



Vanessa Bach  
Markus Berger  
Martin Henßler  
Martin Kirchner  
Stefan Leiser  
Lisa Mohr  
Elmar Rother

Klaus Ruhland  
Laura Schneider  
Ladji Tikana  
Wolfgang Volkhausen  
Frank Walachowicz  
Matthias Finkbeiner

# Messung von Ressourceneffizienz mit der ESSENZ-Methode

Integrierte Methode zur  
ganzheitlichen Bewertung

OPEN

 Springer

# Messung von Ressourceneffizienz mit der ESSENZ-Methode

Vanessa Bach • Markus Berger • Martin Henßler  
Martin Kirchner • Stefan Leiser • Lisa Mohr  
Elmar Rother • Klaus Ruhland • Laura Schneider  
Ladji Tikana • Wolfgang Volkhausen  
Frank Walachowicz • Matthias Finkbeiner

# **Messung von Ressourceneffizienz mit der ESSENZ-Methode**

Integrierte Methode  
zur ganzheitlichen Bewertung

Vanessa Bach,  
Technische Universität Berlin;  
Dr. Markus Berger,  
Technische Universität Berlin;  
Dr. Martin Henßler, Daimler AG;  
Dr. Martin Kirchner,  
Evonik Techn. & Infr. GmbH;  
Stefan Leiser,  
Knauer Wissenschaftliche Geräte GmbH;  
Lisa Mohr, Thyssen Krupp Steel Europe AG;  
Dr. Elmar Rother,  
Evonik Techn. & Infr. GmbH;

Dr. Klaus Ruhland, Daimler AG;  
Dr. Laura Schneider,  
Technische Universität Berlin;  
Dr.-Ing. Ladji Tikana,  
Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V.;  
Dr. Wolfgang Volkhausen,  
Thyssen Krupp Steel Europe AG;  
Frank Walachowicz, Siemens AG;  
Prof. Dr. Matthias Finkbeiner,  
Technische Universität Berlin.

ISBN 978-3-662-49263-5 978-3-662-49264-2 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-49264-2

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2016. Dieses Buch ist eine Open-Access-Publikation.

**Open Access** Dieses Buch wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

# Vorwort

Die natürlichen Ressourcen der Erde sind seit jeher eine wichtige Grundlage für Fortschritt und wirtschaftliches Handeln der Menschen. Während die Nutzung von Ressourcen in früheren Zeiten jedoch überschaubar und auf wenige Rohstoffe begrenzt war, hat sich dieses Bild in den letzten Jahrhunderten dramatisch verändert. Mit dem permanent steigenden Rohstoffbedarf unserer Gesellschaft werden auch die aus der Ressourcennutzung resultierenden negativen Konsequenzen immer deutlicher.

Um diesem Trend zu begegnen und eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen, ist die Ressourceneffizienz eine häufig genannte Strategie. Als Konzept wird die Erhöhung der Ressourceneffizienz sowohl von Unternehmen als auch von öffentlichen Einrichtungen gestützt. Was aber bedeutet Ressourceneffizienz nun konkret? Wie kann man sie messen? Welches Produkt oder welches Unternehmen ist ressourceneffizient? Welche Alternative ist ressourceneffizienter?

Auf diese Fragen gibt es heute keine von allen Anspruchsgruppen getragene Antwort, da diese sowohl von der Definition des Ressourcenbegriffs als auch von der zur Bestimmung herangezogenen Indikatoren abhängt. Wenn das Konzept „Ressourceneffizienz“ zum Erreichen der politischen und unternehmerischen Ziele aber nicht nur als Lippenbekenntnis, sondern als praktische Entscheidungsunterstützung dienen soll, ist eine integrierte und konsistente Quantifizierungsmethode unbedingt notwendig. Nur so können Produkte oder Verfahren bezüglich ihrer Ressourceneffizienz verglichen und Optimierungspotenziale quantifiziert werden.

Ziel des ESSENZ-Projektes war es daher, ein Set von Ressourceneffizienzindikatoren zu entwickeln, die

- sowohl physische als auch ökologische und sozio-ökonomische Schutzgüter adressieren,
- sowohl wissenschaftlich konsistent als auch praktisch umsetzbar sind und
- sowohl branchenübergreifend wirksam als auch von den gesellschaftlichen Anspruchsgruppen akzeptiert sind.

Um Ressourceneffizienz von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen umfassend abzubilden und eine belastbare und transparente Einschätzung der Ressourceneffizienz im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung zu ermöglichen, betrachtet die ESSENZ-Methode die 4 Dimensionen „Verfügbarkeit“, „Gesellschaftliche Akzeptanz“, „Umweltauswirkungen“ und „Nutzen“. Die Dimension „Verfügbarkeit“ ist untergliedert in die Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“ und „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“. Die Modellierung des zu untersuchenden Produktsystems basiert auf der Ökobilanzmethodik ISO 14044. Um die 4 Dimensionen umfassend abzubilden, werden 21 Kategorien betrachtet. Es erfolgt zuerst die Bewertung der einzelnen Kategorien. Abschließend wird die Ressourceneffizienz des betrachteten Produktsystems ermittelt, indem die zuvor errechneten Ergebnisse für die einzelnen Dimensionen mit dem Nutzen des untersuchten Produktsystems zusammengeführt werden. In der ESSENZ-Methode repräsentiert die funktionelle Einheit den Nutzen des untersuchten Produktsystems. Eine Aggregation zu einem Gesamtwert findet nicht statt. Die ESSENZ-Methode kann sowohl für die Analyse eines Produktes als auch für mehrere Produktalternativen verwendet werden.

Auch wenn die ESSENZ-Methode noch nicht alle offenen Fragen klären kann, sind wir davon überzeugt, dass sie einen wichtigen Fortschritt zu einer zielorientierten, wissenschaftlich begründeten und praktisch umsetzbaren Bewertung von Ressourceneffizienz darstellt. Die Aussagekraft der heute gerade im politischen Kontext oft verwendeten massenbasierten Indikatoren ist mehr als gering. Neben den physischen Rohstoffvorkommen können sozio-ökonomische Aspekte die Verfügbarkeit zusätzlich begrenzen. So ist beispielsweise Eisen geologisch ausreichend verfügbar. Da es jedoch nur von drei Unternehmen weltweit gehandelt wird, kann es zu einer ökonomischen Verknappung kommen. In ähnlicher Weise können Handelshemmnisse, politische Stabilitäten oder Preisschwankungen den Zugang zu Rohstoffen über die physische Verfügbarkeit hinaus limitieren.

ESSENZ hat gezeigt, dass die Wissenschaft heute bereits über deutlich aussagekräftigere Bewertungsverfahren verfügt. Es ist höchste Zeit, diese auch in der Praxis umzusetzen.

Das ESSENZ-Projekt wäre ohne die Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Förderschwerpunktes „r<sup>3</sup> – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“ nicht möglich gewesen (FKZ 033R094A-F). Für diese Unterstützung und die konstruktive Zusammenarbeit mit dem Projektträger Jülich (DLR) möchten wir uns stellvertretend bei Herrn Dr. Lothar Mennicken und Herrn Dr. Andreas Jacobi bedanken.

Als Verbundkoordinator gilt unser herzlicher Dank vor allem unseren Koautoren und Projektpartnern Dr. Martin Henßler und Dr. Klaus Ruhland (Daimler AG), Dr. Ladji Tikana (Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e. V.), Dr. Martin Kirchner und Dr. Elmar Rother (Evonik Industries AG), Frank Walachowicz (Siemens AG), Lisa Mohr und Dr. Wolfgang Volkhausen (ThyssenKrupp Steel Europe AG) und Stefan Leiser (Wissenschaftlicher Gerätebau Knauer GmbH) ohne deren Kompetenz, Engagement und konstruktive Mitarbeit dieses Buch nicht hätte entstehen können.

Technische Universität Berlin  
Berlin, 01.12.2015

Vanessa Bach  
Dr. Laura Schneider  
Dr. Markus Berger  
Prof. Dr. Matthias Finkbeiner



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Die Verantwortung  
für den Inhalt dieser  
Veröffentlichung liegt  
beim Autor

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
1.1	Ressourceneffizienz	1
1.2	Möglichkeiten und Grenzen der Ressourceneffizienzbewertung mit der ESSENZ-Methode	4
<b>2</b>	<b>Ablauf der Ressourceneffizienzbewertung mit der ESSENZ-Methode</b>	7
<b>3</b>	<b>Modellierung des Produktsystems</b>	11
3.1	Ziel und Untersuchungsrahmen	11
3.2	Sachbilanz	15
<b>4</b>	<b>Methodik zur Bewertung der Ressourceneffizienzdimensionen</b>	19
4.1	Methodik zur Bewertung der Verfügbarkeit von Metallen und fossilen Rohstoffen	20
4.2	Methodik zur Bewertung der gesellschaftlichen Akzeptanz	41
4.3	Methodik zur Bewertung der Umweltauswirkungen	44
4.4	Bewertung des Nutzens	46
<b>5</b>	<b>Berechnung der Ressourceneffizienz</b>	51
5.1	Allgemeines Vorgehen	51
5.2	Berechnung der Verfügbarkeit für Metalle und fossile Rohstoffe	52
5.3	Berechnung der gesellschaftlichen Akzeptanz	55
5.4	Berechnung der Umweltauswirkungen	55
5.5	Ermittlung der Ressourceneffizienz	57
<b>6</b>	<b>Interpretation der Ergebnisse</b>	61
6.1	Unsicherheiten in der Bewertung	61
6.2	Interpretation der Verfügbarkeit	64
6.3	Interpretation der gesellschaftlichen Akzeptanz	69
6.4	Interpretation der Umweltbewertung	70

6.5	Interpretation der ermittelten Ressourceneffizienz . . . . .	72
6.6	Interpretation des Gesamtergebnisses . . . . .	73
<b>7</b>	<b>Aggregation zum Vergleich von Produktalternativen . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>9</b>	<b>Anhang . . . . .</b>	<b>87</b>
9.1	Anhang 1: Charakterisierungsfaktoren für Metalle und fossile Rohstoffe . . . . .	88
9.2	Anhang 2: Wirkungsindikatorbeträge . . . . .	128
9.3	Anhang 3: Distance-to-Target-Werte . . . . .	130
9.4	Anhang 4: Globale Produktionsdaten . . . . .	132
9.5	Anhang 5: Maximale normalisierte Distance-to-Target-Werte . . . . .	133
9.6	Anhang 6: Normalisierte Distance-to-Target-Werte . . . . .	134
9.7	Anhang 7: Auswertung der Stakeholderbefragung . . . . .	136
9.8	Anhang 8: Darstellung der Berechnung der Charakterisierungsfaktoren am Beispiel Silber . . . . .	139
	<b>Glossar . . . . .</b>	<b>155</b>
	<b>Referenzen . . . . .</b>	<b>157</b>

# Abkürzungsverzeichnis

AADP	Anthropogenic stock extended Abiotic Depletion Potential
ADP <sub>elementar</sub>	Abiotic Depletion Potential für Metalle
ADP <sub>fossil</sub>	Abiotic Depletion Potential für fossile Rohstoffe
AP	Acidification Potential
AR	Abiotischer Ressourcenverbrauch
BGS	British Geological Survey
CF	Charakterisierungsfaktor
DtT	Distance-to-Target
EP	Eutrophication Potential
ESSENZ	Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung/ Messung von Ressourceneffizienz
ETI	Enabling Trade Index
GA	Gesellschaftliche Akzeptanz
GE	Gesamtergebnis
GWP	Global Warming Potential
HH	Handelshemmnisse
HHI	Herfindahl-Hirschman-Index
KA	Kinderarbeit
KG	Konfliktgebiete
Konz_P	Konzentration der Produktion
Konz_R	Konzentration der Reserven
Konz_U	Unternehmenskonzentration
Kop	Koppelproduktion
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
MK	Minenkapazität
NFW	Nachfragewachstum
ODP	Ozone Depletion Potential
ÖT	Ökotoxizität
PE	Primärmaterialeinsatz
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential

PPI	Policy Potential Index
PRS	Preisschwankungen
PS	Politische Stabilität
RE	Ressourceneffizienz
REX	Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben
Sb	Antimon
SHDB	Social Hotspot Database
SLCA	Social Life Cycle Assessment (Sozialbilanz)
SR	Statische Reichweite
TE	Teilergebnis
UBP	Umweltbelastungspunkte
USGS	United States Geological Service
V	Volatilität
WGI	World Governance Indicators
WGII	World Governance Index

# Kapitel 1

## Einleitung

### Inhaltsverzeichnis

1.1 Ressourceneffizienz .....	1
1.2 Möglichkeiten und Grenzen der Ressourceneffizienzbewertung mit der ESSENZ-Methode .....	4

### 1.1 Ressourceneffizienz

Sowohl das starke Wirtschaftswachstum – motiviert durch eine wachsende Weltbevölkerung – als auch die vorherrschenden Produktions- und Konsummuster der letzten Jahrzehnte haben zu einer intensiven Beanspruchung natürlicher Ressourcen geführt [1]. Natürliche Ressourcen wie Metallerze, Frischwasser oder saubere Luft bilden jedoch die Grundlage für jegliche Wirtschaftsaktivitäten. Daher ist neben dem Schutz der Umwelt auch der Zugang zu Ressourcen bedeutend und ein wesentlicher Aspekt für eine nachhaltige Entwicklung [2]. Eine nachhaltige Entwicklung ist ein Indiz dafür, dass nicht nur die Bedürfnisse der jetzigen Generation, sondern auch die künftiger Generationen erfüllt werden können. Dabei werden die drei Teildimensionen Umwelt, Soziales und Wirtschaft gleichberechtigt betrachtet. Bei der Entwicklung von innovativen und umweltfreundlicheren Technologien, Produkten und Herstellungsverfahren kommt daher neben dem effizienten Einsatz von Ressourcen über den gesamten Lebensweg auch dem Zugang zu den benötigten Ressourcen eine wesentliche Bedeutung bei [3].

Die Reduzierung des Ressourceneinsatzes und der Umweltbelastungen bei gleichzeitiger Steigerung des Nutzens bzw. bei gleichbleibendem Nutzen sind deshalb zentraler Bestandteil nationaler und internationaler Politik (z. B. Deutsches Ressourceneffizienzprogramm [4], Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie [5], EU roadmap on resource efficiency [6]). Die Implementierung von Strategien ist notwendig, um die Effizienz des Ressourceneinsatzes zu erhöhen.

Unter Ressourceneffizienz wird im Allgemeinen das Verhältnis aus Wertschöpfung und dem dafür benötigten Ressourceneinsatz verstanden (siehe Gl. 1.1):

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Wertschöpfung}}{\text{Ressourcen}} \quad \text{Gl. 1.1}$$

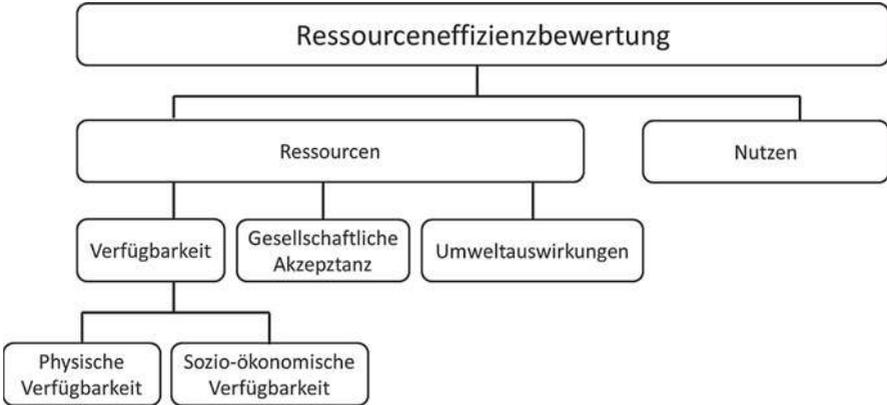
Ressourcen sind verschiedenste Mittel, die es ermöglichen, eine bestimmte Handlung oder einen bestimmten Vorgang auszuüben. Bisher werden bei der Ressourceneffizienzbetrachtung vor allem abiotische Ressourcen wie Metalle berücksichtigt. In der „Thematischen Strategie zur nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen“ der Europäischen Kommission werden erstmals auch Umweltmedien wie Luft, Wasser, Boden sowie strömende Ressourcen (Wind- oder Sonnenenergie) und Landnutzung einbezogen [7]. Unter Wertschöpfung wird der Verdienst des untersuchten Produktsystems verstanden. Dieser lässt sich sowohl monetär als auch über physikalische Parameter (z. B. Übertragung von Energie, gemessen in kWh/m) oder den Nutzen des untersuchten Produktsystems abbilden.

Bestehende Ansätze zur Messung des Ressourceneinsatzes (z. B. Materialintensität pro Serviceeinheit (MIPS) [8]) greifen bei den oben beschriebenen Herausforderungen zu kurz, da der Fokus ausschließlich auf der Materialmenge liegt. Mengenbezogene Kennzahlen sind zwar einfach zu berechnen und gut kommunizierbar, haben jedoch nur eine sehr geringe Aussagekraft, da die Materialmenge weder über die damit verbundenen Umweltauswirkungen noch über die Verfügbarkeit des Materials Auskunft gibt. Sie entsprechen deshalb heute nicht mehr dem Stand der Wissenschaft. Basiert die Bewertung von Ressourceneffizienz auf nur einem Indikator, z. B. der Masse der eingesetzten Rohstoffe, werden die Ergebnisse nur von diesem einen betrachteten Indikator beeinflusst, obwohl eine komplexe Fragestellung wie Ressourceneffizienz keine eindimensionale Betrachtungsweise ist.

Für eine ganzheitliche Bewertung von Ressourceneffizienz im Kontext der Nachhaltigkeit sollten neben der Betrachtung des Rohstoffeinsatzes auch die Umweltauswirkungen im Zusammenhang mit dem Abbau, der Nutzung sowie der Verfügbarkeit der jeweiligen Ressource unter Berücksichtigung von heutigem und zukünftigem Bedarf einbezogen werden. Dies ist vor allem deswegen von großer Bedeutung, um eine Verlagerung von Umweltwirkungen und Versorgungsrisiken zu vermeiden [9]. Daher fokussiert die ESSENZ-Methode aktuell auf Metalle und fossile Rohstoffe sowie auf die Umweltmedien Wasser, Boden und Luft. Der Nutzen des Produktsystems dient zur Quantifizierung der Wertschöpfung, da dieser ein zuverlässigeres Ergebnis liefert. Daher wird die in Gleichung 1 dargestellte Ressourceneffizienzberechnung folgendermaßen angepasst (siehe Gl. 1.2):

$$\text{Ressourceneffizienz} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressourcen}} \quad \text{Gl. 1.2}$$

Um sicherzustellen, dass die Ressourceneffizienz von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen ganzheitlich gemessen wird, gilt es, adäquate Methoden zu entwickeln, die über die Bewertung der Masse hinausgehen. Dazu bedarf es robuster und

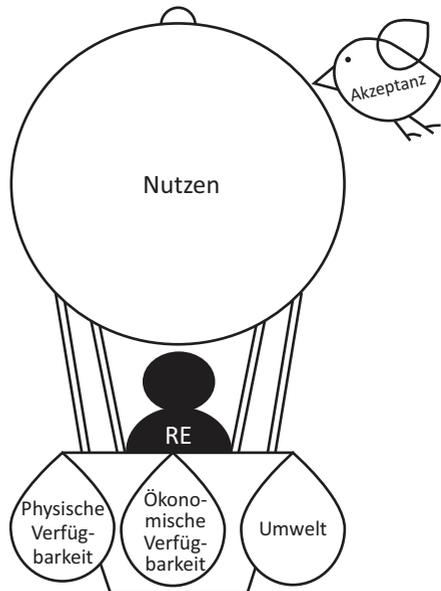


**Abb. 1.1** Dimensionen der Ressourceneffizienzbewertung

anwendbarer Indikatoren, die alle Dimensionen der Ressourceneffizienzbewertung im Kontext der Nachhaltigkeit (d. h. unter Berücksichtigung sozialer, ökologischer und ökonomischer Aspekte) beschreiben. Die in der ESSENZ-Methode betrachteten Dimensionen sind in Abb. 1.1 dargestellt und umfassen „Verfügbarkeit“, „Gesellschaftliche Akzeptanz“, „Umweltauswirkungen“ sowie „Nutzen“. Die Dimension „Verfügbarkeit“ ist untergliedert in die Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“ und „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“.

In Abb. 1.2 ist schematisch das Verständnis von Ressourceneffizienz nach der ESSENZ-Methode anhand eines Heißluftballons dargestellt. Das Aufsteigen des

**Abb. 1.2** Schematische Darstellung der Ressourceneffizienz (RE) in Abhängigkeit von physischer und (sozio-) ökonomischer Verfügbarkeit, (gesellschaftlicher) Akzeptanz, Umwelt(auswirkungen) und Nutzen



Ballons repräsentiert den Nutzen. Das potenzielle Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit aufgrund von physischen und sozio-ökonomischen Aspekten und die entstehenden Umweltauswirkungen werden durch die am Heißluftballon befestigten Sandsäcke repräsentiert; sie ziehen den Heißluftballon nach unten und bilden damit ein Gegengewicht zum Nutzen. Die Ressourceneffizienz – visualisiert als Ballonfahrer – befindet sich in einer bestimmten Höhe, die durch den Auftrieb des Ballons und das Gewicht der Sandsäcke festgelegt wird. Je größer der Nutzen und je kleiner die potenziellen Umweltauswirkungen und das potenzielle Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit, desto höher steigt der Ballon und desto größer ist die Ressourceneffizienz.

Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ wird durch einen Vogel abgebildet, der auf den Ballon zufliegt und diesen mit seinem Schnabel beschädigen kann. Da sowohl für die Einhaltung von sozialen Standards als auch von Umweltstandards die Menge der eingesetzten Metalle oder fossilen Rohstoffe keine Rolle spielt, können selbst minimale Mengen dazu führen, dass der Einfluss der anderen Dimensionen auf die Ressourceneffizienz keine Bedeutung mehr hat.

## 1.2 Möglichkeiten und Grenzen der Ressourceneffizienzbewertung mit der ESSENZ-Methode

Ziel der ESSENZ-Methode ist die Bewertung der Ressourceneffizienz von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen. Im Folgenden wird zur Vereinfachung „Produkt, Prozess und Dienstleistung“ zu „Produkt“ zusammengefasst. Entsprechend der in den nächsten Kapiteln beschriebenen Methodik werden neben den eingesetzten Massen der Metalle und fossilen Rohstoffe das potenzielle Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit (aufgrund von physischen oder sozio-ökonomischen Aspekten) sowie die potenziellen Umweltauswirkungen des Produktsystems<sup>1</sup> betrachtet. Weiterhin wird die gesellschaftliche Akzeptanz der im Produkt verwendeten Materialien hinsichtlich potenzieller Einhaltungen von Sozial- und Umweltstandards abgeschätzt. Auf diese Weise wird eine belastbare und transparente Einschätzung der Ressourceneffizienz von Produkten im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung ermöglicht. Bei der Interpretation ist zu bedenken, dass den Dimensionen „Physische Verfügbarkeit“ und „Umweltauswirkungen“ nicht weniger Bedeutung zukommt als der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, nur weil weniger Kategorien betrachten werden. Das methodische Vorgehen der ESSENZ-Methode ist an die seit langem erprobte Ökobilanzmethodik angelehnt, die auf der ISO-Norm 14044 [10] fußt und ein Verfahren zur systematischen Analyse der Umweltauswirkungen entlang des Lebensweges von der Produktgewinnung über Herstellung und Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung darstellt.

---

<sup>1</sup> Unter Produktsystem versteht man die Zusammenfassung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen, die den Lebensweg eines Produktes beschreiben und die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllen [10].

Als Standard ist in der ESSENZ-Methode die Analyse von 21 Kategorien festgelegt, die im vorliegenden Leitfaden umfassend beschrieben werden. Sie können bei Bedarf um weitere Kategorien ergänzt werden. Die Analyse dieser 21 Kategorien ist notwendig, um jede Dimension bestmöglich zu analysieren und Zielkonflikte innerhalb sowie zwischen den Dimensionen (z. B. Produktsysteme, die geringe Umweltauswirkungen haben, aber ein hohes potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit aufweisen) zu vermeiden. Die ESSENZ-Methode findet sowohl für die Analyse eines Produktes als auch für mehrere Produktalternativen Anwendung. Optional kann bei der Betrachtung mehrerer Alternativen ein relativer Vergleich der Dimensionen vorgenommen werden.

Die Anwendbarkeit der ESSENZ-Methode ist für Metalle und fossile Rohstoffe erprobt. Die Übertragung auf andere abiotische Ressourcen wie Sand und Kies oder biotische Materialien ist nicht mehr Teil des ESSENZ-Projektes, aber zukünftig möglich und vorgesehen. Bei der Übertragung der ESSENZ-Methode auf andere abiotische Ressourcen müssen aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika dieser Ressourcen weitere Kategorien wie z. B. logistische Beschränkungen betrachtet werden (z. B. Transporte über lange Wegstrecken). Bei biotischen Materialien spielen neben den bereits in der ESSENZ-Methode betrachteten Kategorien auch Gesichtspunkte wie Extremnaturereignisse (z. B. Dürre, Überschwemmung, Stürme) eine Rolle. Für Metalle und fossile Rohstoffe werden entsprechende Charakterisierungsfaktoren<sup>2</sup> zur Bewertung der Teildimension „Physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ sowie der „Gesellschaftliche Akzeptanz“ zur Verfügung gestellt, die die Einschränkungen in den verschiedenen Abschnitten der Lieferkette widerspiegeln (z. B. zu Beginn der Lieferkette erfolgt die Entnahme von Rohstoffen). Sowohl bei der Interpretation der einzelnen Dimensionen als auch bei der darauf basierenden Gesamtbewertung müssen bestehende Unsicherheiten einbezogen werden.

