009
Produktionsauslastung	%	Experteneinschätzung
Recycling	Tonnen	U.S. Geological Survey 2014a, Graedel et al. 2011a
Reichweite Reserven	Jahre	Deutsche Rohstoffagentur (DERA), U.S. Geological Survey 2014b
Reichweite Ressourcen	Jahre	Deutsche Rohstoffagentur (DERA), U.S. Geological Survey 2014b
Risiko des strategischen Einsatzes	qualitativ	Experteneinschätzung
Rohstoffpreisvolatilität	Volatilität, USD/kg	U.S. Geological Survey 2014a
Substituierbarkeit	qualitativ	Experteneinschätzung, European Commission 2010
Unternehmenskonzentration	%, HHI	SNL Metals & Mining 2014
Verwundbarkeit durch den Klimawandel	qualitativ	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) 2014
Zeitlich begrenzte Knappheit	n.V.	n.V.
Zukünftige Marktkapazität	%	SNL Metals & Mining 2014

Da die 27 identifizierten Indikatoren für unterschiedliche Fragestellungen entwickelt wurden, sind in einem nächsten Schritt diejenigen zu selektieren, die zur Bewertung von Inhalts- und Betriebsstoffen strategischer Produkte und Technologien von KMUs

geeignet sind. Hierzu wurden Expertenbefragungen mit Wissenschaftlern aus den Bereichen „Ressourcenstrategie“ und „Ressourcenmanagement“ sowie betrieblichen Rohstoffexperten durchgeführt. Die Bewertung erfolgte auf Basis eines Fragebogens (siehe Anhang V.3). Die Experten wurden gebeten, jeden der 27 Indikatoren auf einer Skala von "1: sehr wichtig" bis "6: unwichtig" zu bewerten, wobei der Relevanzbereich zuvor im Bereich von 1,0 bis 3,9 festgelegt wurde. Indikatoren, die im Durchschnitt mit 4,0 oder schlechter bewertet wurden, wurden für die weiterführende Betrachtung nicht berücksichtigt. Durch diese Vorgehensweise reduzierte sich das Indikatorenset auf 15 Indikatoren (vgl. Abbildung 11). Die Bewertungszahl repräsentiert dabei die Einschätzung der Experten in Bezug auf die Relevanz des Indikators. In einem anschließenden Expertenworkshop wurden die verbleibenden 15 Indikatoren auf Redundanzen und, unter besonderer Berücksichtigung von KMUs, auf Quantifizierbarkeit hin untersucht. Redundante (mit den Nummern (1) und (2) in Abbildung 11 markiert) und nicht quantifizierbare Indikatoren (mit einem Stern (\*) in Abbildung 11 markiert) wurden für die weitere Ausarbeitung des endgültigen Satzes von Indikatoren vernachlässigt, woraus sich die Auswahl von insgesamt 11 Indikatoren ergibt.

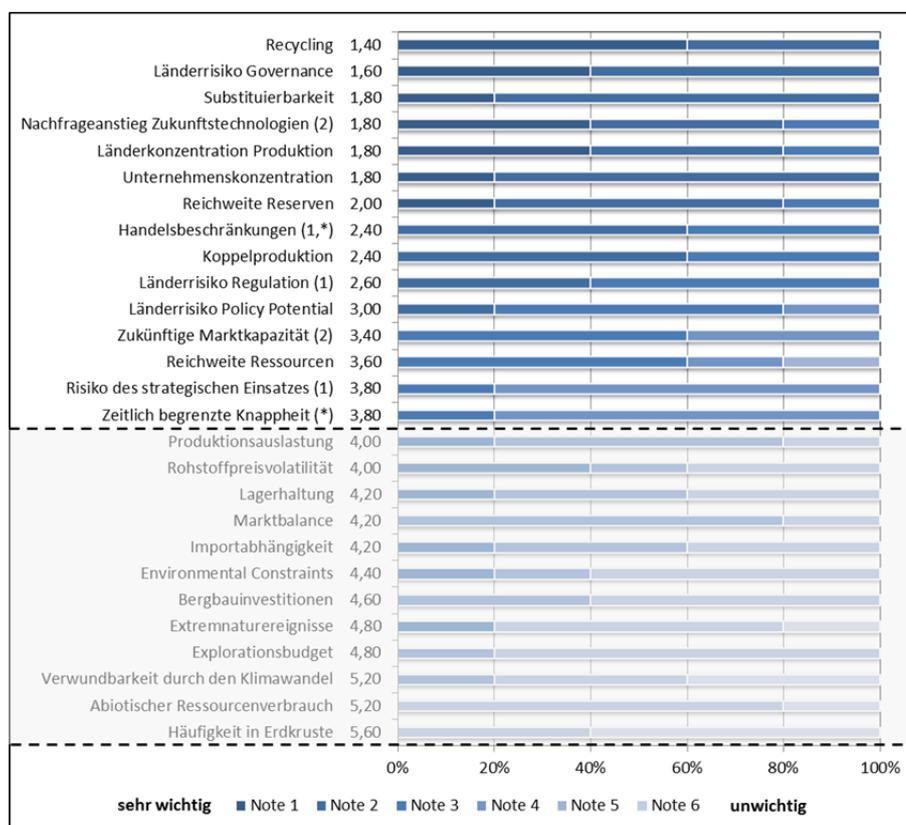


Abbildung 11: Vollständiges Set von 27 Verfügbarkeitsindikatoren

In Tabelle 5 sind die 11 ausgewählten Indikatoren detailliert beschrieben. Sie bilden die Grundlage für die ökonomische Dimension der Kritikalitätsbewertung.

**Tabelle 5: Ökonomische Indikatoren**

Kriterium	Indikator	Indikatorbeschreibung	Berechnung	Datenquelle
Risiko der Konzentration	Länderkonzentration	Konzentration der Jahresproduktion des Rohstoffs auf Länderebene, gemessen mit dem Herfindahl-Hirschman-Index	$\sum \text{Prod. Anteil}_{Land}^2$	U.S. Geological Survey 2014b)
	Unternehmenskonzentration	Konzentration der Jahresproduktion des Rohstoffs auf Unternehmensebene, gemessen mit dem Herfindahl-Hirschman-Index	$\sum \text{Prod. Anteil}_{Unternehmen}^2$	SNL Metals & Mining 2014
Politisches Risiko	Länderrisiko Politische Stabilität	Politische Instabilität der Förderländer, gewichtet nach Produktionsanteilen, gemessen mit dem Worldwide Governance Indikator für Politische Stabilität und Gewaltfreiheit	$\sum \text{Prod. Anteil}_{Land} \times \text{WGI-PV}_{Land}$	Weltbank 2014 Kaufmann et al. 2010
	Länderrisiko Policy Potential	Fähigkeit der Abbauländer, neue Bergbauprojekte umgesetzt zu bekommen, gemessen am Policy Potential Index	$\sum \text{Prod. Anteil}_{Land} \times \text{PPI}_{Land}$	Fraser Institute, Wilson et al. 2013
	Länderrisiko Regulation	Fähigkeit der Produktionsländer, aufgrund ihres Entwicklungsstandes Handelsrestriktionen tatsächlich umzusetzen, gemessen am HDI	$\sum \text{Prod. Anteil}_{Land} \times \text{HDI}_{Land}$	Human Development Index, UNDP 2014
Risiko der Angebotsreduzierung	Statische Reichweite Reserven	Statische Reserven-Reichweite des Rohstoffs, gemessen mit dem Verhältnis aus jährlicher Produktionsmenge und globalen Reserven	$\frac{\text{Globale Reserven}}{\text{Jährliche Produktion}}$	U.S. Geological Survey 2014b
	Statische Reichweite Ressourcen	Statische Ressourcen-Reichweite des Rohstoffs, gemessen mit dem Verhältnis aus jährlicher Produktionsmenge und global geschätzten Ressourcen	$\frac{\text{Globale Ressourcen}}{\text{Jährliche Produktion}}$	U.S. Geological Survey 2014b
	EoL-Recyclingrate	Recyclingquote des Rohstoffs, gemessen an der derzeitigen End-of-Life-Recycling-Rate	End-of-Life-Recyclingrate	Graedel et al. 2011b
Risiko des Nachfrageanstiegs	Koppelproduktion	Anteil der als Koppelprodukt geförderten Menge an der globalen Produktion des Rohstoffs	$\frac{\text{Jährl. Prod. als Koppelprod.}}{\text{Gesamte jährl. Prod.}}$	SNL Metals & Mining 2014
	Nachfrageanstieg Zukunftstechn.	Geschätzte Nachfrage durch Zukunftstechnologien, gemessen mit dem Verhältnis von erwarteter Nachfrage in einem zukünftigen Jahr und der globalen Förderung in einem vergangenen Jahr	$\frac{\text{Nachfrage 2030 von Zuk.Techn.}}{\text{Gesamtproduktion 2006}}$	Angerer et al. 2009
	Substituierbarkeit	Die Einschätzung der Erfüllbarkeit der Funktion eines Rohstoffs durch einen anderen Rohstoff; gemessen durch Experteneinschätzungen	Expertenschätzung	Graedel et al. 2013

### 4.3.1.2 Kategorisierung und Gewichtung der Indikatoren

Nach der Auswahl der Indikatoren sind diese für die betriebliche Rohstoffbewertung zu kategorisieren und zu gewichten. Dies ist erforderlich, um zu einem aggregierten Bewertungswert für die ökonomische Dimension der Kritikalität zu kommen.

Die Ableitung der Kategorien, deren Gewichtung zueinander sowie die Gewichtung der einzelnen Indikatoren innerhalb der gewählten Kategorien erfolgt mittels des Analytischen Hierarchieprozesses (AHP) nach Saaty (Saaty 1980).

In einem ersten Schritt sind die identifizierten 11 Indikatoren in thematische Gruppen zusammenzufassen. In einem stufenweisen Prozess werden mittels der Expertengruppe vier Kategorien (K1 bis K4) definiert (vgl. Abbildung 12). Diese adressieren das:

- Konzentrationsrisiko (K1),
- Politisches Risiko (K2),
- Risiko der Angebotsreduktion (K3) und
- Risiko des Nachfrageanstiegs (K4).

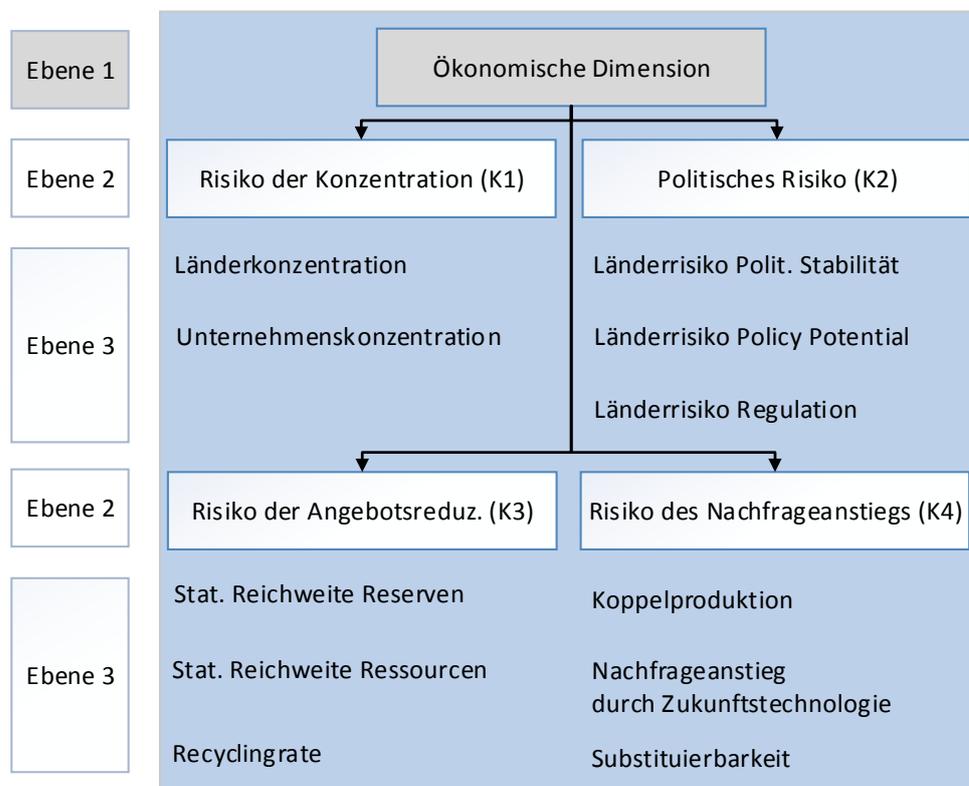


Abbildung 12: Kategorisierung der ökonomischen Indikatoren

Die Bestimmung der Gewichtungen der vier Kategorien bzw. der 11 Indikatoren basieren, entsprechend des AHP-Ansatzes, auf paarweisen Vergleichen. Hierzu wurde ein Fragebogen an 15 Experten versandt, davon acht aus den Forschungsbereichen der Ressourcenstrategie, Rohstoffbewertung, Grundlagenforschung, Informationssystem und Betriebswirtschaft und sieben aus KMUs und Industrieunternehmen. Verglichen werden die vier Kriterien untereinander und die einem Kriterium zugeteilten Indikatoren.

Für die Bestimmung der Gewichtungen pro Kriterium und pro Indikator wird die AHP-Software "SuperDecision" (Creative Decision Foundation 2013) verwendet. Die Zahleneinträge in der Ergebnismatrix (vgl. Tabelle 6) geben jeweils die Gewichtung der Indikatoren in der ersten Tabellenspalte gegenüber dem Vergleichspartner in einer nachfolgenden Tabellenspalte an. Die Konsistenzverhältnisse (KV) der Ergebnismatrizen sind deutlich kleiner als der aus der Literatur vorgegebene Schwellwert von 0,1. Dies zeigt, dass die Aggregation der Expertenbewertungen bei der Gewichtungsabfrage bezüglich der paarweisen Vergleiche hinreichend konsistente Ergebnisse liefert (Saaty 1980, Saaty 1994).

**Tabelle 6: Ergebnismatrix aller paarweisen Vergleiche**

<b>Versorgungsrisiko (Ökon. Dimension)</b>	<b>RK</b>	<b>PR</b>	<b>RA</b>	<b>RN</b>	<b>Priorität</b>
Risiko der Konzentration (RK)	1	2,812	2,178	0,8414	0,359
Politisches Risiko (PR)	0,356	1	1,485	0,680	0,183
Risiko d. Angebotsreduzierung (RA)	0,459	0,673	1	0,655	0,157
Risiko d. Nachfrageanstiegs (RN)	1,188	1,470	1,527	1	0,302
Konsistenzverhältnis (KV) = 0,036					
<b>Risiko der Konzentration</b>	<b>Länderkonzentration</b>		<b>Unternehmenskonzentration</b>		<b>Priorität</b>
Länderkonzentration	1		1,368		0,578
Unternehmenskonzentration	0,731		1		0,422
KV = 0					
<b>Politisches Risiko</b>	<b>LRPS</b>	<b>LRPP</b>	<b>LRR</b>	<b>Priorität</b>	
Länderrisiko Politische Stabilität (LRPS)	1	2,043	1,668	0,479	
Länderrisiko Policy Potential (LRPP)	0,489	1	0,770	0,241	
Länderrisiko Regulation (LRR)	0,599	1,130	1	0,280	
KV = 0,001					
<b>Risiko d. Angebotsreduzierung</b>	<b>SRReserven</b>	<b>SRRessourcen</b>	<b>Recyclingrate</b>	<b>Priorität</b>	
Statische Reichweite Reserven	1	2,034	0,934	0,398	
Statische Reichweite Ressourcen	0,492	1	0,614	0,216	
EoL-Recyclingrate	1,070	1,628	1	0,387	
KV = 0,009					
<b>Risiko d. Nachfrageanstiegs</b>	<b>KP</b>	<b>NZ</b>	<b>Subs.</b>	<b>Priorität</b>	
Koppelproduktion (KP)	1	0,613	0,430	0,203	
Nachfrageanstieg Zukunftstechn. (NZ)	1,630	1	0,830	0,350	
Substituierbarkeit (Subs.)	2,33	1,204	1	0,446	
KV = 0,003					

Tabelle 7 zeigt die Gewichtungsfaktoren für die Kategorien K1 - K4 zueinander sowie die Einzelgewichte der Indikatoren. Dabei wird deutlich, dass die Experten das Konzentrationsrisiko und das Risiko eines Nachfrageanstiegs für besonders relevant halten. Das Risiko der Angebotsreduktion wird als weniger bedeutend eingeschätzt.

**Tabelle 7: Indikatorengewichtung**

<b>Kriterium</b>	<b>Lokale Gewichtung</b>	<b>Indikator</b>	<b>Lokale Gewichtung</b>	<b>Globale Gewichtung</b>
Risiko der Konzentration	0,359	Länderkonzentration	0,578	0,208
		Unternehmenskonzentration	0,422	0,151
Politisches Risiko	0,183	Länderrisiko Politische Stabilität	0,479	0,088
		Länderrisiko Policy Potential	0,241	0,044
		Länderrisiko Regulation	0,280	0,051
Risiko der Angebotsreduzierung	0,157	Statische Reichweite Reserven	0,398	0,062
		Statische Reichweite Ressourcen	0,216	0,034
		EoL-Recyclingrate	0,387	0,061
Risiko des Nachfrageanstiegs	0,302	Koppelproduktion	0,203	0,061
		Nachfrageanstieg Zukunftstechn.	0,350	0,106
		Substituierbarkeit	0,446	0,135
			Summe	1,000

In Tabelle 8 werden die Einzelindikatoren nach Priorität geordnet. Die beiden Indikatoren der Kategorie „Konzentrationsrisiko“ werden als wichtigste Indikatoren eingeschätzt, gefolgt von den Indikatoren „Substituierbarkeit“ und „Nachfrage Zukunftstechnologie“. Die „Statische Reichweite Ressourcen“ sowie das „Länderrisiko Policy Potential“ und das „Länderrisiko Regulation“ weisen die geringste Gewichtung auf.

**Tabelle 8: Rangfolge der ökonomischen Indikatoren**

Rang	Indikator	Globale Gewichtung (%)
1	Länderkonzentration	20,8
2	Unternehmenskonzentration	15,1
3	Substituierbarkeit	13,5
4	Nachfrage Zukunftstechnologie	10,6
5	Länderrisiko Politische Stabilität	8,8
6	Statische Reichweite Reserven	6,2
7	Koppelproduktion	6,1
8	EoL-Recyclingrate	6,1
9	Länderrisiko Regulation	5,1
10	Länderrisiko Policy Potential	4,4
11	Statische Reichweite Ressourcen	3,4
Summe		100

Die vorgeschlagene Gewichtung ist als allgemeingültig beste Alternative zu interpretieren und ist beispielsweise zu empfehlen, wenn keine (unternehmensinterne) Expertise zur Kritikalitätsbewertungen vorhanden ist. Unbeschadet dessen kann sie unternehmensspezifisch angepasst werden.

### 4.3.2 Ökologische Kritikalitätsbewertung

Für die ökologische Bewertung der Inhaltsstoffe eines Produktes stellen Ökobilanzen (Life Cycle Analysis) den Stand der Wissenschaft dar. So wird gemäß Ökobilanzierungsnorm ISO 14040 auf die für die entsprechenden Prozesse ermittelten Life Cycle Inventories (LCI) jeweils eine entsprechende Methode aus dem Bereich der Life Cycle Impact Assessments (LCIA) angewendet.

Diese Methode kann entweder die direkte Auswirkung der Ressourcennutzung und der damit verbundenen Stoffemissionen und Flächennutzungen angeben (sog. „Midpoints“) oder die aus diesen Auswirkungen resultierenden Schäden in den entsprechenden Schutzbereichen wie „Menschliche Gesundheit“ (Human Health) oder „Biodiversität“ (Ecosystem Quality) abschätzen (sog. „Endpoints“). Das Joint Research Centre (JRC) der

Europäischen Kommission unterscheidet 17 verschiedene „Midpoint“-Kategorien und gibt für 16 von diesen eine empfohlene Berechnungsmethode an (Wolf et al. 2012). Für die Umrechnung der „Midpoint“-Auswirkungen auf „Endpoint“-Schäden liegen bisher lediglich für die Kategorien krebserregende Giftstoffe, Feinstaub und bodennahes Ozon empfohlene Methoden vor. Die Methode ‚ReCiPe‘<sup>12</sup> wird für die letztere, die sogenannte Kategorie „Photochemical ozone formation“ empfohlen und wird auch von Graedel für die Kritikalitätsbewertung in der Umweltdimension herangezogen (Graedel et al. 2012).