Die physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit kann derzeit (meist) nur für das Mengengerüst ausgewertet werden. Alle im Produktsystem verwendeten Metalle und fossilen Rohstoffe über den gesamten Lebensweg eines Produktes basierend auf bestehenden Ökobilanzdatenbanken zu identifizieren, ist derzeit nicht möglich. Daher ist eine Lebenswegbetrachtung erschwert. Als einen ersten Ansatz wird in der ESSENZ Methode daher die Bewertung des Mengengerüsts vorgeschlagen. Liegen dem Anwender weitere Daten zur Lieferkette vor, sollten diese ebenfalls bewertet werden.

Die physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit lässt sich mithilfe der ESSENZ Methode lediglich für Primärrohstoffe bewerten. Grund hierfür ist, dass die Charakterisierungsfaktoren für die betrachteten Kategorien nur für Primärrohstoffe gelten. Für Sekundärrohstoffe sind zwar ähnliche Kategorien bedeutsam (z. B. Unternehmenskonzentration), allerdings müssten andere Grunddaten zur Berechnung herangezogen werden. Bei der Bestimmung der Rohstoffverfügbarkeit wird

---

<sup>2</sup> Dies ist ein aus dem Charakterisierungsmodell abgeleiteter Faktor, der die Sachbilanzdaten (in diesem Falle die Materialflüsse) in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators umwandelt [10].

also angenommen, dass alle eingesetzten Materialien aus primären Quellen kommen – unabhängig von ihrer tatsächlichen Herkunft. Die aus dem Einsatz von Sekundärrohstoffen resultierenden Vorteile können aktuell lediglich durch die geringeren Umweltauswirkungen abgebildet werden.

Die Methode ermittelt potenzielle Auswirkungen – somit werden Effekte identifiziert, die eintreten könnten, aber in der Realität so nicht eintreten müssen. Die Ermittlung der Ressourceneffizienz eines Produktes bzw. Produktalternativen mittels der ESSENZ-Methode soll Hotspots hinsichtlich potenzieller Umweltauswirkungen und potenzielle Risiken einer eingeschränkten Verfügbarkeit aufgrund von physischen und sozio-ökonomischen Gesichtspunkten sowie aufgrund von Einschränkungen der gesellschaftlichen Akzeptanz aufzeigen.

Die ESSENZ-Methode ist für die interne Anwendung gedacht. Zielgruppe sind daher sowohl kleine und mittelständische als auch große Unternehmen, die über die Anwendung der ESSENZ-Methode die Ressourceneffizienz ihres Produktportfolios ermitteln möchten. Die ermittelten Ressourceneffizienzpotenziale sollen zu diesem Zeitpunkt nur hinsichtlich der Dimension „Umweltauswirkungen“ an Kunden weitergegeben werden. Für die Teildimensionen „Physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ sowie für die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ ist eine Kommunikation der Ergebnisse nach außen nicht vorgesehen. Da die Charakterisierungsfaktoren für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ eine Gewichtung enthalten, dürfen die Ergebnisse zudem nach ISO 14044 nicht in Ökobilanzstudien veröffentlicht werden, in denen vergleichende Aussagen enthalten sind.

Um diese Grenzen und Einschränkungen auch während des Lesens des Leitfadens bewusst zu reflektieren und die Ergebnisse sicher interpretieren zu können, werden an den entsprechenden Stellen im Leitfaden Unsicherheiten und Einschränkungen durch kursive Schrift gekennzeichnet:

*Hier liegt eine Unsicherheit oder Einschränkung in der ESSENZ-Methode vor. Diese sollte bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.*

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

## Kapitel 2

# Ablauf der Ressourceneffizienzbewertung mit der ESSENZ-Methode

In Abb. 2.1 sind die in der ESSENZ-Methode betrachteten Bereiche Produktsystem und Bewertung dargestellt. Die Modellierung des Produktsystems wird in Kap. 3 erläutert und beinhaltet idealerweise den gesamten Lebensweg des Produktes. Neben der Entnahme von Rohstoffen werden die Produktion, Nutzung und Wartung, Recycling, Wieder- und Weiterverarbeitung sowie die Entsorgung des Produktes berücksichtigt. Die Bewertung der Ressourceneffizienz des Produktsystems mithilfe der ESSENZ Methode ist in Kap. 4 umfassend erklärt und gliedert sich in die Teildimensionen „Physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, „Gesellschaftliche Akzeptanz“ und „Umweltauswirkungen“. Die Gegenüberstellung dieser einzelnen Dimensionen mit der Dimension „Nutzen“ ermöglicht schließlich eine Bewertung der Ressourceneffizienz.

Um eine transparente und objektive Ermittlung der Ressourceneffizienz zu gewährleisten, läuft die ESSENZ-Methode nach dem in Abb. 2.2 dargestellten schematischen Verfahren ab.

Im ersten Schritt erfolgt die **Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen**, indem das Ziel der Betrachtung festgelegt wird, z. B. Vergleich der Ressourceneffizienz zweier Alternativen. Des Weiteren erfolgt eine Beschreibung des Untersuchungsrahmens, der unter anderem die Festlegung der funktionellen Einheit, der Systemgrenzen und eine Beschreibung des Produktlebensweges beinhaltet. In der ESSENZ-Methode ist der **Nutzen** des untersuchten Produktsystems über die funktionelle Einheit beschrieben, entgegen der oftmals verwendeten Definition über monetärer Werte. Dem Anwender steht es frei, zusätzlich noch monetäre Werte in die Analyse miteinzubeziehen.

Unter Berücksichtigung des Ziels und des Untersuchungsrahmens wird die Modellierung des Lebensweges des untersuchten Produktes bzw. der Produktalternativen nach den Ökobilanzanforderungen der ISO-Norm 14044 durchgeführt. Basierend auf der Modellierung können die Elementarflüsse sowie das Mengengerüst ermittelt werden, die die Grundlage der Bewertung bilden.

Die Bewertung umfasst eine Analyse der potenziellen Risiken einer eingeschränkten Verfügbarkeit und der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie der Umweltauswir-

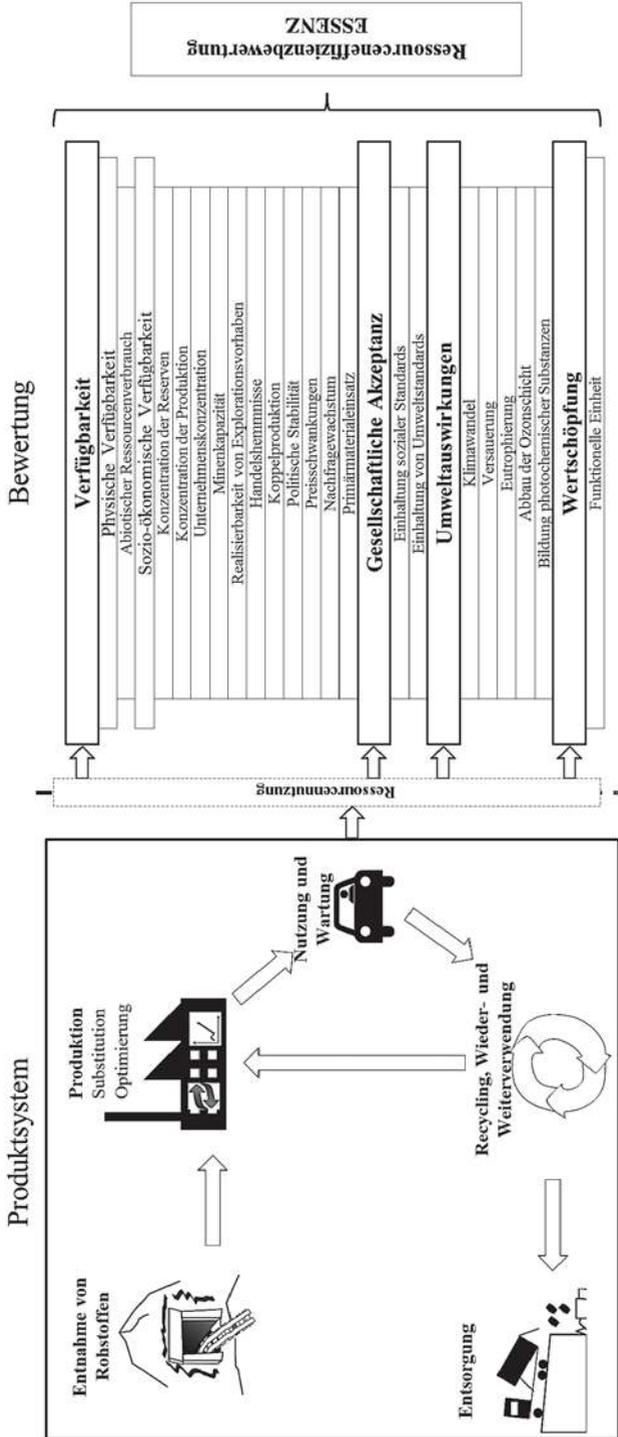
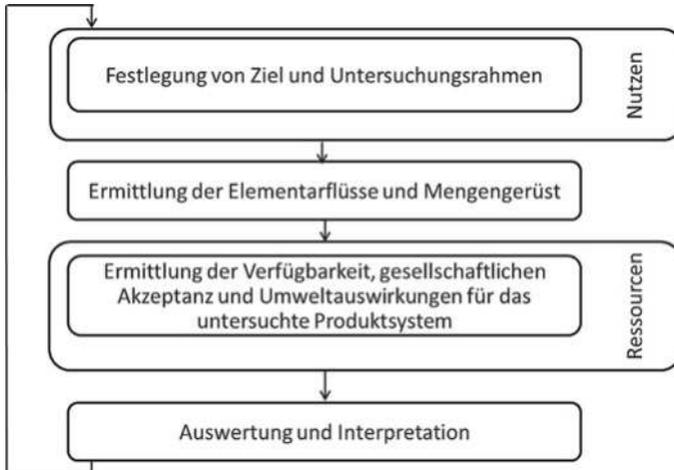


Abb. 2.1 Schematische Darstellung der in der ESSENZ-Methode betrachteten Bereiche: Produktsystem und Bewertung



**Abb. 2.2** Schematisches Verfahren zur Ermittlung der Ressourceneffizienz mit der ESSENZ-Methode

kungen nach den Regeln der ESSENZ-Methode, die im Leitfaden näher erläutert sind.

Im nächsten Schritt werden die betrachteten Kategorien und **Dimensionen zusammgeführt**, und somit wird die **Ressourceneffizienz** des untersuchten Produktsystems **ermittelt**. Dabei werden die Ergebnisse der Bewertungsdimensionen „Physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, „Gesellschaftlichen Akzeptanz“ sowie „Umweltauswirkungen“ dem Nutzen gegenübergestellt, der über die funktionelle Einheit repräsentiert wird.

Abschließend erfolgt die **Auswertung und Interpretation** der Ergebnisse. Diese Phase beinhaltet eine kritische Prüfung der vorherigen Phasen. Anschließend werden die ergebnisrelevanten Prozesse, Emissionen, Materialien und Annahmen identifiziert. Mittels einer Sensitivitätsanalyse, bei der signifikante Parameter verändert werden, wird schließlich die Robustheit der Ergebnisse überprüft.

Es ist zu beachten, dass das sequenzielle Abarbeiten der dargestellten Phasen nicht zwingend und ein iteratives Vorgehen in vielen Fällen sinnvoll ist. So können beispielsweise die Systemgrenzen auch nachträglich angepasst werden, wenn in der Interpretation der Ergebnisse weitere relevante Prozesse identifiziert werden.

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmateriale unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmateriale nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

# Kapitel 3

## Modellierung des Produktsystems

### Inhaltsverzeichnis

3.1 Ziel und Untersuchungsrahmen .....	11
3.2 Sachbilanz .....	15

Aufbauend auf der ISO 14044 [10] wird das zu untersuchende Produktsystem modelliert. Im Folgenden werden die damit verbundenen Schritte kurz erläutert. Um mehr Informationen zur Erstellung von Ökobilanzen zu erhalten, können weitere Quellen herangezogen werden [10], [11], [12].

### 3.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

In einem ersten Schritt werden das Ziel (beabsichtigte Anwendung) sowie der Untersuchungsrahmen mit den Systemgrenzen, die funktionelle Einheit und der Referenzfluss<sup>1</sup> festgelegt. Darüber hinaus werden die Gründe für die Durchführung sowie das Zielpublikum bestimmt. Die ESSENZ-Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz hat zum Ziel, den Einsatz von Ressourcen über den Lebensweg eines Produktes effizienter zu gestalten, und dient zur Analyse des eigenen Produktportfolios.

Zur Veranschaulichung wird an dieser Stelle ein fiktives Beispiel eingeführt, welches im weiteren Verlauf des Leitfadens erneut aufgegriffen wird. Es umfasst grau hinterlegte Texte und Abbildungen und dient dazu, die verschiedenen Schritte der ESSENZ-Methode besser zu erläutern. Das Beispiel wurde daher entsprechend in seiner Komplexität soweit verringert, dass es gut nachvollziehbar ist. Für das

---

<sup>1</sup> Der Referenzfluss ist ein Maß für die Outputs von Prozessen eines vorhandenen Produktsystems, die zur Erfüllung der Funktion notwendig sind [10].

Verständnis der Methode ist es nicht zwingend erforderlich, das Beispiel zu lesen. Es kann bei Bedarf übersprungen werden.

Das Ziel lässt sich beispielsweise wie folgt formulieren: Vergleich eines Silber- und Aluminiumkabels in der Elektronik eines Soundsystems.

Die Nutzengleichheit im Beispiel ist insofern gegeben, da beide Kabel zur Übertragung von elektrischer Energie dienen, ohne dass eine eingeschränkte Qualität in der Funktion zu erwarten ist. Würde sich zum Beispiel das Aluminiumkabel nicht für den Einsatz in einem Soundsystem eignen, wäre der Vergleich der beiden Kabel nicht zielführend.

In den Zielen wird festgelegt, ob es sich um eine vergleichende Analyse oder die Betrachtung eines einzelnen Produktes handelt. Bei einer vergleichenden Analyse muss sichergestellt werden, dass die zu untersuchenden Systeme die gleichen Funktionen und damit den gleichen Nutzen erfüllen.

Die Definition des Nutzens eines Produktes ist wichtig, da der Nutzen als ein entscheidender Parameter in die Ressourceneffizienzbewertung eingeht. Die Quantifizierung des Nutzens erfolgt über die funktionelle Einheit. Der Nutzen und die funktionelle Einheit werden nach ISO-Hierarchie in ESSENZ bevorzugt physikalisch abgebildet. Dabei muss sowohl der Nutzen als auch die funktionelle Einheit spezifisch für das untersuchte Produktsystem definiert werden. Es besteht aber auch die Option, wirtschaftliche Kenngrößen zu verwenden.

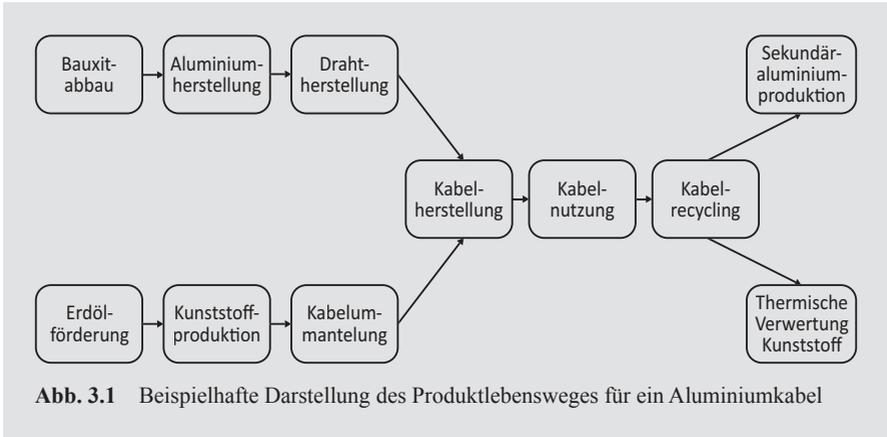
Des Weiteren erfolgt eine Beschreibung des Produktlebenswegs, die dabei unterstützen kann, keine relevanten Lebenswegabschnitte und deren Belastungen zu vernachlässigen. Zum besseren Verständnis ist dabei die Anfertigung einer einfachen Skizze empfehlenswert.

Vergleich eines Silber- und Aluminiumkabels in der Elektronik eines Soundsystems:

Funktionelle Einheit: Übertragung von 0,06 kWh elektrischer Energie bei gleichem Spannungsabfall über 5 m (0,012 kWh/m)

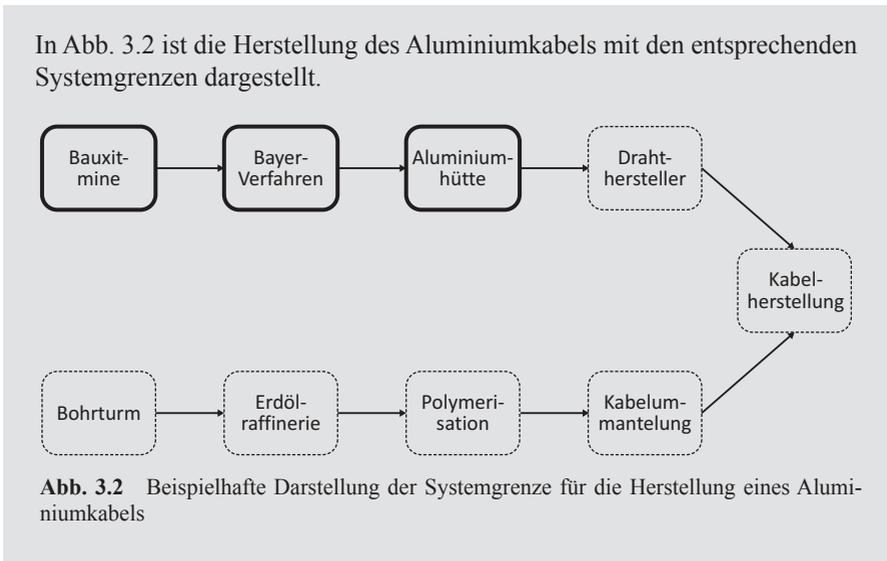
Referenzfluss: 0,44 kg Silberkabel und 0,24 kg Aluminiumkabel (mit je 0,06 kg Kunststoffummantelung)

In Abb. 3.1 ist der Lebensweg eines Aluminiumkabels grob dargestellt. Dieser umfasst den Abbau des Bauxits zur Herstellung des Rohstoffes Aluminium zur Fertigung des Drahts sowie die Förderung von Erdöl, welches als Rohstoff zur Herstellung von Kunststoff für die Kabelummantelung benötigt wird. Durch die Zusammenführung von Draht und Kabelummantelung entsteht schließlich ein Kabel für Soundsysteme. Die Kabelnutzung umfasst den Einsatz im Soundsystem. Am Ende des Lebensweges steht das Kabelrecycling, welches die stoffliche Rückgewinnung von Aluminium und die thermische Verwertung von Kunststoff umfasst.



**Abb. 3.1** Beispielhafte Darstellung des Produktlebensweges für ein Aluminiumkabel

Im nächsten Schritt werden die Systemgrenzen und Abschneidekriterien definiert. Die festgelegten Systemgrenzen spezifizieren, welche Abschnitte des Produktlebensweges und welche der darin auftretenden Prozesse (z. B. Rohstoffgewinnung, Transport, Verarbeitungs- bzw. Herstellungsprozesse, Herstellung von Betriebsstoffen, Recycling) Berücksichtigung finden. Prozesse und Verfahren, die zur Ressourceneffizienz beitragen, werden dabei ebenfalls betrachtet. Diese umfassen zum einen mögliche Optimierungsoptionen von Prozessen (z. B. ein verringerter Energieverbrauch), unter die auch das Recycling von Rohstoffen am Ende des Lebensweges fällt, sowie die Substitution von Materialien (Abb. 2.1). Bei vergleichenden Analysen können übereinstimmenden Lebenswegabschnitte abgeschnitten und somit erhebliche Vereinfachungen bei der Modellierung erreicht werden.



**Abb. 3.2** Beispielhafte Darstellung der Systemgrenze für die Herstellung eines Aluminiumkabels

Aufgrund der Symmetrien im Herstellungsprozess des Silber- und Aluminiumkabels können Prozessschritte wie beispielsweise die Ummantelung des Drahtes (aufgrund gleicher Massen) sowie die Drahtherstellung abgeschnitten werden. Letzteres ist allerdings nur dann möglich, wenn bei der Drahtherstellung beider Kabel gleich viel Energie benötigt wird und die Mengenunterschiede bei den Metallen keine prozesstechnischen Unterschiede bedingen. Diese Prozesse sind mit hell umrandeten Kästchen gekennzeichnet. Die aluminiumspezifischen Prozesse, die dunkel umrandete Kästchen haben, sind für die Herstellung des Aluminiumkabels maßgebend und können bei einem Vergleich der Kabel nicht abgeschnitten werden. Für das gewählte Beispiel wurde die Drahtummantelung jedoch weiterhin einbezogen, um den Anwendungsfall der Hotspotanalyse eines Produkts aufzeigen zu können und zu erläutern, wie die Bewertung (Kap. 4), Berechnung (Kap. 5) und Interpretation (Kap. 6) für ein Produkt vorgenommen wird.

Zur Verringerung des Aufwandes beim Erstellen einer Ökobilanzstudie dienen die sogenannten Abschneidekriterien. Diese ermöglichen es, Prozesse oder Stoffströme auch innerhalb der Systemgrenzen zu vernachlässigen. Diese können z. B. über die Masse definiert sein. Dabei wird festgelegt, dass Stoffstrommengen aufgrund ihrer geringen Masse (z. B. weniger als 3 % der Produktmasse) nicht zu bilanzieren sind. In der Gesamtbetrachtung dürfen jedoch nicht mehr als 10 % der Produktmasse abgeschnitten werden. Als Abschneidekriterium kann neben der Masse auch der Umweltwirkungsbeitrag oder Energiegehalt dienen [10]. In der Praxis hat sich allerdings das Massenkriterium bewährt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass Komponenten mit einer signifikanten Wirkung in den Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“, „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, und den Dimensionen „Gesellschaftliche Akzeptanz“ oder „Umweltauswirkungen“ nicht abgeschnitten werden dürfen.

Der Untersuchungsrahmen legt auch fest, welche Wirkungskategorien Betrachtung finden, damit bei der Erstellung der Sachbilanz die Erhebung der entsprechenden Elementarflüsse berücksichtigt wird. Für die ESSENZ-Methode werden als Standard die folgenden Kategorien festgelegt. Die Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ umfasst die Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch. Die in der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ betrachteten Kategorien sind Konzentration der Reserven, Konzentration der Produktion, Unternehmenskonzentration, Minenkapazität, Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben, Handelshemmnisse, Koppelproduktion, politische Stabilität, Preisschwankungen, Nachfragerwachstum und Primärmaterialeinsatz. Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ umfasst die Kategorien „Einhaltung sozialer Standards“ und „Umweltstandards“ (Kap. 4). Die Bewertung der Dimension „Umweltauswirkungen“ erfolgt mithilfe der Kategorien Klimawandel, Versauerung, Eutrophierung, Abbau der Ozonschicht und Bildung photochemischer Oxidantien.

## 3.2 Sachbilanz

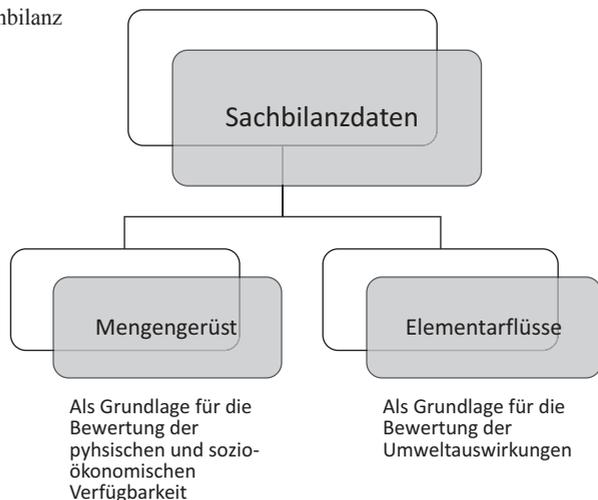
Ziel der Erstellung der Sachbilanz ist die Erfassung aller, die Systemgrenze überschreitenden Input- (Rohstoffe, Energie- und Wasserverbrauchsdaten) und Outputgrößen (Emissionen in Luft, Wasser, Boden) bezogen auf die funktionelle Einheit des zu untersuchenden Produktsystems. Diese Elementarflüsse bilden die Grundlage für die Bewertung der Dimension „Umweltauswirkungen“ (Abb. 3.3). In der ESSENZ-Methode umfasst die Sachbilanz zusätzlich die Inventardaten des Mengengerüsts des Produktes. Diese dienen als Grundlage für die Bewertung der Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“, „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ und der Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“.

Optimal wäre es, alle verwendeten Metalle und fossilen Rohstoffe über den Lebensweg eines Produktes einzubeziehen, um eine umfassende Bewertung des betrachteten Produktsystems zu gewährleisten und unerwünschte Verschiebung von Belastung zu vermeiden. *Diese Angaben aus bestehenden Ökobilanzdatenbanken zu bekommen, ist derzeit nicht möglich, was solch eine Analyse erschwert. Daher wird in einem ersten Schritt nur das Mengengerüst des untersuchten Produktes betrachtet. Sollten dem Anwender weitere Daten zur Lieferkette vorliegen, sollten diese unbedingt integriert werden.*

*Zudem ist es erforderlich, bei der Modellierung eine klare Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen vorzunehmen. Die Wieder- und Weiterverwendung von Metallen ist ein wichtiger Beitrag für die Verringerung der Umweltauswirkungen sowie der Aufzehrung von Ressourcen und muss daher bei der Modellierung berücksichtigt werden. Derzeit sind keine Charakterisierungsfaktoren für Sekundärrohstoffe zur Bewertung der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ vorhanden.*

Dennoch sollte auch im Mengengerüst eine Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärrohstoff vorgenommen werden. Bei der detaillierteren Analyse des

**Abb. 3.3** Gliederung der Sachbilanz



potenziellen Risikos einer eingeschränkten Verfügbarkeit muss eine solche Information einbezogen werden.

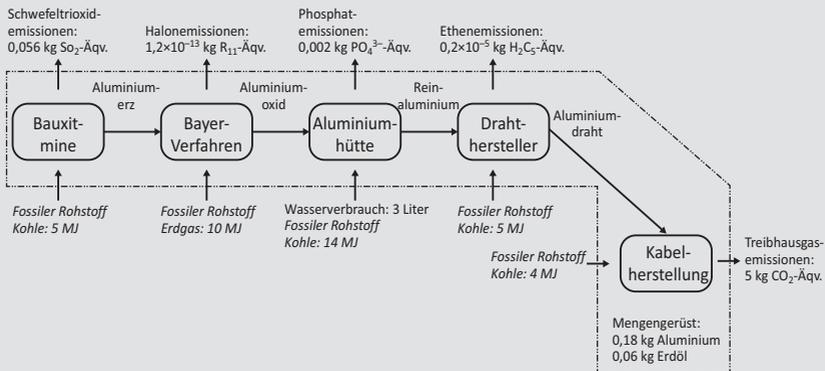
Die Ermittlung der Mengen an Silber, Aluminium und Erdöl für das Produktsystem erfolgt über das Mengengerüst. Unter der Annahme, dass für 1 kg Kunststoff 1 kg Erdöl benötigt wird, ergibt sich im Mengengerüst eine Masse von 0,06 kg Erdöl für die Kunststoffummantelung.

Mengengerüst: 0,38 kg Silber, 0,18 kg Aluminium, 0,06 kg Erdöl

Elementarflüsse: bezogen auf den Lebensweg des Silberkabels z. B. 60 kg CO<sub>2</sub> und des Aluminiumkabels z. B. 0,9 kg CO<sub>2</sub>

Für die Bewertung der Umweltauswirkung werden die Elementarflüsse (z. B. CO<sub>2</sub>) laut ISO 14044 [10] über den Lebensweg eines Produktes identifiziert.

Wie in Abb. 3.4 beispielhaft für die Herstellung des Aluminiumkabels dargestellt, werden für jeden Prozess die eingesetzten Materialien als auch die entstehenden Emissionen sowohl im Vordergrundsystem als auch über den Lebensweg identifiziert.



**Abb. 3.4** Beispielhafte Darstellung der Erhebung der Sachbilanzdaten am Beispiel des Aluminiumkabels

Bei der Erhebung des Inventars können verschiedene Datenquellen mit unterschiedlicher Qualität zur Verfügung stehen. Dabei sollten zuerst Primärdaten (z. B. von Produzenten über Berechnungen, Messungen, Datenerfassungssysteme der Prozesssteuerung, des Umweltmanagements oder des Enterprise-Resource-Plannings) und dann Sekundärdaten (z. B. Ökobilanzdatenbanken, vorangegangene Studien, Emissionsdatenbanken, Umweltstatistiken) verwendet werden. Im Fall von Datenlücken kann auf physikalische bzw. chemische Berechnungen (z. B. Energiebedarf, stöchiometrische Verhältnisse) und, wenn nicht anders möglich, auf quantitative Schätzungen (z. B. Abschätzung anhand ähnlicher Prozesse) zurückgegriffen werden.

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

# Kapitel 4

## Methodik zur Bewertung der Ressourceneffizienzdimensionen

### Inhaltsverzeichnis

4.1	Methodik zur Bewertung der Verfügbarkeit von Metallen und fossilen Rohstoffen . . . .	20
4.1.1	Methodik zur Bewertung der physischen Verfügbarkeit . . . . .	20
4.1.2	Methodik zur Bewertung der sozio-ökonomische Verfügbarkeit . . . . .	23
4.2	Methodik zur Bewertung der gesellschaftlichen Akzeptanz . . . . .	41
4.3	Methodik zur Bewertung der Umweltauswirkungen . . . . .	44
4.4	Bewertung des Nutzens . . . . .	46

Basierend auf der Ermittlung der Elementarflüsse und des Mengengerüsts erfolgt nun die Bewertung hinsichtlich der Ressourceneffizienz des Produktes wie auch in Abb. 2.1 und Abb. 2.2 dargestellt. In Abb. 4.1 ist eine Übersicht der Dimensionen und Kategorien dargestellt, deren Bewertung in den folgenden Kapiteln erläutert wird.

Zunächst wird die Bewertung der Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“ und „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ sowie „Gesellschaftliche Akzeptanz“ erläutert. Im Anschluss wird das Vorgehen zur Bewertung der Umweltauswirkungen vorgestellt.

Die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren, wie in diesem Kapitel erläutert, ist in Kap. 7 für das Beispiel des Silberkabels im Detail dargestellt.

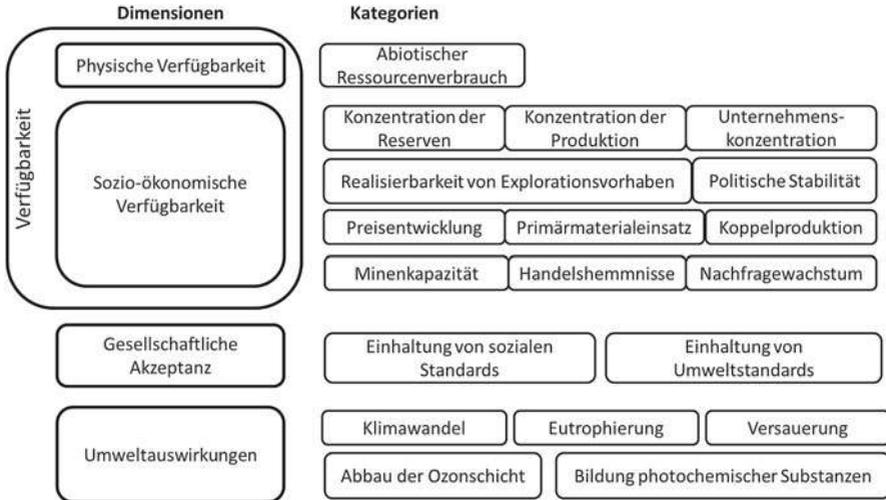


Abb. 4.1 Übersicht der betrachteten Dimensionen und Kategorien

## 4.1 Methodik zur Bewertung der Verfügbarkeit von Metallen und fossilen Rohstoffen

Folgend wird die Bewertung der Dimension „Verfügbarkeit“ erläutert, die sich aus den Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“ und „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ zusammensetzt.

### 4.1.1 Methodik zur Bewertung der physischen Verfügbarkeit

Die Bewertung der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ über die Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch (AR) setzt sich aus der geologischen und anthropogenen Verfügbarkeit der Metalle und fossilen Rohstoffe zusammen. Die geologische Verfügbarkeit betrachtet die in der Erde vorhandenen (ultimativen) Reserven. Anthropogene Vorkommen sind in der Technosphäre vorhandene Materialien, die sich durch jahrelange Förderungen aufgebaut haben. Sie können ebenfalls dazu genutzt werden, den Bedarf an Rohstoffen zu decken. Bereits jetzt können große Teile der anthropogenen Vorräte zurückgewonnen werden (*urban mining*). Teilweise sind die anthropogenen Vorkommen genauso groß wie die Reserven, dessen Abbau sich zum jetzigen Zeitpunkt wirtschaftlich lohnt [13]. Daher haben beide Bestände Einfluss auf die Verfügbarkeit von Materialien und bilden eine wichtige Grundlage für ein funktionierendes Wirtschaftssystem.

Demzufolge wird die Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ als Gesamtheit betrachtet (Abb. 4.2).

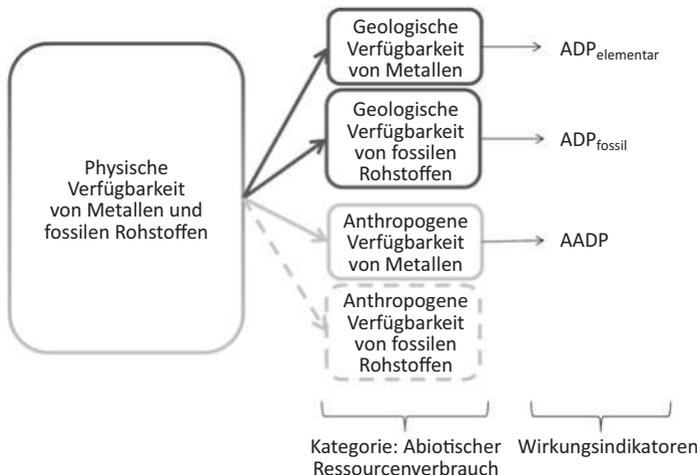


Abb. 4.2 Zusammensetzung der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“

In der ESSENZ-Methode wird die Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch mit dem Wirkungsindikator<sup>1</sup> Abiotic Depletion Potential (ADP) [14] quantifiziert, der die Aufzehrung sedimentärer und mineralischer Rohstoffe sowie fossiler Energieträger bewertet. Hierbei ist zu beachten, dass die Bewertung der Metalle mit einem anderen Indikator als die Bewertung der fossilen Rohstoffe erfolgt. Für Metalle ist der  $ADP_{\text{elementar}}$ -Indikator anzuwenden, welcher auf die ultimativen Reserven<sup>2</sup> bezogen ist. Die Ermittlung des Wirkungsindikatorbetrags (spezifischer Wert des Wirkungsindikators für ein Metall oder fossilen Rohstoff)  $i$  erfolgt, indem die Extraktionsrate des Metalls seinen ultimativen Reserven gegenübergestellt wird (siehe Gl. 4.1). Um die abiotische Aufzehrung der verschiedene Metalle untereinander vergleichen zu können, erfolgt eine Normierung auf die Referenzsubstanz Antimon (Sb) [14]:

$$ADP_{\text{elementar},i} = \frac{\text{Extraktionsrate}_{\text{mineralisch},i}}{(\text{ultimative Reserven}_{\text{mineralisch},i})^2} \times \frac{(\text{ultimative Reserven}_{\text{Sb}})^2}{\text{Extraktionsrate}_{\text{Sb}}} \quad \text{Gl. 4.1}$$

Neben den ultimativen Reserven kann der  $ADP_{\text{elementar}}$ -Indikator auch auf die Reservenbasis<sup>3</sup> oder die Reserven<sup>4</sup> bezogen sein. In der Praxis wird allerdings hauptsächlich mit dem  $ADP_{\text{elementar}}$ -Indikator der ultimativen Reserven gerechnet, der auch in der ESSENZ-Methode Verwendung findet. Werden viele Sekundärrohstoffe einge-

1 Der Wirkungsindikator ist die quantifizierbare Darstellung der Wirkungskategorie [12].  
 2 Unter ultimativen Reserven werden die Ressourcenvorkommen in der Erdkruste verstanden [22].  
 3 Dies sind Ressourcen, die das Potenzial haben, in naher Zukunft technisch und wirtschaftlich abgebaut zu werden [22].  
 4 Dies ist ein Teil der Reservenbasis, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung wirtschaftlich abbaubar ist [22].

setzt, so ist die Aufzehrung der Primärrohstoffe geringer. Die Aufzehrung bzw. der Einsatz von Sekundärrohstoffen kann mit dem  $ADP_{\text{elementar}}$  nicht bewertet werden.

Die Quantifizierung der Wirkungskategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch der fossilen Rohstoffe erfolgt mit dem  $ADP_{\text{fossil}}$ -Indikator, der nach Gl. 4.2 berechnet wird:

$$ADP_{\text{fossil}} = \frac{\text{Extraktionsrate}_{\text{fossil}}}{(\text{ultimative Reserven}_{\text{fossil}})^2} \times \frac{(\text{ultimative Reserven}_{\text{Sb}})^2}{\text{Extraktionsrate}_{\text{Sb}}}. \quad \text{Gl. 4.2}$$

Die Extraktionsrate des fossilen Rohstoffs wird durch die quadrierten ultimativen Reserven dividiert. Um verschiedene fossile Rohstoffe untereinander vergleichen zu können, findet analog zum  $ADP_{\text{elementar}}$ -Indikator eine Normierung auf die Referenzsubstanz Antimon (Sb) statt. Für fossile Rohstoffe spielen Sekundärrohstoffe eine geringe Rolle, da die meisten fossilen Rohstoffe verbrannt und somit nicht im Kreislauf geführt werden.

Ergebnisse der Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch für Metalle können nicht mit den Ergebnissen für fossile Rohstoffe zusammengefasst werden, da sie sowohl unterschiedliche Berechnungsgrundlagen haben als auch verschiedene Aussagen zulassen.

Um zusätzlich zur geologischen auch die anthropogene Verfügbarkeit, also die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen, bewerten zu können, wird in der ESSENZ-Methode der Wirkungsindikator Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential (AADP) [15], [16] verwendet. Zur Berechnung des AADP-Indikators für ein Metall  $i$  wird die Extraktionsrate des Metalls seinen Ressourcen und anthropogene Vorkommen gegenübergestellt und auf die Referenzsubstanz Antimon (Sb) normiert (siehe Gl. 4.3):

$$AADP_{i,\text{Ressourcen}} = \frac{\text{Extraktionsrate}_i}{(\text{Ressourcen}_i + \text{anthropogene Vorkommen}_i)^2} \times \frac{(\text{Ressourcen}_{\text{Sb}} + \text{anthropogene Vorkommen}_{\text{Sb}})^2}{\text{Extraktionsrate}_{\text{Sb}}}. \quad \text{Gl. 4.3}$$

Für die Berechnung des AADP-Indikators wird im Gegensatz zum  $ADP_{\text{elementar}}$  das Vorkommen der Ressourcen anstelle der ultimativen Reserven betrachtet. Daher können die Ergebnisse nicht direkt miteinander verglichen werden. Weitere Hinweise zu den Indikatoren der Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch finden sich auch in den entsprechenden Veröffentlichungen [11], [14], [15]. Für fossile Rohstoffe liegen keine AADP-Werte vor, es kann jedoch angenommen werden, dass die sich in der Anthroposphäre befindenden Sekundärrohstoffe (dazu zählen z. B. Kunststoffe) verhältnismäßig gering sind, da der größte Anteil von fossilen Rohstoffen für die Herstellung von Energie und Wärme verbrannt wird. Kunststoffe können jedoch noch recycelt werden oder in Abfallverbrennungsanlagen Verwendung finden, sodass auch bei fossilen Rohstoffen ein anthropogenes Lager vorzufinden ist.

*Da es für den AADP-Indikator bisher nur wenige Charakterisierungsfaktoren gibt, sollte für die Bewertung von Metallen neben dem AADP-Indikator auch der ADP-Indikator verwendet werden, um alle sich im Produktsystem befindenden Metalle und deren physische Verfügbarkeit zu bewerten.*

*Bei der Bewertung der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ handelt es sich um eine potenzielle Aufzehrung von Ressourcen – nicht um die tatsächliche Aufzehrung. Sie ist potenziell, da hinter dem Charakterisierungsfaktor ein Model steht, welches zwar versucht, die Realität bestmöglich abzubilden, diese jedoch nicht perfekte wiedergeben kann (zeitliche und räumliche Informationen werden beispielsweise nicht abgebildet).*

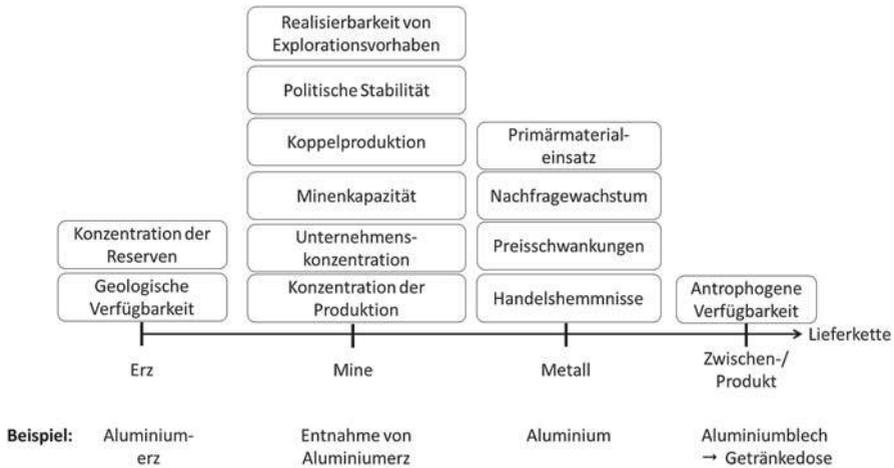
### **4.1.2 Methodik zur Bewertung der sozio-ökonomische Verfügbarkeit**

Neben der physischen Verfügbarkeit gilt es, zusätzlich die sozio-ökonomische Verfügbarkeit als weiteren limitierenden Faktor im Rahmen der Ressourceneffizienzbewertung zu berücksichtigen. Ziel ist es, mögliche Störungen entlang der Versorgungskette zu identifizieren und zu bewerten, die zu einer künstlichen Verknappung von Ressourcen bzw. einer mangelnden Bereitstellung führen können. Mögliche Störfaktoren sind in diesem Zusammenhang z. B. strukturelle Gegebenheiten des Marktes und/oder vorherrschende Gesellschaftsstrukturen (z. B. politisch instabile Regierungsformen).

Die in der ESSENZ-Methode betrachteten Sozio-ökonomischen Kategorien haben mittelfristige Auswirkungen auf die Verfügbarkeit. Langfristige Effekte, wie die geologische Verfügbarkeit von Ressourcen, werden bei der physischen Verfügbarkeit berücksichtigt. Kurzfristige Auswirkungen, wie Spekulationen auf dem Aktienmarkt, werden in der Methode nicht berücksichtigt, da sie schwer vorhersehbar und quantifizierbar sind.

*Zur Ermittlung der Indikatoren werden keine Zukunftsprognosen, sondern Daten aus den letzten fünf Jahren verwendet. Dabei wird die Annahme getroffen, dass das Verhalten von Märkten und Gesellschaften auch zukünftig nach dem gleichen Muster der letzten Jahre abläuft. Somit können Gesichtspunkte, die von zukünftigen Parametern beeinflusst sind, wie „technischer Fortschritt“, nicht miteinbezogen werden.*

Abb. 4.3 stellt dar, welchen Bereich der Lieferkette die in der ESSENZ-Methode betrachteten Kategorien für die Teildimensionen „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ abbilden. Darüber hinaus können weitere Kategorien für die verschiedenen Abschnitte der Lieferkette von Bedeutung sein – die hier diskutierten Kategorien sind die in der ESSENZ-Methode quantifizierten. Die Lieferkette umfasst die vier Abschnitte Erz, Mine, Metall und Zwischenprodukt bzw. Produkt. Für das Beispiel Aluminium gilt Folgendes: Aluminiumerz im Boden wird über die Mine entnommen und in weiteren Aufbereitungsschritten zum Werkstoff Aluminium umgewandelt. Dieser kann beispielsweise zum Zwischenprodukt Aluminiumblech weiterverarbeitet werden, um als Getränkedose (Produkt) zu dienen. In allen Abschnitten der Lieferkette besteht die Möglichkeit, dass die Verfügbarkeit der verwendeten Materialien und erzeugten Zwischenprodukte beeinflusst wird. Für das sich im Boden



**Abb. 4.3** Übersicht über die in der ESSENZ-Methode betrachteten Kategorien und ihre Anordnung in der Lieferkette

befindende Erz sind die geologische Verfügbarkeit sowie die Konzentration der Reserven einschränkende Faktoren. Bei der Entnahme von Erzen in der Mine sind Einschränkungen durch die geografische Konzentration der Förderstätten, die Unternehmenskonzentration, die Minenkapazität, die Koppelproduktion, die politische Stabilität des Erz fördernden Landes und die Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben möglich. Bei der Aufbereitung zum Metall können Handelshemmnisse, Preisschwankungen, Nachfragewachstum und Primär Materialeinsatz zur Verfügbarkeitseinschränkung führen. Für die Herstellung der Zwischen- bzw. Endprodukte ist die anthropogene Verfügbarkeit von Bedeutung. Obgleich verschiedene Abschnitte der Lieferkette betrachtet werden, beziehen sich die ermittelten Charakterisierungsfaktoren auf die Massen der eingesetzten Materialien auf elementarer Ebene, da die Bewertung anhand des Mengengerüsts (z. B. 0,18 kg Aluminium und 0,38 kg Silber) und nicht anhand der Rohmaterialien (z. B. 0,2 kg Bauxit und 0,4 kg Silbererz) erfolgt.

*Zu den hier aufgelisteten Kategorien, für die in Abschn. 9.1 Charakterisierungsfaktoren zur sofortigen Anwendung zur Verfügung stehen, können vom Anwender auch weitere Kategorien, die für die untersuchte Produktkategorie von Bedeutung sein können, ergänzt werden. Bei Ergänzung um weitere Kategorien, z. B. der Unternehmenskonzentration von Zwischenprodukten, werden diese als eigene Kategorien verstanden und entsprechend ausgewertet.*

Neben Metallen und fossilen Rohstoffen können die hier aufgelisteten Kategorien auch für andere Materialien z. B. Phosphor relevant sein. Die Berechnung bestehender Kategorien für weitere Materialien kann mithilfe der im vorliegenden Leitfadens erläuterten Berechnungsschritte sowie einem zur Verfügung gestellten Tabellenkalkulation-Tool vorgenommen werden.

*Die zur Verfügung gestellten Charakterisierungsfaktoren für Metalle gelten nur für Primärrohstoffe. Für die sozio-ökonomische Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen*

*müssen separate Charakterisierungsfaktoren ermittelt werden, da Sekundär- und Primärrohstoffe auf unterschiedlichen Märkten gehandelt werden und somit auch unterschiedlichen Einschränkungen unterliegen. Da Faktoren für Sekundärrohstoffe nicht zur Verfügung stehen, nutzt der Anwender die Faktoren der Primärrohstoffe. So kommt es zu keiner Vernachlässigung des potenziellen Risikos der eingeschränkten Verfügbarkeit. Jedoch kann es zu Über- und Unterschätzung von Kategorien kommen. Die Bedeutung von sekundären fossilen Rohstoffen z. B. in Form von Kunststoff wird gering gesehen.*

*Es handelt sich bei den ermittelten Ergebnissen um potenzielle Risiken der eingeschränkten Verfügbarkeit, da hinter dem Charakterisierungsfaktor ein Model steht, welches zwar versucht, die Realität bestmöglich abzubilden, diese jedoch nicht perfekte wiedergeben kann (zeitliche und räumliche Informationen werden beispielsweise nicht abgebildet).*

Des Weiteren ist unter Risiko hier nicht wie sonst üblich das Produkt aus Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit zu verstehen, sondern vielmehr „die aus der Unvorhersehbarkeit der Zukunft resultierende Möglichkeit, geplante Ziele zu verfehlen“ [17]. Das Ziel wäre hier eine uneingeschränkte Verfügbarkeit von Metallen und fossilen Rohstoffen. Aufgrund der für die Metalle oder fossilen Rohstoffe in den Dimensionen abgebildeten Einschränkungen kann dieses Ziel verfehlt werden. Die unvorhersehbare Zukunft (Schadensausmaß) wird über die Bewertungsmethodik abgebildet. Um der klassischen Definition des Risikos gerecht zu werden, müsste zusätzlich zu den ermittelten Ergebnissen, die das Schadensausmaß repräsentieren, die Wahrscheinlichkeit des Eintritts bestimmt werden. In der ESSENZ-Methode wird die Eintrittswahrscheinlichkeit als Schritt innerhalb der Interpretation verstanden, bei dem das Unternehmen bewertet, welches potenzielle Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit für sie tatsächlich relevant ist und welches nicht. Eine weitere Möglichkeit für die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit stellt die Vulnerabilitätsbestimmung dar, die in der Methoden von Graedel et al. [18] und vom VDI [19] erläutert wird.

In den folgenden Kapiteln wird die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren und entsprechenden Wirkungsindikatoren erläutert.

### **Allgemeines Vorgehen der Berechnung der Charakterisierungsfaktoren**

Die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren erfolgt in Anlehnung an die Methode der ökologischen Knappheit [20], [21] die in Gl. 4.4 dargestellt ist:

$$\text{Ökofaktor} = \frac{1 \text{ UBP}}{\text{Normierungsmenge}} \times \left( \frac{\text{Istzustand}}{\text{Toleranzmenge}} \right)^2 \quad \text{Gl. 4.4}$$

Die Methode der ökologischen Knappheit ist eine Methode zu Bewertung von Umweltauswirkungen. Die Sachbilanzdaten werden bei dieser Methode in der Einheit Umweltbelastungspunkte (UBP) überführt. Die Gewichtung erfolgt nach dem Distance-to-Target-Prinzip, bei dem der Istzustand, z. B. die emittierte Menge einer

umweltschädigenden Substanz, mit der Toleranzmenge, z. B. einem festgelegten politischen Grenzwert, gegenübergestellt wird. Des Weiteren findet eine Normierung mit der gesamten Belastung innerhalb einer Region statt.