Unabhängig von der genannten Einschränkung ist die ReCiPe-Methodik für die Transformation aller „Midpoint“-Kategorien in Werte für die Schutz- bzw. Schadenskategorien („Endpoint“-Kategorien) anwendbar. Soll die Bewertung der Rohstoffnutzung im Produkt quantitativ erfolgen, ist für Unternehmen die Verwendung von „Endpoint“-Kategorien zu bevorzugen, da hier eine Normalisierung und Gewichtung sowie eine Umrechnung der bis zu 17 Wirkungskategorien auf lediglich zwei bis drei Schadenskategorien bereits innerhalb der LCIA-Methode stattfindet.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen der vorliegenden Studie für die ökologische Bewertung der Rohstoffe die ReCiPe-Methode vorgeschlagen (ReCiPe 2012). Die dabei berücksichtigten Schutzbereiche („Endpoints“) betreffen die Menschliche Gesundheit (Human Health) und den Erhalt der Biodiversität (Ecosystem Quality). Die dritte innerhalb der ReCiPe-Methode vorgeschlagene „Endpoint“-Kategorie, die Ressourcenverfügbarkeit, wird hier für die Bewertung der ökologischen Dimension ausgeblendet, da die Verfügbarkeit bereits bei der ökonomischen Bewertung berücksichtigt wird.

Tabelle 9 zeigt eine exemplarische Bewertung für Gold<sup>13</sup> sowie die verwendeten „Midpoint“-Indikatoren. Die für eine derartige ökologische Bewertung (Life Cycle Impact Assessment) benötigten Daten können direkt aus der „ecoinvent“-Datenbank entnommen werden (ecoinvent Centre 2010).

---

<sup>12</sup>Die Bezeichnung ‚ReCiPe‘ ist ein Akronym und bezieht sich auf die vier mitwirkenden niederländischen Institutionen RIVM, Radboud Universität Nijmegen, CML (Universität Leiden) und PRé Consultants.

<sup>13</sup>Die Werte für die „Endpoints“ in Tabelle 9 ergeben sich bei der Annahme einer 35%-igen Verwendung von Sekundärgold.

**Tabelle 9: Bewertung der ökologischen Kritikalität am Beispiel von Gold**

Ökologische Dimension	Indikator	Endpoints Primärprod. (Gewichtung 0,65)	Endpoints Sekundärprod. (Gewichtung 0,35)	Gesamtwert
<b>Human Health</b>	Climate Change	8959,5	28,74	5833,73
	Human Toxicity			
	Ionising Radiation			
	Ozone Depletion			
	Particulate Matter Formation			
	Photochemical Oxidant Formation			
<b>Ecosystem Quality</b>	Agricultural Land Occupation	532,29	15,76	351,5
	Climate Chance			
	Freshwater Ecotoxicity			
	Freshwater Eutrophication			
	Marine Ecotoxicity			
	Natural Land Transformation			
	Terrestrial Acidification			
	Terrestrial Ecotoxicity			
Urban Land Occupation				

Im Fall von Gold wird dabei zwischen Gold aus der Primärproduktion und der Sekundärproduktion unterschieden. Gemäß der „ecoinvent Version 2.2“ (Stand 2010) können für beide Varianten entsprechende Prozesse in der Datenbank identifiziert werden. Die primäre Goldproduktion wird durch den Prozess „Gold, aus Primärproduktion, ab Raffinerie“ abgedeckt. Für Gold aus der Sekundärproduktion wird „Gold, sekundär, ab Raffinerie“ verwendet. Für beide Prozesse ist 1 Kilogramm die funktionelle Einheit. Innerhalb der ReCiPe-Methode wird ein Zeithorizont von 100 Jahren gewählt (Hierarchist-Methode). Die Normalisierungsfaktoren haben einen Europa-Bezug und die verschiedenen Wirkungskategorien werden mit der durchschnittlichen Gewichtung verrechnet. Diese Normalisierung und Gewichtung wurde von den Autoren der ReCiPe-Methode empfohlen (Goedkoop et al. 2013). Tabelle 10 zeigt die entsprechenden Bewertungen für Primär- und Sekundärgold<sup>14</sup>.

<sup>14</sup> Die Auswertung der Ökobilanz von Primär- und Sekundärgold beinhaltet jedoch keinen Transport des Rohstoffs zum Produktionsstandort, keine Verarbeitung des Rohstoffs im Produktionsprozess und auch keine Auswirkungen während der Nutzung oder nach der Nutzungsphase. Es werden in den entsprechenden Impact Assessments von ReCiPe aufgrund der eingeschränkten Systemgrenze des Life Cycle Inventoriums in der ecoinvent-Datenbank lediglich die cradle-to-gate-Emissionen von umweltwirksamen Stoffen bis zur Bereitstellung des Gold-Rohstoffs berücksichtigt.

**Tabelle 10: Ergebnisse des Life Cycle Impact Assessments von Gold (ecoinvent Centre 2010).**

Midpoints (Auszug)	Einheit	Primärgold <sup>15</sup>	Sekundärgold <sup>16</sup>	Gold <sup>17</sup>
Global Warming Potential 100 Jahre	kg CO <sub>2</sub> -äq	18650	846,5	12419
Human Toxicity Potential	kg 1,4-DB-äq	582520	147,29	378690
Endpoints	Einheit	Primärgold <sup>15</sup>	Sekundärgold <sup>16</sup>	Gold <sup>17</sup>
Ecosystem Quality	Punkte	532,29	15,76	351,5
Human Health	Punkte	8959,5	28,74	5833,73

Insgesamt wird deutlich, dass Primärgold bei der ökologischen Bewertung erheblich schlechter bewertet wird als Sekundärgold. Ein Kilogramm Primärgold hat bei der Auswirkung auf die Artenvielfalt eine über 30-fach kritischere Wirkung als Sekundärgold, die Wirkung der primären Goldherstellung auf die menschliche Gesundheit ist sogar bereits über 300 mal so hoch wie die Wirkung der gleichen Menge an Sekundärgold (ecoinvent Centre 2010).

Auch im Vergleich zu anderen Rohstoffen schneidet Gold, bezogen auf die ökologische Wirkung des Abbaus, relativ schlecht ab. Hauptgrund hierfür sind die hohen Mengen an für Menschen toxischen Stoffen, die bei der Förderung emittiert werden. Höhere spezifische Punktwerte im Bereich „Human Health“ ergeben sich nur bei Stoffen wie Platin, Palladium oder Rhodium, welche in ihren jeweiligen Erzen in noch geringerer Konzentration vorhanden sind als Gold und deshalb einen noch höheren Einsatz an toxischen Chemikalien zur Aufbereitung benötigen (ecoinvent Centre 2010).

### 4.3.3 Soziale Kritikalitätsbewertung

Analysiert man die aktuelle Diskussion um die sozialen Implikationen der Rohstoffförderung auf Technologieunternehmen, erkennt man, dass diese einerseits durch die unternehmerische Selbstverpflichtung, etwa formuliert in Unternehmensleitlinien, andererseits durch normative Regelungen wie dem Dodd-Frank-Act<sup>18</sup> getrieben wird. Das politische Ziel des Artikels 1502 des Dodd-Frank-Acts ist die

<sup>15</sup>Verwendet wurde der Prozess „Gold, aus Primärproduktion, ab Raffinerie“.

<sup>16</sup>Verwendet wurde der Prozess „Gold, sekundär, ab Raffinerie“.

<sup>17</sup>Unter der Annahme, dass Gold aus 65% Primärgold und 35% Sekundärgold hergestellt wird.

<sup>18</sup>Dodd-Frank-Act: siehe auch „Leitfaden für Unternehmen zum Dodd-Frank-Act, Section 1502“; Deutsch-Amerikanische Handelskammern.

Unterbindung der Finanzierung von Konfliktparteien durch den Abbau der 3TG-Metalle (Zinn, Tantal, Wolfram, Gold)<sup>19</sup> etwa im Osten der Demokratischen Republik Kongo.

Festzuhalten ist, dass für die Auswahl sozialer Indikatoren keine etablierte Vorgehensweise existiert. Dementsprechend werden in die letztendliche Auswahl oftmals unternehmensspezifische Erwägungen miteinfließen. Hier ist die Zulieferer- und Wertschöpfungskette möglichst genau zu analysieren. Nur auf diese Weise können potentielle Missstände aufgedeckt und entsprechende Maßnahmen getroffen werden.

Um dennoch einen möglichst allgemein gültigen Ansatz zur Bestimmung sozialer Indikatoren vorzuschlagen, werden für die vorliegende Studie die Grundsätze des UN Global Compact (United Nations Global Compact 2014) herangezogen. Hierbei handelt es sich um eine Initiative der Vereinten Nationen, in deren Rahmen sich Unternehmen verpflichten, ihre Geschäftstätigkeiten und Strategien an zehn universell anerkannten Prinzipien aus den Bereichen „Menschenrechte“, „Arbeitsnormen“, „Umweltschutz“ und „Korruptionsbekämpfung“ auszurichten. Die genannten Grundsätze sind abgeleitet aus:

- der Allgemeinen Erklärung der Menschenrechte,
- der Erklärung über grundlegende Prinzipien und Rechte bei der Arbeit der Internationalen Arbeitsorganisation,
- den Grundsätzen der Erklärung von Rio zu Umwelt und Entwicklung,
- der UN-Konvention gegen Korruption.

Der UN Global Compact fordert Unternehmen dazu auf, sich innerhalb ihres Einflussbereiches Grundsätzen aus den vier Bereichen Menschenrechte, Arbeitsnormen, Umweltschutz und Korruptionsbekämpfung anzunehmen, diese zu unterstützen und zu befolgen. Die zu berücksichtigenden Grundsätze sind in Tabelle 11 aufgelistet.

---

<sup>19</sup> „3TG“ ist eine Referenz auf die englische Bezeichnung der Metalle: Tin, Tantal, Tungsten, Gold.

**Tabelle 11: Die zehn Grundsätze des UN Global Compact**

Menschenrechte	
Grundsatz 1	Unternehmen sollen den Schutz der internationalen Menschenrechte unterstützen und achten und
Grundsatz 2	sicherstellen, dass sie sich nicht an Menschenrechtsverletzungen mitschuldig machen.
Arbeitsnormen	
Grundsatz 3	Unternehmen sollen die Vereinigungsfreiheit und die wirksame Anerkennung des Rechts auf Kollektivverhandlungen wahren.
Grundsatz 4	Unternehmen sollen sich für die Beseitigung aller Formen der Zwangsarbeit einsetzen.
Grundsatz 5	Unternehmen sollen sich für die Abschaffung von Kinderarbeit einsetzen.
Grundsatz 6	Unternehmen sollen sich für die Beseitigung von Diskriminierung bei Anstellung und Erwerbstätigkeit einsetzen.
Umweltschutz	
Grundsatz 7	Unternehmen sollen im Umgang mit Umweltproblemen dem Vorsorgeprinzip folgen.
Grundsatz 8	Unternehmen sollen Initiativen ergreifen, um größeres Umweltbewusstsein zu fördern.
Grundsatz 9	Unternehmen sollen die Entwicklung und Verbreitung umweltfreundlicher Technologien beschleunigen.
Korruptionsbekämpfung	
Grundsatz 10	Unternehmen sollen gegen alle Arten der Korruption eintreten, einschließlich Erpressung und Bestechung.

Entsprechend des in dieser Studie entworfenen Kritikalitätsbewertungskonzeptes wurden die genannten Grundsätze hinsichtlich der Verfügbarkeit quantitativer Indikatoren untersucht. Hierzu wurde ein Expertenworkshop unter Mitwirkung der Projekt- und Kooperationspartner sowie des Fachbeirats durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Grundsätze 1 und 2 (aus dem Bereich „Menschenrechte“) werden als nicht quantifizierbar erachtet und werden daher nicht weiter berücksichtigt.
- Die Grundsätze 7, 8 und 9 (aus dem Bereich Umwelt) werden ebenfalls nicht weiter berücksichtigt, da das Kritikalitätsmodell mit der separaten ökologischen Dimension den Umweltaspekt bereits abdeckt.
- Für die restlichen fünf Grundsätze wird in einem ersten Schritt jeweils mindestens ein Indikator ausgewählt (vgl. Tabelle 12).
- Letztendlich werden zur Bewertung der sozialen Dimension drei Indikatoren „World Governance Indicator – Voice and Accountability“, „UNICEF Childinfo“ und „World Governance Indicator – Control of Corruption“ ausgewählt.

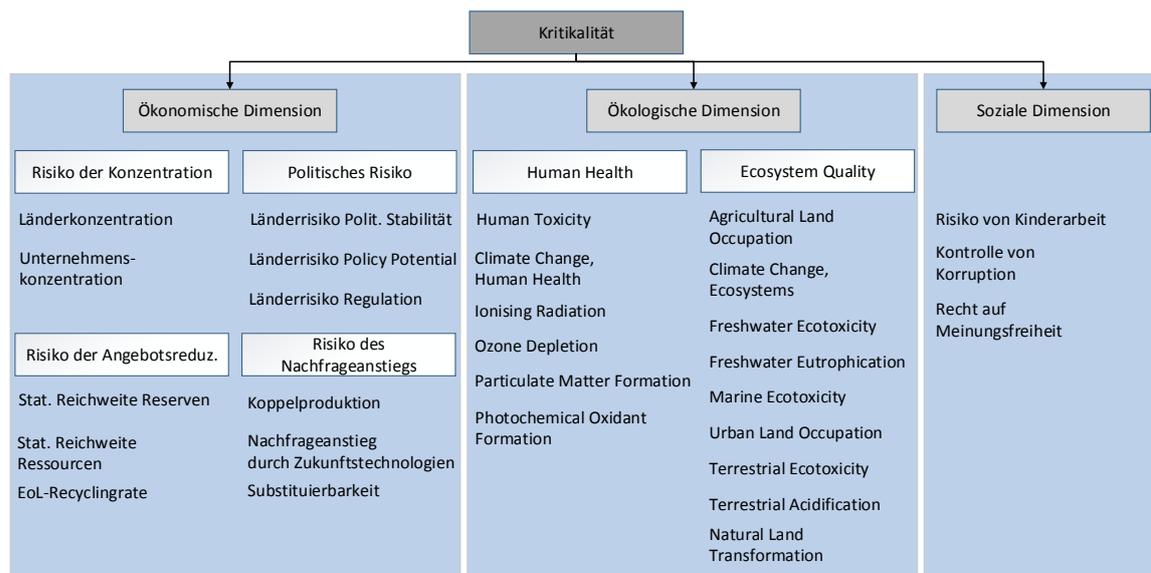
**Tabelle 12: Indikatoren zu den fünf quantifizierbaren Grundsätzen des UN Global Compact**

Grundsatz	Mögliche Indikatoren
3	World Governance Indicator – Voice and Accountability
4	Maplecroft-Index bezüglich Zwangs- und unfreiwilliger Arbeit (Forced and Involuntary Labour Index)
5	Maplecroft –Index bezüglich Kinderarbeit (Child Labour Index) UNICEF Childinfo
6	Eine geschlechterfokussierte Variation des Human Development Index (HDI) Maplecroft-Index bezüglich Arbeitskonditionen (Working Conditions Index)
10	World Governance Indicator – Regulatory Quality World Governance Indicator – Control of Corruption

Damit werden zwei Indikatoren zur Bewertung des Bereichs „Arbeitsnormen“ und ein Indikator zur Bewertung des Bereichs „Korruptionsbekämpfung“ berücksichtigt. Aufgrund des spezifischen Charakters der Bewertungsdimension empfiehlt sich eine unternehmensspezifische Adaption oder Ergänzung der Indikatorenliste gemäß den spezifischen Unternehmensleitlinien.

#### 4.3.4 Strukturbaum zur Kritikalitätsbewertung

Der Strukturbaum zur Kritikalitätsbewertung fasst die ermittelten Indikatoren zur Bewertung der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension der Nachhaltigkeit zusammen und strukturiert diese anhand inhaltlicher Kategorien (vgl. Abbildung 13).



**Abbildung 13: Strukturbaum für die Kritikalitätsbewertung eines Rohstoffes**

Zur Berechnung eines Kritikalitätswertes für einen Rohstoff sind Indikatoren der drei Teilkategorien zu aggregieren. Zur Aggregation der ökonomischen Indikatoren wird gemäß Abschnitt 4.3.1.2 ein AHP-Ansatz (Analytical Hierarchy Process) vorgeschlagen. Die entsprechenden Gewichtungsfaktoren wurden in interdisziplinären Expertenworkshops bzw. durch Expertenbefragung ermittelt. Die Bewertung für einen Rohstoff ist umso besser, je höher der aggregierte Wert ist.

Die ökologischen Indikatoren werden gemäß des Standes der Wissenschaft auf Basis der ReCiPe-Methode auf sogenannte „Endpoint“-Werte aggregiert. Dabei wird jedem Rohstoff (z.B. Technologiemetall) ein absoluter Endpunktwert in der Einheit „Endpunkte pro Kilogramm“ zugeteilt. Zwei Rohstoffe können hier aufgrund ihrer massenspezifischen Endpunkte direkt miteinander verglichen werden. Die Bewertung ist umso besser, je kleiner die vorliegenden Endpunkte sind. Diese Vorgehensweise beruht auf der Annahme, dass alle zur Auswahl stehenden Rohstoffe mit der gleichen Masse eingehen. Ist der tatsächliche Masseneinsatz der einzelnen Rohstoffe im Produkt/Bauteil bekannt (erfordert einen höheren Informationsstand im Unternehmen), kann der Endpunktwert entsprechend angepasst werden.

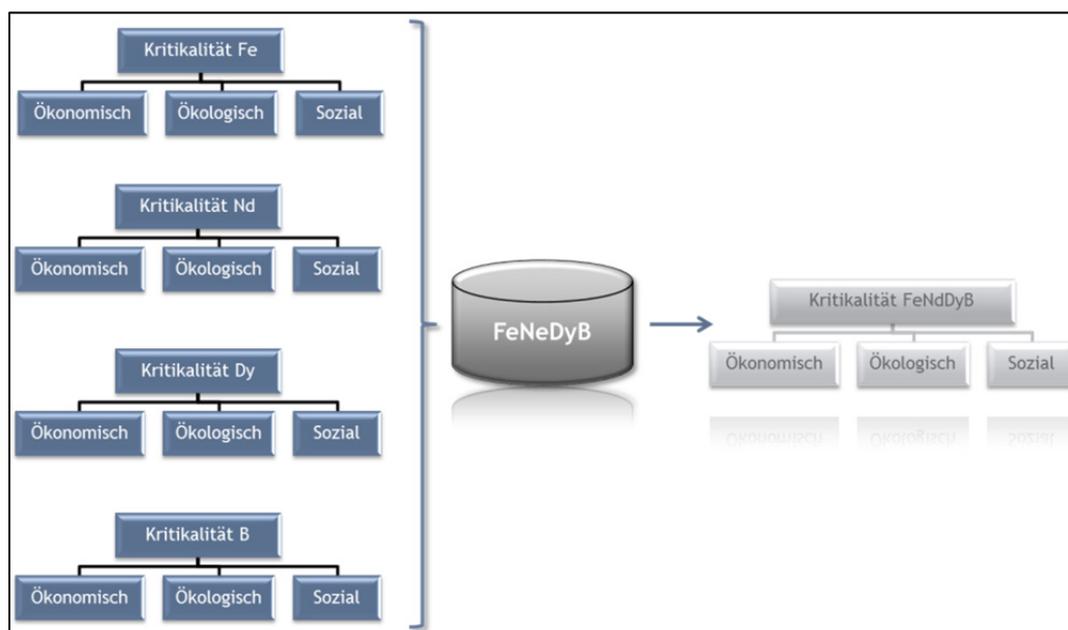
Bezüglich der Aggregation der sozialen Indikatoren wird das Maximumprinzip vorgeschlagen, wobei jeder der insgesamt drei Indikatoren einen Wert zwischen 0 (unkritisch) und 100 (hochkritisch) annehmen kann. D.h. der Indikator mit der „schlechtesten“ Bewertung ist dominant. Der Grundgedanke hierbei ist, dass ein einzelner nicht eingehaltener sozialer Standard nicht kompensiert werden kann.

Nach der Aggregation der Indikatoren innerhalb der drei Nachhaltigkeitsdimensionen bleibt die Frage der Gewichtung der Dimensionen zueinander, um eine einzige Kritikalitätskennzahl für einen Rohstoff festzulegen. Die im Rahmen des Projektes geführten Untersuchungen zeigen, dass eine Gewichtung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen äußerst problematisch ist. Sie sollte – wenn überhaupt – für jedes Unternehmen individuell erfolgen. Dies ergibt sich einerseits aus der prinzipiellen Schwierigkeit, ökonomische, ökologische und soziale Aspekte miteinander zu vergleichen und bestätigte sich in den Diskussionen mit Mitgliedern des Augsburger Graduiertenkollegs „Ressourcenstrategische Konzepte für zukunftsfähige

Energiesysteme“, in dem wissenschaftliche Mitarbeiter mit unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten (Naturwissenschaften, Wirtschaftswissenschaften und Sozialwissenschaften) in einem interdisziplinären Team zusammenarbeiten. Zusätzlich zeigte die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, dass die einzelnen Dimensionen stets unterschiedlich, also personenspezifisch oder auch unternehmensspezifisch, bewertet werden. Daher ist eine generelle Empfehlung für die Gewichtung zwischen ökonomischen, ökologischen und sozialen Risiken nicht zielführend.

#### 4.3.5 Aggregationsproblematik auf Produktebene

Das bisher vorgestellte Kritikalitätsbewertungskonzept liefert drei Bewertungen je Inhaltsstoff oder Element. Da in Produkten und Bauteilen im Allgemeinen verschiedene kritische Funktionselemente enthalten sind, stellt sich das Problem der Aggregation ökonomischer, ökologischer und sozialer Kritikalitätswerte verschiedener Inhaltsstoffe (vgl. Abbildung 14).



**Abbildung 14: Aggregationsproblematik bei der Bewertung komplexer Bauteile**

Bezüglich der ökologischen liegt es nahe, die auf Einzelelementebene definierten Methoden zu übertragen, da diese prinzipiell linear bzw. additiv sind. Insofern können auch „Endpoint“-Werte mehrerer Elemente, falls bekannt, gewichtet mit den Massenanteilen, summiert werden. Bezüglich der sozialen Teilkriterien wird wiederum

das Maximumprinzip (hier als Maximum der Maxima) vorgeschlagen, d.h. das Element mit der „schlechtesten“ Bewertung dominiert die Produkt-/Bauteilbewertung.

Bezüglich der Aggregation der ökonomischen Kritikalitätswerte einzelner Elemente ist eine weitergehende Betrachtung erforderlich. Dies schließt sowohl eine potentielle Gewichtung der Kritikalitätswerte einzelner Rohstoffe als auch die Aggregation der gewichteten Werte ein.

Zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren werden folgende Verfahren untersucht und anhand eines Neodym-Dysprosium-Eisen-Bor Hochleistungsmagneten ( $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ), der aktuell im Applikationsfeld der Elektromobilität zum Einsatz kommt, verdeutlicht:

- *Gewichtung nach Massenanteilen:* Problematisch an der Gewichtung nach Massenanteilen ist, dass Funktionselemente mit hoher Kritikalität und niedrigem Massenanteil tendenziell unterbewertet werden. So enthält der Neodym-Dysprosium-Eisen-Bor-Magnet nur 1 Gewichtsprozent Bor und 6,9 Gewichtsprozent Dysprosium, aber 72,3 Gewichtsprozent Eisen. Eine entsprechende Vorgehensweise würde zu einer Überbewertung des relativ unkritischen Elements Eisen führen.
- *Gewichtung nach Kosten:* Bei einer Gewichtung nach Kostenanteilen dominieren im Beispiel die Metalle der Seltenen Erden. Insbesondere Dysprosium, obwohl vom Massenanteil nur zu knapp 6% im Produkt enthalten, trägt bei dieser Gewichtung mit 68% zur Gesamtbewertung des Magneten bei. Wird dem Rohstoffpreis eine vollständige Wiedergabe der Verfügbarkeitssituation (Angebots-Nachfrage-Verhältnis) eines Rohstoffs unterstellt, würden Preissteigerungen implizieren, dass der Rohstoff knapper wird. Folglich würde auch der Kritikalitätswert steigen. Eine Aggregationsmethode gemäß dem Gesamtkostenanteil könnte diese Effekte berücksichtigen und somit stets aktuelle Ergebnisse bezüglich der real vorhandenen Marktsituation liefern. Sollte der Rohstoff Eisenerz knapper werden und der Eisenerzpreis in der Folge steigen, würde dies einen Einfluss auf die Kritikalitätsbewertung des Magneten haben. Kritisch bleibt anzumerken, ob aktuelle Preise tatsächlich ein zukünftiges Versorgungsrisiko antizipieren.

- Gewichtung nach dem Maximumprinzip:* In Analogie zur Bewertung der sozialen Dimension könnte sich die Bewertung des Bauteils an dem „kritischsten“ Element orientieren. Demnach wird einem Bauteil, im obigen Beispiel dem Magneten, die Kritikalität des Inhaltsstoffs mit dem höchsten Kritikalitätswert zugesprochen. Ein Produkt wäre demnach immer genauso kritisch wie der kritischste Inhaltsstoff. Der Grundgedanke besteht hierbei darin, dass zur Fertigung eines Produktes alle relevanten Bestandteile zwingend benötigt werden und ein Überschuss von einem unkritischen Rohstoff den Verfügbarkeitsengpass eines kritischeren Bestandteils nicht ausgleichen kann. Das bedeutet, dass das Risiko des kritischsten Elements nicht kompensiert werden kann. Die einzelnen Versorgungsrisiken der Inhaltsstoffe werden hier als stochastisch unabhängig voneinander angenommen.
- Gleichgewichtung:* Können keine plausiblen Gewichtungslogiken gefunden werden, besteht die Möglichkeit einer Gleichgewichtung. Der Nachteil liegt in einer kompensatorischen Wirkung.

Nach der Bestimmung der Gewichtungsfaktoren sind die gewichteten Werte zu aggregieren. Hierzu werden eine lineare sowie eine multiplikative Aggregation untersucht. Die Ergebnisse der linearen Aggregation sind am Beispiel des beschriebenen Hochleistungsmagneten in Tabelle 13 aufgezeigt; Tabelle 14 hingegen zeigt die Ergebnisse einer multiplikativen Aggregation.

**Tabelle 13: Bestimmung des Kritikalitäts-Index für den (Nd,Dy)<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B -Magneten mittels linearer Aggregation**

Aggregationsmethodik									
Element	Kritikalität	Massenanteil		Maximalprinzip		Kostenanteil		Mittelwert	
<i>j</i>	<i>k<sub>j</sub></i>	<i>w<sub>j</sub></i>	<i>k<sub>j</sub> * w<sub>j</sub></i>						
Nd	72,67	0,198	14,39	1,00	72,67	0,32	23,50	0,25	18,17
Dy	72,67	0,069	5,01	0,00	0,00	0,68	49,15	0,25	18,17
Fe	43,13	0,723	31,18	0,00	0,00	$1,8 * 10^{-5}$	0,00	0,25	10,78
B	66,58	0,010	0,67	0,00	0,00	$1,9 * 10^{-4}$	0,01	0,25	16,65
$G = \sum_{Element_j=1}^n k_j * w_j$ <b>Gesamtbewertung</b>		Σ	<b>51,25</b>	Σ	<b>72,67</b>	Σ	<b>72,67</b>	Σ	<b>63,76</b>
<i>k<sub>j</sub></i> : Kritikalität Element <i>j</i> ; <i>w<sub>j</sub></i> : Gewichtung Element <i>j</i>									

**Tabelle 14: Bestimmung des Kritikalitäts-Index für den (Nd,Dy)<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B -Magneten mittels multiplikativer Aggregation**

Aggregationsmethodik									
Element	Kritikalität	Massenanteil		Maximalprinzip		Kostenanteil		Mittelwert	
$j$	$k_j$	$w_j$	$k_j^{w_j}$	$w_j$	$k_j^{w_j}$	$w_j$	$k_j^{w_j}$	$w_j$	$k_j^{w_j}$
Nd	72,67	0,198	2,34	1,00	72,67	0,32	4,00	0,25	2,92
Dy	72,67	0,069	1,34	0,00	1,00	0,68	18,15	0,25	2,92
Fe	43,13	0,723	15,20	0,00	1,00	$1,8 * 10^{-5}$	1,00	0,25	2,56
B	66,58	0,010	1,04	0,00	1,00	$1,9 * 10^{-4}$	1,00	0,25	2,86
$I = \prod_{j=1}^n (k_j)^{w_j}$ <b>Gesamtbewertung</b>		II	<b>49,79</b>	II	<b>72,67</b>	II	<b>72,67</b>	II	<b>62,40</b>
$k_j$ : Kritikalität Element $j$ ; $w_j$ : Gewichtung Element $j$									

Die Gewichtung nach Massenanteilen führt bei beiden betrachteten Aggregationsmethoden zu den jeweils geringsten Kritikalitätseinschätzungen (51,25 und 49,79) und scheint für das hier vorliegende Beispiel nicht geeignet zu sein, wenn man berücksichtigt, dass zwei der vier Inhaltsstoffe eine Kritikalitätsbewertung von 72,67 aufweisen. Verantwortlich für die verhältnismäßig geringe Gesamtbewertung ist der Bestandteil Eisen, mit einer relativ geringen Einzelbewertung von 43,13 und einem Massenanteil von 72%. Ähnliches gilt für die Methode der Gleichgewichtung, da auch hier die höheren Einzelbewertungen scheinbar unterrepräsentiert werden. Das Maximumprinzip hingegen bewertet die Gesamtkritikalität des Produktes intuitiv. Zu diskutieren ist die Tatsache, dass hier zwei der vier beteiligten Elemente diesen Maximalwert aufzeigen und das Produkt daher „kritischer“ erscheint im Vergleich zu dem Fall, wenn nur ein Element diesen Maximalwert tragen würde, dies bei der Gewichtung aber nicht zum Ausdruck kommt. Nahezu identische Ergebnisse zum Maximalprinzip liefert die Aggregation gemäß den entsprechenden Kostenanteilen.

#### 4.4 Bewertung betrieblicher Handlungsoptionen

Nach der Identifikation strategischen Produkte und Bauteile bzw. der entsprechenden Inhalts- und Betriebsstoffe (RHBS) sind auf Basis des Kritikalitätsassessments unternehmerische Handlungsoptionen zur Reduktion des Rohstoffrisikos zu eruiieren. Prinzipiell können diese in betriebswirtschaftliche und technologische Maßnahmen unterteilt werden. Zu den betriebswirtschaftlichen Optionen zählen im Wesentlichen

Absicherungsmaßnahmen wie langfristige Vertragsgestaltung, physische Lagerhaltung, Rückwärtsintegration und Hedging. Technologische Maßnahmen betreffen die Substitution kritischer Materialien und Bauteile. Darüber hinaus können Kreislaufwirtschaftsstrategien zur Absicherung des Rohstoffrisikos in Betracht gezogen werden. Diese sind aufgrund ihres strategischen Charakters oftmals sehr langfristig orientiert.

#### **4.4.1 Betriebswirtschaftliche Handlungsoptionen**

Betriebswirtschaftliche Maßnahmen bieten sich vor allem dann an, wenn es aus technischer oder ökonomischer Sicht nicht sinnvoll ist, den kritischen Rohstoff bzw. das Bauteil zu substituieren oder in die Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien zu investieren. Prinzipiell kann in Bezug auf betriebswirtschaftlichen Handlungsoptionen zur Adressierung des Rohstoffrisikos in physische und rechtliche Absicherungsmaßnahmen unterschieden werden. Bei einer physischen Absicherung bringt das Unternehmen den kritischen Rohstoff in seinen Besitz. Bei einer rechtlichen Absicherung (beispielsweise durch kapitalmarktbasierende Instrumente) werden Eigentumsrechte an dem kritischen Rohstoff gesichert. Maßgeblichen Einfluss auf die Wahl eines Absicherungsinstruments haben die für das Unternehmen entstehenden Kosten. Grundsätzlich kann dabei in Preis- und Verfügbarkeitsrisiken unterteilt werden. Die nachfolgend diskutierten Absicherungsinstrumente „Ausgestaltung langfristiger Lieferverträge“, „physische Lagerhaltung“, „Rückwärtsintegration“ und „finanzwirtschaftliche Maßnahmen“ besitzen unterschiedliche Schwerpunkte zur Absicherung von nur einem oder beiden der genannten Risiken.

Eine Möglichkeit zur Absicherung des Verfügbarkeitsrisikos und möglicher Preissteigerungen bietet die physische Lagerhaltung. Hier wird der kritische Rohstoff durch das Unternehmen eingelagert und somit ein Vorrat für die laufende Produktion vorgehalten. Dabei muss für den Rohstoff der optimale Lagerbestand bestimmt werden. Zu beachten ist hierbei, dass hohe Lagerbestände zwar das Verfügbarkeitsrisiko senken, gleichzeitig aber eine hohe Kapitalbindung nach sich ziehen. Bei fallenden Rohstoffpreisen kann es auch zu Spekulationsverlusten kommen.

Durch langfristige Lieferverträge wird im Wesentlichen das Verfügbarkeitsrisiko abgesichert. Unbeschadet dessen kann bei Ausfall des Zulieferers oder dem Ende der Vertragslaufzeit ein Lieferengpass entstehen. Abhängig von einer vorgenommenen Preisbindung in der Ausgestaltung der Lieferverträge wird das Preisrisiko adressiert. Bei einer fehlerhaft prognostizierten Entwicklung der Marktpreise kann ein langfristiger Liefervertrag zu entsprechenden Nachteilen führen, da der Rohstoff ohne die langfristige Bindung mit geringeren Kosten zu beschaffen wäre.

Bei der Handlungsoption Rückwärtsintegration wird direkt in eine Lagerstätte und damit den Rohstoffabbau des kritischen Rohstoffs investiert. Dies kann auch in Form einer Beteiligung an einer Abbaustätte zur Sicherung des eigenen Rohstoffbedarfs geschehen. Damit kann das Unternehmen sich sowohl gegen Preisschwankungen als auch bezüglich des Verfügbarkeitsrisikos absichern.

Eine weitere Absicherungsoption stellen Finanzmarktprodukte dar. Der Rohstoffhandel in Börsenform hat über die letzten Jahre hinweg stark an Bedeutung gewonnen. Gründe dafür sind u.a. die geringen Informations- und Transaktionskosten. Mittels geeigneter Instrumente wie Derivate oder Futures lassen sich künftige Preisanstiege absichern, wobei je nach Ausgestaltung des Finanzinstruments nur ein Preis (Barausgleich) oder die physische Lieferung des Rohstoffs garantiert wird. Abhängig von der Ausgestaltung wird somit das Verfügbarkeitsrisiko abgesichert oder nur eine finanzielle Ausgleichszahlung erreicht.

#### **4.4.2 Substitution als Handlungsoption**

Ziel von Substitutionsmaßnahmen ist es, die kritischen Komponenten eines Produkts durch alternative Bauteile bzw. Inhaltsstoffe zu ersetzen. Der kritische Rohstoff sollte durch diesen Schritt vollständig vermieden oder zumindest der Bedarf reduziert werden. So kann zum Beispiel das Rohstoffrisiko des Bariumtitanat-Kondensators durch eine Substitution zu einem Aluminium- oder Niob-Kondensator verringert werden. Dezierte Substitutionsoptionen untergliedern sich in „Funktionssubstitution“, und „Redesign“.

Bei der Funktionssubstitution werden funktionale Komponenten innerhalb eines Bauteils substituiert. Dies bedeutet, dass ein kritisches Bauteil nicht weiter verwendet wird und

stattdessen ein Bauteil mit der gleichen Funktionalität Verwendung findet. Vor allem bei einem modularen Aufbau eines Produkts bietet sich eine Funktionssubstitution auf Grund geringerer Kosten und Komplexität an.

Beim Redesign wird eine Neukonstruktion vormals kritischer Bauteile erforderlich. Diese Handlungsoption verursacht den höchsten Aufwand innerhalb der Substitutionsalternativen. Die Neugestaltung eines Bauteils erfordert den starken Einbezug der Forschungs- und Entwicklungsabteilung und kann in einigen Fällen genau wie die Entwicklung eines vollständig neuen Produkts behandelt werden.

#### **4.4.3 Kreislaufwirtschaft als Handlungsoption**

Im Gegensatz zu den bisher genannten Maßnahmen ist die Option „Kreislaufwirtschaft“ prinzipiell langfristig orientiert und damit strategischer Natur. Die Umsetzung eines Kreislaufwirtschaftssystems betrifft oftmals eine Restrukturierung der Kundenbeziehung, die Konzeption und Implementierung von Rücknahmesystemen, die Verfügbarkeit effizienter Demontage- und Verwertungstechnologien sowie ein Redesign von Produkten oder Baugruppen. Daher sind umfassende Analysen sowie umfangreiche Investitionen zur Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien notwendig.

Prinzipiell stehen drei Handlungsoptionen zur Implementierung von Kreislaufwirtschaftsstrategien zur Verfügung. Recyclingstrategien zielen im Sinne eines Materialrecyclings darauf ab, die in einem Produkt enthaltenen Wertstoffe als Sekundärrohstoffe wieder zu verwerten. Bei den Remanufacturing und ReUse-Strategien stehen die Mehrfachnutzung von Komponenten und Produkten im Vordergrund (siehe Abbildung 15).

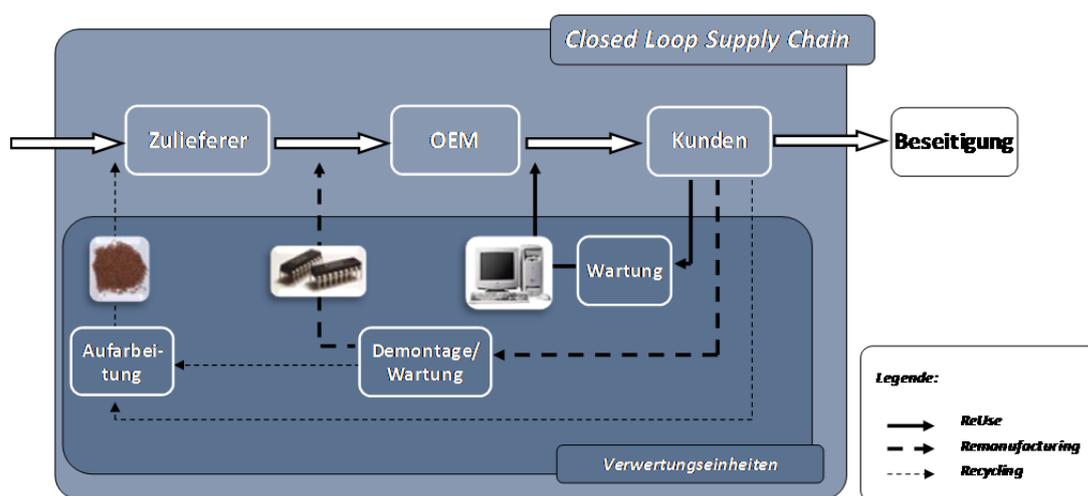


Abbildung 15: Kreislaufwirtschaftsstrategien

Entscheidungsrelevante Parameter zur Identifikation einer geeigneten Kreislaufwirtschaftsstrategie sind neben prinzipiellen technischen und organisatorischen Restriktionen das Verhältnis von Primärrohstoffkosten, Aufbereitungs-, Logistik- und Entsorgungskosten sowie die Größe der Marktsegmente für ReUse-/Remanufacturingprodukte, die Rückflussverteilung der Altprodukte, die technologische Wiedereinsetzbarkeit bzw. die Verwertungsquote.

Bezogen auf die Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien für KMUs, die oftmals in der „Mitte“ der Wertschöpfungskette verortet sind, ist insbesondere das Recycling von Produktionsabfällen (new scrap) interessant. In diesem Zusammenhang zeigte sich im Projekt, dass spezifische Dienstleistungsangebote zielführend sind, wie sie etwa der Projektpartner Remondis Industrie Service GmbH & Co. KG anbietet. Dabei können Unternehmen ihre Produktionsabfälle abholen lassen, diese werden bezüglich des Wertes der enthaltenen Inhaltsstoffe geschätzt. Das liefernde Unternehmen kann entscheiden, ob es die aufbereiteten Rohstoffe als Sekundärrohstoffe (abzüglich der Aufbereitungskosten) zurück erhält oder einen entsprechenden monetären Ausgleich bekommt.

#### 4.4.4 Auswahl rohstoffbezogener Handlungsoptionen

Die Auswahl spezifischer Handlungsoptionen zur Absicherung des Rohstoffrisikos ist unternehmensspezifisch zu diskutieren. Eine prinzipielle Zuordnung dezidierter

Maßnahmen zur Absicherung unterschiedlicher Rohstoffrisiken (vgl. Tabelle 15) findet sich etwa in Fridgen et al. (2013).

**Tabelle 15: Handlungsempfehlungen für Unternehmen**

Exemplarische Zuordnung möglicher Maßnahmen zu möglichen Risiken		Risiken			
		Geologische Risiken / Unsichere Verfügbarkeit	Langfristiger Preisanstieg durch Verknappung	Politische Instabilität	
Unternehmen im Markt	Unternehmensinternes Informationsmanagement	o	o	o	
	Forschung & Entwicklung & Substitution	+	+	+	
	Lagerung	o	o	+	
Maßnahmen	Diversifikation	o	o	+	
	Langfristige Lieferverträge	+	+	o	
	Zulieferernetzwerk	Investition in Zulieferer	+	+	o
	Beschaffungskooperation	o	o	o	
	Unternehmensübergreifendes Informationsmanagement	o	o	+	
	Kundennetzwerk	Langfristige Lieferverträge	o	o	o
	Finanzmarkt & Rohstoffbörse	Financial Hedging	o	-	o
Politik & Rechtliche Rahmenbedingungen	Organisation in Interessengemeinschaften	-	-	o	
Kreislaufwirtschaft	Recycling, Reuse, Remanufacturing	+	+	o	

Legende:

- + Kann im Allgemeinen zur Absicherung des Risikos eingesetzt werden
- o Kann in gewissen Fällen zur Absicherung des Risikos eingesetzt werden
- Kann im Allgemeinen nicht zur Absicherung des Risikos eingesetzt werden

Weitere Studien, die sich mit der Thematik der Absicherung unternehmensspezifischer Rohstoffrisiken auseinandersetzen, finden sich in Tabelle 16.