In der ESSENZ-Methode wird dieses Prinzip angewendet, um Charakterisierungsfaktoren für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ zu ermitteln (siehe Gl. 4.5). Die Quantifizierung der jeweiligen Kategorien erfolgt über entsprechende Wirkungsindikatoren  $j$  (Wirkungsindikatorbetrag), deren Berechnung für die betrachteten Metalle und fossilen Rohstoffe im darauffolgenden Kapitel umfassend erläutert wird. Jedem Wirkungsindikatorbetrag wird ein für jede Kategorie spezifischer Grenzwert gegenübergestellt und das Ergebnis anschließend quadriert (Distance-to-Target-Wert – DtT-Wert), um eine überproportionale Gewichtung starker Grenzwertüberschreitungen zu erreichen. Die Grenzwerteinführung soll dem Anwender eine Unterstützung in der Interpretation der Ergebnisse bieten. DtT-Werte größer als 1 bedeuten, dass ein potenzielles Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit vorliegt. Je größer der DtT-Wert ist, desto größer ist auch das potenzielle Risiko. DtT-Werte größer als 1 treten immer dann auf, wenn der Wirkungsindikatorbetrag größer ist als der Grenzwert. Wenn der DtT-Wert hingegen kleiner 1 ist, bedeutet das, dass der Wirkungsindikatorbetrag den Grenzwert nicht erreicht und somit auch kein potenzielles Risiko besteht. Werte kleiner 1 werden daher auf 0 gesetzt. Die in der ESSENZ-Methode verwendeten Grenzwerte werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Sie können vom Nutzer individuell angepasst werden, wenn sie als nicht adäquat empfunden werden. Dies bedingt dann allerdings auch eine Neuberechnung der in Abschn. 9.1 zur Verfügung gestellten Charakterisierungsfaktoren.

$$nDtT - Wert_{K,i} = \frac{1}{\text{globale Produktion}_i} \times \left( \frac{\text{Wirkungsindikatorbetrag}_{i,j}}{\text{Grenzwert}_j} \right)^2 \quad \text{Gl. 4.5}$$

In der Methode der ökologischen Knappheit erfolgt die Anpassung der jeweiligen Knappheitssituation (DtT-Wert) an die aktuelle Situation einer Region (z. B. Menge an Emissionen in der Schweiz) über die Normierung.

*Regionen für die Förderung von Metallen und fossilen Rohstoffen werden dabei nicht einzelnen betrachtet, sondern es werden globale Daten verwendet.*

Ziel der ESSENZ-Methode ist es, das potenzielle Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit global zu ermitteln, sodass jedes Unternehmen weltweit die Methode anwenden kann. Sie ist nicht auf ein Gebiet z. B. Deutschland oder Europa begrenzt. Die globale Produktion des Metalls oder fossilen Rohstoffs wird daher zur Normierung verwendet (normierter Distance-to-Target-Wert – nDtT-Wert). Daten für die globale Produktion der Metalle und fossile Rohstoffe können über die Veröffentlichungen der United States Geological Service [22] (USGS) oder British Geological Service [23] (BGS) gefunden werden.

Abschließend wird auf den Wertebereich von 0 bis  $1,7 \cdot 10^{13}$  linear skaliert (siehe Gl. 4.6). Dabei ist  $1,7 \cdot 10^{13}$  kg die größte jährliche globale Produktionsmenge des im ESSENZ-Projekt betrachteten Materialportfolios. Es kann so ausgeschlossen werden, dass die Ergebnisse für das betrachtete Produktsystem zu stark von großen

Mengen des Mengengerüsts beeinflusst werden. Des Weiteren weisen alle Kategorien eine ähnliche Größenordnung auf, was einen direkten Vergleich sowie die Interpretation der Ergebnisse erleichtert:

$$\text{Charakterisierungsfaktoren}_{\text{final}_{K,i}} = nDtT_{\text{skaliert},K,i} = \begin{cases} nDtT_{K,\text{max}} \gg 1,7 \times 10^{13} \\ nDtT_{K,i} \gg \frac{1,7 \cdot 10^{13}}{nDtT_{\text{max},K}} \times nDtT_{K,i} \end{cases} \text{ Gl. 4.6}$$

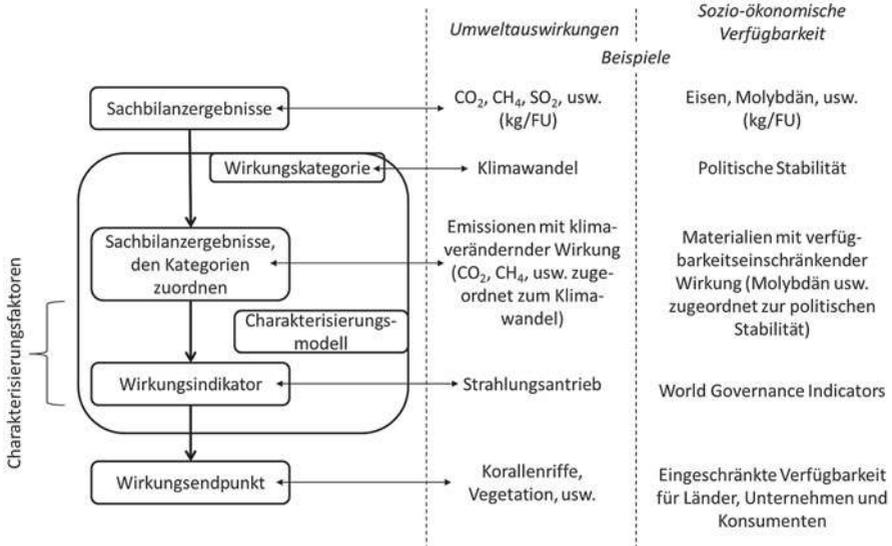
Die Berechnung der skalierten Werte ( $nDtT_{\text{skaliert}}$ ), die die endgültigen Charakterisierungsfaktoren darstellen, basiert auf den zuvor ermittelten normierten  $DtT$ -Werten aus Gl. 4.5. Die Skalierung erfolgt linear, daher wird der maximale  $nDtT$ -Wert ( $nDtT_{\text{max}}$ ) auf  $1,7 \cdot 10^{13}$  gesetzt und die anderen  $nDtT$ -Werte über eine lineare Funktion ermittelt (siehe Gl. 4.6 – unterste Zeile). Der Quotient aus  $1,7 \cdot 10^{13}$  und dem maximalen  $nDtT$ -Wert ( $nDtT_{K,\text{max}}$ ) der Kategorie wird mit dem  $nDtT$ -Wert ( $nDtT_{K,i}$ ) multipliziert.

*Da die ermittelten Charakterisierungsfaktoren eine Normalisierung beinhalten, enthält ein Vergleich der Kategorien zueinander auch automatisch immer einer Gewichtung (in der ESSENZ-Methode gilt die Gleichgewichtung als Standard). Ohne eine Gewichtung kann keine Aussage über die Bedeutung der Kategorien untereinander getroffen werden. Jeder Anwender kann und sollte diese Gleichgewichtung seinen individuellen Bedürfnissen anpassen.*

Die berechneten Charakterisierungsfaktoren stehen für alle Kategorien in Abschn. 9.1 des Leitfadens für ein begrenztes Materialportfolio von 40 Rohstoffen (36 Metalle und 4 fossile Rohstoffe) zur Verfügung. Bei der Betrachtung zusätzlicher Materialien durch den Anwender müssen die zuvor ausgeführten Berechnungsschritte angewendet werden, um Charakterisierungsfaktoren für die neuen Materialien zu berechnen. Dazu stehen die entsprechenden Werte (Wirkungsindikatorbeiträge, Distance-to-Target-Werte sowie normalisierte Distance-to-Target-Werte) in Abschn. 9.6 zur Verfügung. Sollten die neu berechneten Rohstoffe eine größere Produktionsmenge als  $1,7 \cdot 10^{13}$  aufweisen, muss eine neue Berechnung aller Charakterisierungsfaktoren erfolgen. Die normalisierten Distance-to-Target-Werte müssen nach Gl. 4.6 neu skaliert werden. Anstelle von  $1,7 \cdot 10^{13}$  wird dann mit der neuen Produktionsmenge gerechnet.<sup>5</sup>

Zur besseren Anschaulichkeit ist in Abb. 4.4 das nach ISO 14044 [10] bekannte Konzept der Wirkungsindikatoren für das Beispiel der Wirkungskategorie Klimawandel dargestellt und um die Kategorie der politischen Stabilität für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ erweitert. Die Sachbilanzergebnisse des Mengengerüsts sind die im Produkt verwendeten Metalle und fossile Rohstoffe.

<sup>5</sup> Um die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren für weitere Metalle und fossile Rohstoffe zu erleichtern, steht ein Tabellenkalkulation-Tool zur Verfügung: <http://www.see.tu-berlin.de/menue/forschung/ergebnisse/>



**Abb. 4.4** Konzept der Wirkungsindikatoren für die Kategorien Klimawandel und Politische Stabilität nach ISO 14044

Diese werden den Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomischen Verfügbarkeit“ zugewiesen (Klassifizierung) [12]. Die erhobenen Elementarflüsse werden nicht allen Kategorien zugeordnet (z. B. hat SO<sub>2</sub> keinen Einfluss auf die Kategorie Klimawandel). Dies gilt auch für die im Mengengerüst auftretenden Metalle und fossilen Rohstoffe. Nicht alle betrachteten Metalle und fossilen Rohstoffe haben für die 11 Kategorien ein potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit. Ebenso wie beispielsweise SO<sub>2</sub> keinen Einfluss auf die Kategorie Klimawandel hat, besteht für Chrom kein potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit in der Kategorie Nachfragerwachstum.

*Werden neue Kategorien z. B. Unternehmenskonzentrationen von Zwischenprodukten eingeführt, müssen die Wirkungsindikatorbeträge erst berechnet werden, um zu ermitteln, ob für die entsprechenden Metalle und fossilen Rohstoffe für diese Kategorie ein potenzielles Risiko vorliegt.*

Für die Kategorie politische Stabilität dienen die World Governance Indicators als Wirkungsindikatoren, da sie die Stabilität eines Landes, in dem Rohstoffe abgebaut werden, quantifizieren. Beim Klimawandel ist der Strahlungsantrieb der Wirkungsindikator, der verwendet wird, um die Auswirkungen der klimaveränderten Emissionen zu quantifizieren. Der Wirkungsendpunkt ist der Bestandteil der Umwelt, der menschlichen Gesundheit oder der Ressourcen, bis zu dem die Ursache-Wirkungs-Kette betrachtet wird. Oft ist der Wirkungsendpunkt auch der Grund, weshalb Besorgnis in der Gesellschaft besteht (z. B. Vernichtung von Ernten durch Dürre) [10].

Der Klimawandel hat unter anderem Auswirkungen auf die Endpunkte Korallenriffe und Vegetation. Für die politische Stabilität ist der Wirkungsendpunkt die ein-

geschränkte Verfügbarkeit der Metalle und fossilen Rohstoffe für verschiedene Stakeholdergruppen wie Länder, Unternehmen und Konsumenten.

### **Beschreibung der Kategorien und der zugrunde liegenden Charakterisierungsmodelle**

Im Folgenden werden die 11 Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ erläutert und das Vorgehen bei der Berechnung der jeweiligen Wirkungsindikatoren erklärt. Die Kategorien bilden die über die Lieferkette identifizierten verfügbareitseinschränkenden Gesichtspunkte ab (Abb. 4.3). Sie sind unter anderem basierend auf den folgenden Arbeiten identifiziert: Rosenau-Tornow et al. [24], der Europäischen Kommission [25], dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung [36], der Deutschen Rohstoffagentur [26], Thomas Gradel et al. [27] und dem Verein Deutscher Ingenieure [19]. Die meisten dieser Arbeitsgruppen beschäftigen sich mit dem Thema Verfügbarkeit von Ressourcen, allerdings nicht im Kontext eines Produktsystems mittels Lebenszyklusansatz, welcher in der ESSENZ-Methode Anwendung findet.

Abhängigkeiten zwischen den Kategorien können nicht ausgeschlossen werden (z. B. zwischen der politischen Stabilität eines Landes und den vorliegenden Handelshemmnissen), jedoch liegen keine eindeutigen Korrelationen zwischen den Kategorien vor (d. h. nicht jedes politisch stabiles Land hat automatisch auch mehr oder weniger Handelshemmnisse).

Die zur Berechnung der Charakterisierungsfaktoren verwendeten Daten zur globalen Produktion von Metallen und fossilen Rohstoffen werden aus der Datenbanken des United States Geological Survey<sup>6</sup> [22] und des British Geological Survey<sup>7</sup> (BGS) [23] entnommen. Im ESSENZ-Projekt war keine quantifizierende Datenqualitätsbewertung möglich, jedoch gibt es Veröffentlichungen, die solch eine Analyse vorgenommen haben [28], [29]. *Sie zeigen, dass USGS und BGS die bestverfügbaren Quellen für globale Produktionsdaten sind, allerdings nicht immer vollständige Daten bereitstellen.* Auf weitere Daten und Indikatoren, die bei der Berechnung der Indikatoren verwendet werden, wird in den entsprechenden Unterkapiteln hingewiesen.

**Konzentrationen** Unter Konzentration wird im Allgemeinen die Anhäufung von Merkmalen (z. B. Abbau von Ressourcen) auf eine begrenzte Anzahl von Merkmalsträgern (z. B. Ländern) verstanden [30]. Hohe Konzentrationen einer Aktivität, z. B. des Abbaus von Ressourcen in wenigen Ländern bergen ein höheres Risiko im Hinblick die Verfügbarkeit der jeweiligen Ressourcen.

Der Einfluss hoher Konzentrationen ist für die gesamte Wertschöpfungskette einer Ressource relevant. Zu Beginn der Lieferkette ist die Konzentration der Reserve (Konz\_R) bedeutsam, gefolgt von der Konzentration der Produktion und dem Abbau

<sup>6</sup> <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>

<sup>7</sup> <http://www.bgs.ac.uk/mineralsUK/statistics/worldStatistics.html>

der Ressource (Konz\_P). Ist das Vorkommen oder der Abbau einer Ressource auf nur wenige Länder beschränkt (was zu einer hohen Konzentration führt), kann die Ressource aus Sicht eines Unternehmens nur aus wenigen Ländern bezogen werden. Sollte eines dieser Länder den Abbau einstellen, gäbe es entsprechend nur wenige Ländern, die die Ressource weiterhin abbauen würden. Das potenzielle Risiko einer Verfügbarkeitseinschränkung ist somit höher, als würden viele Länder über Ressourcen verfügen und diese abbauen. Nach dem Abbau wird die Ressource von Unternehmen verkauft, aufbereitet und ggf. weiterverkauft (Konz\_U). Hier ist erneut das potenzielle Risiko höher, wenn wenige Unternehmen das Metall oder den fossilen Rohstoff verkaufen. Die Konzentration dieser Unternehmen ist über die gesamte Lieferkette bis hin zu dem Unternehmen von Wichtigkeit, für das die Ressourceneffizienzbewertung durchgeführt wird.

Als Wirkungsindikator für die Kategorie „Konzentrationen“ dient der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) [31], welche die Summe der quadrierten Anteile darstellt (siehe Gl. 4.7 bis Gl. 4.9):

$$\text{HHI\_R}_i = \sum (\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an den globalen Reserven}_i)^2 \quad \text{Gl. 4.7}$$

$$\text{HHI\_P}_i = \sum (\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an der globalen Produktion}_i)^2 \quad \text{Gl. 4.8}$$

$$\text{HHI\_U}_i = \sum (\text{Anteil eines Unternehmens}_u \text{ in \% an der globalen Produktion}_i)^2 \quad \text{Gl. 4.9}$$

Der prozentuale Anteil eines Landes x oder Unternehmens u an der globalen Produktion oder an den globalen Reserven eines Metalls oder fossilen Rohstoffes i wird quadriert und anschließend mit den anderen Anteilen zu einem Wert aufsummiert [31]. Für die Konzentration der Reserven und der Produktion kann für die Kalkulation auf USGS-Daten [22] und BGS-Daten [23] zurückgegriffen werden. Die SNL-Datenbank [32] stellt Daten für Unternehmen bereit.

Der Wirkungsindikatorbetrag nimmt Werte von 0 bis 1 an. Je näher der berechnete Wert an die 1 herankommt, desto größer ist die Konzentration und somit auch das potenzielle Risiko, dass es zu einer Einschränkung der Verfügbarkeit kommt. Ob tatsächlich ein potenzielles Risiko vorliegt, wird ermittelt, indem der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls oder fossilen Rohstoffes dem Grenzwert der Kategorie gegenübergestellt wird (siehe Gl. 4.5). Die Grenzwerte der einzelnen Kategorien finden sich in 4.1.2.3. In der ESSENZ-Methode werden Charakterisierungsfaktoren für die Konzentration der Reserven und Produktion auf Länderebene sowie der produzierenden Unternehmen (Minenbetreiber) betrachtet und für das Materialportfolio zur Verfügung gestellt.

**Minenkapazität** Die Kategorie **Minenkapazität (MK)** gibt Auskunft darüber, wie lange unter den derzeitigen Bedingungen eine Reserve noch abgebaut werden kann,

bevor die bisher erschlossenen Minen und Förderstätten erschöpft sind. Ihr Wert sagt allerdings nichts über den absoluten Verfügbarkeitshorizont der Ressource (als ultimative Reserve) aus. Zur Quantifizierung wird der Wirkungsindikator statische Reichweite verwendet. Ein Wirkungsindikatorbetrag von 20 Jahren bedeutet also nicht, dass das betrachtete Metall oder der fossile Rohstoff in 20 Jahren nicht mehr vorhanden ist. Vielmehr geht es darum, mögliche Zeiträume sowie das daraus entstehende potenzielle Risiko der Einschränkung der Versorgung mit Rohstoffen abzuschätzen. Ist der Zeitraum bis zum vollständigen Abbau der bisher erschlossenen Minen gering, könnte dies in Zukunft zu Versorgungsengpässen führen, da neue Minen erschlossen werden müssen. Dies erfordert zum einen Investitionen, zum anderen dauert es aber auch eine gewisse Zeit (je nach Land ca. 8 bis 15 Jahre), bis eine neue Mine erschlossen wird. Um die statische Reichweite (SR) zu ermitteln, werden die Reserven des Metalls durch die entsprechende jährliche Produktion dividiert (siehe Gl. 4.10):

$$SR_i = \frac{\text{Reserven}_{i_i}}{\text{Jährliche Produktion}_i}. \quad \text{Gl. 4.10}$$

Daten für die jährliche Produktion und die Reserven von Metallen und fossilen Rohstoffen können aus USGS-Daten [22] und BGS-Daten [23] entnommen werden. Der Wirkungsindikatorbetrag der statischen Reichweite nimmt Werte von 0 bis (theoretisch) unendlich an. Je kleiner die Werte der statischen Reichweite sind, desto eher besteht ein potenzielles Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit. Das Risiko wird ermittelt, indem der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls oder fossilen Rohstoffs dem Grenzwert der Kategorie gegenübergestellt wird. Bei der Kategorie Minenkapazität kommt es zu einer Besonderheit: Würde die ermittelte statische Reichweite z. B. von 20 Jahren durch den Grenzwert von 50 Jahren dividiert werden, würde der berechnete Wert kleiner 1 sein, obwohl eine statische Reichweite von 20 Jahren zu einem potenziellen Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit führen kann. Im Gegensatz zu den anderen Kategorien ist bei der Minenkapazität ein großer Wert als positiv zu interpretieren und ein kleiner Wert entsprechend als negativ. Daher wird zur Ermittlung des DtT-Wertes (siehe Gl. 4.5) sowohl für den ermittelten Wirkungsindikatorbetrag als auch für den Grenzwert der Kehrwert gebildet. So kann gewährleistet werden, dass eine große Zahl negativ zu interpretieren ist, wohingegen eine kleine Zahl ein geringes potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit anzeigt.

**Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben** Die Kategorie Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX) beschreibt, inwieweit der Ressourcenabbau durch gesetzliche, gesellschaftliche (z. B. Bürgerbewegungen, Gewerkschaften) oder anderweitige Rahmenbedingungen (z. B. Infrastruktur: Energie- und Wasserversorgung) eingeschränkt oder gefördert wird. Schränken die Gesetze eines Landes die Erschließung von Minen ein, kann die Eröffnung neuer Minen viel Zeit in Anspruch nehmen oder gar nicht stattfinden. Eine mögliche Folge ist, dass Rohstoffe nicht mehr in den benötigten Mengen gefördert werden können und Versorgungsengpässen auftreten. Bürgerbewegungen haben ebenfalls die Möglichkeit, die Er-

schließung von Minen zu beeinflussen, indem sie die Eröffnung verhindern und somit herauszögern.

Beim Policy Potential Index<sup>8</sup> (PPI) [33], der als Wirkungsindikator zur Messung der Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben verwendet wird, schneiden Länder besonders gut ab, deren Regierungen autoritär sind und beispielsweise Bürgerbewegungen unterdrücken, um Verzögerungen bei Mineneröffnungen durch Proteste zu verhindern. Im Gegensatz dazu ist bei Regierungsformen wie der Demokratie, wo Bürgerbewegungen zugelassen sind, die Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben somit möglicherweise höheren Widerständen ausgesetzt. Der PPI-Indikator steht somit nachhaltigen Regierungsformen oftmals entgegen. Um eine einseitige, auf Explorationsvorhaben beschränkte Sichtweise zu verhindern, wird im Standardset der ESSENZ-Methode daher die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ ergänzt (Abschn. 4.2).

Der PPI-Indikator wird vom Fraser Institute ermittelt, indem ca. 4000 Unternehmen nach ihren Erfahrungen bezüglich der Erschließung von Minen befragt werden. Basierend auf den Antworten wird der PPI-Indikator bestimmt. *Da bei Befragungen Ungenauigkeiten auftreten können (z. B. Verständnis der Fragen) [34] und zudem die Antworten der Unternehmen nicht transparent nachvollziehbar sind, können möglicherweise entsprechenden Unsicherheiten vorliegen.*

Die Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben für ein Metall  $i$  kann mithilfe des  $PPI_x$  bestimmt werden. Der PPI eines Landes  $x$  wird dazu mit dem prozentualen Anteil der Reserven multipliziert und am Ende aufsummiert (siehe Gl. 4.11):

$$PPI_i = \sum(\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an den Reserven}_i \times PPI_x).$$

Gl. 4.11

Daten für die Reserven von Metallen und fossilen Rohstoffen sind in der BGS [23] und USGS-Datenbank [22] zu finden. Der  $PPI_x$  nimmt Werte zwischen 0 und 100 an, allerdings bedeuten große Werte, dass das Land eine gute Realisierbarkeit von Explorationstätigkeiten gewährleisten kann. Ein kleiner Wert steht für schlechte Bedingungen hinsichtlich der Explorationstätigkeiten in dem Land. Da in der ESSENZ-Methode ein großer Wert auch ein großes potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit anzeigen soll, werden die PPI-Werte entsprechend umgedreht. Fehlende  $PPI_x$ -Werte werden über eine Korrelation mit dem  $WGII_x$ -Index ermittelt. Da kein Indikator identifiziert werden konnte, der gut mit dem  $PPI_x$  korreliert, wird der  $WGII_x$  als erste Näherung verwendet. Die Risikobewertung wird durchgeführt, indem der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls oder fossilen Rohstoffs dem Grenzwert der Kategorie REX gegenübergestellt wird (siehe Gl. 4.5).

Da vorhandene gesetzliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen auch für andere Vorhaben wie den Bau von Fabriken zur Produktion von Gütern Bedeutung haben können, ist die Kategorie womöglich auch für Zwischenprodukte innerhalb

<sup>8</sup> <https://www.fraserinstitute.org/uploadedFiles/fraser-ca/Content/research-news/research/publications/mining-survey-2012-2013.pdf>, S.13 ff.

der Lieferkette relevant. In Abschn. 9.1 des Leitfadens sind Charakterisierungsfaktoren für den Abschnitt der Wertschöpfungsstufe Mine zur Verfügung gestellt.

**Handelshemmnisse** Die Kategorie Handelshemmnisse (HH) beschreibt, inwieweit der Austausch von Waren und Dienstleistungen eingeschränkt und damit die Verfügbarkeit von Metallen und fossilen Rohstoffen negativ beeinträchtigt sein kann. Handelshemmnisse liegen immer dann vor, wenn eine Restriktion des Handels durch staatliche Maßnahmen (z. B. Ausfuhrzölle) besteht.

Für die Quantifizierung von Handelshemmnissen verschiedener Rohmaterialien wird der Wirkungsindikator Enabling Trade Index (ETI)<sup>9</sup> [35] verwendet (siehe Gl. 4.12):

$$ETI_i = \sum(\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an der globalen Produktion}_i \times ETI_x) \quad \text{Gl. 4.12}$$

Der  $ETI_i$  eines Metalls wird ermittelt, indem der prozentuale Anteil eines Landes an der globalen Produktion eines Metalls  $i$  (basierend auf BGS-Daten [23] oder USGS-Daten [22]) mit dem entsprechenden ETI des Landes  $x$  multipliziert wird. Anschließend werden die Werte aufsummiert. Der  $ETI_x$  nimmt Werte zwischen 0 und 7 an, allerdings bedeuten große Werte, dass geringe Handelshemmnisse vorliegen. Ein kleiner Wert steht für schlechte Bedingungen hinsichtlich des Exports von Metallen und fossilen Rohstoffen. Da in der ESSENZ-Methode ein großer Wert auch ein großes potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit anzeigen soll, werden die ETI-Werte entsprechend umgedreht. Fehlende  $ETI_x$ -Werte werden über die Korrelationen mit dem  $PPI_x$ -Index ermittelt. Da kein Indikator identifiziert werden konnte, mit dem eine gute Korrelation vorliegt, wird der  $PPI_x$  als erste Näherung verwendet.

Das potenzielle Risiko kann allerdings erst ermittelt werden, wenn der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls oder fossilen Rohstoffs dem Grenzwert der Kategorie HH gegenübersteht (siehe Gl. 4.5) und der Charakterisierungsfaktor ermittelt ist.