**Tabelle 16: Studien zu unternehmensspezifischen Handlungsoptionen**

Titel der Studie	Verfasser
Alternative bei drohender Rohstoffknappheit (Buller 2011)	U. Buller; Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (2011)
Rohstoffklemme zeichnet sich ab (Deutscher Industrie- und Handelskammertag 2010)	Deutscher Industrie- und Handelskammertag   Berlin   Brüssel (2010)
Ressourceneinsparpotenziale durch den Einsatz von Dienstleistungsmodellen in rohstoffnahen Produktionssystemen (Bollhöfer et al. 2013)	E. Bollhöfer, et al.; Fraunhofer-Institut für system- und Innovationsforschung ISI (2013)
Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien – Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie (Gandenberger et al. 2012)	C. Gandenberger et al., Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag (2013)
Rohstoffe und Energie: Risiken umkämpfter Ressourcen, Unternehmerperspektiven (Commerzbank AG, Mittelstandsbank, Frankfurt am Main 2011)	Commerzbank AG, Mittelstandsbank, Frankfurt am Main

#### 4.5 Fallstudien mit den Praxispartnern

Im Rahmen des Projektes werden die erarbeiteten Ergebnisse mit den beiden Praxispartnern BMK electronic solutions GmbH & Co. KG und der LST Laser & Schalttechnik GmbH auf deren Praxistauglichkeit evaluiert. Als besonders interessant erweisen sich die unterschiedlichen Fragestellungen der Unternehmen. So ergibt die Vulnerabilitätsanalyse, dass die BMK electronic solutions GmbH & Co. KG als Entwickler und Hersteller innovativer elektronischer Schaltungen auf eine langfristige, kostengünstige Versorgung mit Funktionsbauteilen (z.B. Kondensatoren) angewiesen ist. In diesem Kontext spielen auch ökologische und soziale Aspekte, wie sie etwa im Dodd-Frank-Act zum Ausdruck kommen, eine bedeutende Rolle. Eine eindeutige Identifizierung der Inhaltsstoffe der eingekauften elektronischen Bauteile ist hier nur über kostenpflichtige Datenbanken (siehe Abschnitt 4.2) oder laboranalytische Verfahren möglich. Die Handlungsoptionen zur Reduktion des Rohstoffrisikos beziehen sich auf die Auswahl verschiedener Kondensatoren auf Basis von Titan, Niob oder Aluminium. Bei der LST Laser & Schalttechnik GmbH liegt der Fokus auf der Verfügbarkeit der Ersatzteile und der Betriebsstoffe für die Laserschneidanlagen. Zinkselenid ist dabei Hauptbestandteil im Linsenmaterial, Helium wird als Funktionsgas eingesetzt. Die potentiell kritischen Materialien sind hier direkt aus dem ERP-System zu identifizieren. Handlungsoptionen betreffen die kurz- und mittelfristige Absicherung der Verfügbarkeit insbesondere in Bezug auf Helium. Langfristig geht die Kritikalitätsbewertung in Investitionsentscheidungen bezüglich neu zu beschaffender Blechbearbeitungstechnologien (Wasserschneiden vs. Lasertechnologie) ein.

#### 4.5.1 Funktionssubstitution am Anwendungsbeispiel BMK

Im Rahmen der Vulnerabilitätsanalyse werden die strategischen Bauteile der BMK electronic solutions GmbH & Co. KG klassifiziert. So können dabei 60 repräsentative Bauteile auf Basis von Herstellerinformationen, Datenrecherchen, laboranalytischen Untersuchungen und Datenbankabfragen hinsichtlich ihrer Inhaltsstoffe untersucht werden. Zur Veranschaulichung und Evaluierung der im Projekt erarbeiteten Methoden werden im Folgenden zwei Phasen des Leitfadens dargestellt:

- die Vorgehensweise zur Identifikation von Inhaltsstoffen exemplarisch anhand eines Keramikkondensators und
- das entwickelte Kritikalitätsassessment am Beispiel der Entscheidung bezüglich der Substitution eines Tantalkondensators durch einen Kondensator auf Aluminium- oder Niob-Basis.

Bezüglich der Identifikation der Inhaltsstoffe des Keramikkondensators ist zu bemerken, dass erwartungsgemäß keine Inhaltsstoffe des Einkaufsteils im ERP-System zu ermitteln sind. In einem ersten Schritt werden daher die Herstellerinformationen aus dem Datenblatt ausgewertet und eine allgemeine Recherche bezüglich der Inhaltsstoffe von „Keramikkondensatoren“ durchgeführt. Das Ergebnis zeigt eine starke Inzidenz auf die Inhaltsstoffe Titandioxid ( $\text{TiO}_2$ ), Nickel und Zinn sowie Hinweise auf Bariumoxid ( $\text{BaO}$ ), Kupfer, Mangan, Tantal, Zink, Niob und Strontium. Anschließend werden die Materialinformationen aus einer Datenbank (siehe Kapitel 4.2) ausgewertet und eine detaillierte Laboranalyse durchgeführt.

**Tabelle 17: Identifikation der Inhaltsstoffe eines Keramikcondensators**

Identifizierte Inhaltsstoffe (Angaben in Massenprozent)															
Quelle	BaO	TiO <sub>2</sub>	Cu	Ni	Sn	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sons.	Mg	Ta	Zn	Nb	Tb	Ca	Sr	Σ
HR	o	+	o	+	+	-	-	o	o	o	o	-	-	o	-
DB	49	24	17	6	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-	100
L	53	25	3	10	7	1	-	-	-	-	-	<1	<1	<1	100

Legende:

Sons.: Sonstige

HR: Herstellerinformation und Recherche | DB: Datenbank | L: Laboranalyse

+: sehr wahrscheinlich enthalten | o: möglicherweise enthalten | -: nicht identifiziert

Die Ergebnisse (vgl. Tabelle 17) zeigen deutlich die Defizite der Herstellerinformationen sowie der Recherchemöglichkeiten (HR) im Vergleich zur Datenbankauswertung (DB) und Laboranalyse (L). Besonders interessant ist hier der Inhaltsstoff Yttriumoxid (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Die Seltene Erde Yttrium ist zu etwa einem Massenprozent im Bauteil enthalten und kann auf Basis der Herstellerinformationen und Recherche nicht identifiziert werden, jedoch eindeutig aus der Datenbank und der Laboranalyse. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass Massenanteile von etwa 2% in der Datenbank nicht ausgewiesen und als „Sonstiges“ deklariert werden.

Das entwickelte Verfahren wird zum Kritikalitätsassessment exemplarisch an der potentiellen Substitutionsentscheidung eines Tantalkondensators veranschaulicht. Hierzu werden alternativ funktionsgleiche Kondensatoren auf Aluminium- und Niob-Basis verglichen. In einem ersten Schritt wird die ökonomische Kritikalität der drei Alternativen auf Basis des entwickelten AHP-Ansatzes (vgl. Abschnitt 4.3.1.2) untersucht.

**Tabelle 18: Ökonomische Bewertung alternativer Kondensatoren**

Kriterium Indikator	Einheit	Globale Gewichtung	Al-Kond.			Ta-Kond.			Nb-Kond.		
			Wert	Perf.	Punkte	Wert	Perf.	Punkte	Wert	Perf.	Punkte
<b>Risiko der Konzentration</b>											
Länderkonzentration	HHI	0,208	1638	0,44	0,092	1564	0,44	0,092	8157	0,11	0,024
Unternehmenskonzentration	HHI	0,151	684	0,72	0,108	5761	0,16	0,024	7461	0,12	0,019
<b>Politisches Risiko</b>											
Länderrisiko Politische Stabilität	WGI	0,088	-0,07	0,25	0,022	-0,74	0,12	0,010	0,17	0,63	0,056
Länderrisiko Policy Potential	PPI	0,044	41	0,33	0,015	44	0,33	0,015	42	0,33	0,015
Länderrisiko Regulation	HDI	0,051	0,74	0,21	0,011	0,5	0,59	0,030	0,75	0,21	0,011
<b>Risiko der Angebotsreduzierung</b>											
Statische Reichweite Reserven	Jahre	0,062	109	0,27	0,017	149	0,59	0,037	86	0,14	0,009
Statische Reichweite Ressourcen	Jahre	0,034	213	0,12	0,004	abund.	0,29	0,010	more t. abund.	0,59	0,020
EoL-Recyclingrate	%	0,061	60%	0,46	0,028	<1%	0,08	0,005	>50%	0,46	0,028
<b>Risiko des Nachfrageanstiegs</b>											
Koppelproduktion	%	0,061	0%	0,44	0,027	15%	0,12	0,007	0%	0,44	0,027
Nachfrage Zukunftstechnologie	%	0,106	0%	0,64	0,068	101%	0,1	0,011	3%	0,26	0,027
Substituierbarkeit	dim.los	0,135	44	0,33	0,045	41	0,33	0,045	42	0,33	0,045
<b>Gesamtpunktzahl (höher ist besser)</b>			<b>0,436</b>			<b>0,285</b>			<b>0,279</b>		

Tabelle 18 zeigt, dass Aluminium mit einem Wert von 0,436 die relativ beste Bewertung erhält, gefolgt von Tantal (0,285) und Niob (0,279). Die Gründe liegen hier vor allem in dem relativ niedrigen Konzentrationsrisiko (bedingt durch die relativ niedrigen Herfindahl-Hirschmann-Index-Werte (HHI) für die Länder- und Unternehmenskonzentration) sowie der hohen Recyclingquote von 60% bei Aluminium. Die vergleichbare Bewertung von Tantal und Niob resultiert aus einer Summe gegenläufiger Einzelbewertungen. Ausschlaggebend für die kritische Bewertung von Niob ist der relativ hohe HHI-Wert für die Länderkonzentration sowie die geringere statische Reichweite der Reserven (86 zu 149 Jahre). Demgegenüber ist festzuhalten, dass Niob im Wesentlichen in Brasilien und Kanada gefördert wird. Diesen Ländern wird eine relativ hohe politische Stabilität ausgewiesen, was der WGI von 0,17 zeigt. Darüber hinaus ist die Recyclingquote von Niob mit über 50% deutlich höher als die von Tantal. Auch bergen die Tatsachen, dass Tantal im Allgemeinen als Koppelprodukt anderer Metalle abgebaut wird sowie dessen potentiell steigende zukünftige Nachfrage, ein signifikantes Versorgungsrisiko in sich.

Auch aus ökologischer Sicht ist der Aluminiumkondensator zu bevorzugen. So ergibt die ReCiPe-Methode (vgl. Tabelle 19) für Aluminium den kleinsten und somit besten Wert von 0,55 Endpunkten pro Kilogramm. Die mit Abstand größten Umweltauswirkungen hat das Element Tantal mit einem Wert von 24,19 Endpunkten pro Kilogramm. Entscheidend

für die Bewertungen sind hier die durchschnittlichen Erzkonzentrationen der drei Elemente.

**Tabelle 19: Ökologische Bewertung alternativer Kondensatoren**

Kriterium	Indikator	Al-Kond. (aluminium, production mix, at plant) (ecoinvent Centre 2010)		Ta-Kond. (tantalum, powder, capacitor-grade, at regional storage) (ecoinvent Centre 2010)		Nb-Kond. (Niobium, >99.75%, All energy) (Nuss et al. 2014)	
		midpoint / kg	endpoints / kg	midpoint / kg	endpoints / kg	endpoints / kg	endpoints / kg
Human Health	Climate Change	0,24		7,21			
	Human Toxicity	0,05		2,14			
	Ionising Radiation	0,00		0,03			
	Ozone Depletion	0,00	0,38	0,00	15,20		1,78
	Particulate Matter Formation	0,09		5,83			
	Photochemical Oxidant Formation	0,00		0,00			
Ecosystem Quality	Agricultural Land Occupation	0,00		0,39			
	Climate Change	0,16		4,72			
	Freshwater Ecotoxicity	0,00		0,00			
	Freshwater Eutrophication	0,00		0,02			
	Marine Ecotoxicity	0,00	0,17	0,00	8,98		0,59
	Natural Land Transformation	0,01		1,02			
	Terrestrial Acidification	0,00		0,02			
	Terrestrial Ecotoxicity	0,00		0,01			
Urban Land Occupation	0,00		2,81				
<b>Gesamt endpoints / kg (niedriger ist besser)</b>			<b>0,55</b>		<b>24,19</b>		<b>2,37</b>

Bezüglich der sozialen Dimension ist Niob zu bevorzugen. Der Grund hierfür liegt in den relativ hohen Sozialstandards der Förderländer Brasilien (90% Fördervolumen) und Kanada (10% Fördervolumen). Hier erfolgt die Aggregation nach dem Maximumprinzip, wobei der jeweils niedrigere Indikatorwert die bessere Vereinbarkeit mit den geforderten sozialen Grundsätzen anzeigt. Die einzelnen Rohstoffbewertungen und das Ergebnis der sozialen Dimension sind in Tabelle 20 aufgeführt.

**Tabelle 20: Soziale Bewertung alternativer Kondensatoren**

	Indikator	Al-Kond.	Ta-Kond.	Nb-Kond.
Soziale Dimension	WGI-VA	60,83	62,30	17,75
	Kinderarbeit	10,36	48,80	48,55
	WGI-CC	46,58	54,46	40,66
<b>Gesamtbewertung (niedriger ist besser)</b>		<b>60,83</b>	<b>62,30</b>	<b>48,55</b>

Die drei Einzelbewertungen sind in Tabelle 21 zusammengefasst dargestellt und können als Grundlage für die unternehmerische Entscheidung angesehen werden.

**Tabelle 21: Ergebnisse aller drei Dimensionen der Kritikalitätsbewertung**

Dimension	Element (Bauteil)		
	Al-Kond.	Ta-Kond.	Nb-Kond.
Ökonomische Dimension (dimensionsloser Wert zwischen 0 und 1; größere Werte besser)	<b>0,436</b>	0,285	0,279
Ökologische Dimension (Endpunkte pro Kilogramm; kleinere Werte besser)	<b>0,55</b>	24,19	2,37
Soziale Dimension (dimensionsloser Wert zwischen 0 und 100; kleinere Werte besser)	60,83	62,30	<b>48,55</b>

#### 4.5.2 Betriebswirtschaftliche Absicherung am Beispiel LST

Die LST Laser & Schalttechnik GmbH ist als technischer Dienstleister im Bereich der Blechbearbeitung tätig. Das Unternehmen beliefert europaweit unterschiedlichste Branchen mit ausgestanzten Blechteilen. Neben den Mitarbeitern stellt der umfangreiche Maschinenpark (z.B. Laserschneid- und Schweißanlagen, Biege- und Abkantanlagen) die Basis der Geschäftstätigkeit dar. Vor diesem Hintergrund steht die Verfügbarkeit von Ersatzteilen (Laseroptik) bzw. Betriebsstoffen (Helium) für die technischen Aggregate in direktem Zusammenhang mit dem Fortbestand des gesamten Geschäftsmodells.

Eine Befragung der Geschäftsleitung bzw. eine Auswertung der Herstellerinformationen zeigt, dass die Linse der Laseroptik aus Zinkselenid besteht. Als Betriebsstoff für die technischen Anlagen wird Helium benötigt. Im Weiteren werden potentielle Substitutionsmöglichkeiten untersucht. Die Recherche ergibt, dass die Zinkselenid-Linse prinzipiell durch eine Linse auf Basis von Gallium ersetzt werden könnte. Zum Einsatz von Helium stehen kurz- bis mittelfristig keine Alternativen zur Verfügung. Da Gallium einen relativ höheren Kritikalitätswert als Zink aufweist, wird von einer Substitutionsempfehlung jedoch abgesehen.

Bezogen auf Helium ist festzuhalten, dass sich bei der LST Laser & Schalttechnik GmbH zu Projektbeginn die Situation ergab, dass Helium generell nicht verfügbar war, unabhängig vom Preis. Nach einer Analyse aller Handlungsoptionen entschied sich der Projektpartner für einen strategischen Zuliefererwechsel von einem Zwischenhändler zu einem Lieferanten, der über einen direkten Zugang zu einer Förderstätte verfügt. Langfristig – im Falle einer Reinvestition in den Anlagenpark – empfiehlt sich die Durchführung eines Kritikalitätsassessments in Ergänzung zu den klassischen

Investitionsbewertungsverfahren. Prinzipiell stehen neben der heliumbasierten Lasertechnologie auch Hochdruck-Wasserstrahl-Verfahren zur Verfügung. Diese Technologie ist allerdings mit signifikant höheren Beschaffungskosten verbunden.

Obwohl Helium kein metallischer Rohstoff ist, können die einzelnen Indikatoren des Bewertungsmodells relativ leicht adaptiert werden. So ist bei Helium beispielsweise eine äußerst hohe Förderkonzentration auf die USA zu identifizieren, verbunden mit einer statischen Reichweite von wenigen Jahrzehnten. Ein Recycling von Helium ist nur in geschlossenen Gaskreisläufen, beispielsweise in Laboren, möglich. Darüber hinaus ist eine Substitution des Edelgases bei vielen Anwendungen vollständig ausgeschlossen, da kein anderes Gas entsprechend tiefe Temperaturen bereitstellen kann.

## 5 Veröffentlichungen und Vorträge

Im Rahmen des Projektes wurden vier Workshops mit den Projektpartnern durchgeführt:

- am 23. April 2013 als Auftakt-Veranstaltung an der Universität Augsburg,
- am 24. Oktober 2013 bei der BMK solutions GmbH & Co. KG in Augsburg,
- am 1. Juli 2014 als Zwischenpräsentation an der Universität Augsburg sowie
- einen Abschlussworkshop am 25. November 2014 in der IHK Schwaben.

Der Start des Projektes sowie der Abschlussworkshop wurden von der Presseabteilung der Universität Augsburg in Form von Pressemeldungen intern bzw. extern an die Medien verteilt.

Ferner wurden die Ergebnisse auf dem „Münchener Rohstoff-Frühstück“ unter anderem vor Vertretern der Siemens AG, der Osram GmbH, der Wacker Chemie AG, der BMW AG, und der Infineon AG sowie einem Vertreter der Rohstoffallianz GmbH am 15. Oktober 2013, 4. Februar 2014 und am 3. Juni 2014 diskutiert. Auf dem Abschlussworkshop wurden die Projektergebnisse mit Unternehmensvertretern der Region diskutiert. Am 26. November 2014 erfolgte zusätzlich eine Präsentation vor dem Zukunftskreis der IHK Schwaben.

Die gewonnenen Ergebnisse wurden auf wissenschaftlicher Ebene auf den Fachtagungen „Green Electronics“ in Budapest (4.-6. November 2013), „EcoBalance“ in Tsukuba (27.-30. Oktober 2014, Japan) sowie auf der „Re-Source“ in Wien (4.-6. Dezember 2014) erörtert. Am 7. Januar 2015 werden die Endergebnisse auf der Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 2015 präsentiert, zu der auch eine wissenschaftliche Publikation in den Proceedings erscheinen wird. Als Verbundforschung zum Graduiertenkolleg „Ressourcenstrategische Konzepte für zukunftsfähige Energiesysteme (gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst) erschien der Artikel „Geopolitical Supply Risk of Raw Materials in Life Cycle Sustainability Assessments“ im „Journal of Industrial Ecology“. Es ist geplant, weitere Publikationen in hochrangigen Journals einzureichen.

## 6 Diskussion und Ausblick

Die Projektarbeit hat gezeigt, dass insbesondere für KMUs eine Unterstützung bei der Umsetzung einer nachhaltigen Ressourcenstrategie essentiell ist. Vor diesem Hintergrund bietet der erarbeitete Leitfaden technologieorientierten KMUs erstmals die Möglichkeit auf Basis des aktuellen Standes der Kritikalitätsforschung ihre ressourceninduzierten Risiken zu adressieren. Prinzipiell ergeben sich vier Aufgaben bzw. Herausforderungen für die Unternehmen:

- Zunächst sind im Rahmen einer Vulnerabilitätsanalyse die strategischen Produkte zu identifizieren. Dies ist unabhängig zum betrachteten Studienziel im Sinne einer langfristigen Existenzsicherung für alle Unternehmen erforderlich.
- Die folgende Identifikation der Inhaltsstoffe der selektierten strategischen Produkte, Baugruppen und Technologien ist abhängig von der Verortung des Unternehmens in der Supply Chain und dessen Marktmacht eine anspruchsvolle Aufgabe. Sie erfordert oftmals eine Klassifikation der potentiell kritischen Bauteile zur Komplexitätsreduktion. Sind die Inhaltsstoffe nicht aus ERP-Daten ersichtlich, erfordert die Inhaltsstoffanalyse aufwendige Rechercharbeit bzw. Laboranalysen oder den Zugang zu kostenpflichtigen Datenbanken. Dabei hat sich gezeigt, dass die aus Datenblättern oder Rechercharbeit gewonnenen Informationen hinsichtlich der Vollständigkeit den Laboranalysen bzw. der Datenbankrecherche unterlegen sind.
- Mit dem im Projekt erarbeiteten Kritikalitätsassessment steht den Unternehmen zum ersten Mal ein quantitatives Bewertungsinstrument zur Verfügung, welches alle Nachhaltigkeitsdimensionen umfasst. Für eine erstmalige betriebliche Anwendung wird allerdings eine externe Unterstützung empfohlen. Der Analysegegenstand beschränkt sich zunächst im Wesentlichen auf Technologiemetalle. Die Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass die Methodik auch auf andere Stoffe, wie das Edelgas Helium, übertragbar ist. Bezüglich einer Übertragung der Methodik auf Nichtmetalle besteht noch Forschungsbedarf. Für

die Bewertung von Bauteilen, die aus mehreren potentiell kritischen Elementen bestehen, wurden verschiedene Aggregationsansätze evaluiert.

- Die Auswahl potentieller Handlungsoptionen zur Reduzierung des Rohstoffrisikos ist sehr unternehmensspezifisch. Daher ist die Beschreibung in Abschnitt 4.4 eher allgemein gehalten. Die untersuchten Praxisfälle zeigen, dass effiziente einzelfallbezogene Lösungen relativ schnell gefunden werden können.

Ferner haben die Forschungsarbeiten gezeigt, dass für eine erfolgreiche Umsetzung die Bildung eines Steuerungskreises, bestehend aus Mitgliedern der Geschäftsleitung sowie den Bereichen „Forschung und Entwicklung“ und „Beschaffung“ essentiell ist.

Vor dem Hintergrund der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse ergibt sich weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf in 1.) Distribution, Evaluation und Adaption der Methodik auf weitere Unternehmen und Branchen, 2.) der Erweiterung des Kritikalitätsassessments hinsichtlich der zu bewertenden Stoffe auf Nichtmetalle und 3.) der Erweiterung des Kritikalitätsassessments um weitere ökologische und soziale Indikatoren (insbesondere Bewertung dissipativer Verluste im Wertschöpfungsprozess).

## IV. Literaturverzeichnis

- Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwede, M. (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Stuttgart: Fraunhofer-IRB (ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale").
- Bach, V.; Schneider, L.; Berger, M.; Finkbeiner, M. (2014): Essenz-Projekt. Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Ressourceneffizienz auf Produktebene. Fachgebiet Sustainable Engineering, TU Berlin.
- Behrendt, S.; Scharp, M.; Kahlenborn, W.; Feil, M.; Dereje, C.; Bleischwitz, R.; Delzeit, R. (2007): Seltene Metalle. Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3182.pdf>.
- Bollhöfer, E.; Mattes, K.; Miller, M. (2013): Ressourceneinsparpotenziale durch den Einsatz von Dienstleistungsmodellen in rohstoffnahen Produktionssystemen. Studie im Rahmen des r2-Integrations- und Transferprojekts. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Karlsruhe. Online verfügbar unter [http://www.r-zwei-innovation.de/\\_media/V26\\_Studie\\_Dienstleistungsmodelle.pdf](http://www.r-zwei-innovation.de/_media/V26_Studie_Dienstleistungsmodelle.pdf).
- British Geological Survey (BGS): World Mineral Statistics. Online verfügbar unter <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/worldStatistics.html>.
- British Geological Survey (BGS) (2012): Risk List 2012. Online verfügbar unter <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/risklist.html>.
- Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D. (2009): Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. Hg. v. United Nations Environment Programme & United Nations University. Online verfügbar unter <http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1202xPA-Critical%20Metals%20and%20their%20Recycling%20Potential.pdf>.
- Buller, Ulrich (2011): Alternativen bei drohender Rohstoffknappheit. Hg. v. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Fraunhofer ISI. 22. Automobilforum Stuttgart. Online verfügbar unter <http://www.automobilproduktion.de/uploads/2011/05/1645-Buller.pdf>.
- Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI). Berlin. Online verfügbar unter [www.bdi.eu](http://www.bdi.eu).

- Commerzbank AG, Mittelstandsbank, Frankfurt am Main (Hg.) (2011): Rohstoffe und Energie: Risiken umkämpfter Ressourcen. UnternehmerPerspektiven. 11. Aufl. Online verfügbar unter [https://www.unternehmerperspektiven.de/media/up/studien/11studie/11\\_Studie\\_Rohstoffe.pdf](https://www.unternehmerperspektiven.de/media/up/studien/11studie/11_Studie_Rohstoffe.pdf).
- Creative Decision Foundation 2013 (Hg.): Super Decision Software - Version Number 2.2.6. Pittsburgh, USA.
- Deutsche Rohstoffagentur (DERA): Schriftenreihe Rohstoffinformationen. Online verfügbar unter [http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Publikationen/Schriftenreihe/schriftenreihe\\_node.html](http://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Publikationen/Schriftenreihe/schriftenreihe_node.html).
- Deutscher Industrie- und Handelskammertag (Hg.) (2010): Rohstoffklemme zeichnet sich ab. Berlin, Brüssel. Online verfügbar unter [http://www.konstanz.ihk.de/linkableblob/knihk24/standortpolitik/downloads/1110044/.9./data/DIHK\\_Unternehmensbarometer\\_Rohstoffklemme\\_zeichnet\\_sich\\_ab-data.pdf](http://www.konstanz.ihk.de/linkableblob/knihk24/standortpolitik/downloads/1110044/.9./data/DIHK_Unternehmensbarometer_Rohstoffklemme_zeichnet_sich_ab-data.pdf).
- Duclos, S. J.; Otto, J. P.; Konitzer, D. G. (2008): Design in an Era of Constrained Resources. As Global Copetition for Material strains the Supply Chain, Companies must know where a Shortage can hurt and then plan around it. In: *Mechanical Engineering magazine* 132 (9), S. 36–40.
- ecoinvent Centre (Hg.) (2010): ecoinvent data v2.2. the 2010 version of the most comprehensive and most popular public LCI database. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf.
- Erdmann, L.; Behrendt, S.; Feil, M. (2011): Kritische Rohstoffe für Deutschland. Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte. Hg. v. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT). Online verfügbar unter <http://www.ihk-koblenz.de/linkableblob/koihk24/innovation/downloads/1628482/.7./data/KF-data.pdf>.
- European Commission (Hg.) (2010): Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Brüssel. Online verfügbar unter [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_en.htm).
- European Commission (Hg.) (2014): Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Brüssel. Online verfügbar unter [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-report-on-critical-raw-materials_en.pdf).
- Fraser Institute: Survey of Mining Comapnies. Policy Potential Index. Online verfügbar unter <http://www.fraserinstitute.org/>.

- Frondel, M.; Grösche, P.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J. (2006): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI). Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI Essen); Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Online verfügbar unter [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Endbericht\\_Rohstoffe.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/n/de/publikationen/Endbericht_Rohstoffe.pdf).
- Gandenberger, C.; Glöser, S.; Marscheider-Weidmann, F.; Ostertag, K.; Walz, R. (2012): Die Versorgung der deutschen Wirtschaft mit Roh- und Werkstoffen für Hochtechnologien. Präzisierung und Weiterentwicklung der deutschen Rohstoffstrategie. Hg. v. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Online verfügbar unter <http://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab150.pdf>.
- Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; Schryver, A. de; Struijs, J.; Zelm, R. (2013): ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (revised), Report I: Characterisation. Hg. v. Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer van Ministerie Volkshuisvesting.
- Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K. et al. (2011a): Recycling Rates of Metals. A status report. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. Online verfügbar unter [http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals\\_Recycling\\_Rates\\_110412-1.pdf](http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Metals_Recycling_Rates_110412-1.pdf).
- Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Buchert, M.; Hagelüken, C.; Reck, B. K. et al. (2011b): What Do We Know About Metal Recycling Rates? In: *Journal of Industrial Ecology* 15 (3), S. 355–366. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00342.x.
- Graedel, T. E.; Barr, R.; Chandler, C.; Chase, T.; Choi, J.; Christoffersen, L. et al. (2012): Methodology of Metal Criticality Determination. In: *Environ. Sci. Technol.* 46 (2), S. 1063–1070. DOI: 10.1021/es203534z.
- Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N. T.; Reck, B. K. (2013): On the materials basis of modern society. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences*. DOI: 10.1073/pnas.1312752110.
- Haynes, William M. (2014): CRC handbook of chemistry and physics. A ready-reference book of chemical and physical data. 95. rev. ed. Boca Raton, Fla: CRC Press.

- IW Consult (Hg.) (2011): Rohstoffsituation Bayern: Keine Zukunft ohne Rohstoffe. Strategien und Handlungsoptionen. vbw Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. Online verfügbar unter [http://www.rohstoffstrategie-bayern.de/fileadmin/user\\_upload/rohstoffstrategie/dokumente/vbw\\_Rohstoff\\_situation\\_Bayern\\_keine\\_Zukunft\\_ohne\\_Rohstoffe.pdf](http://www.rohstoffstrategie-bayern.de/fileadmin/user_upload/rohstoffstrategie/dokumente/vbw_Rohstoff_situation_Bayern_keine_Zukunft_ohne_Rohstoffe.pdf).
- Kaufmann, D.; Aart, K.; Massimo, M. (2010): The Worldwide Governance Indicators: Methodology and Analytical Issues. In: *World Bank Policy Research Working Paper No. 5430*.
- Morley, N.; Eatherley, D. (2008): Material security. Ensuring resource availability for the UK economy. Chester: C-Tech Innovation Ltd. Online verfügbar unter [http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/material\\_security.pdf](http://www.oakdenehollins.co.uk/pdf/material_security.pdf).
- Moss, R. L.; Tzimas, E.; Willis, P.; Arendorf, J.; Espinoza, L. T.; et al. (2013): Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies. Hg. v. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport. Online verfügbar unter <http://setis.ec.europa.eu/system/files/Critical%20Metals%20Decarbonisation.pdf>.
- ReCiPe (Hg.) (2012): ReCiPe Mid/Endpoint version 1.08 December 2012. RIVM, CML, PRé Consultants and Radboud Universiteit Nijmegen. Online verfügbar unter <http://www.lcia-recipe.net/>.
- Reichl, C.; Schatz, M.; Zsak, G. (2014): Welt-Bergbau-Daten. 29. Aufl. Hg. v. World Mining Data (WMD). Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft. Wien. Online verfügbar unter [http://www.univie.ac.at/Mineralogie/docs/Weltbergbaudaten\\_2014.pdf](http://www.univie.ac.at/Mineralogie/docs/Weltbergbaudaten_2014.pdf).
- Roelich, K.; Dawson, D. A.; Purnell, P.; Knoeri, C.; Revell, R.; Busch, J.; Steinberger, J. K. (2014): Assessing the dynamic material criticality of infrastructure transitions: A case of low carbon electricity. In: *Applied Energy* 123, S. 378–386. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.01.052.
- Rosenau-Tornow, D.; Buchholz, P.; Riemann, A.; Wagner, M. (2009): Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends. In: *Resources Policy* 34 (4), S. 161–175. DOI: 10.1016/j.resourpol.2009.07.001.
- Saaty, T. L. (1980): The analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation. New York, London: McGraw-Hill International Book Co.
- Saaty, Thomas L. (1994): Highlights and critical points in the theory and application of the Analytic Hierarchy Process. In: *European Journal of Operational Research* 74 (3), S. 426–447. DOI: 10.1016/0377-2217(94)90222-4.

- Schneider, L.; Berger, M.; Schüler-Hainsch, E.; Knöfel, S.; Ruhland, K.; Mosig, J. et al. (2014): The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment. In: *Int J Life Cycle Assess* 19 (3), S. 601–610. DOI: 10.1007/s11367-013-0666-1.
- SNL Metals & Mining (Hg.) (2014): Raw Materials Data. Online verfügbar unter <http://www.snl.com/Sectors/metalsmining/Default.aspx>.
- Thomason, J. S.; Atwell, R. J.; Bajraktari, Y.; Bell, J, P; Barnett, D. S.; Karvonides, N. S. J. et al. (2010): From National Defense Stockpile (NDS) to Strategic Materials Security Program (SMSP): Evidence and Analytic Support. Volume I. Hg. v. Institute for Defense Analyses.
- TU Berlin Lehrstuhl Sustainable Engineering. Technische Universität Berlin, Institut für Technischen Umweltschutz. Online verfügbar unter [https://www.see.tu-berlin.de/menue/fachgebiet\\_sustainable\\_engineering/](https://www.see.tu-berlin.de/menue/fachgebiet_sustainable_engineering/).
- U.S. Department of Energy (DOE) (2011): Critical Materials Strategy. Online verfügbar unter [http://energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf).
- U.S. Geological Survey (2014a): Commodity Statistics and Information. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>.
- U.S. Geological Survey (Hg.) (2014b): Mineral Commodity Summaries 2014: U.S. Geological Survey. Online verfügbar unter <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014.pdf>.
- U.S. National Research Council (2008): Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. Unter Mitarbeit von Nicholas D. Rogers Elizabeth A. Eide. Hg. v. National Academies Press: Washington, D.C.
- UNDP (2014): Human Development Index (HDI). United Nations Development Programme. Online verfügbar unter <http://hdr.undp.org/en/data>.
- United Nations Global Compact (2014): The Ten Principles. Hg. v. United Nations. Online verfügbar unter <https://www.unglobalcompact.org/index.html>.
- Weltbank (2014): Worldwide Governance Indicators. The World Bank Group. Online verfügbar unter <http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx>.
- Wilson, A.; McMahon, F.; Cervantes, M. (2013): Survey of Mining Companies, 2012/2013. Hg. v. Kristin McCahon. Fraser Institute. Online verfügbar unter <http://www.fraserinstitute.org/uploadedFiles/fraser-ca/Content/research-news/research/publications/mining-survey-2012-2013.pdf>.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2014). Online verfügbar unter <http://www.wbgu.de/>.

Wolf, M.-A.; Pant, R.; Chomkhamri, K.; Sala, S.; Pennington, D. (2012): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. Hg. v. Institute for Environment and Sustainability. European Commission-Joint Research Centre. Luxemburg. Online verfügbar unter <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/JRC-Reference-Report-ILCD-Handbook-Towards-more-sustainable-production-and-consumption-for-a-resource-efficient-Europe.pdf>.

Yale Center for Environmental Law and Policy (2014). Online verfügbar unter <http://epi.yale.edu/>.

## V. Anhang

### V.1 Foliensatz des Leitfadens



Abbildung 16: Leitfaden Folie 1

## Nachhaltige Ressourcenstrategien in Unternehmen

**Projektkoordinator:**

- Dr. Andrea Thorenz

**Projektpartner:**

- Prof. Dr. Axel Tuma, Lehrstuhl für Production & Supply Chain Management der Universität Augsburg
- Prof. Dr. Armin Reller, Lehrstuhl für Ressourcenstrategie der Universität Augsburg
- BMK electronic solutions GmbH & Co. KG
- LST Laser & Schalttechnik GmbH

**Fachbeirat/Kooperationspartner:**

- Robert Bosch GmbH (Corporate Office Sustainability, Design for Environment)
- Remondis Industrie Service GmbH & Co. KG
- Prof. Dr. Bernd Wagner
- Framo Morat GmbH & Co. KG

gefördert durch



www.dbu.de



Lehrstuhl für Ressourcenstrategie




Technik fürs Leben




Ressource Lab
2

Abbildung 17: Leitfaden Folie 2

## Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

Material- und Ressourceneffizienz entwickelt sich zunehmend zu einem zentralen Kosten- und Erfolgsfaktor für die Industrie. Existierende und vermutete Knappheiten bestimmter Rohstoffe, steigende Materialkosten und die **Abhängigkeit Deutschlands** von Importen vieler Rohstoffe, tragen dazu bei. Dies gilt im besonderen Maße für Unternehmen, deren Produkte von **Technologiemetallen**, wie Indium, Gallium oder Seltene Erden abhängen. Einerseits kann das **aktuelle Produktdesign** zu **strategischen Risiken, vermeidbaren Kosten und damit zu einer reduzierten Wettbewerbsfähigkeit** führen, andererseits ist die aktuelle Produktionsweise oftmals mit erheblichen **Umweltbelastungen** bei der Förderung, Veredelung, und Herstellung entsprechender Rohstoffe, Materialien und Vorprodukte verbunden. Gerade **KMUs fehlt oftmals das Wissen**, welche Rohstoffe in ihren Bauteilen enthalten sind, wie deren Verfügbarkeit zukünftig zu beurteilen ist und welche **Strategien zur Sicherung der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit** empfehlenswert sind.

Vor diesem Hintergrund hat das **Resource Lab der Universität Augsburg** in Zusammenarbeit mit namhaften **Technologieunternehmen** und mit Unterstützung der „**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**“ einen Leitfaden zur Umsetzung nachhaltiger Ressourcenstrategien in Unternehmen entwickelt. Der Leitfaden ist dabei so konzipiert, dass er Unternehmen in die Lage versetzt, ihre aktuelle Produktionssituation hinsichtlich der **Rohstoffabhängigkeit bzw. der Kritikalität** der eingesetzten **Rohstoffe** zu analysieren und entsprechende Maßnahmen zu treffen. Für tiefergehende Analysen werden spezielle Beratungsangebote bereitgestellt. Diese umfassen **laboranalytische Verfahren** (z.B. Bestimmung der Inhaltsstoffe von Bauteilen mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie), detaillierte **Kritikalitätsbewertungen** sowie Unterstützung zur Auswahl von Maßnahmen zur **Erhöhung der Ressourceneffizienz**.



Prof. Dr. Axel Tuma



Prof. Dr. Armin Reller

Ressource Lab
3

Abbildung 18: Leitfaden Folie 3

### Motivation

Warum es sinnvoll ist, über eine Ressourcenstrategie nachzudenken:

Quelle: Zepf V., Reiler A., Rennie C., Ashfield M. & Simmons J., BP (2014): *Materials critical to the energy industry. An Introduction*. 2nd edition.

Ressource Lab
4

Abbildung 19: Leitfaden Folie 4

### Gliederung

1. Struktur des Leitfadens
2. Identifikation der Inputströme
3. Bewertung der Rohstoffe (Kritikalität)
4. Handlungsempfehlungen

Ressource Lab
5

Abbildung 20: Leitfaden Folie 5

## 1. Struktur des Leitfadens

1.1 Konzeptionelles Vorgehen zur Umsetzung einer nachhaltigen Ressourcenstrategie

Unter dem Begriff **Ressourcenstrategie** sind dabei alle Maßnahmen zur **Identifikation** potentieller material- und ressourcenbedingter Risiken, deren Bewertung (**Kritikalität**) sowie die Auswahl potentieller **Handlungsalternativen** zu verstehen.

**Konzeptionell** umfasst das Vorgehen zur Reduktion der Rohstoffrisiken **drei Schritte**.

In einem **ersten Schritt** werden die **strategischen Produktgruppen** des betrachteten Unternehmens ermittelt (Vulnerabilitätsanalyse). Diese werden bezüglich der darin enthaltenen **Technologiemetalle** analysiert. Hierzu werden Informationen aus den ERP-Systemen, Datenblättern sowie laboranalytischen Verfahren herangezogen.

Die Bewertung der Rohstoffrisiken (**zweiter Schritt**) umfasst **ökonomische** (Verfügbarkeit, Marktrisiken), **ökologische** (Biodiversität, Klimawirkung) und **soziale Kriterien**.

Auf Basis einer derartigen Bewertung werden in einem **dritten Schritt Handlungsempfehlungen zur Reduktion der Rohstoffrisiken** vorgeschlagen. Diese beziehen sich sowohl auf betriebswirtschaftliche Instrumente (Integration weiterer Zulieferer, Ausgestaltung von Verträgen, Hedging) als auch auf technische Maßnahmen (Substitution von Funktionsmaterialien).



Ressource Lab

6

Abbildung 21: Leitfaden Folie 6

## 1. Struktur des Leitfadens

1.1 Konzeptionelles Vorgehen zur Umsetzung einer nachhaltigen Ressourcenstrategie

### Über welche Begriffe reden wir?

Begriff	Kurzerklärung
Vulnerabilitätsanalyse	Bezeichnet die Verwundbarkeit, Verletzbarkeit, Anfälligkeit des Unternehmens durch strategische Produktgruppen und Bauteile aufgrund ihrer herausgehobenen Bedeutung für den Unternehmenserfolg.
Rohstoffkritikalität	Ist ein Maß für die Summe der Risiken eines Rohstoffs auf globaler Ebene. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist die Kritikalität eines Rohstoffs in die drei Dimensionen ‚ökonomische Dim.‘, ‚ökologische Dim.‘ und ‚Soziale Dim.‘ unterteilt.
Ökonomische Dimension	Die ökonomische Komponente der Rohstoffkritikalität misst das globale Versorgungsrisiko eines Rohstoffs mit quantifizierbaren Indikatoren.
Ökologische Dimension	Die ökologische Komponente der Rohstoffkritikalität misst die globalen Auswirkungen der Rohstoffproduktion auf die Umwelt.
Soziale Dimension	Die soziale Komponente der Rohstoffkritikalität misst die globalen sozialen Risiken der Rohstoffproduktion.