*Der ETI ist kein Indikator, der spezifisch für Metalle oder fossile Rohstoffe Handelshemmnisse ausweist, sondern das Exportverhalten eines Landes im Allgemeinen widerspiegelt. Der ETI bewertet vorliegende Handelseinschränkungen von Ländern auf Exporte, indem er die vier Bereiche „Zugang zu Märkten“, „Grenzverwaltung“, „Transport und Kommunikationsinfrastruktur“ sowie das „Geschäftsumfeld“ betrachtet. Diese Einschränkung muss bei der Interpretation beachtet werden.*

Die Kategorie ist sowohl für Rohstoffe als auch für Zwischenprodukte über die gesamte Lieferkette bedeutsam. In der ESSENZ-Methode werden Charakterisierungsmethoden für Handelshemmnisse von Rohstoffen für die betrachteten Metalle und fossilen Rohstoffe zur Verfügung gestellt.

**Koppelproduktion** Der Grund für die Betreibung einer Mine sind die sogenannten Hauptelemente. Neben diesen werden oftmals auch noch weitere Rohstoffe, die sogenannten Nebenprodukte, gewonnen. In diesem Fall spricht man von einer Koppel-

9 [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_GlobalEnablingTrade\\_Report\\_2014.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalEnablingTrade_Report_2014.pdf), S.10 ff.

**Tab. 4.1** Qualitative Kriterien aus IZT-Studie [36] und deren quantifizierten Wirkungsindikatorbeträge für die ESSENZ-Methode

Qualitatives Kriterium	Quantifizierung in ESSENZ-Methode
Nur Hauptproduktion	0
Überwiegend Hauptproduktion	0,33
Überwiegend Nebenprodukt	0,67
Nur Nebenprodukt	1

produktion. Kommt es zu einem eingeschränkten Abbau der Hauptprodukte, hat dies einen unmittelbaren Einfluss auf die Verfügbarkeit der Nebenprodukte.

Für die Quantifizierung der Kategorie Koppelproduktion (Kop) wird der Wirkungsindikator „Anteil des durch Koppelproduktion gewonnen Materials“ ermittelt. In der IZT-Studie *Kritische Rohstoffe für Deutschland* [36] gibt es Angaben zu Haupt- und Nebenprodukten.<sup>10</sup> Dabei werden die Metalle in die Kategorien „nur Hauptproduktion“, „überwiegend Hauptproduktion“, „überwiegend Nebenprodukt“ und „nur Nebenprodukt“ eingeteilt. Diese qualitative Einteilung wird für die ESSENZ-Methode, wie in Tab. 4.1 dargestellt, quantifiziert. Da für Metalle, die nur als Hauptprodukte vorkommen, kein potenzielles Risiko hinsichtlich ihrer Versorgungssicherheit besteht, wird der Wirkungsindikatorbetrag auf 0 gesetzt. Für Metalle, die nur als Nebenprodukt gewonnen werden, ist hingegen das potenzielle Risiko einer Verfügbarkeitseinschränkung am höchsten, weshalb diesem qualitativen Kriterium der höchste quantitative Wert zugeordnet ist. Für Metalle, die überwiegend als Hauptprodukte bzw. überwiegend als Nebenprodukte abgebaut werden, befindet sich der Wirkungsindikatorbetrag entsprechend zwischen 0 und 1.

Die ermittelten Werte der Metalle liegen zwischen 0 und 1. Je näher der Wert an 1 liegt, desto eher besteht ein potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit. Das potenzielle Risiko kann allerdings erst ermittelt werden, indem der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls dem Grenzwert der Kategorie Kop gegenübersteht (siehe Gl. 4.5) und der Charakterisierungsfaktor ermittelt ist. Da der Abbau fossiler Rohstoffe ohne Koppelprodukte einhergeht, wird das potenzielle Risiko in diesem Fall auf 0 gesetzt.

Koppelproduktion kann nicht nur in der Mine stattfinden, sondern auch in anderen Phasen der Wertschöpfung vorkommen. In Abschn. 9.1 sind die Charakterisierungsfaktoren der betrachteten Metalle und fossilen Rohstoffe zur Verfügung gestellt.

**Politische Stabilität** Die Kategorie politische Stabilität (PS) beschreibt, wie stabil die Strukturen des politischen Systems sind und bildet somit auch die Beständigkeit einer Gesellschaft ab [37]. In einem politisch stabilen System sind die politischen und rechtlichen Verfahren verlässlich sowie staatliche Entscheidungen vorhersehbar oder zumindest nachvollziehbar [38]. Neben dem Vorhandensein von geeig-

<sup>10</sup> <https://www.kfw.de/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Sonderpublikationen/Kritische-Rohstoffe-Anhang.pdf>, S. 7-59

neten Rechtsnormen muss auch deren Umsetzung kontrolliert werden, um auszuschließen, dass Korruptionsprozesse stattfinden. Die wirtschaftliche Stabilität eines Staates hängt von der politischen Stabilität ab, da Investitionen z. B. in die Erschließung von Minen höchstwahrscheinlich nur dann stattfinden, wenn sicher ist, dass das Land materielles sowie geistiges privates Eigentum schützt [39]. Instabile Situationen entstehen z. B. durch Revolutionen, Unruhen, Terrorismus, Korruption, Wahlbetrug oder auch schwere Wirtschaftskrisen. Bei der Bewertung von geostrategischen Risiken der Rohstoffversorgung kann daher die politische Stabilität von rohstoffproduzierenden Ländern bedeutsam für die Verfügbarkeit eines Rohstoffes sein. Instabile Zustände führen somit zu einem höheren potenziellen Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit.

Die Quantifizierung der Kategorie erfolgt mithilfe der von der Weltbank erhobenen und entwickelten sechs Worldwide Governance Indicators [37]. Da alle sechs Indikatoren (Mitspracherecht und Verantwortlichkeit, politische Stabilität, Effektivität der Regierung, Regulierungsqualität, Rechtsstaatlichkeit und Korruption) Gesichtspunkte der politischen Stabilität betrachten, wird für den Wirkungsindikator ein gemittelter Wert aller Indikatoren – fortan als WGI-Index (WGII) bezeichnet – verwendet. Da die WGI Indikatoren von  $-2,5$  bis  $+2,5$  reichen, in der ESSENZ-Methode aber keine negativen Werte Verwendung finden, werden die Indikatoren entsprechend auf den Bereich 0 bis 5 umgerechnet. Weiterhin bedeuten große Werte, dass in dem entsprechenden Land eine stabile Politik herrscht, wohingegen ein kleiner Wert für schlechte Bedingungen steht. Da in der ESSENZ-Methode ein großer Wert auch ein großes potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit anzeigen soll, werden die WGII<sub>x</sub>-Werte entsprechend gedreht. *Die World Governance Indicators werden basierend auf einer umfassenden Befragung von Industrie, privaten Haushalten, NGOs etc. erhoben. Trotz des Umfangs der Befragungen können Unsicherheiten nicht gänzlich ausgeschlossen werden* [34].

Der Wirkungsindikatorbetrag für die Metalle und fossilen Rohstoffe wird ermittelt, indem der prozentuale Anteil eines Landes  $x$  an der globalen Produktion eines Metalls oder fossilen Rohstoffes  $i$  (basierend auf BGS-Daten [23]) mit dem entsprechenden WGII<sub>x</sub>-Wert multipliziert wird (siehe Gl. 4.13). Fehlende WGII<sub>x</sub>-Daten für Länder werden über Korrelation mit dem Bruttoinlandsprodukt ermittelt. Anschließend erfolgt die Aufsummierung der einzelnen Anteile zu einem Gesamtwert:

$$WGII_i = \sum(\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an der globalen Produktion}_i \times WGII_x).$$

Gl. 4.13

Die ermittelten WGII<sub>i</sub>-Werte der Metalle liegen zwischen 0 und 5. Je näher der Wert an 5 ist, desto eher besteht ein potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit. Eine Aussage bezüglich des potenziellen Risikos lässt sich erst ableiten, wenn der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls oder fossilen Rohstoffes dem Grenzwert der Kategorie PS gegenübergestellt wird (siehe Gl. 4.5) und der Charakterisierungsfaktor ermittelt ist.

Die politische Stabilität von Ländern kann in jeder Phase der Lieferkette zu Einschränkungen führen. In Abschn. 9.1 des Leitfadens sind Charakterisierungsfaktoren

für Metalle und fossile Rohstoffe bereitgestellt, die die politische Stabilität der abbauenden/fördernden Länder berücksichtigen.

**Preisschwankungen** Unter Preisschwankungen wird die Schwankung der Preise von Rohstoffen und Produkten verstanden. Versorgungsprobleme entstehen vor allem, wenn diese Schwankungen unerwartet sind und nicht vorausgesehen werden können [18]. Für die Kostenkalkulation der Unternehmen ist ein intensives Auf und Ab der Preise eine große Herausforderung, da die Kosten für die Materialbeschaffung schwer abschätzbar sind. Dies kann dazu führen, dass die Unternehmen die benötigten Rohstoffe nicht mehr beziehen können und somit die Verfügbarkeit eingeschränkt ist.

In der ESSENZ-Methode wird die Kategorie Preisschwankungen (PRS) über den Wirkungsindikator „Volatilität“ quantifiziert. Werte für die Volatilität vieler Metalle und fossile Rohstoffe werden von der BGR<sup>11</sup> [40] über den Zeitraum der letzten 5 Jahre bereitgestellt. Zur Berechnung von Volatilitäten für weitere Materialien wird die verwendete Berechnungsformel des BGR bereitgestellt [40], [41] (siehe Gl. 4.14):

$$\text{Volatilität} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \times \sum_{t=1}^{12} \left( \ln \left( \frac{P_{i,t}}{P_{i,t-1}} \right) - R^2 \right)^2} \times \sqrt{12} . \quad \text{Gl. 4.14}$$

In Gl. 4.14 steht  $m$  für die Anzahl der vorhandenen Preisdaten – bei der Betrachtung von 5 Jahren mit monatlichen Werte ergibt sich für  $m = 60$ ;  $t$  steht für die Zeit – bei Monatswerten für die betrachteten Monate pro Jahr;  $P$  ist die monatliche Preisrendite eines Metalls oder fossilen Rohstoffs  $x$ ;  $R$  steht für den Mittelwert der Preisrenditen.

Die Wirkungsindikatorbeträge sind in Prozent angegeben und bewegen sich zwischen 0 und 100. Je höher der Prozentwert ist, desto größer ist die Schwankung. Große Schwankungen lassen auf ein höheres potenzielles Risiko schließen. Das potenzielle Risiko kann allerdings erst ermittelt werden, wenn der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls oder fossilen Rohstoffs dem Grenzwert der Kategorie PRS gegenübergestellt (siehe Gl. 4.5) und der Charakterisierungsfaktor ermittelt ist.

Preisschwankungen können über die gesamte Lieferkette auftreten. In Abschn. 9.1 werden Charakterisierungsfaktoren für Metalle und fossile Rohstoffe hinsichtlich der Preisschwankungen des auf dem Weltmarkt gehandelten Metalls oder fossilen Rohstoffs bereitgestellt.

**Nachfragewachstum** Nachfrage beschreibt den Bedarf an Gütern bzw. Rohstoffen. Wenn dieser Bedarf steigt, wird von Nachfragewachstum gesprochen [42]. Übersteigt die Nachfrage nach einer Ressource deren derzeitige Produktionsmenge um ein Vielfaches, kann es zu einem potenziellen Risiko in der Versorgungssicherheit kommen.

<sup>11</sup> [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Produkte/Volatilitaetsmonitor/vm\\_14\\_01.html?nn=1542132](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/Volatilitaetsmonitor/vm_14_01.html?nn=1542132)

Die Kategorie Nachfragewachstum (NFW) wird in der ESSENZ-Methode über die Bestimmung der Nachfrage quantifiziert, indem das Wachstum der Produktion über die letzten 5 Jahre mithilfe von BGS-Daten [23] betrachtet wird (siehe Gl. 4.15):

$$NF_i = \frac{\sum_1^5 \left\{ \left( \frac{\text{globale Produktion im Jahr } (n+1)_i}{\text{globale Produktion in Jahr } n_i} - 1 \right) \right\}}{5} \quad \text{Gl. 4.15}$$

Zur Berechnung der Nachfrage wird die globale jährliche Produktionsmenge des Metalls der globalen Produktionsmenge des jeweils vergangenen Jahres über einen Zeitraum von 6 Jahren (2008–2013) gegenübergestellt und anschließend der Mittelwert gebildet.

Die Wirkungsindikatorbeträge werden in Prozent angegeben und bewegen sich zwischen –100 und 100. Je höher der Prozentwert ist, desto größer ist die Nachfrage. Das potenzielle Risiko kann allerdings erst ermittelt werden, wenn der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls oder fossilen Rohstoffs dem Grenzwert der Kategorie NFW gegenübergestellt (siehe Gl. 4.5) und der Charakterisierungsfaktor berechnet ist. Wird der Wirkungsindikatorbetrag dem Grenzwert gegenübergestellt und quadriert, werden die negativen Werte mathematisch in positive Werte umgewandelt. Da dies die Ergebnisse verzerren würde, werden negative Nachfragewachstumswerte vor der Gegenüberstellung mit dem Grenzwert auf 0 gesetzt.

Nachfragewachstum ist für die gesamte Lieferkette relevant. In der ESSENZ-Methode werden Charakterisierungsfaktoren für Metalle und fossile Rohstoffe für den Abbau der Rohstoffe bereitgestellt.

**Primärmaterialieinsatz** Bei der Herstellung von Produkten können sowohl Primär- als auch Sekundärmaterialien eingesetzt werden. Unter Primärmaterialien werden Rohstoffe oder Rohmaterialien verstanden, die nach ihrer Förderung noch nicht in anderen Produktsystemen eingesetzt wurden. Sekundärmaterialien hingegen sind recycelte Rohstoffe, die zuvor bereits Teil eines anderen Produktes waren. Je höher der Primärmaterialieinsatz ist, desto weniger Sekundärmaterial wird eingesetzt. Dies kann zum einen bedeuten, dass kein Anreiz besteht, Sekundärmaterialien einzusetzen, zum anderen, dass nicht genügend Sekundärmaterial zur Verfügung steht, um die Nachfrage an Material zu decken. Insgesamt erhöht sich der Druck auf die Verfügbarkeit des Primärmaterials, wenn wenig Sekundärmaterialien zur Verfügung stehen, und es kann zu einem potenziellen Risiko der Versorgungssicherheit kommen. Sekundärrohstoffe werden hier demnach indirekt ebenfalls in die Bewertung einbezogen.

Zur Quantifizierung der Kategorie Primärmaterialieinsatz (PE) wird der Wirkungsindikator „Primärmaterialanteil“ (PMA) ermittelt. Daten zum Sekundärmaterialanteil werden aus dem UNEP-Bericht *Recycling Rates of Metals*<sup>12</sup> [43] herange-

12 [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), S. 30 ff.

zogen (siehe Gl. 4.16). Zur Berechnung des Primärmaterialanteils wird vom Wert 100 der prozentuale Anteil des Sekundärmaterialanteils abgezogen:

$$\text{PMA}_i = 100 - \text{Sekundärmaterialanteil}_i \quad \text{Gl. 4.16}$$

Die Wirkungsindikatorbeträge werden in Prozent angegeben und bewegen sich zwischen 0 und 100. Je höher der Prozentwert ist, desto größer ist die Primäranteil. Die Abhängigkeit von Primärmaterialien erhöht das potenzielle Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit. Das potenzielle Risiko wird ermittelt, indem der Wirkungsindikatorbetrag des Metalls dem Grenzwert der Kategorie PE gegenübergestellt (siehe Gl. 4.5) und der Charakterisierungsfaktor berechnet wird.

*Da fossile Rohstoffe zum einen überwiegend als Energierohstoff eingesetzt werden und somit nicht wieder gewonnen werden können und zum anderen als Material (z. B. Kunststoff) bisher wenig stofflich recycelt werden, wird der Primärmaterialanteil für fossile Rohstoffe auf 100 gesetzt.*

Ein Wert von 100 sagt, dass es zu keiner Verwendung von Sekundärmaterial kommt. Für vereinzelte Produkte, die aus recyceltem Kunststoff bestehen, ist diese Annahme als Worst Case zu verstehen, was bei der Interpretation bedacht werden sollte.

In Abschn. 9.1 des Leitfadens sind Charakterisierungsfaktoren für den Einsatz von Primärmaterial für die Herstellung von Zwischen- bzw. finalen Produkten bereitgestellt.

Die für alle Kategorien ermittelten Wirkungsindikatorbeträge für das betrachtete Materialportfolio sind in Abschn. 9.2 zu finden.

### **Erläuterung der Grenzwerte**

Wie bereits in Abschn. 4.1 erläutert, werden die Indikatorwerte der Metalle und fossilen Rohstoffe für jede Kategorie einem Grenzwert gegenübergestellt. Dies ist in Gl. 4.17 erneut dargestellt.

$$\text{DtT - Wert} = \left( \frac{\text{Wirkungsindikatorbetrag}}{\text{Grenzwert}} \right)^2 \quad \text{Gl. 4.17}$$

Ist das Ergebnis des Wirkungsindikators kleiner als der Grenzwert, ist der quadrierte Quotient (DtT-Wert) kleiner als 1 und wird auf 0 gesetzt, da kein potenzielles Risiko vorliegt. Stimmt der Wirkungsindikatorbetrag mit dem Zielwert überein, ergibt sich exakt ein Wert von 1. Ist der DtT-Wert größer als 1, liegt ein potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit vor.

Die Gewichtung mit einem Grenzwert soll dabei helfen, das Ergebnis hinsichtlich seiner Bedeutung besser einzuordnen. Bei der Kategorie Minenkapazität wird beispielsweise der Zeitraum bestimmt, indem das Metall unter den jetzigen Produktionsbedingungen noch zur Verfügung steht. Für das untersuchte Produktportfolio werden Wirkungsindikatorbeträge von 10 Jahre bis 1000 Jahre ermittelt. Dass eine Reichweite von 10 Jahren im Hinblick auf die Versorgungssicherheit poten-

**Tab. 4.2** Grenzwerte für die Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomischen Verfügbarkeit“

Kategorie	Grenzwert	Quelle
Konzentrationen	0,15	Rhoades [31]
Minenkapazität	50 Jahre bzw. $\frac{1}{50 \text{ Jahre}}$	Fragebogen
Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben	55	Experteneinschätzung
Handelshemmnisse	3,5	Experteneinschätzung
Koppelproduktion	0,25	Experteneinschätzung
Politische Stabilität	0,38	Experteneinschätzung
Preisschwankungen	20%	Experteneinschätzung
Nachfragewachstum	5%	Fragebogen
Primärmaterialeinsatz	75%	Fragebogen

ziell risikobehafteter ist als eine Reichweite von 1000, bedarf keiner weiteren Erläuterung. Bei Werten, die allerdings näher beieinander liegen, z. B. 10 und 100 Jahre, lässt sich eine derartige Aussage schon deutlich schwieriger treffen. Zudem stellt sich die Frage, ab wie viel Jahren generell von einem Risiko zu sprechen ist.

In Tab. 4.2 werden die in der ESSENZ-Methode verwendeten Grenzwerte für die betrachteten Kategorien dargestellt. Nur für die Kategorie Konzentrationen war vom Autor des Herfindahl-Hirschman-Index ein Grenzwert gegeben [31].

Da sowohl die Konzentration der Reserven als auch die Konzentration der Produktion und die Unternehmenskonzentration mit dem HHI-Indikator berechnet werden, haben alle drei Kategorien den gleichen Grenzwert. Für die anderen Kategorien sind die Grenzwerte über Experteneinschätzungen und einer Stakeholderbefragungen im Rahmen des ESSENZ-Projekts festgelegt worden (Abschn. 9.7).

*Die Festlegung von Grenzwerten ist immer subjektiv.* Im besten Fall stehen alle Stakeholdergruppen hinter der Festlegung. Um einen möglichst großen Konsens bei der Festlegung der in der ESSENZ-Methode genutzten Grenzwerte zu erreichen, wurde daher die Stakeholderbefragung priorisiert. Da die Ergebnisse in vielen Bereichen nicht eindeutig waren, musste auf eine Expertenbefragung zurückgegriffen werden, um die in der ESSENZ-Methode verwendeten Grenzwerte zu ermitteln. Für die Kategorie *Minenkapazität*, *Nachfragewachstum* und *Primärmaterialeinsatz* konnten jedoch Grenzwerte basierend auf der Befragung ermittelt werden. Sowohl der ermittelte DtT-Wert als auch die Charakterisierungsfaktoren sind von dem gewählten Grenzwert abhängig. Daher ist es in der ESSENZ-Methode möglich, die als Standard definierten Grenzwerte anzupassen (z. B. wenn der Anwender die vorgegebenen Grenzwerte als nicht streng genug erachtet) und die Charakterisierungsfaktoren nach dem in Gl. 4.5 und Gl. 4.6 dargestellten Prinzip neu zu berechnen.

	PS	NFW	Kopp	PMA	MK	Konz_U	Konz_R	Konz_P	HH	REX	PRS
Aluminium (Al)	*2	*1						*3			
Antimon (Sb)											
Beryllium (Be)		*4									
Bismut (Bi)											
Blei (Pb)											
Braunkohle											
Chrom (Cr)											
Eisen (Fe)											
Erdgas											
Erdöl											
Gallium (Ga)											
Germanium (Ge)											
Gold											
Indium (In)											
Kobalt (Co)											
Kupfer (Cu)											
Lithium (Li)											
Magnesium (Mg)											
Mangan (Mn)											
Molybdän (Mo)											
Nickel (Ni)											
Niob (Nb)											
Palladium (Pd)											
Platin (Pt)											
Rhenium (Re)											
Selen (Se)											
Seltene Erden											
Silber (Ag)											
Silicium (Si)											
Steinkohle											
Strontium (Sr)											
Tantal (Ta)											
Tellur (Te)											
Titan (Ti)											
Vanadium (V)											
Wolfram (W)											
Zink (Zn)											
Zinn (Sn)											

\*1 - kein potentielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit, bezogen auf 1 kg Metall oder fossilen Rohstoff  
 \*2 - geringes potentielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit, bezogen auf 1 kg Metall oder fossilen Rohstoff  
 \*3 - mittleres potentielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit, bezogen auf 1 kg Metall oder fossilen Rohstoff  
 \*4 - hohes potentielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit, bezogen auf 1 kg Metall oder fossilen Rohstoff

Abb. 4.5 Visualisierte Charakterisierungsfaktoren der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ für die Funktionelle Einheit von 1 kg

Die ermittelten Charakterisierungsfaktoren<sup>13</sup> werden abschließend für die betrachteten 36 Metalle und 4 fossile Rohstoffe bezogen auf die funktionelle Einheit von 1 kg mithilfe des erweiterten Ampelsystems (grün, gelb, orange, rot) visualisiert.

Dabei sind die Metalle und fossilen Rohstoffe, die für die betrachtete Kategorie kein potenzielles Risiko einer einschränkenden Verfügbarkeit aufzeigen (deren Charakterisierungsfaktor 0 ist), mit grün gekennzeichnet. Metall oder fossile Rohstoffe werden mit gelb gekennzeichnet, wenn das Ergebnis 10 % des maximalen Ergebnisses ausmacht – es liegt ein potenzielles Risiko einer einschränkenden Verfügbarkeit vor, jedoch ist dieses noch vergleichsweise gering. Bei Ergebnissen, die 10 % bis zu 70 % des maximalen Ergebnisses ausmachen, wird das Metall oder der fossile Rohstoffe mit orange gekennzeichnet – es liegt ein potenzielles Risiko einer ein-

13 Die Charakterisierungsfaktoren werden nach dem Vorgehen in Abschn. 4.1.2.1 ermittelt.

schränkenden Verfügbarkeit vor, welches höher ist als das der gelb gekennzeichneten, jedoch geringer als das der rot markierten Metalle und fossilen Rohstoffe. Für Metalle und fossile Rohstoffe, deren Ergebnis größer als 70% des maximalen Ergebnisses ausmacht, erfolgt eine rote Kennzeichnung – das potenzielle Risiko einer einschränkenden Verfügbarkeit ist besonders hoch. Es ist zu bedenken, dass die hier visualisierten Ergebnisse nur für die funktionelle Einheit von 1 kg gelten, ändern sich die Massen im Produktsystem, können andere Metalle an Bedeutung gewinnen bzw. verlieren.

Aus Abb. 4.5 ist zu erkennen, dass nur wenige Metalle und fossile Rohstoffe rot gekennzeichnet sind. In den meisten Kategorien gibt es ca. ein bis zwei Metalle oder fossile Rohstoffe, die ein hohes potenzielles Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit haben. Zudem sind nur wenige Metalle und fossile Rohstoffe mit orange gekennzeichnet, ebenfalls ca. ein bis zwei pro Kategorie. Die meisten Metalle und fossilen Rohstoffe sind mit gelb gekennzeichnet, was auf ein geringes potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit hindeutet – jedoch nur bezogen auf die funktionelle Einheit von 1 kg.

## 4.2 Methodik zur Bewertung der gesellschaftlichen Akzeptanz

Das Ziel der ESSENZ-Methode – Ressourceneffizienz im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung zu messen und bewerten – kann nur erfüllt sein, wenn auch soziale Gesichtspunkte betrachtet werden. Soziale Gesichtspunkte gewinnen bei Kaufentscheidungen durch den Konsumenten zunehmend an Bedeutung und sind daher für Unternehmen unter Umständen durchaus sehr relevant (z. B. soziale Aspekte und Umweltauswirkungen beim Abbau von Erzen [44]). Es wird davon ausgegangen, dass ein Material nicht eingesetzt werden kann, wenn die gesellschaftliche Akzeptanz nicht gegeben ist – obwohl es physisch und sozio-ökonomisch ausreichend verfügbar ist. Dabei werden derzeit nur Primärrohstoffe hinsichtlich ihrer gesellschaftlichen Akzeptanz bewertet, obwohl es auch bei der Wiedergewinnung von Sekundärrohstoffen zu Konflikten mit sozialen und Umweltstandards kommen kann (z. B. Aufbereitung von Elektroschrott in Ghana [45]).