Ressource Lab

7

Abbildung 22: Leitfaden Folie 7

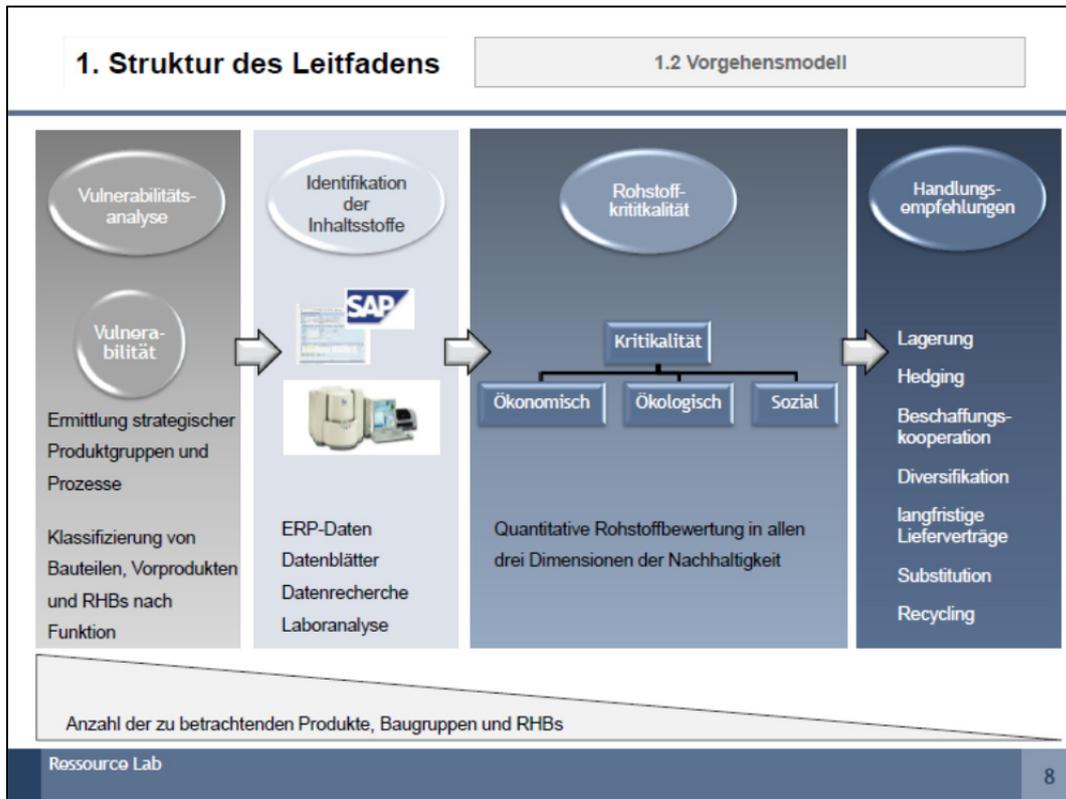


Abbildung 23: Leitfaden Folie 8

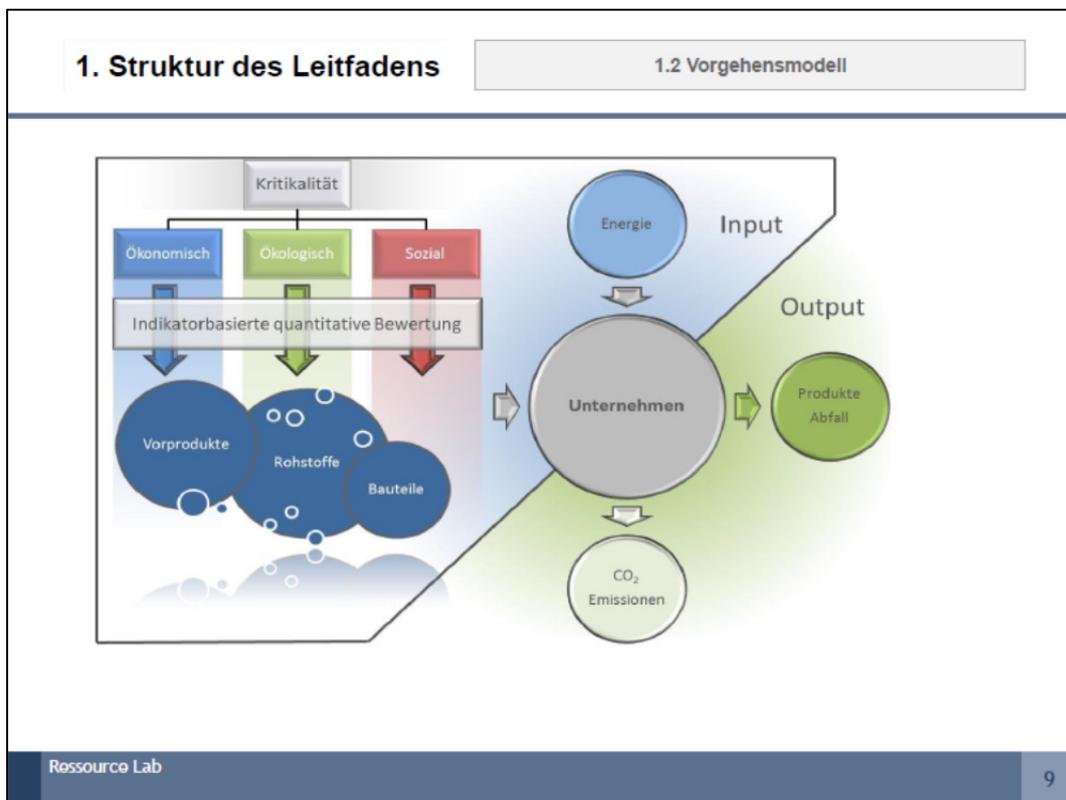


Abbildung 24: Leitfaden Folie 9

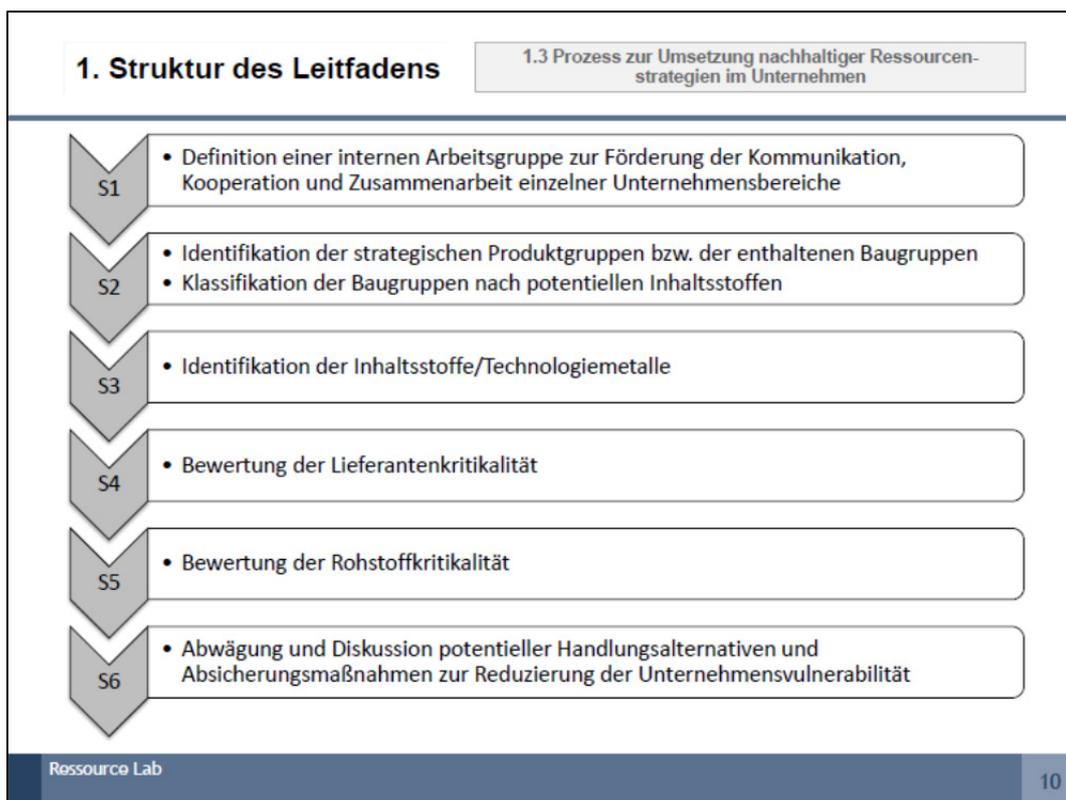


Abbildung 25: Leitfaden Folie 10

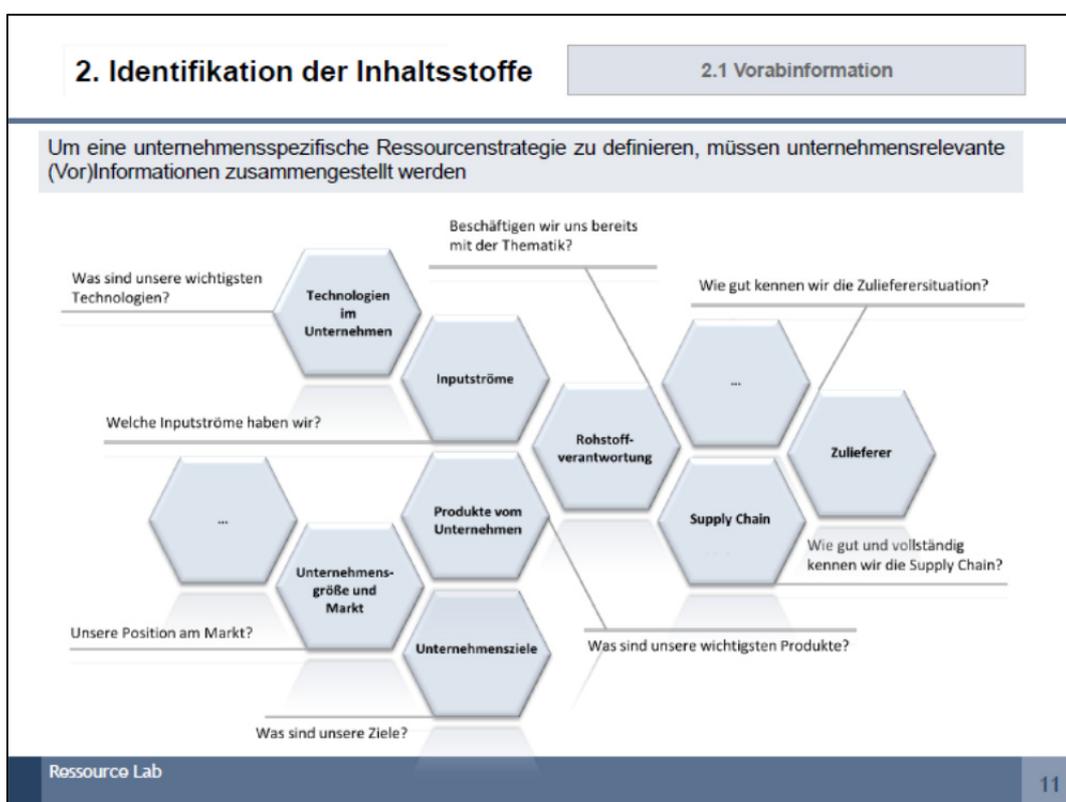


Abbildung 26: Leitfaden Folie 11

**2. Identifikation der Inhaltsstoffe**

2.2 Klassifikation

Hier gilt es die für das Unternehmen wichtigsten Bauteile, Vorprodukte und RHBs (Inputströme) zu identifizieren.

Gesucht werden Produktgruppen mit ...

1. den höchsten Erlösen
2. Alleinstellungsmerkmalen
3. etc.

Gesucht werden Baugruppen mit ...

1. der geringsten Substituierbarkeit
2. wenigsten Zulieferern
3. dem größten Materialwert
4. etc.

Ermittlung strategischer  
Produktgruppen

Klassifizierung der  
einzelnen Bauteile,  
Vorprodukte und RHBs  
nach Funktionen

Ermittlung  
repräsentativer  
strategischer Baugruppen

Vulnerabilität

Erste Abschätzung der  
Unternehmens-  
vulnerabilität

Ressource Lab

12

Abbildung 27: Leitfaden Folie 12

**2. Identifikation der Inhaltsstoffe**

2.3 Verfügbare Instrumente

Welche Daten stehen dem Unternehmen zur Identifizierung der Inputströme zur Verfügung?

**Verfügbare Datenquellen**

Informationen über Hersteller oder Zulieferer, Datenblätter

Informationen über Recherche

Informationen aus dem ERP-System (Excel, Stücklisten)

Informationen über Experten, F&E, den Einkauf

Informationen über Laboranalysen und Datenbanken

**Inputströme mit zugehörigen Elementen**

Kondensator	LED
<input type="checkbox"/> Aluminium	<input type="checkbox"/> Gallium
<input type="checkbox"/> Kupfer	<input type="checkbox"/> Arsen
<input type="checkbox"/> -	<input type="checkbox"/> -
Ferrit	Widerstand
<input type="checkbox"/> Silber	<input type="checkbox"/> Eisen
<input type="checkbox"/> Mangan	<input type="checkbox"/> Zink
<input type="checkbox"/> -	<input type="checkbox"/> -
Betriebsstoffe	...
<input type="checkbox"/> Helium	<input type="checkbox"/> -
<input type="checkbox"/> Argon	<input type="checkbox"/> -
<input type="checkbox"/> -	<input type="checkbox"/> -

Ressource Lab

13

Abbildung 28: Leitfaden Folie 13

## 2. Identifikation der Inhaltsstoffe

### 2.3 Verfügbare Instrumente

Welche Arbeitsschritte können berücksichtigt werden und wie aufwendig ist die Identifikation einfließender Materialien und Rohstoffe?

Für die Identifikation einfließender Rohstoffströme (Inputanalyse) werden folgende Arbeitsschritte vorgeschlagen



	1	2	3	4	5
	Datenblätter, Herst.inform.	Recherche	ERP-Daten	Analogie-schlüsse	Laboranalyse    Datenbanken
Massen ermittelbar (höher besser)	●	●	●	●	●
Vollständigkeit (höher besser)	●	●	●	●	●
Verlässlichkeit (höher besser)	●	●	●	●	●
Zeitaufwand (niedriger besser)	●	●	●	●	●

Ressource Lab
14

Abbildung 29: Leitfaden Folie 14

## 3. Bewertung der Rohstoffe

### 3.1 Indikatoren

Kritikalität

Ökonomische Dimension		Ökologische Dimension		Soziale Dimension
Risiko der Konzentration	Politisches Risiko	Human Health	Ecosystem Quality	Risiko von Kinderarbeit Kontrolle von Korruption Recht auf Meinungsfreiheit
Länderkonzentration	Länderrisiko Polit. Stabilität	Human Toxicity	Agricultural Land Occupation	
Unternehmenskonzentration	Länderrisiko Policy Potential	Climate Change, Human Health	Climate Change, Ecosystems	
	Länderrisiko Regulation	Ionising Radiation	Freshwater Ecotoxicity	
Risiko der Angebotsreduz.	Risiko des Nachfrageanstiegs	Ozone Depletion	Freshwater Eutrophication	
Stat. Reichweite Reserven	Koppelproduktion	Particulate Matter Formation	Marine Ecotoxicity	
Stat. Reichweite Ressourcen	Nachfrageanstieg durch Zukunftstechnologie	Photochemical Oxidant Formation	Urban Land Occupation	
Recyclingrate	Substituierbarkeit		Terrestrial Ecotoxicity	
			Terrestrial Acidification	
			Natural Land Transformation	

Ressource Lab
15

Abbildung 30: Leitfaden Folie 15

3. Bewertung der Rohstoffe			3.2 Ökonomische Indikatoren	
Kriterium	Indikator	Kurzbeschreibung Indikator	Messung	Quelle
Risiko der Konzentration	Länderkonzentration	Konzentration der Jahresproduktion des Rohstoffs auf Länderebene, gemessen mit dem Herfindahl-Hirschman-Index	$\sum \text{Produktionsanteil}_{\text{Land}}^2$	USGS
	Unternehmenskonzentration	Konzentration der Jahresproduktion des Rohstoffs auf Unternehmensebene, gemessen mit dem Herfindahl-Hirschman-Index	$\sum \text{Produktionsanteil}_{\text{Unternehmen}}^2$	IntierraRMG
Politisches Risiko	Länderrisiko Politische Stabilität	Politische Instabilität der Förderländer, gewichtet nach Produktionsanteilen	$\sum \text{Prod.anteil}_{\text{Land}} \times \text{WGI} - \text{PV}_{\text{Land}}$	USGS, World Bank
	Länderrisiko Policy Potential	Fähigkeit der Abbauländer, neue Bergbauprojekte umgesetzt zu bekommen	$\sum \text{Prod.anteil}_{\text{Land}} \times \text{PPI}_{\text{Land}}$	USGS, Fraser Institute
	Länderrisiko Regulation	Fähigkeit der Produktionsländer, aufgrund ihres Entwicklungsstandes Handelsrestriktionen tatsächlich umzusetzen, gemessen am HDI	$\sum \text{Prod.anteil}_{\text{Land}} \times \text{HDI}_{\text{Land}}$	USGS, UNDP
Risiko der Angebotslücke	Stat. Reichweite Reserven	Statische Reserven-Reichweite des Rohstoffs,	$\frac{\text{globale Reserven}}{\text{jährliche Produktion}}$	USGS
	Stat. Reichweite Ressourcen	Statische Ressourcen-Reichweite des Rohstoffs	$\frac{\text{globale Ressourcen}}{\text{jährliche Produktion}}$	USGS
	Recyclingrate	Recycling-Quote des Rohstoffs	End-of-Life-Recyclingrate	UNEP
Risiko des Nachfrageanstiegs	Koppelproduktion	Anteil der als Koppelprodukt geförderten Menge an der globalen Produktion des Rohstoffs	$\frac{\text{jährliche Produktion als Koppelprodukt}}{\text{gesamte jährliche Produktion}}$	IntierraRMG
	Nachfrageanstieg d. Zukunftst.	Geschätzter Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien	$\frac{\text{Nachfrage 2030 durch Zukunftstechn.}}{\text{Gesamtproduktion 2006}}$	Angerer et al.
	Substituierbarkeit	Einschätzung bezüglich der Erfüllbarkeit der gleichen Funktion durch einen anderen Rohstoff	Expertenschätzung	Graedel et al.

Abbildung 31: Leitfaden Folie 16

3. Bewertung der Rohstoffe			3.3 Ökologische	
Kriterium	Indikator	Kurzbeschreibung Indikator (und Messung)	Quelle	
Ökonomische Dimension	Human Health	Climate Change	Gibt über Endpoints (Einheit $\frac{\text{endpoints}}{\text{Kilogramm}}$ ) an, wie stark die Auswirkungen der Förderung eines Kilogramms eines bestimmten Rohstoffs auf die menschliche Gesundheit sind. Hierfür werden die Werte der sechs aufgeführten Einzelindikatoren nach der ReCiPe-Methode berechnet (Einheit $\frac{\text{midpoints}}{\text{Kilogramm}}$ ) und aufsummiert.	Ecoinvent Datenbank
		Human Toxicity		
		Ionising Radiation		
		Ozone Depletion		
		Particulate Matter Formation		
		Photochemical Oxidant Formation		
	Ecosystem Quality	Agricultural Land Occupation	Gibt über Endpoints (Einheit $\frac{\text{endpoints}}{\text{Kilogramm}}$ ) an, wie stark die Auswirkungen der Förderung eines Kilogramms eines bestimmten Rohstoffs auf die Qualität der Umwelt sind. Hierfür werden die Werte der neun aufgeführten Einzelindikatoren nach der ReCiPe-Methode berechnet (Einheit $\frac{\text{midpoints}}{\text{Kilogramm}}$ ) und aufsummiert.	
		Climate Change		
		Freshwater Eotoxicity		
		Freshwater Eutrophication		
Marine Eotoxicity				
Natural Land Transformation				
Terrestrial Acidification				
Terrestrial Eotoxicity				
Urban Land Occupation				

Abbildung 32: Leitfaden Folie 17

3. Bewertung der Rohstoffe		3.3 Soziale Indikatoren		
Soziale Dimension	Indikator	Kurzbeschreibung Indikator	Messung	Quelle
	Risiko von Kinderarbeit	Das Risiko, dass Kinderarbeit bei Rohstoffförderung eingesetzt wird	$\sum \text{Prod.anteil}_{\text{Land}} \times \text{Risiko Kinderarbeit}_{\text{Land}}$	UNICEF
	Kontrolle von Korruption	Die Kontrolle von Korruption in den produzierenden Ländern	$\sum \text{Prod.anteil}_{\text{Land}} \times \text{WGI-CC}_{\text{Land}}$	World Bank
	Recht auf Meinungsfreiheit	Die Möglichkeit das Recht auf eigene Meinungsfreiheit wahrzunehmen	$\sum \text{Prod.anteil}_{\text{Land}} \times \text{WGI-VA}_{\text{Land}}$	World Bank
Ressource Lab				18

Abbildung 33: Leitfaden Folie 18

3. Bewertung der Rohstoffe		3.4 Datenbanken/-quellen		
Datenbank	Datenquelle	Links		
USGS	USGS 2013. "Mineral Commodity Summaries", U.S. Geological Survey	<a href="http://www.usgs.gov">www.usgs.gov</a>		
InterraRMD	InterraRMG 2013. "Raw Materials Data", Sweden	<a href="http://www.interrarmg.com">www.interrarmg.com</a>		
World Bank	Kaufmann, D., Kraay, A., and Mastruzzi, M., "The Worldwide Governance Indicators: Methodology and Analytical Issues", World Bank Policy Research Working Paper, 2010	<a href="http://www.worldbank.org">www.worldbank.org</a>		
Fraser Institute	Wilson, A., and Cervantes, F.M.a.M. 2013. "Survey of Mining Companies, 2012/2013", Kristin McCahon - Fraser Institute, Vancouver, Canada	<a href="http://www.fraserinstitute.org">www.fraserinstitute.org</a>		
UNDG	UNDP 2012. "Human Development Reports", United Nations Development Programme	<a href="http://www.undp.org">www.undp.org</a>		
UNEP	Graedel, T.E., Allwood, J., Birat, J.-P., Buchert, M., Hagelüken, C., Reck, B.K., and Sonnemann, S.F.S.a.G., "What Do We Know About Metal Recycling Rates?", Journal of Industrial Ecology, 15(3), 2011, pp. 355-368	<a href="http://www.unep.org">www.unep.org</a>		
Angerer et al.	Angerer, G., Marscheider-Weidemann, F., Lüllmann, A., Erdmann, L., Scharp, M., Handke, V., and Marwede, M. 2009. "Raw Materials for Emerging Technologies", Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart	<a href="http://www.isi.fraunhofer.de">http://www.isi.fraunhofer.de</a>		
Graedel et al.	Graedel, T.E., Harper, E.M., Nassar, N.T., and Reck, B.K., "On the materials basis of modern society", Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013	<a href="http://www.pnas.org">www.pnas.org</a>		
Ecoinvent LCIA Database	ecoinvent Centre 2010. "ecoinvent data v2.2", Dübendorf	<a href="http://www.ecoinvent.ch">www.ecoinvent.ch</a>		
Ressource Lab				19

Abbildung 34: Leitfaden Folie 19

4. Handlungsempfehlungen		4. Absicherungsmaßnahmen			
Mögliche Rohstoffrisiken aus Unternehmenssicht und potentielle Absicherungsmaßnahmen					
Exemplarische Zuordnung möglicher Maßnahmen zu möglichen Risiken		Risiken			
		Geologische Risiken / Unsichere Verfügbarkeit	Langfristiger Preisanstieg durch Verknappung	Politische Instabilität	
Maßnahmen	Unternehmen im Markt	Unternehmensinternes Informationsmanagement	o	o	o
		Forschung & Entwicklung & Substitution	+	+	+
		Lagerung	o	o	+
	Zulieferernetzwerk	Diversifikation	o	o	+
		Langfristige Lieferverträge	+	+	o
		Investition in Zulieferer	+	+	o
		Beschaffungskooperation	o	o	o
	Kundennetzwerk	Unternehmensübergreifendes Informationsmanagement	o	o	+
		Langfristige Lieferverträge	o	o	o
	Finanzmarkt & Rohstoffbörse	Financial Hedging	o	-	o
	Politik & Rechtliche Rahmenbedingungen	Organisation in Interessengemeinschaften	-	-	o
	Kreislaufwirtschaft	Recycling, Reuse, Remanufacturing	+	+	o

Legende: + Kann im Allgemeinen, o kann in gewissen Fällen, - kann im Allgemeinen nicht zur Absicherung des Risikos eingesetzt werden

Quelle: In Anlehnung an Fridgen et al., Die Absicherung von Rohstoffrisiken – Eine Disziplinen übergreifende Herausforderung für Unternehmen, Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 2013, 65

Resource Lab 20

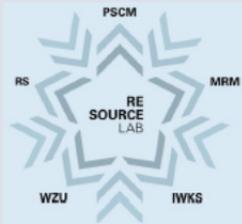
Abbildung 35: Leitfaden Folie 20

## Kontakt

**Resource Lab**  
Universität Augsburg

Prof. Dr. Axel Tuma  
Dr. Andrea Thorenz  
Tel. + 49 (0) 821 598-3948  
andrea.thorenz@mmm.uni-augsburg.de  
www.resource-lab.de





Die interdisziplinäre Forschungsgruppe bündelt Kompetenzen der Lehrstühle für Production & Supply Chain Management (Prof. Dr. Axel Tuma) und Ressourcenstrategie (Prof. Dr. Armin Reller) sowie des Arbeitsschwerpunktes Nachhaltigkeitsmanagement (Prof. Dr. Bernd Wagner).

Resource Lab 21

Abbildung 36: Leitfaden Folie 21

## V.2 Bauteilanalyse



Abbildung 37: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 1

## Identifikation metallischer Inhaltsstoffe

Analyse des Rohstoff-Inventars von elektronischen Bauteilen

EDX = Energiedispersive Röntgenspektroskopie



Quelle: <http://www.shimadzu.de/edx-72000hs/>

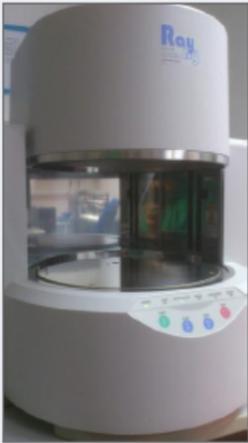
Warum untersuchen wir Produkte und deren Inhaltsstoffe ?

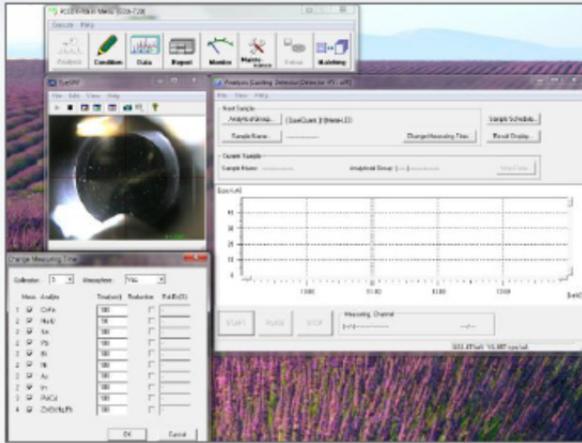
Resource Lab 2

Abbildung 38: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 2

## Identifikation metallischer Inhaltsstoffe

Vorgehensweise bei der Bauteilanalyse





Element	Symbol	Prozent	Relative	Ref.(%)
1	Ca	100	100	100
2	Al	10	10	10
3	Si	10	10	10
4	Fe	10	10	10
5	Ni	10	10	10
6	Cu	10	10	10
7	Zn	10	10	10
8	Pb	10	10	10
9	Ag	10	10	10
10	Sn	10	10	10
11	Bi	10	10	10
12	Pb	10	10	10
13	Bi	10	10	10
14	Pb	10	10	10
15	Bi	10	10	10
16	Pb	10	10	10
17	Bi	10	10	10
18	Pb	10	10	10
19	Bi	10	10	10
20	Pb	10	10	10
21	Bi	10	10	10
22	Pb	10	10	10
23	Bi	10	10	10
24	Pb	10	10	10
25	Bi	10	10	10
26	Pb	10	10	10
27	Bi	10	10	10
28	Pb	10	10	10
29	Bi	10	10	10
30	Pb	10	10	10
31	Bi	10	10	10
32	Pb	10	10	10
33	Bi	10	10	10
34	Pb	10	10	10
35	Bi	10	10	10
36	Pb	10	10	10
37	Bi	10	10	10
38	Pb	10	10	10
39	Bi	10	10	10
40	Pb	10	10	10
41	Bi	10	10	10
42	Pb	10	10	10
43	Bi	10	10	10
44	Pb	10	10	10
45	Bi	10	10	10
46	Pb	10	10	10
47	Bi	10	10	10
48	Pb	10	10	10
49	Bi	10	10	10
50	Pb	10	10	10
51	Bi	10	10	10
52	Pb	10	10	10
53	Bi	10	10	10
54	Pb	10	10	10
55	Bi	10	10	10
56	Pb	10	10	10
57	Bi	10	10	10
58	Pb	10	10	10
59	Bi	10	10	10
60	Pb	10	10	10
61	Bi	10	10	10
62	Pb	10	10	10
63	Bi	10	10	10
64	Pb	10	10	10
65	Bi	10	10	10
66	Pb	10	10	10
67	Bi	10	10	10
68	Pb	10	10	10
69	Bi	10	10	10
70	Pb	10	10	10
71	Bi	10	10	10
72	Pb	10	10	10
73	Bi	10	10	10
74	Pb	10	10	10
75	Bi	10	10	10
76	Pb	10	10	10
77	Bi	10	10	10
78	Pb	10	10	10
79	Bi	10	10	10
80	Pb	10	10	10
81	Bi	10	10	10
82	Pb	10	10	10
83	Bi	10	10	10
84	Pb	10	10	10
85	Bi	10	10	10
86	Pb	10	10	10
87	Bi	10	10	10
88	Pb	10	10	10
89	Bi	10	10	10
90	Pb	10	10	10
91	Bi	10	10	10
92	Pb	10	10	10
93	Bi	10	10	10
94	Pb	10	10	10
95	Bi	10	10	10
96	Pb	10	10	10
97	Bi	10	10	10
98	Pb	10	10	10
99	Bi	10	10	10
100	Pb	10	10	10

Resource Lab 3

Abbildung 39: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 3

## Identifikation metallischer Inhaltsstoffe

Innenaufbau der Messapparatur und schematischer Messvorgang

Resource Lab
4

Abbildung 40: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 4

## Erzeugung von Röntgenstrahlung

Verwendung einer Rhodium-Anode

→ (in rechter Grafik) Charakteristische  $K_{\alpha}$ - und  $K_{\beta}$ -Rhodium-Linien

Resource Lab
5

Abbildung 41: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 5

### Charakteristische Röntgenstrahlung

Element	Z	Atomgewicht (x)	Dichte (x)	K <sub>α</sub> -Linie (keV)	K <sub>β</sub> -Linie (keV)	L <sub>α</sub> -Linie (keV)	L <sub>β</sub> -Linie (keV)
Al	13	26,970	2,722	1,487	1,553	0	0
Co	27	58,932	8,900	6,930	7,649	0	0
Cu	28	63,546	8,940	8,047	8,904	0	0
Nb	41	92,906	8,570	16,614	18,621	2,166	2,257
Te	52	127,603	6,240	27,471	30,993	3,769	4,029
Ta	73	180,950	16,600	57,523	65,210	8,145	9,340
Au	79	197,200	19,370	68,779	77,968	9,711	11,439
Pb	82	207,210	11,340	74,957	84,921	10,549	12,611

Charakteristische K<sub>α</sub>, K<sub>β</sub>, L<sub>α</sub> und L<sub>β</sub> -Linien für jedes Element

Quelle: <http://www.yourperiodictable.com/modlum.php>

Resource Lab
6

Abbildung 42: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 6

### Charakteristische Röntgenstrahlung

Element	Z	Atomgewicht (x)	Dichte (x)	K <sub>α</sub> -Linie (keV)	K <sub>β</sub> -Linie (keV)	L <sub>α</sub> -Linie (keV)	L <sub>β</sub> -Linie (keV)
Al	13	26,970	2,722	1,487	1,553	0	0
Co	27	58,932	8,900	6,930	7,649	0	0
Cu	28	63,546	8,940	8,047	8,904	0	0
Nb	41	92,906	8,570	16,614	18,621	2,166	2,257
Te	52	127,603	6,240	27,471	30,993	3,769	4,029
Ta	73	180,950	16,600	57,523	65,210	8,145	9,340
Au	79	197,200	19,370	68,779	77,968	9,711	11,439
Pb	82	207,210	11,340	74,957	84,921	10,549	12,611

Charakteristische K<sub>α</sub>, K<sub>β</sub>, L<sub>α</sub> und L<sub>β</sub> -Linien für jedes Element

Quelle: <http://www.yourperiodictable.com/modlum.php>

Resource Lab
7

Abbildung 43: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 7

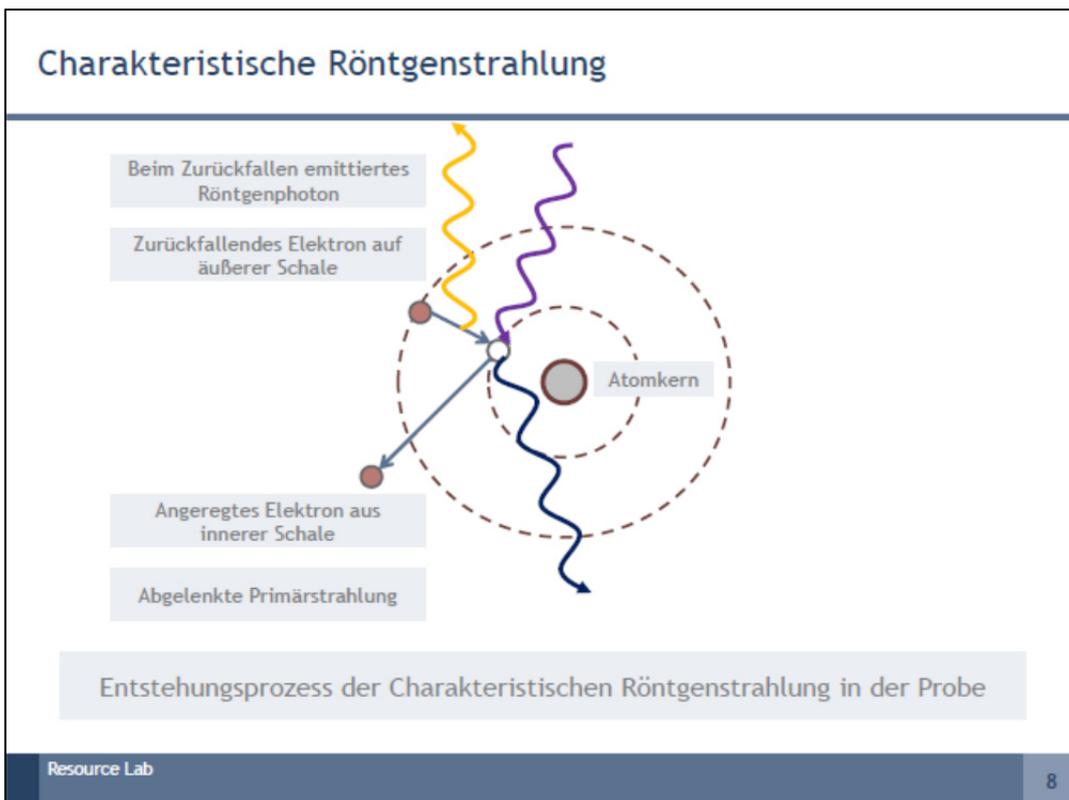


Abbildung 44: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 8

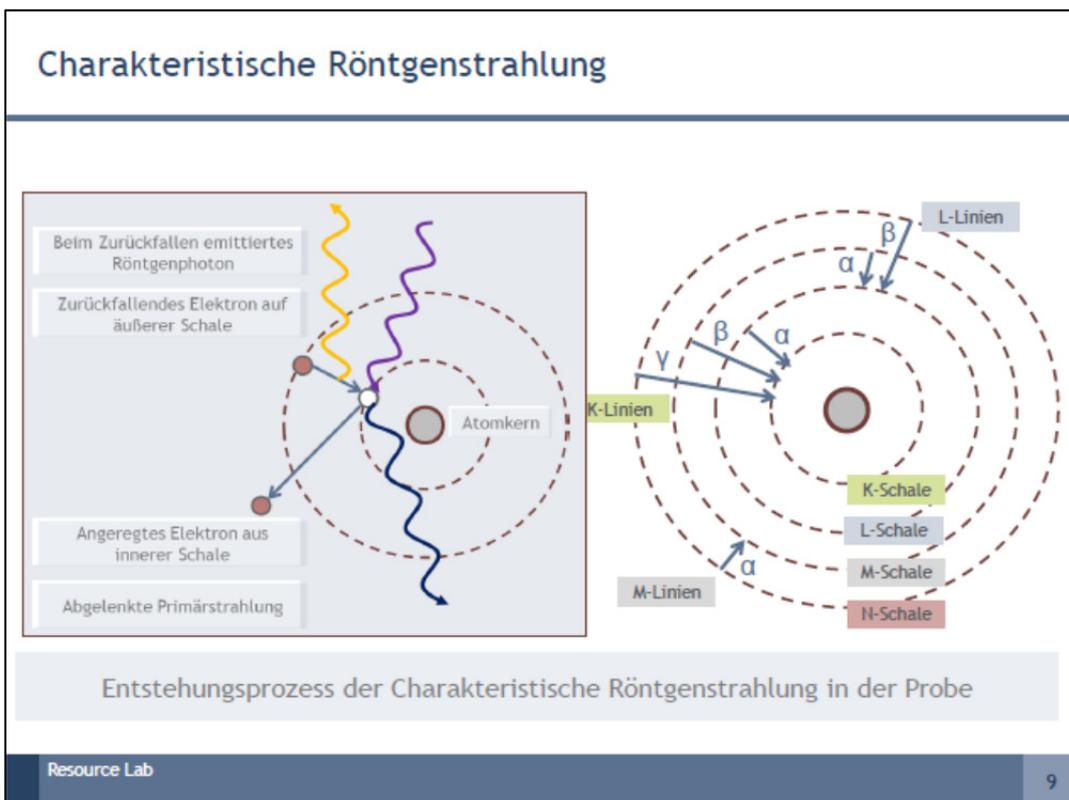


Abbildung 45: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 9

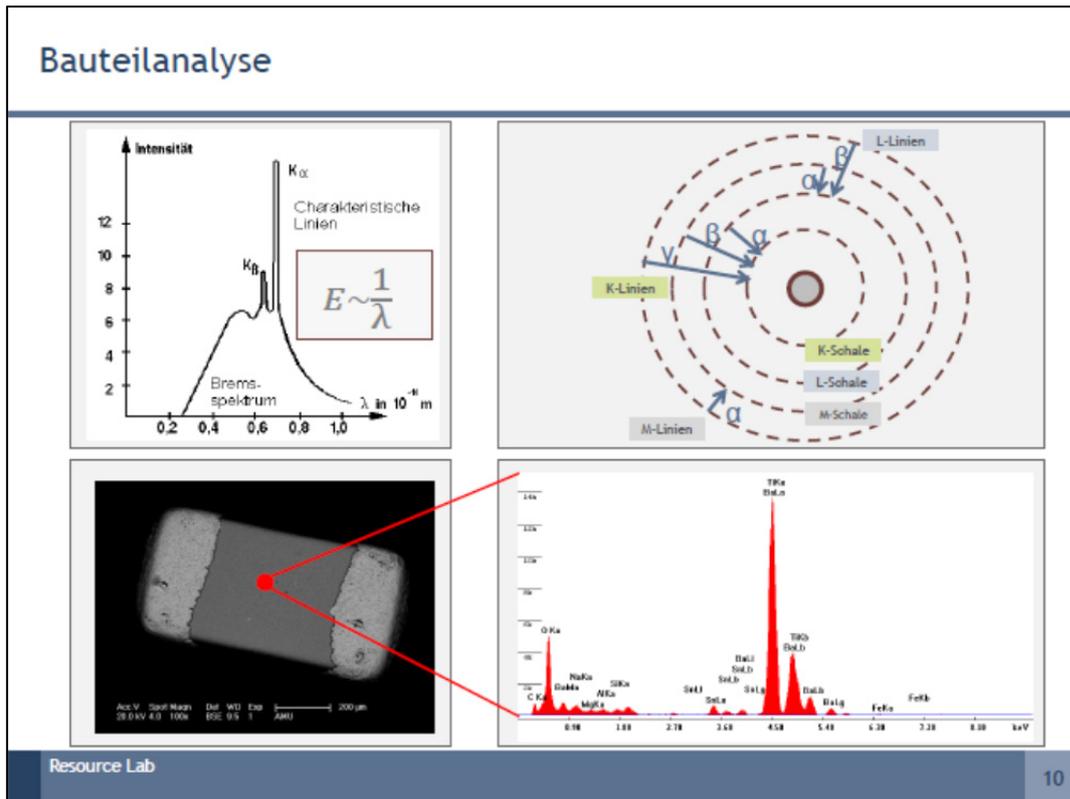


Abbildung 46: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 10

### Bauteilanalyse

#### Anschauungsbeispiel Tantalkondensator

	Ta	SiO2	Epoxy.	Fe	MnO2	Ni	Ag	Sn	„C“	Ti	S	Σ
R												
DB	41,77	23,78	10,19	8,11	7,45	5,89	1,83	0,69	0,30	-	-	100,01
L	37,35	20,04	n.n.	9,17	12,04	5,26	1,38	6,10	n.n.	4,67	3,17	99,18