**Bewertung der Einhaltung von sozialen Standards** In der ESSENZ-Methode wird ein Screeningindikator zur Bewertung der Kategorie Einhaltung sozialer Standards (GAs) verwendet, der an bestehende Vorarbeiten [9] anknüpft. Der Screeningindikator deutet an, bei welchem Metall oder fossilem Rohstoff während des Abbaus soziale Standards verletzt werden können. Die drei betrachteten Gesichtspunkte „Kinderarbeit“ (KA), „Zwangsarbeit“ (ZA) und „Konfliktgebiete“ (KG) werden im Social Life Cycle Assessment (SLCA – Sozialbilanz) Framework [46] adressiert. Zudem ist die Vermeidung von Kinder- und Zwangsarbeit ein zentraler Punkt der ILO Kernarbeitsnorm [47]. Konfliktgebiete werden zudem betrachtet, da diese in der Öffentlichkeit eine bedeutsame Rolle spielen [44], [48]. In der Social Hotspot Database (SHDB) [49] können die entsprechenden Risikowerte für den Abbau von Me-

tallen und fossiler Rohstoffen entnommen werden. Die Wirkungsindikatorberechnung erfolgt nach Gl. 4.18. Der Wirkungsindikator ( $WI_{\text{gesellschaftliche Akzeptanz},s,i}$ ) für ein Metall oder fossilen Rohstoff wird ermittelt, indem der prozentuale Anteil an der Produktion ( $PA_{agP_i}$ ) mit den länderspezifischen Risikofaktoren aus der SHDB multipliziert wird. Diese werden zu einem Gesamtergebnis aufsummiert:

$$WI_{\text{gesellschaftliche Akzeptanz},s,i} = \sum [PA_{agP_i} \times (KA_x + ZA_x + KG_x)]^2. \quad \text{Gl. 4.18}$$

Die Screeningfaktoren werden anschließend auf den Wertebereich 0 bis 100 nach dem Prinzip in Gl. 4.6 skaliert. Je höher der Wert ist, desto größer ist das potenzielle Risiko, dass beim Abbau von Metallen und fossilen Rohstoffen soziale Standards verletzt werden. Für diese Kategorie gibt es keinen Grenzwert, da das Ziel darin besteht, gar keine sozialen Standards zu verletzen. In Abschn. 9.1 des Leitfadens sind die entsprechenden Charakterisierungsfaktoren für Metalle und fossile Rohstoffe bereitgestellt.

*Die Ergebnisse sind unter Berücksichtigung folgender Herausforderung zu interpretieren: Die Hintergrunddaten aus der SHDB sind mit großen Unsicherheiten verbunden, da sie länder- und sektorenspezifisch sind und somit keine Aussage über den tatsächlichen Zustand einer bestimmten Mine treffen können. Die zur Verfügung gestellten Werte der SHDB basieren größtenteils auf Daten des Global Trade Analysis Project (GTAP) [50], das intransparente Quellen verwendet. Zudem könnte diskutiert werden, ob die gewählten Indikatoren die Verletzung bzw. Einhaltung von Standards ausreichend widerspiegeln können. Derzeit stehen keine Indikatoren zur Verfügung, die die Einhaltung von sozialen Standards betrachten.*

*Bei den durch den Screeningindikator ermittelten Ergebnissen handelt es sich um das potenzielle Risiko einer Verletzung von Standards für die im Mengengerüst des untersuchten Produktsystems eingesetzten Metalle und fossilen Rohstoffe. Da die Screeningfaktoren nicht mit dem Mengengerüst multipliziert werden, handelt es sich nicht um produktsystemspezifische Auswirkungen.*

Soziale Gesichtspunkte sind bisher noch schwer messbar, da regionalisierte Informationen zu den jeweiligen Ländern, aus denen der Rohstoff bezogen wird, sowie adäquate Wirkungsabschätzungsmethoden fehlen [51], [52]. Eine angemessene Bewertung ist daher mit einem zu hohen Zeitaufwand verbunden, weshalb in der ESSENZ-Methode auf eine umfassende Bewertung der sozialen Gesichtspunkte in Bezug auf den Lebensweg des Produktes verzichtet wird. Die Erhebung solch zusätzlicher Daten über die ESSENZ-Methode hinaus wird empfohlen und kann z. B. mit dem Ansatz von Neugebauer et al. (2015) [53] bewertet werden.

**Bewertung der Einhaltung von Umweltstandards** Zusätzlich zur Einhaltung von sozialen Standards kann auch die Einhaltung von Umweltstandards Einfluss auf die gesellschaftliche Akzeptanz haben. Auswirkungen durch die Verletzung von Umweltstandards können vielfältig sein und von der Region des Abbaus abhängen – z. B. werden vermehrt eutrophierende Substanzen in das umliegende Ökosystem geleitet, wenn Bergebecken (tailing ponds) brechen. Ökotoxizität sowie andere lokale Verschmutzung des Ökosystems werden von vielen Konsumenten kritisch

gesehen (z. B. lokale Umweltverschmutzungen in der Mongolei [54] durch den Abbau von Kohle). Im Gegensatz zu globalen Umweltauswirkungen (wie Klimawandel), bei denen der Ausstoß von Klimagasen und entsprechende Folgen nicht zusammen auftreten, ist bei lokalen Auswirkungen die Ursache der Verschmutzung leichter ausfindig zu machen und zumeist über technische Verfahren zu umgehen. Daher erwarten Konsumenten vermehrt, dass diese Umweltverschmutzungen verhindert werden.

*Da eine regionalisierte Aufschlüsselung ebenso wie bei den sozialen Standards aufgrund von fehlenden Daten über die jeweiligen Länder, aus denen der Rohstoff bezogen wird, kaum möglich ist, wird auf generische Daten zurückgegriffen.*

Zur Quantifizierung der Kategorie Einhaltung von Umweltstandards wird der Wirkungsindikator ( $WI_{GA,um,i}$ ) nach Gl. 4.19 ermittelt. Dazu wird der prozentuale Anteil der globalen Produktion in einem Land  $x$  ( $pAgP_x$ ) mit dem entsprechenden Environmental Performance Index (EPI) [55] multipliziert. Durch Aufsummierung werden die metallspezifischen Ergebnisse ermittelt. Der EPI betrachtet die ökologische Leistungsbilanz von Staaten und umfasst insgesamt 16 Indikatoren aus den Bereichen Zustand des Umweltsystems (z. B. Abwasserentsorgung), Luftqualität, Wasser, Biodiversität, natürliche Ressourcen und Energie. Für die Bewertung der Einhaltung von Umweltstandards für Metalle und fossile Rohstoffe werden die Subindikatoren für den Bereich Schutz der Natur – Critical Habitat Protection, CHP (Schutz kritischer Habitats), Marine Protected Areas, MPA (Schutz mariner Gebiete) und Terrestrial Protected Areas, TPA (Schutz terrestrischer Gebiete) – verwendet. Über diese drei Indikatoren wird der Mittelwert gebildet.

$$WI_{GA,um,i} = \sum [pAgP_x \times (MPA_x + TPA_x + CHP_x)]^2 \quad \text{Gl. 4.19}$$

Die Screeningfaktoren werden anschließend auf den Wertebereich 0 bis 100 nach dem Prinzip in Gl. 4.6 skaliert. Je höher der Wert ist, desto größer ist das potenzielle Risiko, dass beim Abbau von Metallen und fossilen Rohstoffen Umweltstandards verletzt werden. Für diesen Gesichtspunkt gibt es keinen Grenzwert, da es das Ziel ist, dass gar keine Verletzungen von Umweltstandards auftreten. Es kann angenommen werden, dass es je größer das Screeningindikatorergebnis ist, desto mehr Verstöße gegen Umweltstandards vorkommen.

*Die Ergebnisse sind unter Berücksichtigung folgender Herausforderung zu interpretieren: Die verwendeten EPI-Daten zeigen die Qualität und Quantität von Naturschutzgebieten in den Abbauländern, nicht jedoch, wo welche Standards eingehalten werden. Zudem könnte diskutiert werden, ob die gewählten Indikatoren, die Einhaltung von Umweltstandards ausreichend widerspiegeln können. Derzeit stehen keine Indikatoren zur Verfügung, die die Einhaltung von Umweltstandards messen.*

*Bei den mit Screeningindikatoren für die Einhaltung von Umweltstandards ermittelten Ergebnissen handelt es sich um das potenzielle Risiko der betrachteten Metalle und fossilen Rohstoffe. Da die Screeningfaktoren nicht mit dem Mengengerüst multipliziert werden, handelt es sich nicht um produktsystemspezifische Auswirkungen.*

In Abschn. 9.1 des Leitfadens werden Charakterisierungsfaktoren für Metalle und fossile Rohstoffe bereitgestellt, die die Einhaltung von Umweltstandards aufzeigen.

### 4.3 Methodik zur Bewertung der Umweltauswirkungen

Im Folgenden wird die Bewertung der Dimension „Umweltauswirkung“ erläutert. Umweltauswirkungen werden über den gesamten Lebensweg basierend auf der Ökobilanzmodellierung, wie in Kap. 3 erläutert, bewertet. Insgesamt werden die fünf Umweltauswirkungen Klimaänderung, Versauerung, Eutrophierung, Abbau der Ozonschicht und Bildung photochemischer Substanzen (Smog) betrachtet. Diese Kategorien werden seit Jahren in Ökobilanzstudien verwendet, da sie mit robusten und vielfach getesteten Wirkungsabschätzungsmethoden bewertet werden können [56], [57], [58]. Diese Wirkungsabschätzungsmethoden finden auch in der ESSENZ-Methode Anwendung. Obwohl die Kategorien „Biodiversität“ und „Landnutzung“ von großer Wichtigkeit für alle Produktgruppen sind, können sie derzeit in der ESSENZ-Methode nicht betrachtet werden, da weder ausgereifte Methoden zur Bewertung noch die entsprechenden Inventardaten zur Verfügung stehen [56], [59].

*Für alle Indikatoren gilt, dass es sich um potenzielle nicht um tatsächliche Umweltauswirkungen handelt. Die Wirkung ist potenziell, da sie auf einem Modell basiert, welches zwar versucht, die Realität bestmöglich abzubilden, jedoch keine perfekte Wiedergabe dieser darstellt.*

Die Kategorie Klimaveränderung umfasst sowohl anthropogene als auch natürliche Veränderungen des Klimas. Die Klimaveränderung durch anthropogen verursachte Emissionen ist auch als globale Erwärmung bekannt. Die globale Erwärmung beschreibt den Anstieg der Mitteltemperatur in der Atmosphäre infolge von vermehrten Emissionen von Treibhausgasen wie Methan, Kohlendioxid und Lachgas, die vor allem bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe entstehen. Die Wärmemenge, die von der Erdoberfläche zurückgestrahlt wird, kann die Atmosphäre aufgrund der sich dort befindenden Treibhausgase nicht mehr verlassen. Somit erwärmt sich die Erdatmosphäre stärker, als dies durch die reine Sonnenstrahlung möglich wäre [60]. In der ESSENZ-Methode wird zur Bewertung der Klimaänderung die CML-IA-Methode [11] verwendet. Das zugrunde liegende Charakterisierungsmodell wurde vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [61] entwickelt und bezieht die Treibhauswirkungen auf einen Zeithorizont von 100 Jahren. Angegeben wird das Treibhausgaspotenzial (GWP) in Kilogramm Kohlenstoffdioxid-äquivalente (kg CO<sub>2</sub>-Äqv.).

Versauerung bedeutet eine Verringerung des pH-Werts im terrestrischen und aquatischen Ökosystem. Anthropogen entstandene Luftschadstoffe wie Schwefel- und Stickoxid reagieren mit Wasser in der Atmosphäre zu Säuren und sind die Hauptverursacher des sauren Regens. Versauernde Substanzen werden überwiegend bei der Verbrennung von fossilen Rohstoffen frei. Die in den Boden gelangenden Säuren führen so zu einer Überdosierung von Protonen, die der Boden nicht mehr alleine neutralisieren kann. Es kommt dadurch zu einer vermehrten Auswaschung der Basenkationen, die wichtige Nährstoffe für Pflanzen darstellen. Eine Veränderung des pH-Werts erhöht auch die Mobilität von toxischen Schwermetallen. Zudem greifen die Säuren das feine Wurzelsystem der Bäume an [62]. In Seen führt der vermehrte Eintrag von Säuren und somit einer Abnahme des pH-Werts zum Sterben der säureempfindlichen Arten und somit zu einer kompletten Umgestaltung des

Ökosystems mit einer verringerten Artenanzahl. Dies beeinflusst auch die benachbarten Ökosysteme, die mit dem betroffenen Ökosystem in Nahrungsaustausch stehen [63]. In der ESSENZ-Methode wird zur Bewertung der Versauerung die CML-IA-Methode [11] verwendet. Das Versauerungspotenzial (AP) wird in Kilogramm Schwefeldioxidäquivalente ( $\text{kg SO}_2\text{-Äqv.}$ ) angegeben.

Eutrophierung (Überdüngung) bedeutet eine Anreicherung von Nährstoffen im Boden (terrestrische Eutrophierung) oder im Gewässer (aquatische Eutrophierung), die ihren Ursprung aus Luftschadstoffen, Abwässern und der Düngung haben. Im Wasser führen viele Nährstoffe zu vermehrtem Algenwachstum, weshalb weniger Sonnenlicht in die tieferen Wasserschichten eindringen kann. Die Fotosyntheseprozesse verringern sich und somit auch der Ausstoß von Sauerstoff, der für den Abbau der abgestorbenen Algen gebraucht wird. Die verringerte Sauerstoffverfügbarkeit führt einerseits zu Fischsterben und fördert andererseits die anaerobe Zersetzung der abgestorbenen Pflanzen. Beim Abbau des organischen Materials entsteht Ammoniak, welches toxisch auf Fische und andere größere Wasserlebewesen wirkt [64]. Die Überdüngung von Böden kann durch Auswaschungsprozesse zu einem vermehrten Nitratgehalt im Grundwasser führen. Nitrat entsteht durch Stoffwechselprozesse der an Stickstoff überdüngten Pflanzen. Im menschlichen Körper wird Nitrat zu Nitrit umgewandelt und wirkt toxisch [65]. In der ESSENZ-Methode wird zur Bewertung der Eutrophierung die CML-IA-Methode [11] verwendet. Angegeben wird das Eutrophierungspotenzial (EP) in Kilogramm Phosphatäquivalente ( $\text{kg PO}_4^{3-}\text{-Äqv.}$ ).

Die Ozonschicht ist der natürliche Schutz der Atmosphäre gegen UV-Strahlung. Bei Zerstörung der Ozonschicht gelangen die krebserregende UV-Strahlen der Sonne auf die Erde und können dem Menschen und dem Ökosystem schaden [67]. Substanzen, die zum Abbau der Ozonschicht führen, sind unter anderem Halogenkohlenwasserstoffe, die in der Metallindustrie (als Lösemittel zum Waschen), der Kunststoffindustrie und der Erdölindustrie (zum Abtrennen von unerwünschten Stoffgruppen) entstehen können. Das FCKW-Molekül wird über die UV-Strahlung zu einem Radikal gespalten, welches wiederum ein Sauerstoffatom vom Ozon abspaltet [68]. Die abgebauten Ozonmoleküle führen zur Durchlässigkeit in der Ozonschicht. In der ESSENZ-Methode wird zur Bewertung der Abbau der Ozonschicht die CML-IA-Methode [11] verwendet. Angegeben wird das Ozonabbaupotenzial (ODP) in  $\text{kg R11-Äquivalente}$  (Trichlorfluormethan-Äqv.).

Die Bildung photochemische Oxidantien unterstützt die Bildung von troposphärischem Ozon (Sommersmog: bodennahe Ozonbelastung, die vor allem im Sommer auftritt). Ozon führt bei Menschen und Tieren zu einer Reizung der Atemwege und schädigt das Chlorophyll in Pflanzen, sodass diese anderen Umwelteinwirkungen gegenüber geschwächt sind [56]. Ozon entsteht durch die Reaktion von molekularem Sauerstoff und einem Sauerstoffatom mithilfe eines Stoßpartners wie Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) oder Argon. Sauerstoffatome bilden sich, wenn Stickstoffdioxid fotolytisch in Stickstoffmonoxid und Sauerstoff gespalten wird. Parallel zur Entstehung von Ozon wird Sauerstoff durch die Reaktion mit dem entstandenen Stickstoffmonoxid abgebaut. Dieses Gleichgewicht kann durch Peroxidradikale gestört werden, die über die Oxidation von Kohlenwasserstoffen durch Hydroxidradikale entstehen. Peroxidradikale

oxidieren Stickstoffmonoxid schneller zu Stickstoffdioxid, als dies Ozon kann. Zudem wird die photolytische Spaltung von Stickstoffdioxid unterstützt, was wiederum die Bildung von Ozon fördert. Die Entstehung von Hydroxidradikalen ist abhängig von der Strahlungsintensität und somit von der geografischen Breite. Kohlenwasserstoffe sind leichtflüchtige organische Verbindungen (VOCs – *volatile organic compounds*), die bei der Verwendung von Lösemittel oder auch im Straßenverkehr frei werden [57]. In der ESSENZ-Methode wird zur Bewertung der Bildung photochemischer Substanzen die CML-IA-Methode [11] verwendet. Angegeben wird das photochemische Oxidantienbildungspotenzial (POCP) in Kilogramm Ethenäquivalente ( $\text{kg C}_2\text{H}_4\text{-Äqv.}$ ).

#### 4.4 Bewertung des Nutzens

In der ESSENZ-Methode wird der Nutzen über die funktionelle Einheit in Anlehnung an die ISO 14045 [69] bewertet. Dabei stellt die funktionelle Einheit keine Größe für den Nutzen im klassischen Sinne dar. Sie wird in der Ökobilanzmethodik [70] verwendet, um den Nutzen eines Produktsystems zu bemessen.

Um die Ressourceneffizienz eines Produktes zu ermitteln, wird im Allgemeinen, wie in Gl. 1.1 dargestellt, der Nutzen dem entsprechenden Ressourcenverbrauch gegenübergestellt. In der ESSENZ-Methode wird die Ressourceneffizienz ermittelt, indem der Nutzen den Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“, „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ und der Dimension „Umweltauswirkungen“ gegenübergestellt wird. Die genaue Berechnung der Ressourceneffizienz für das Beispiel des Aluminium- und Silberkabels wird in Abschn. 5.5 erläutert.

Nach Bedarf können Unternehmen bei der Bewertung der Ressourceneffizienz auch ökonomische Kennzahlen (z. B. Preis des untersuchten Produktes, Gewinn durch den Verkauf des untersuchten Produktes etc.) verwenden.

Abschließend ist in Tab. 4.3 eine Übersicht über die in Kap. 4 betrachteten Dimensionen, Kategorien, Sachbilanzergebnisse und Wirkungsindikatoren dargestellt.

Die als Standard in der ESSENZ-Methode zur Verfügung gestellten Charakterisierungsfaktoren sind auf die hier erläuterte Weise berechnet, müssen jedoch nicht vom Anwender selbst bestimmt werden, sondern stehen in Abschn. 9.1 zur Anwendung bereit.

**Tab. 4.3** Übersicht über die betrachteten Dimensionen, Kategorien, Sachbilanzergebnisse und Wirkungsindikatoren

Dimension	Kategorie	Beschreibung	Wirkungsindikator	Sachbilanzergebnis
Physische Verfügbarkeit	Abiotischer Ressourcenverbrauch (AR)	Aufzehrung von Ressourcen (geologisch und anthropogen) durch vermehrte Förderung	Aufzehrung von Ressourcen [11], [15], [16], [71]	Menge an Metallen und fossilen Rohstoffen aus dem Mengengertist je FU <sup>2</sup>
	Konzentration der Reserven (Konz_R)	Konzentration von Reserven in bestimmten Ländern	Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) [31]	Siehe Kategorie AR
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	Konzentration der Produktion (Konz_P)	Konzentration von Produktionsstandorten in bestimmten Ländern (Mine)	HHI	Siehe Kategorie AR
	Unternehmenskonzentration (Konz_U)	Konzentration von Unternehmen, die Metalle und fossile Rohstoffe handeln	HHI	Siehe Kategorie AR
	Minenkapazität (MK)	Erschließungszeitraum neuer Minen	Minenkapazität	Siehe Kategorie AR
	Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX)	Politische Gegebenheiten zur Erschließung von Minen	Policy Potential Index (PPI) [33]	Siehe Kategorie AR
	Handelshemmnisse (HH)	Metalle und fossile Rohstoffe, die Handelshemmnissen unterliegen	Enabling Trade Index (ETI) [35]	Siehe Kategorie AR
	Koppelproduktion (Kop)	Auftreten als Nebenmaterial	Anteil des durch Koppelproduktion gewonnen Materials [36]	Siehe Kategorie AR
	Politische Stabilität (PS)	Stabilität der Regierung in Ländern, die Ressourcen abbauen	World Governance Indicators (WGI) [72]	Siehe Kategorie AR
	Preisschwankungen (PRS)	Starke Unsicherheiten der Preise	Volatilität [40]	Siehe Kategorie AR
	Nachfragewachstum (NFW)	Erhöhung der Nachfrage	Prozentualer Wachstum	Siehe Kategorie AR
	Primärmaterialersatz (PE)	Primärmaterialanteil an der Produktion	Primärmaterialanteil [43]	Siehe Kategorie AR

Tab. 4.3 (Fortsetzung)

Dimension	Kategorie	Beschreibung	Wirkungsindikator	Sachbilanzergebnis
Gesellschaftliche Akzeptanz	Einhaltung sozialer Standards (GA <sub>s</sub> )	Soziale Standards werden nicht eingehalten	Einhaltung von sozialen Standards	Im Produktsystem verwendete Metalle und fossile Rohstoffe
	Einhaltung von Umweltstandards (GA <sub>um</sub> )	Umweltstandards werden nicht eingehalten	Einhaltung von Umweltstandards	Im Produktsystem verwendete Metalle und fossile Rohstoffe
Umweltauswirkungen	Klimawandel (GWP)	Emissionen von Treibhausgasen	Erhöhung des Strahlungsantriebs [60]	Menge an Treibhausgasen je FU
	Versauerung (AP)	Emissionen von versauernden Substanzen	Protonenabgabe [73]	Menge an versauernden Substanzen je FU
	Eutrophierung (EP)	Emissionen von eutrophierenden Substanzen	Übermäßige Nährstoffzufuhr [74]	Menge an eutrophierenden Substanzen je FU
	Abbau der Ozonschicht (ODP)	Emissionen von Substanzen, die zum Abbau der Ozonschicht beitragen	Freisetzung von Chlor-/Bromatomen [68]	Menge an Substanzen, die die Ozonschicht abbauen, je FU
	Bildung photochemischer Substanzen (POCP)	Emissionen von photochemischen Substanzen oder von Substanzen, die zur Bildung photochemischer Substanzen beitragen	Bildung von troposphärischem Ozon [11]	Menge an photochemischen Substanzen oder von Substanzen, die zur Bildung photochemischer Substanzen beitragen, je FU

<sup>1</sup> Obwohl die Ergebnisse der Berechnungen mit ADP<sub>elementar</sub>, ADP<sub>fossil</sub> und AADP alle zur Wirkungskategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch beitragen, müssen sie separat betrachtet werden und können nicht zu einem Gesamtwert zusammengeführt werden.

<sup>2</sup> FU=funktionelle Einheit des untersuchten Produktsystems.

Der Nutzen wird über die funktionelle Einheit abgebildet.

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

# Kapitel 5

## Berechnung der Ressourceneffizienz

### Inhaltsverzeichnis

5.1	Allgemeines Vorgehen	51
5.2	Berechnung der Verfügbarkeit für Metalle und fossile Rohstoffe	52
5.2.1	Berechnung der physischen Verfügbarkeit	52
5.2.2	Berechnung der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit	53
5.3	Berechnung der gesellschaftlichen Akzeptanz	55
5.4	Berechnung der Umweltauswirkungen	55
5.5	Ermittlung der Ressourceneffizienz	57

In den folgenden Unterkapiteln wird die Berechnung der Ressourceneffizienz basierend auf den in Kap. 3 ermittelten Sachbilanzdaten und der in Kap. 4 beschriebenen Bewertung durchgeführt. Die Erklärung der einzelnen Berechnungsschritte wird am bereits zuvor eingeführten Beispiel des Aluminium- und Silberkabels exemplarisch dargestellt.

### 5.1 Allgemeines Vorgehen

In der ESSENZ-Methode werden die zwei Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“, „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, sowie die zwei Dimensionen „Gesellschaftliche Akzeptanz“ und „Umweltauswirkungen“ berechnet. Diese erfolgt durch den Anwender auf die in Abb. 5.1 dargestellte Weise. Die Materialflüsse des Mengengerüsts ( $m_i$ ) und die Elementarflüsse ( $m_j$ ) aus der Sachbilanz werden mit ihren entsprechenden Charakterisierungsfaktoren (CF) zu Teilergebnissen ( $TE_{K,i}$ ) multi-

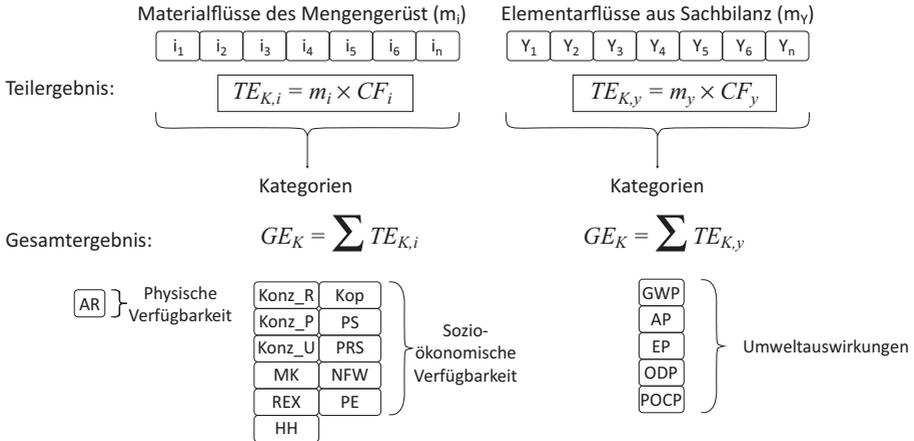


Abb. 5.1 Ebenen der Ergebnisbestimmung der Ressourceneffizienzbewertung

pliziert. So wird der spezifische Beitrag der Material- und Elementarflüsse innerhalb einer Kategorie K ermittelt. Werden alle spezifischen Beiträge einer Kategorie aufsummiert, ist es möglich, das Gesamtergebnis ( $GE_K$ ) der jeweiligen Kategorie zu ermitteln. Im Folgenden ist detailliert dargestellt, wie die Berechnung für die einzelnen Kategorien durchzuführen ist.