➤ Zahlenwerte in der Einheit Prozent  
 ➤ R: Recherche  
 ➤ DB: Datenbank  
 ➤ L: Labor

**Ergebnisse im Überblick:**

- Alle nicht-metallischen Elemente können nachgewiesen werden
- Messung tendenziell sehr einfach, Auswertung der Ergebnisse u.U. sehr schwierig und zeitintensiv
- Massenanteile ohne Hilfsmittel nicht identifizierbar

Resource Lab 11

Abbildung 47: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 11

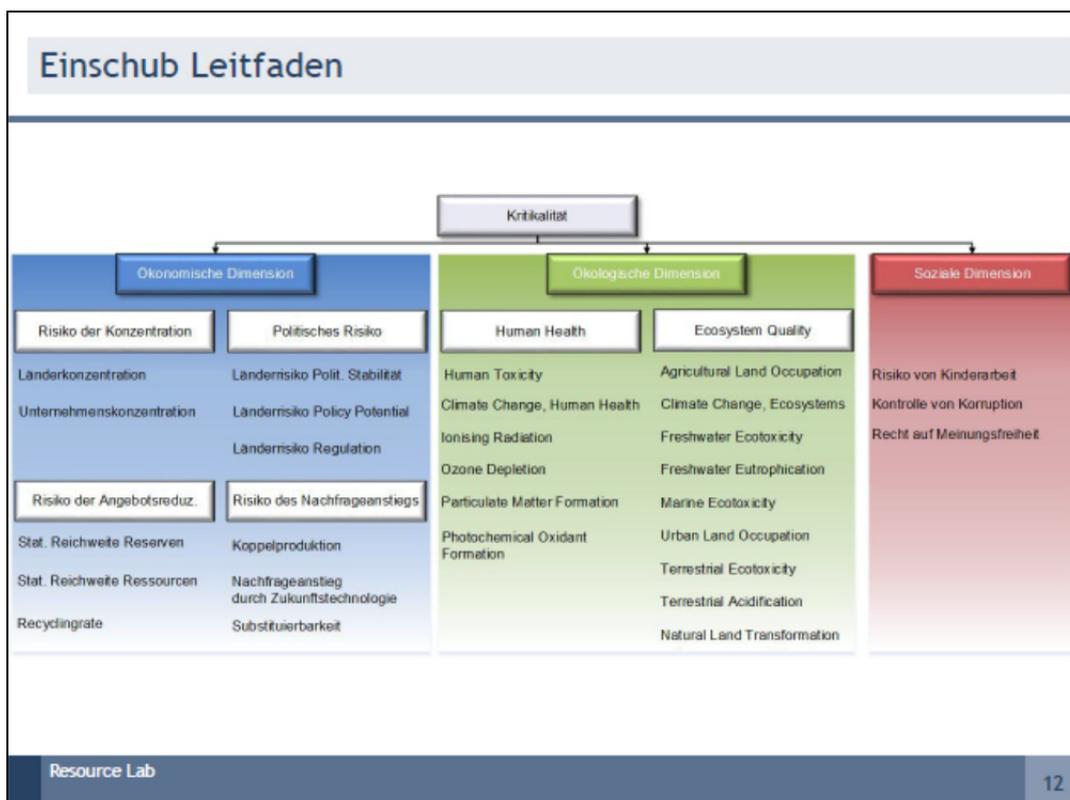


Abbildung 48: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 12

### Kondensator-Selektion auf ökonomischer Ebene

Criteria	Unit of Value	Global weights	AI-Cap			Te-Cap			Nb-Cap		
			Value	Perf.	Score	Value	Perf.	Score	Value	Perf.	Score
<b>Concentration Risk</b>											
Country Concentration	HHI	0.208	1638	0.44	0.092	1564	0.44	0.092	8157	0.11	0.024
Company Concentration	HHI	0.151	684	0.72	0.108	5761	0.16	0.024	7461	0.12	0.019
<b>Political Risk</b>											
Country Risk Political Stability	WGI	0.088	-0.07	0.25	0.022	-0.74	0.12	0.010	0.17	0.63	0.056
Country Risk Policy Potential	PPI	0.044	41	0.33	0.015	44	0.33	0.015	42	0.33	0.015
Country Risk Regulation	HDI	0.051	0.74	0.21	0.011	0.5	0.59	0.030	0.75	0.21	0.011
<b>Supply Reduction Risk</b>											
Statio Reach Reserves	years	0.062	109	0.27	0.017	149	0.59	0.037	86	0.14	0.009
Statio Reach Resources	years	0.034	213	0.12	0.004	abund.	0.29	0.010	more L. abund.	0.59	0.020
Recycling Rate	%	0.061	60%	0.46	0.028	<1%	0.08	0.005	>50%	0.46	0.028
<b>Demand Increase Risk</b>											
Companion Metal Fraction	%	0.061	0%	0.44	0.027	15%	0.12	0.007	0%	0.44	0.027
Future Technology Demand	%	0.106	0%	0.64	0.068	101%	0.1	0.011	3%	0.26	0.027
Substitutability	dimless	0.135	44	0.33	0.045	41	0.33	0.045	42	0.33	0.045
<b>Total scores</b>					<b>0.436</b>			<b>0.285</b>			<b>0.279</b>

Resource Lab
13

Abbildung 49: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 13

### Kondensator-Selektion auf ökologischer Ebene

Criteria	Indicators	Al-Cap (aluminium, production mix, at plant) (ecoinvent Centre 2010)		Ta-Cap (tantalum, powder, capacitor-grade, at regional storage) (ecoinvent Centre 2010)		Nb-Cap (Niobium, >99.75%, All energy) (Nuss et al. 2014)
		midpoint / kg	endpoints / kg	midpoint / kg	endpoints / kg	endpoints / kg
Human Health	Climate Change	0.24	0.38	7.21	15.20	1.78
	Human Toxicity	0.05		2.14		
	Ionising Radiation	0.00		0.03		
	Ozone Depletion	0.00		0.00		
	Particulate Matter Formation	0.09		5.83		
	Photochemical Oxidant Formation	0.00		0.00		
Ecosystem Quality	Agricultural Land Occupation	0.00	0.17	0.39	8.98	0.59
	Climate Change	0.16		4.72		
	Freshwater Eotoxicity	0.00		0.00		
	Freshwater Eutrophication	0.00		0.02		
	Marine Eotoxicity	0.00		0.00		
	Natural Land Transformation	0.01		1.02		
	Terrestrial Acidification	0.00		0.02		
	Terrestrial Eotoxicity	0.00		0.01		
	Urban Land Occupation	0.00		2.81		
<b>Total endpoints / kg</b>			<b>0.55</b>		<b>24.19</b>	<b>2.37</b>

Resource Lab 14

Abbildung 50: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 14

### Kondensator-Selektion auf sozialer Ebene

Indicators	Unit of Value	Global weights	Al-Cap	Ta-Cap	Nb-Cap
			Value	Value	Value
Risk of Child Labour	dimless	Maximum Value	10,36	48,80	48,55
Control of Corruption	WGI		46,58	54,46	40,66
Value and Accountability	WGI		60,83	62,30	17,75
<b>Value</b>				<b>60,83</b>	<b>62,30</b>

Resource Lab 15

Abbildung 51: Folien zur Bauteilanalyse, Folie 15

## V.3 Expertenfragebogen



26.03.2014

### Expertenbefragung zur Bewertung von Rohstoffrisiken

Sehr geehrte/r Teilnehmer/in,

die Universität Augsburg erarbeitet im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) einen Leitfaden, der Unternehmen (KMUs) bei der Bewertung von Rohstoffrisiken unterstützen soll. Mithilfe eines Bewertungsmodells im Leitfaden kann ein Unternehmen, beispielsweise aus der Elektronikbranche, für die Produktion diejenigen Rohstoffe oder Bauteile auswählen, die aufgrund der enthaltenen Metalle langfristig gesehen das geringste Verfügbarkeitsrisiko aufweisen.

Wir haben Sie als Experten ausgewählt und bitten Sie, den nachfolgenden Fragebogen auszufüllen. Damit leisten Sie einen wichtigen Beitrag für eine möglichst praxisnahe Gestaltung des Bewertungsmodells sowie des Leitfadens.

Die Auswertung des Fragebogens erfolgt selbstverständlich vertraulich. Bitte senden Sie den ausgefüllten Fragebogen bis zum 28. März 2014 wieder per Mail an uns zurück.

Bei Rückfragen oder Anmerkungen stehen wir Ihnen gerne telefonisch (0821-598-3950) oder per Mail ([christoph.kolotzek@wiwi.uni-augsburg.de](mailto:christoph.kolotzek@wiwi.uni-augsburg.de)) zur Verfügung.

Wir bedanken uns bereits im Voraus für Ihre Zeit und Expertise.

Mit freundlichen Grüßen

*Christoph Kolotzek, Dr. Andrea Thorenz, Prof. Dr. Axel Tuma*

---

#### Ziel dieses Fragebogens ist:

1. Die Bestimmung der Gewichtung einzelner Indikatoren innerhalb eines Merkmals zueinander.
2. Die Bestimmung der Gewichtung vier einzelner Merkmale zueinander.
3. (Mittels der Gewichtungen) Die Bestimmung des Verfügbarkeitsrisikos eines Rohstoffs.

Das Bewertungsmodell (siehe Abbildung 1) bestimmt das Verfügbarkeitsrisiko eines Rohstoffs. Hierfür werden vier Merkmale betrachtet: (1) Risiko der Konzentration, (2) Politisches Risiko, (3) Risiko der Angebotsreduzierung und (4) Risiko des Nachfrageanstiegs. Jedes Merkmal wird dabei durch zwei bzw. drei quantifizierbare Indikatoren definiert; insgesamt werden elf Indikatoren verwendet. Eine Kurzerklärung der Indikatoren finden Sie in der Tabelle auf Seite 6.

Abbildung 52: Expertenbefragung zur Bewertung von Rohstoffrisiken, Fragebogen Seite 1

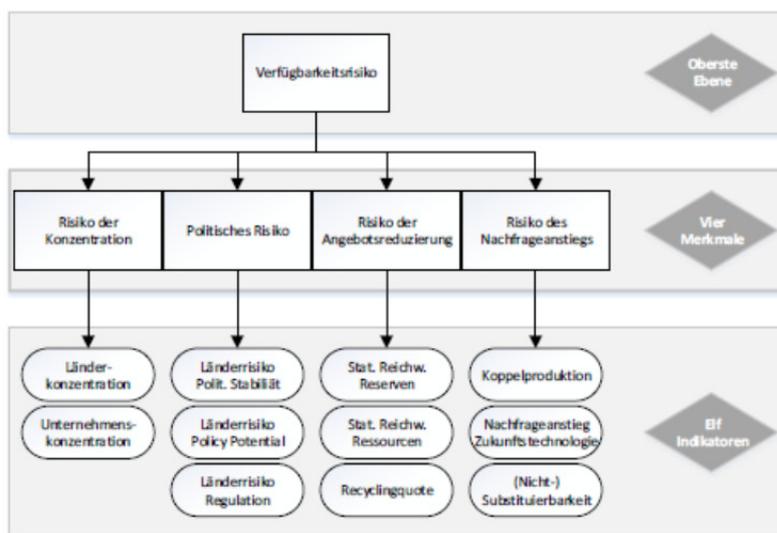


Abbildung 1: Baumstruktur des Bewertungsverfahrens

Ihre Aufgabe bei diesem Fragebogen ist der paarweise Vergleich der Indikatoren jeweils innerhalb eines Merkmals sowie anschließend der paarweise Vergleich der vier Merkmale; zusammengefasst 16 paarweise Vergleiche (siehe Seite 3 und 4). Aus den einzelnen paarweisen Vergleichen ergeben sich schließlich die gesuchten Gewichtungsfaktoren (siehe Ziel 1 und 2 dieses Fragebogens). Ein Beispiel zur Vorgehensweise beim paarweisen Vergleich dreier Indikatoren finden Sie auf Seite 5.

Die Bestimmung der Gewichtung der Indikatoren eines Merkmals bzw. der vier Merkmale mittels paarweiser Vergleiche erfolgt jeweils auf einer Skala von

- 1 (beide Indikatoren/Merkmale besitzen die gleiche Bedeutung) bis
- 9 (ein Indikator/ein Merkmal ist gegenüber dem anderen absolut dominant).

Bitte beachten Sie die Erläuterungen zur Bewertungsskala:

- 1: Gleiche Bedeutung (Beide Indikatoren/Merkmale besitzen gleiche Bedeutung)
- 2: Mittelwert zwischen ,1' und ,3'
- 3: Etwas größere Bedeutung (Ein Indikator/Merkmal besitzt dem anderen gegenüber eine etwas größere Bedeutung)
- 4: Mittelwert zwischen ,3' und ,5'
- 5: Viel größere Bedeutung (Ein Indikator/Merkmal besitzt dem anderen gegenüber eine viel größere Bedeutung)
- 6: Mittelwert zwischen ,5' und ,7'
- 7: Sehr viel größere Bedeutung (Ein Indikator/Merkmal besitzt dem anderen gegenüber eine sehr viel größere Bedeutung)
- 8: Mittelwert zwischen ,7' und ,9'
- 9: Absolut dominant (Ein Indikator/Merkmal ist gegenüber dem anderen absolut dominant)

Abbildung 53: Expertenbefragung zur Bewertung von Rohstoffrisiken, Fragebogen Seite 2

**Fragebogen:**

(Für zusätzliche Informationen zu den einzelnen Indikatoren, bitte Mauszeiger über gewünschtem Indikator positionieren)

**1. Paarweiser Vergleich der zwei Indikatoren im Merkmal Risiko der Konzentration**

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Länderkonzentration	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Unternehmenskonzentration														

**2. Paarweiser Vergleich der drei Indikatoren im Merkmal Politisches Risiko**

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Länderrisiko Politische Stabilität	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Länderrisiko Policy Potential														
Länderrisiko Regulation	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Länderrisiko Politische Stabilität														
Länderrisiko Policy Potential	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Länderrisiko Regulation														

**3. Paarweiser Vergleich der drei Indikatoren im Merkmal Risiko der Angebotsreduzierung**

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Statische Reichweite Ressourcen	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Statische Reichweite Ressourcen														
Recyclingquote	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Statische Reichweite Ressourcen														
Statische Reichweite Ressourcen	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Recyclingquote														

**4. Paarweiser Vergleich der drei Indikatoren im Merkmal Risiko des Nachfrageanstiegs**

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Koppelproduktion	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Nachfrageanstieg wg. Zukunftstechnologien														
Substituierbarkeit	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Koppelproduktion														
Nachfrageanstieg wg. Zukunftstechnologien	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Substituierbarkeit														

Abbildung 54: Expertenbefragung zur Bewertung von Rohstoffrisiken, Fragebogen Seite 3

5. Paarweiser Vergleich der vier Merkmale

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Risiko der Konzentration	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Politisches Risiko														
Risiko der Angebotsreduzierung	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Risiko des Nachfrageanstiegs														
Politisches Risiko	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Risiko der Angebotsreduzierung														
Risiko des Nachfrageanstiegs	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Risiko der Konzentration														
Politisches Risiko	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Risiko des Nachfrageanstiegs														
Risiko der Angebotsreduzierung	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	Risiko der Konzentration														

*Vielen Dank für Ihre Unterstützung!*

Abbildung 55: Expertenbefragung zur Bewertung von Rohstoffrisiken, Fragebogen Seite 4

---

**Beispiel zur Vorgehensweise bei den paarweisen Vergleichen:**

Paarweiser Vergleich dreier Indikatoren A, B und C:

Erster paarweiser Vergleich: A mit B

Zweiter paarweiser Vergleich: C mit A

Dritter paarweiser Vergleich: B mit C

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
A	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	B							
C	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	A				
B	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	C

Abbildung 2: Bewertungsbeispiel für drei Indikatoren A, B und C

Im ersten paarweisen Vergleich wird beiden Indikatoren A und B die gleiche Bedeutung zugesagt (Zahlenwert 1 auf der Skala). Beide Indikatoren A und B sind in diesem Vergleich zueinander gleich gewichtet, Gewichtung A : B = 1 : 1.

Im zweiten paarweisen Vergleich wird dem Indikator C eine viel größere Bedeutung, als dem Indikator A zugesprochen (Zahlenwert 5 auf der Seite des Indikators C). Der Indikator C wird in diesem Vergleich gegenüber dem Indikator A fünf mal stärker gewichtet; Gewichtung C : A = 5 : 1.

Im dritten paarweisen Vergleich wird der Indikator C als absolut dominant gegenüber dem Indikator B eingeschätzt (Zahlenwert 9 auf der Seite des Indikators C). Der Indikator C wird in diesem Vergleich gegenüber dem Indikator B neun mal stärker gewichtet; Gewichtung B : C = 1 : 9.

Nach der mathematischen Auswertung ergibt sich als Ergebnis hierbei eine Gewichtung der drei Indikatoren zueinander von A : B : C = 0,127 : 0,104 : 0,769.

---

**Kurzerklärung zu den elf Indikatoren:**

Merkmalsname	Indikator	Beschreibung Indikator
Risiko der Konzentration	Länderkonzentration	Konzentration der Jahresproduktion des Rohstoffs auf Länderebene, gemessen mit dem Herfindahl-Hirschman-Index
	Unternehmenskonzentration	Konzentration der Jahresproduktion des Rohstoffs auf Unternehmensebene, gemessen mit dem Herfindahl-Hirschman-Index
Politisches Risiko	Länderrisiko Politische Stabilität	Politische Instabilität der Förderländer, gewichtet nach Produktionsanteilen, gemessen mit dem Worldwide Governance Indicator für Political Stability and Absence of Violence/Terrorism
	Länderrisiko Policy Potential	Fähigkeit der Abbauländer, neue Bergbauprojekte umgesetzt zu bekommen, gemessen am Policy Potential Index
	Länderrisiko Regulation	Fähigkeit der Produktionsländer, aufgrund ihres Entwicklungsstandes Handelsrestriktionen tatsächlich umzusetzen, gemessen am HDI
Risiko der Angebotsreduzierung	Statische Reichweite Reserven	Statische Reserven-Reichweite des Rohstoffs, gemessen durch das Verhältnis aus jährlicher Produktionsrate und globalen Reserven
	Statische Reichweite Ressourcen	Statische Ressourcen-Reichweite des Rohstoffs, gemessen durch das Verhältnis aus jährlicher Produktionsrate und global geschätzten Ressourcen
	Recyclingquote	Recycling-Quote des Rohstoffs, gemessen an der derzeitigen End-of-Life-Recycling-Rate
Risiko des Nachfrageanstiegs	Koppelproduktion	Anteil der als Koppelprodukt geförderten Menge an der globalen Produktion des Rohstoffs
	Nachfrageanstieg aufgrund von Zukunftstechnologien	Geschätzter Nachfrageimpuls durch Zukunftstechnologien, gemessen durch das Verhältnis von erwarteter Nachfrage dieser Technologien in einem zukünftigen Jahr und der globalen Förderung in einem vergangenen Jahr
	(Nicht-) Substituierbarkeit	Einschätzung bezüglich der (Nicht-) Erfüllbarkeit der gleichen Funktion durch einen anderen Rohstoff, gemessen durch eine Experteneinschätzung

Abbildung 57: Expertenbefragung zur Bewertung von Rohstoffrisiken, Fragebogen Seite 6

V.4 Exemplarische Ergebnisse der Bauteilanalyse im Überblick

Exemplarisches Bauteil	enthaltene Elemente																																			
	Ag	Al	As	Au	Ba	Be	Bi	Br	Ca	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	K	Mn	Mg	Nb	Ni	Os	P	Pb	Pd	Sb	Si	Sn	Sr	Ta	Tb	Ti	Y	Zn			
Dünnschichtwiderstand	+													0	0					+																
Diode	0			0									0	0	0					+							+									
Ferrit (*)	+						0						0	0	+					+								+							+	
Keramikkondensator									0				0	0					0	0								+	0						0	
LED	0	0	0	0									0	0						0			0				+	0								
Optokoppler (*)	0	0	0	0																0						0	0									
Spannungskomparator	+	+		+									+	+						+				+		+	+	+	+						+	
Switch	0	0		0									0	0						0						0	0	0	0						0	
Tantalkondensator	0																										0	0								0
Transistor	0			0									+	+	0					+							+	0							0	

Legende:

- (\*) keine Materialdeklaration zu gemessenen Bauteilen in einer Datenbank vorhanden
- +
- 0
- gemäß Recherche sehr wahrscheinlich enthalten
- gemäß Recherche möglicherweise enthalten
- enthalten gemäß Labor, keine Materialdeklaration aus Datenbank vorhanden
- enthalten gemäß Labor ja, enthalten gemäß Datenbank nein
- enthalten gemäß Labor nein, enthalten gemäß Datenbank ja
- enthalten gemäß Labor ja, enthalten gemäß Datenbank ja

Abbildung 58: Analyseergebnisse im Überblick für 10 exemplarische Bauteile