## 5.2 Berechnung der Verfügbarkeit für Metalle und fossile Rohstoffe

In den folgenden Abschnitten wird erläutert, wie die Berechnung für die Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“, „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ und die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ durchzuführen ist.

### 5.2.1 Berechnung der physischen Verfügbarkeit

Die in Abschn. 4.1 erläuterten Indikatoren für die Bewertung der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ (AADP bzw. ADP-Indikatoren) werden mit den ermittelten Massen ( $m_i$ ) aus dem Mengengerüst multipliziert (siehe Gl. 5.1, Gl. 5.2 und Gl. 5.3). So wird das Teilergebnis ( $TE_i$ ) für die Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch für das betrachtete Metall oder den fossilen Rohstoff ermittelt:

$$TE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch},i} = m_i \times ADP_{\text{elementar},i} \quad \text{Gl. 5.1}$$

$$TE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch},i} = m_i \times ADP_{\text{fossil},i} \quad \text{Gl. 5.2}$$

$$TE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch},i} = m_i \times AADP_i \quad \text{Gl. 5.3}$$

Auf diese Weise kann die Bedeutung eines jeden Metalls oder fossilen Rohstoffs hinsichtlich der Kategorie betrachtet werden.

In Abb. 5.2 ist die Berechnung für die Komponenten des Silber- und Aluminiumkabels dargestellt. Die Masse des Silbers im Silberkabel bzw. des Aluminiums im Aluminiumkabel wird mit dem entsprechenden  $ADP_{\text{elementar}}$ -Indikator multipliziert. Der spezifische Beitrag des Erdöls für die Kategorie wird analog ermittelt, allerdings über den  $ADP_{\text{fossil}}$ -Indikator. Da das Silberkabel aus den Komponenten Silber und Erdöl besteht, werden auch für die weiteren Kategorien jeweils zwei Teilergebnisse berechnet. Bestünde das Produkt aus entsprechend mehr Materialien, gäbe es auch mehr Teilergebnisse, die zusammengenommen werden würden.

**Berechnung der Teilergebnisse für die Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch**

$$TE_{\text{Silber}} = 0,38 \text{ kg} \times 1,18 \text{ Sb-}\ddot{A}qv = 0,4484 \text{ kg Sb-}\ddot{A}qv.$$

$$TE_{\text{Aluminium}} = 0,18 \text{ kg} \times 1,09 \times 10^{-9} \text{ Sb-}\ddot{A}qv = 1,96 \times 10^{-10} \text{ kg Sb-}\ddot{A}qv.$$

$$TE_{\text{Erdöl}} = 0,06 \text{ MJ} \times 0,023 \frac{\text{kg Sb-}\ddot{A}qv}{\text{MJ}} = 0,0015 \text{ kg Sb-}\ddot{A}qv.$$

**Abb. 5.2** Berechnung für Silber und Aluminiumkabel: Abiotischer Ressourcenverbrauch

Für das hier verwendete Beispiel ist eine Zusammenrechnung der Teilergebnisse zu einem Gesamtergebnis nicht möglich, da  $ADP_{\text{elementar}}$  und  $ADP_{\text{fossil}}$  nicht miteinander verrechnet werden können. Nur die Teilergebnisse, die mit dem gleichen Indikator ermittelt wurden, können zu einem Gesamtergebnis für die Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch aufsummiert werden.

Besteht das betrachtete Produktsystem aus mehreren Metallen, die zu einem Gesamtergebnis ( $GE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch}}$ ) zusammengeführt werden können, ist folgender Rechenschritt durchzuführen (vgl. Gl. 5.4):

$$GE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch}} = \sum TE_{\text{Abiotischer Ressourcenverbrauch}, i} \quad \text{Gl. 5.4}$$

Optional ist es möglich, Gesamt- und Teilergebnisse zweier vergleichbarer Produkte nach dem in Kap. 7 beschriebenen Vorgehen gegenüberzustellen.

### 5.2.2 Berechnung der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit

Die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ besteht aus insgesamt 11 Kategorien. Metall- oder rohstoffspezifische Teilergebnisse ( $TE_{K,i}$ ) der einzelnen Kategorien (z. B. politische Stabilität) werden ermittelt, indem die Massen ( $m_i$ ) aus

dem Mengengerüst mit dem Charakterisierungsfaktor ( $CF_{K,i}$ ) multipliziert werden (siehe Gl. 5.5):

$$TE_{K,i} = m_i \times CF_{K,i} . \quad \text{Gl. 5.5}$$

In Abb. 5.3 ist exemplarisch die Berechnung des Teilergebnisses für die Kategorie politische Stabilität dargestellt.

**Berechnung der Teilergebnisse der Kategorie Politische Stabilität**

$$TE_{PS,Silber} = 0,38 \text{ kg} \times 4,03 * 10^{10} \frac{1}{\text{kg}} = 1,53 * 10^{10}$$

$$TE_{PS,Erdöl} = 0,06 \text{ kg} \times 178.144 \frac{1}{\text{kg}} = 10.689$$

**Abb. 5.3** Exemplarische Berechnung für Silberkabel: Teilergebnisse für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ am Beispiel der Kategorie Politische Stabilität

Die Masse des Silbers im Silberkabel wird mit dem entsprechenden Charakterisierungsfaktor der Kategorie für Silber multipliziert. Der spezifische Beitrag des Erdöls für die Kategorie wird ebenso ermittelt, indem die Masse mit dem Charakterisierungsfaktor multipliziert wird. Die Berechnung der anderen Kategorien erfolgt analog. Da das Silberkabel aus den Komponenten Silber und Erdöl besteht, werden auch für die weiteren Kategorien jeweils zwei Teilergebnisse berechnet. Bestünde das Produkt aus entsprechend mehr Materialien, würden auch mehr Teilergebnisse ermittelt werden.

Zur Ermittlung des Gesamtergebnisses ( $GE_K$ ) für die einzelnen Kategorien sind die Teilergebnisse aufzusummieren (siehe Gl. 5.6):

$$GE_K = \sum TE_{K,i} . \quad \text{Gl. 5.6}$$

In Abb. 5.4 ist die exemplarische Berechnung des Gesamtergebnisses für die Kategorie politische Stabilität dargestellt. Die Berechnung des Gesamtergebnisses erfolgt, indem die beiden Teilergebnisse aufsummiert werden. Die Berechnung der anderen Kategorien erfolgt analog. Würde das Produkt aus mehr Materialien bestehen, gäbe es auch mehr Teilergebnisse, die für das Gesamtergebnisse aufsummiert werden müssten.

#### Berechnung des Gesamtergebnisses der Kategorie Politische Stabilität

$$GE_{PS} = TE_{PS,Silber} + TE_{PS,Erdöl} = 10.689 + 1,53 * 10^{10} = 1,53 * 10^{10}$$

**Abb. 5.4** Exemplarische Berechnung für Silberkabel: Gesamtergebnis für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ am Beispiel der Kategorie Politische Stabilität

Somit kann ein Gesamtergebnis für die einzelnen Kategorien der Dimension „sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ ermittelt werden. Optional ist es möglich, Teil- und Gesamtergebnisse von vergleichbaren Produkten nach dem in Kap. 7 beschriebenen Vorgehen einander gegenüberzustellen.

### 5.3 Berechnung der gesellschaftlichen Akzeptanz

Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ besteht aus den zwei Kategorien Einhaltung von sozialen Standards und Einhaltung von Umweltstandards. Für die Bewertung der Einhaltung von sozialen und Umweltstandards werden die Screeningfaktoren nicht mit dem Mengengerüst, also der Masse der verwendeten Metalle und fossilen Rohstoffe, multipliziert. Die gesellschaftliche Akzeptanz ist unabhängig davon, ob 1 g oder 1 kg des Metalls oder fossilen Rohstoffs verwendet werden. In der Analyse zur Bestimmung der potenziell risikobehafteten Metalle und fossilen Rohstoffe im Produkt werden nur die im Mengengerüst verwendeten Metalle und fossile Rohstoffe betrachtet, nicht aber deren Mengen.

### 5.4 Berechnung der Umweltauswirkungen

Bei der Bewertung der Umweltauswirkungen werden fünf Kategorien betrachtet. Die Berechnung der Teilergebnisse erfolgt, indem die Masse des Elementarflusses ( $m_y$ ) (z. B. CO<sub>2</sub>-Emissionen) über den gesamten Lebensweg (wie in Kap. 3 beschrieben) mit dem entsprechenden Charakterisierungsfaktor ( $CF_{K,y}$ ) einer Kategorie K multipliziert wird (siehe Gl. 5.7):

$$TE_{K,y} = m_y \times CF_{K,y} \quad \text{Gl. 5.7}$$

Somit kann der Einfluss eines jeden Elementarflusses auf die entsprechende Wirkungskategorie ausgewiesen werden.

In Abb. 5.5 ist ein Ausschnitt aus der Wirkungskategorie Klimawandel (GWP) für das Beispiel Silberkabel dargestellt. Dieser Schritt wird bei der Verwendung einer Ökobilanzsoftware automatisch durchgeführt.

**Berechnung der Teilergebnisse für die Kategorie Klimawandel**

$$TE_{GWP,CO_2} = 205 \text{ kg} \times 1 \text{ CO}_2\text{-Äqv.} = 205 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}$$

⋮

$$TE_{GWP,CH_4} = 0,5 \text{ kg} \times 25 \text{ CO}_2\text{-Äqv.} = 12,5 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}$$

**Abb. 5.5** Exemplarische Berechnung für Silberkabel: Teilergebnisse für die Kategorie Klimawandel

Zur Ermittlung des Gesamtergebnisses sind die Teilergebnisse aufzusummieren (siehe Gl. 5.8). Eine Aggregation der einzelnen Wirkungskategorien der Dimension „Umweltauswirkungen“ ist aufgrund der unterschiedlichen Einheiten nicht ohne Weiteres möglich:

$$GE_K = \sum TE_{K,y} \quad \text{Gl. 5.8}$$

In Abb. 5.6 ist die Berechnung des Gesamtergebnisses für das Beispiel des Silberkabels dargestellt. Im Falle des Silberkabels werden alle charakterisierten Elementarflüsse zu einem Gesamtwert von 117 kg CO<sub>2</sub>-Äqv. aufaddiert. Für die anderen Kategorien der Dimension „Umweltauswirkungen“ wird nach dem gleichen Verfahren vorgegangen.

**Berechnung der Gesamtergebnisse für die Kategorie Klimawandel**

$$GE_{GWP} = 45 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.} \times \dots + 12,5 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.} = 117 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}$$

**Abb. 5.6** Exemplarische Berechnung für Silberkabel: Gesamtergebnisse für die Kategorie Klimawandel

Optional können die Gesamtergebnisse der beiden Bereiche nach dem in Kap. 7 beschriebenen Vorgehen bei vergleichbaren Produkten gegenübergestellt werden.

## 5.5 Ermittlung der Ressourceneffizienz

Nach der Berechnung der einzelnen Kategorien der Dimensionen werden diese mit der funktionellen Einheit, die den Nutzen quantifiziert, in Bezug gesetzt.

Im Allgemeinen gilt: Je größer der berechnete Wert, desto größer ist die Ressourceneffizienz des Produktes. Dies ist mathematisch einfach erklärbar: Wenn der Zähler des Bruches (die funktionelle Einheit) durch eine kleine Zahl (Ergebnisse für die betrachteten Kategorien je funktioneller Einheit) dividiert wird, ist das Ergebnis entsprechend größer, als würde derselbe Zähler durch einen großen Wert dividiert werden.

Obwohl die funktionelle Einheit somit indirekt zweimal bei der Berechnung der Ressourceneffizienz berücksichtigt wird, kommt es zu keiner direkten Doppeltzählung. Die ermittelten Ergebnisse für die betrachteten Kategorien sind auf die funktionelle Einheit bezogen, da die ESSENZ-Methode in Anlehnung an die Ökobilanzmethodik entwickelt wurde. Die funktionelle Einheit wird dabei allerdings nur indirekt über die Referenzflüsse einbezogen. „Je funktionelle Einheit“ (siehe ISO 14044, S 37) ist daher nicht mathematisch zu interpretieren – es findet keine Division der Ergebnisse durch die funktionelle Einheit statt. Das „je“ bedeutet lediglich, dass die Ergebnisse auf die funktionelle Einheit bezogen sind. Zur Ermittlung der Ressourceneffizienz wird das ermittelte Ergebnis dann mit der funktionellen Einheit mathematisch in Bezug gesetzt: Die funktionelle Einheit als Nutzen des betrachteten Produktsystems wird durch die Ergebnisse der betrachteten Kategorien dividiert.

Für alle Kategorien der betrachteten Dimensionen gilt Folgendes:

- Je größer der Wert für die Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“, desto größer ist die Aufzehrung der Ressourcen – die Ressourceneffizienz ist entsprechend gering.
- Je größer der Wert für die Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“, desto größer ist das potenzielle Risiko, dass es zu einer Einschränkung der Verfügbarkeit kommt – die Ressourceneffizienz ist entsprechend gering.
- Je größer der Wert für die Kategorien der Dimension „Umweltauswirkungen“, desto höher sind die potenziellen Umweltauswirkungen – die Ressourceneffizienz ist entsprechend gering.

Dabei ist wichtig zu bedenken, dass die in der ESSENZ-Methode als Standard definierten 21 Kategorien immer zusammen betrachtet werden müssen, um eine Aussage über die Ressourceneffizienz treffen zu können.

Für das Beispiel des Silber- und Aluminiumkabels ist die zugehörige funktionelle Einheit (FU): Übertragung von 0,06 kWh bei gleichem Spannungsabfall über 5 m (0,012 kWh/m). Die FU wird durch das Ergebnis der Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch (in diesem Fall für  $ADP_{\text{elementar}}$  mit 0,453 kg Sb-Äqv.) dividiert (Gl. 5.9):

$$RE_{AR} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{0,453 \text{ kg Sb-Äqv.}} = 0,026 \left[ \frac{\text{kWh/m}}{\text{kg Sb-Äqv.}} \right]. \quad \text{Gl. 5.9}$$

Die RE des Aluminiumkabels für die gleiche Kategorie wird nach Gl. 5.10 bestimmt:

$$RE_{AR} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{1,96 \times 10^{-10} \text{ kg Sb-Äqv.}} = 6,1 \times 10^7 \left[ \frac{\text{kWh/m}}{\text{kg Sb-Äqv.}} \right] \quad \text{Gl. 5.10}$$

Die Ergebnisse der anderen Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomischen Verfügbarkeit“ werden ebenso zu der FU ins Verhältnis gesetzt. Dies wird exemplarisch für die Wirkungskategorie politische Stabilität in Gl. 5.11 und Gl. 5.12 dargestellt:

$$RE_{PS} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{7.386.395 [-]} = 1,63 \times 10^{-9} \left[ \frac{\text{kWh/m}}{[-]} \right]. \quad \text{Gl. 5.11}$$

$$RE_{PS} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{2266 [-]} = 5,3 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{kWh/m}}{[-]} \right]. \quad \text{Gl. 5.12}$$

Das gleiche Vorgehen ist auch für die andere Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ anzuwenden. Die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ wird über Screeningindikatoren dargestellt, die nicht in die direkte RE-Bewertung eingehen.

Für die Dimension „Umweltauswirkungen“ wird nach dem gleichen Vorgehen wie bei der Verfügbarkeitsbetrachtung die Ressourceneffizienz ermittelt (exemplarisch für die Wirkungskategorie Klimawandel in Gl. 5.13 und Gl. 5.14):

$$RE_{GWP} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{117 \text{ CO}_2\text{-Äqv.}} = 1,0 \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{kWh/m}}{[\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}]} \right]. \quad \text{Gl. 5.13}$$

$$RE_{GWP} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Ressource}} = \frac{0,012 \text{ kWh/m}}{190 \text{ CO}_2\text{-Äqv.}} = 6,3 \times 10^{-5} \left[ \frac{\text{kWh/m}}{[\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}]} \right]. \quad \text{Gl. 5.14}$$

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

# Kapitel 6

## Interpretation der Ergebnisse

### Inhaltsverzeichnis

6.1	Unsicherheiten in der Bewertung	61
6.2	Interpretation der Verfügbarkeit	64
6.2.1	Interpretation der physischen Verfügbarkeit	64
6.2.2	Interpretation der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit	65
6.3	Interpretation der gesellschaftlichen Akzeptanz	69
6.4	Interpretation der Umweltbewertung	70
6.5	Interpretation der ermittelten Ressourceneffizienz	72
6.6	Interpretation des Gesamtergebnisses	73

Im Folgenden wird auf die Interpretation der in Kap. 5 berechneten Ergebnisse eingegangen. Dazu werden in einem ersten Schritt sowohl die Unsicherheiten der Gesamtmethode als auch der einzelnen Methodenbestandteile vorgestellt. Anschließend gibt es Hinweise für die Interpretation der betrachteten Kategorien und Dimensionen. Die Interpretation aller Kategorien für die Bewertung der Ressourceneffizienz des untersuchten Produktsystems ist wichtig, um Zielkonflikte innerhalb sowie zwischen den Dimensionen transparent aufzuzeigen und in die Handlungsempfehlung einfließen zu lassen.

### 6.1 Unsicherheiten in der Bewertung

Im Folgenden wird auf die Unsicherheiten der ESSENZ-Methode eingegangen. Dieser Punkt ist für eine adäquate Interpretation der Ergebnisse von großer Bedeutung.

*Da die ESSENZ-Methode auf der Ökobilanzmethodik [10] aufbaut, gelten die mit der Ökobilanzmethode einhergehenden Unsicherheiten auch für die ESSENZ-Methode [59]. Dazu zählen die Unsicherheiten der Inventardaten und der Modellierung von komplexen Produktsystemen im Allgemeinen.*

*Daher sollte immer – wie in der Ökobilanz üblich – eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Eine Sensitivitätsanalyse ist ein Verfahren, mit dem eingeschätzt werden kann, wie empfindlich das Ergebnis einer Analyse auf die Änderung einzelner Parameter reagiert. Für die ESSENZ-Methode kann eine Sensitivitätsanalyse angewendet, um*

- Datenunsicherheiten bei der Modellierung des Produktsystems zu analysieren und darauf basierend über die Vernachlässigung oder Aufnahme von Lebenswegabschnitten oder Prozessmodulen zu entscheiden,*
- die Auswahl von Allokationsverfahren zu überprüfen,*
- die Berechnung der Wirkungsindikatorbeträge zu analysieren, vor allem den Einfluss des Grenzwertes,*
- oder den Einfluss der Gewichtung zu bestimmen.*

*Anschließend wird beurteilt, ob die sich aus der Sensitivitätsanalyse ergebenden Ergebnisse Einfluss auf die Entscheidungsfindung (z. B. die ermittelten Hotspots) haben.*

*Für die Bewertung der Verfügbarkeit werden nur die Materialien des Mengengerüsts betrachtet und nicht die Metalle und fossilen Rohstoffe des gesamten Lebenswegs. Der Hintergrund für dieses Vorgehen liegt in der Tatsache, dass bestehende Ökobilanzdatenbanken die Massen der über den Lebenszyklus verwendeten Metalle und fossilen Rohstoffe nicht korrekt wiedergeben können. Dies führt dazu, dass eine Lebenswegbetrachtung in den Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“, „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ und der Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ nicht durchgeführt werden kann. Daher ist es vor allem für vergleichenden Produktalternativen wichtig zu untersuchen, ob es über den Lebensweg zu einem unterschiedlichen Materialeinsatz z. B. durch Hilfsstoffe in der Produktion kommt und wenn ja, diesen bei der Bewertung sowie Interpretation zu berücksichtigen.*

*Es werden potenzielle Auswirkungen bewertet, die nicht als tatsächliche Auswirkungen zu verstehen sind. Obwohl die Indikatoren zur Messung von Umweltauswirkungen und physischen Verfügbarkeit ( $ADP_{\text{elementar}}$  und  $ADP_{\text{fossil}}$ ) seit Jahren in der Ökobilanz angewendet werden, sind die zugrunde gelegten Modelle der Indikatoren mit Unsicherheiten behaftet [11], [56], [57], [58], [75], [76]. Der AADP-Indikator wurde bisher in wenigen Fällen in Ökobilanzen verwendet, da nur für eine geringe Anzahl von Metallen Charakterisierungsfaktoren zur Verfügung stehen. Wichtige Umweltauswirkungen wie Landnutzung und Verlust von Biodiversität können nicht in die Bewertung miteinbezogen werden, weil keine aussagekräftigen Bewertungsmethoden zur Verfügung stehen [59].*

*Für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ werden für 11 Kategorien in der ESSENZ-Methode Charakterisierungsfaktoren hinterlegt. Dies liegt vor allem am Mangel von Daten z. B. für Unternehmen, die Zwischenprodukte vertreiben. Zudem sind die verwendeten Daten zur Berechnung der Wirkungsindikatorbeträge wie die*

geförderten Rohstoffmengen nach USGS [22] und BGS [23] ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet. Die Einschätzung des potenziellen Risikos der eingeschränkten Verfügbarkeit eines Metalls oder Produktsystems wird zudem vom Grenzwert beeinflusst. Die verwendeten Grenzwerte sind subjektiv und somit wissenschaftlich schwer zu belegen. Subjektive Werte können die Interpretation der Ergebnisse erschweren, insbesondere dann, wenn der Auswertende eine differenzierte Meinung vertritt. Die verwendeten Indikatoren beschreiben vergangene Zustände und setzen stabile Zustände voraus. Prognosen für die Zukunft werden nicht miteinbezogen. Es gilt daher bei der Interpretation zu berücksichtigen, dass unvorhergesehene Ereignisse nicht abgebildet werden können. Zudem können die Kategorien nur miteinander verglichen werden, wenn eine Gewichtung verwendet wird. Als Standard wird in der ESSENZ-Methode eine Gleichgewichtung vorgeschlagen, bei der allen Kategorien die gleiche Bedeutung zukommt. Die ESSENZ-Methode stellt es jedoch jedem Anwender frei, diese Gleichgewichtung den individuellen Bedürfnissen anpassen. Die Sensitivität der Gewichtung sollte ebenfalls bei der Interpretation analysiert werden.

Die Bewertung der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ erfolgt derzeit nur für Primärrohstoffe. Verwendete Sekundärrohstoffe werden mit den gleichen Charakterisierungsfaktoren bewertet, die für Primärrohstoffe gelten. Dies verhindert, dass potenzielle Risiken einer eingeschränkten Verfügbarkeit nicht betrachtet werden. Es kann jedoch auch dazu führen, dass die potenziellen Risiken über- oder unterschätzt werden. Daher ist es bei der Erarbeitung von Handlungsempfehlungen für das betrachtete Produktsystems wichtig, eine genauere Unterscheidung von Primär- und Sekundärrohstoffen vorzunehmen.

Die Indikatoren der Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ sind Screeningindikatoren und sollten bei der Interpretation auch als solche betrachtet werden. Die zugrunde liegenden Daten sind ebenfalls mit Unsicherheiten behaftet.

Die Quantifizierung des Nutzens wird in der ESSENZ-Methode über die funktionelle Einheit realisiert. Diese stellt die Quantifizierung des Nutzens eines Produktsystems dar [77]. Dennoch kann auch jedes betrachtete Produktsystem wichtige Eigenschaften ausweisen, die nicht über die funktionelle Einheit abgebildet sind. Dies muss bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Für vergleichende Produktsysteme wird eine Möglichkeit zur Aggregation bereitgestellt. Die Aggregation kann allerdings nur über eine Gewichtung realisiert werden. Da Gewichtungen rein subjektiv sind, müssen diese bei der Interpretation der Ergebnisse ausreichend reflektiert werden.

## 6.2 Interpretation der Verfügbarkeit

Im Folgenden wird die Interpretation der Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“ und „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ erläutert.

### 6.2.1 Interpretation der physischen Verfügbarkeit

Die Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ wird mit dem AADP- bzw. mit den ADP-Indikatoren bewertet. Die Bedeutung der einzelnen Metalle und fossilen Rohstoffe für die Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch sind zu ermitteln. Dabei gilt, je höher der ermittelte Wert, desto höher ist das Risiko, dass die Verfügbarkeit aufgrund von fehlenden Ressourcenvorkommen eingeschränkt sein könnte. Es ist wichtig zu beachten, dass die  $ADP_{\text{elementar}}$ -,  $ADP_{\text{fossil}}$ - und AADP-Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Weitere Hinweise zur Interpretation finden sich auch in den entsprechenden Veröffentlichungen [11], [14], [15], [16].

In Abb. 6.1 ist der Vergleich von Silber und Aluminium der beiden Kabel dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die  $ADP_{\text{elementar}}$ -Werte des Silbers im Silberkabel deutlich höher sind als die des Aluminiums im Aluminiumkabel. Demnach sind die Silberbestände geringer, und es besteht ein höheres potenzielles Risiko bei der Versorgungssicherheit. Der  $ADP_{\text{fossil}}$ -Wert des Erdöls ist nicht abgebildet, da die Ergebnisse der Metalle ( $ADP_{\text{elementar}}$ ) und fossilen Rohstoffe ( $ADP_{\text{fossil}}$ ) nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Da die Mengen des eingesetzten Erdöls bei beiden Kabeln gleich ist, kann sie bei einem Vergleich der Kabel vernachlässigt werden.

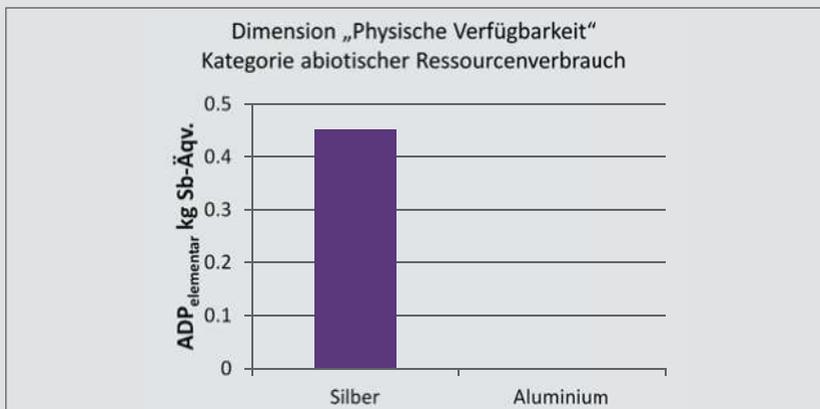


Abb. 6.1 Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: physische Teildimension

### 6.2.2 Interpretation der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit

Die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ wird über elf Kategorien bewertet. Für die Interpretation der Ergebnisse gilt erneut das Prinzip „je höher, desto risikobehafteter“. Weitere Hinweise zur Interpretation finden sich auch in den entsprechenden Veröffentlichungen [9], [19], [27], [36], [78].

In Tab. 6.1 sind die Ergebnisse der Kategorien der Dimension „Sozio-ökonomischen Verfügbarkeit“ für das Beispiel Silber- und Aluminiumkabel dargestellt. Ergebnisse mit dem Wert 0 bedeuten, dass hier kein potenzielles Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit vorliegt. Erkennbar ist auch, dass die Werte für Erdöl im Vergleich zu Silber und Aluminium sehr gering sind. Für das betrachtete Produktsystem hat Erdöl demnach eine geringe Relevanz.

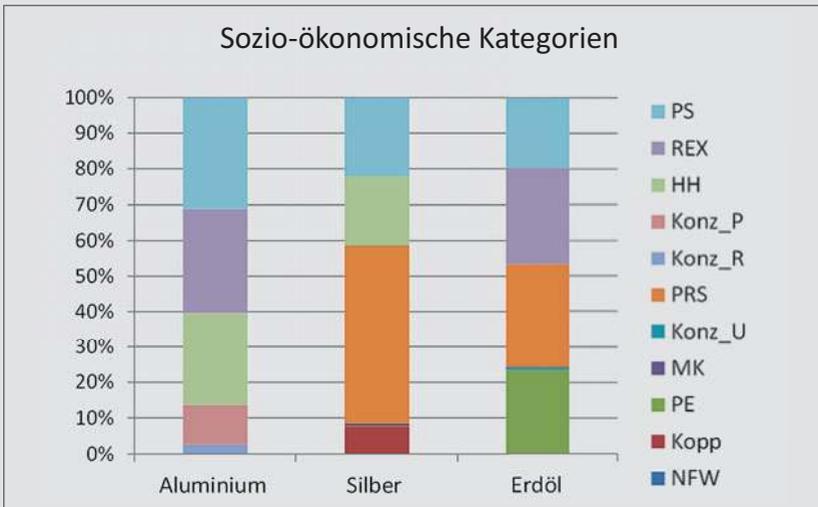
**Tab. 6.1** Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: Ergebnisse der Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“

Kategorien	Metalle und fossile Rohstoffe		
	Aluminium	Silber	Erdöl
NFW	0	0	0
Kop	0	5482962950	0
PE	0	0	16711
MK	0	372962941	0
Konz_U	0	0	560
PRS	0	35250948657	20655
Konz_R	344597	0	0
Konz_P	1415031	0	0
HH	3363567	13618576645	0
REX	3785117	0	19292
PS	4029561	15396791478	13938

Die ermittelten Ergebnisse für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ sollten für eine bessere Interpretation visualisiert werden. Im Folgenden werden drei Visualisierungsmöglichkeiten vorgestellt.

Zuerst wird der prozentuale Anteil der Kategorie hinsichtlich der eingesetzten Metalle und fossilen Rohstoffe dargestellt. Dazu werden die Ergebnisse aller 11 Kategorien für jedes betrachtete Metall oder den fossilen Rohstoff aufsummiert und ihr Gesamtwert auf 100 % gesetzt. So wird der prozentuale Anteil einer jeden Kategorie am Gesamtergebnis für das Metalls und fossilen Rohstoffs verdeutlicht.

Abb. 6.2 ist zu entnehmen, dass die Verfügbarkeit des Aluminiums im Aluminiumkabel besonders von den Kategorien Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX), politische Stabilität (PS), Handelshemmnisse (HH) und Konzentration der Produktion (Konz\_P) beeinflusst wird. Die Verfügbarkeit des Silbers im Silberkabel wird von den Kategorien Preisschwankungen (PRS), Handelshemmnisse (HH), politische Stabilität (PS) und Koppelproduktion (Kopp) bestimmt. Für Erdöl sind die Kategorien Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX), Preisschwankungen (PRS), Primärmaterialereinsatz (PE) und politische Stabilität (PS) bedeutend. Beim Ergebnis des Primärmaterialereinsatzes für Erdöl sollte bedacht werden, dass der Wert einen Worst Case darstellt, da die Annahme getroffen wurde, dass fossile Rohstoffe nicht recycelt werden. Für den Fall der Kabelummantelung muss diese Annahme nicht zutreffen, da womöglich der Kunststoff der Ummantelung teilweise aus Sekundärmaterial hergestellt ist. Dabei sollten die entsprechenden Unsicherheiten der Wirkungsindikatoren bedacht werden. Der ETI als Indikator der Kategorie Handelshemmnisse beispielsweise betrachtet nicht nur Restriktionen auf Metalle und fossile Rohstoffe, sondern bewertet die generelle Situation eines Landes hinsichtlich Handelseinschränkungen von Ländern.



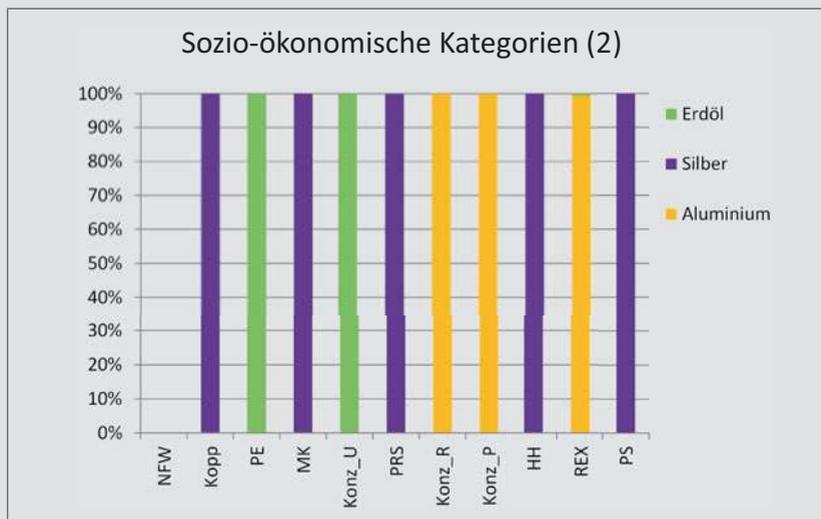
**Abb. 6.2** Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: prozentualer Anteil der sozio-ökonomischen Kategorien an den Metallflüssen

Da die ermittelten Charakterisierungsfaktoren eine Normalisierung beinhalten, enthält ein Vergleich der Kategorien zueinander auch automatisch immer einer Gewichtung (in der ESSENZ-Methode gilt die Gleichgewichtung als Standard). Ohne eine Gewichtung kann keine Aussage über die Bedeutung der Kategorien zueinander

getroffen werden. Diese Gewichtung muss bei der Interpretation der Ergebnisse Berücksichtigung finden.

Jeder Anwender kann diese Gleichgewichtung seinen individuellen Bedürfnissen anpassen. Dazu muss der Anwender für jede Kategorie Gewichtungsfaktoren bereitstellen. Mit der angepassten Gewichtung ändert sich die Relevanz der einzelnen Kategorien für die Metalle und fossilen Rohstoffe. Um in Erfahrung zu bringen, welches Metall welche Wirkungskategorie dominiert, wird das Gesamtergebnis einer jeden Kategorie auf 100% gesetzt. Anschließend erfolgt die Ermittlung des prozentualen Anteils der betrachteten Metalle und fossilen Rohstoffe an der Kategorie.

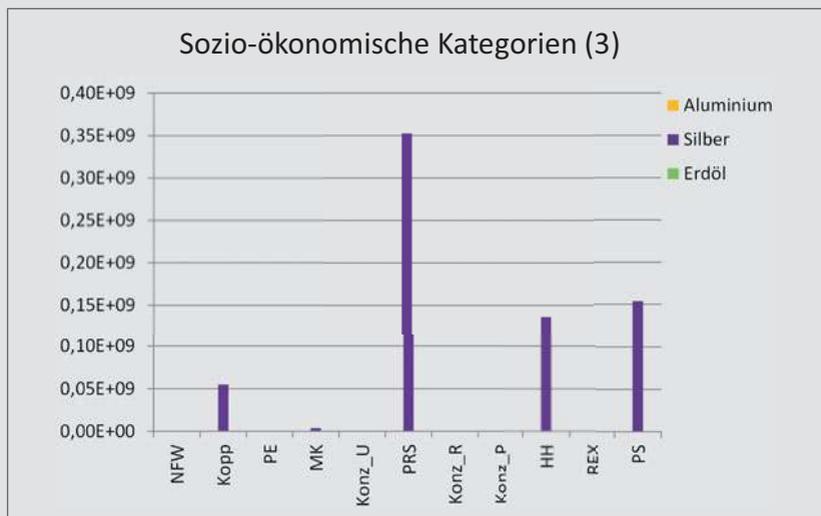
In Abb. 6.3 wird dargestellt, welche Wirkungskategorie von Erdöl, Silber und Aluminium dominiert wird. Es ist zu erkennen, dass Aluminium die Kategorien Konzentration der Produktion (Konz\_P), Konzentration der Reserven (Konz\_R) und Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX) dominiert. Silber hingegen beherrscht die Kategorien politische Stabilität (PS), Koppelproduktion (Kopp), Handelshemmnisse (HH), Minenkapazität (MK) und Preisschwankung (PRS). Die Kategorien Primärmaterialanteil (PE) und Unternehmenskonzentration (Konz\_U) sind für Erdöl bedeutsam. Für das betrachtete Produktsystem ist die Kategorie Nachfragewachstum (NFW) unbedeutend. Sowohl für Erdöl als auch Aluminium und Silber besteht kein potenzielles Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit für diese Kategorie.



**Abb. 6.3** Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: prozentualer Anteil der Metallflüsse an den sozio-ökonomischen Kategorien

Eine Betrachtung der Gesamtergebnisse der Kategorien im Vergleich ist ebenfalls durchzuführen. Dazu werden die ermittelten Gesamtergebnisse der Kategorien in einem Diagramm aufgetragen.

Wie in Abb. 6.4 zu sehen ist, hat die Kategorie Preisschwankung (PRS) die größte Bedeutung. Dominant sind auch die Kategorien politische Stabilität (PS) und Koppelproduktion (Kopp). Silber bildet für alle dominanten Kategorien den Hotspot.



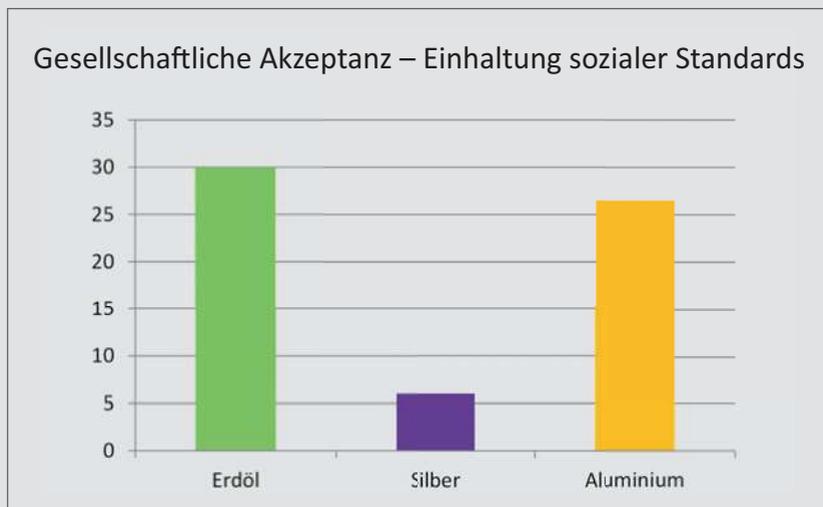
**Abb. 6.4** Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: Vergleich der sozio-ökonomischen Kategorien

Insgesamt werden drei verschiedenen Visualisierungsmöglichkeiten vorgeschlagen, um alle Gesichtspunkte der Ergebnisse beleuchten zu können. Zuerst erfolgt eine prozentuale Betrachtung der eingesetzten Metalle und fossilen Rohstoffe, um in Erfahrung zu bringen, welche Kategorie für welches Metall und welche fossilen Rohstoffe besondere Bedeutung hat (Abb. 6.2). Die zweite Visualisierung ist die prozentuale Darstellung der Kategorien, die darstellt, welche Kategorie von welchem Metall oder fossilen Rohstoff dominiert wird (Abb. 6.3). Abschließend werden die Ergebnisse der betrachteten Kategorien dargestellt (Abb. 6.4), um zu visualisieren, welche Kategorie in dem untersuchten Produktsystem das größte potenzielle Risiko aufweist.

### 6.3 Interpretation der gesellschaftlichen Akzeptanz

Für die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ werden Ergebnisse für die zwei Kategorien Einhaltung von sozialen Standards und Einhaltung von Umweltstandards ermittelt. Für die Interpretation ist die Bedeutung der eingesetzten Metalle und fossile Rohstoffe für die beiden Kategorien zu betrachten. Diese sind allerdings nicht direkt miteinander vergleichbar, da sie auf verschiedenen methodischen Herangehensweisen beruhen.

In Abb. 6.5 ist das Ergebnis für die gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber sozialen Standards für das Silber- und Aluminiumkabel dargestellt. Zu sehen ist, dass Erdöl das größte Risiko aufweist, wobei das Risiko für Aluminium nur geringfügig geringer ist. Die Bedeutung des Silbers im betrachteten Produktsystem ist am geringsten. Die Bedeutung des Silbers im betrachteten Produktsystem ist am geringsten. Die beim Abbau der Metalle Aluminium und Silber als auf bei der Gewinnung des fossilen Rohstoffs Erdöl beteiligten Länder, haben demnach alle Schwierigkeiten, soziale Standards einzuhalten – es liegt z. B. Kinder- oder Zwangsarbeit vor. Da Metalle und fossile Rohstoffe zu großen Anteilen in Schwellen- und Entwicklungsländern wie China abgebaut werden, wo soziale Standards bisher weniger Beachtung finden, ist das Ergebnis nicht überraschend.

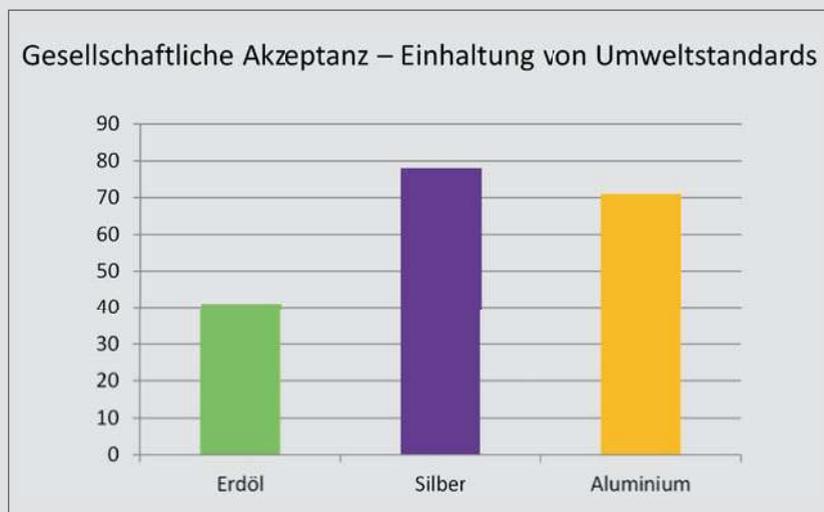


**Abb. 6.5** Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: Vergleich der gesellschaftlichen Akzeptanz hinsichtlich sozialer Standards

Haben soziale Aspekte beim Kunden einen hohen Stellenwert, könnte die Kaufentscheidung tendenziell eher zugunsten eines Produktes ausfallen, bei dessen Herstellung potenziell weniger soziale Standards verletzt werden.

Neben der Einhaltung der sozialen Standards kann auch das Verletzen von Umweltstandards die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ beeinflussen.

In Abb. 6.6 ist das Ergebnis für die gesellschaftliche Akzeptanz hinsichtlich der Umweltstandards für das Aluminium- und Silberkabel aufgetragen. Silber bildet den Hotspot, gefolgt von Aluminium. Erdöl hat ein geringeres potenzielles Risiko. Die Länder, in denen Silber abgebaut wird (z. B. China, Mexiko, Peru), haben ein größeres potenzielles Risiko, dass Umweltstandards verletzt werden, als das bei den Aluminium abbauenden Ländern (z. B. Australien, Brasilien, Guinea) der Fall ist.



**Abb. 6.6** Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: Vergleich der gesellschaftlichen Akzeptanz hinsichtlich Umweltstandards

Hier gilt ebenfalls: Sollten Konsumenten der Einhaltung der Umweltstandards einen hohen Stellenwert beimessen, kann dies die Kaufentscheidung beeinflussen. Die Nachfrage nach dem Produkt könnte sinken.

## 6.4 Interpretation der Umweltbewertung

Für die Dimension „Umweltauswirkungen“ werden 5 Kategorien betrachtet. Für die Interpretation gilt: Je größer die Werte für die Kategorien der Dimension „Umweltauswirkungen“ ausfallen, desto schlechter schneidet das betrachtete Produktsystem im Hinblick auf die Umweltauswirkungen ab.

In Abb. 6.7 sind die Umweltauswirkungen des Aluminium- und Kupferkabels dargestellt. Zur Erstellung der Abbildungen werden die Gesamtergebnisse einer Kategorie für die Metalle und fossilen Rohstoffe dargestellt.

Das im Mantel des Kabels genutzte Erdöl hat im Produktsystem in allen betrachteten Wirkungskategorien kaum Auswirkungen. Das Aluminium des Kabels hingegen weist einen Hotspot für die Kategorien Eutrophierung (EP), Klimaänderung (GWP) und Smog (POCP) auf. Das Silber des Kabels wiederum bildet einen Hotspot für die Kategorien Versauerung (AP) und Abbau der Ozonschicht (ODP). Es wäre hier nun notwendig, über den Lebensweg der Kabel zu analysieren, durch welche Prozesse diese Hotspots bestimmt sind.

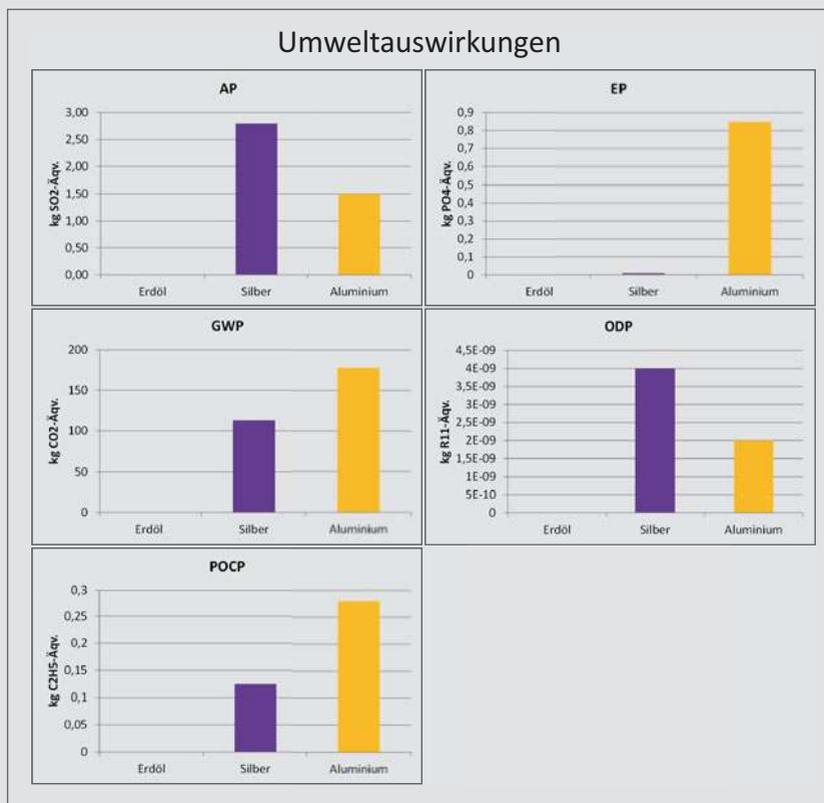


Abb. 6.7 Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: Umweltauswirkungen

## 6.5 Interpretation der ermittelten Ressourceneffizienz

Der Nutzen wird über die funktionelle Einheit dargestellt. Daher sollte bei der Interpretation der Ergebnisse immer berücksichtigt werden, durch welche Funktion des Produktsystems quantifiziert wird und welche Zusatznutzen es ggf. noch gibt, die nicht berücksichtigt werden, aber in die Analyse miteinfließen könnten.

Aus den Berechnungen der Ressourceneffizienz in Abschn. 5.5 in Gl. 5.9 und Gl. 5.10 ist erkennbar, dass der Wert des Aluminiumkabels deutlich größer ist als der Wert des Silberkabels. Dies lässt den Schluss zu, dass die Ressourceneffizienz des Aluminiumkabels für die Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ höher ist als die des Silberkabels. Die Ressourceneffizienz für die Kategorie Politische Stabilität in Gl. 5.11 und Gl. 5.12 ist für das Silberkabel höher als für das Aluminiumkabel. Die Ressourceneffizienz für die Kategorie Klimawandel in den Gl. 5.13 und Gl. 5.14 weist dem Silberkabel einen größeren Wert als den des Aluminiumkabels zu.

Die Verwendung von ökonomischen Kennzahlen ist zusätzlich möglich, wird von den Autoren allerdings kritisch gesehen. Es besteht die Gefahr, dass ein großer ökonomischer Nutzen (z. B. ein teureres Produkt) hohe Umweltauswirkungen ausgleicht und somit als ressourceneffizienter interpretiert wird.

Es werden folgende Annahmen getroffen: Für ein Silberkabel muss der Kunden 5 € und für ein Aluminiumkabel 4,50 € zahlen. Das Unternehmen macht 1,50 € Gewinn am Silberkabel und 2,50 € Gewinn am Aluminiumkabel. Für die Ressourceneffizienz würde sich dies wie folgt darstellen:

$$RE_{KW} = \frac{\text{Nutzen Silberkabel}}{\text{Ressource}} = \frac{5 \text{ Euro}}{117 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}} = 0,043 \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}} \right]$$

Gl. 6.1

$$RE_{KW} = \frac{\text{Nutzen Aluminiumkabel}}{\text{Ressource}} = \frac{4,50 \text{ Euro}}{190 \text{ CO}_2\text{-Äqv.}} = 0,024 \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}} \right].$$

Gl. 6.2

Nach den Berechnungen für das Silber- und Aluminiumkabel in den Gl. 6.1 und Gl. 6.2 wäre die Ressourceneffizienz des Silberkabels höher. Dies ergibt sich aus dem höheren ökonomischen Wert des Silberkabels und seiner kleineren Umweltauswirkung im Vergleich zum Aluminiumkabel.

Nun erfolgt die Berechnung mit dem Gewinn des Unternehmens in Gl. 6.3 und Gl. 6.4:

$$RE_{KW} = \frac{\text{Nutzen Silberkabel}}{\text{Ressource}} = \frac{1,50 \text{ Euro}}{117 \text{ kg CO}_2\text{-Äqv.}} = 0,0128 \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}} \right]$$

Gl. 6.3

$$RE_{KW} = \frac{\text{Nutzen Aluminiumkabel}}{\text{Ressource}} = \frac{2,50 \text{ Euro}}{190 \text{ CO}_2\text{-Äqv.}} = 0,0132 \left[ \frac{\text{Euro}}{\text{kg CO}_2\text{-Äqv.}} \right]$$

Gl. 6.4

Die Berechnung der Ressourceneffizienz über die Gewinne des Unternehmens zeigt zwei Problematiken mit der Verwendung von monetären Werten auf. Zum einen ist nun das Aluminiumkabel ressourceneffizienter als das Silberkabel. Demnach bestimmt der eingesetzte monetäre Wert stark, welches Kabel ressourceneffizienter ist. Zum anderen wird das Aluminiumkabel zwar als ressourceneffizienter ausgewiesen, es ist jedoch nicht umweltfreundlicher.

Herausforderungen bei der Verwendung monetärer Werte bestehen aus zwei Gründen. Zum einen können verschiedenste monetäre Werte verwendet werden, die zu einem unterschiedlichen Ressourceneffizienzergebnis führen. Des Weiteren kann ein hoher ökonomischer Wert eine hohe Umweltbelastung oder geringe Verfügbarkeit ausgleichen. Daher ist die Aussagekraft bei der Verwendung von monetären Werten gering.

## 6.6 Interpretation des Gesamtergebnisses

Bei der Interpretation des Gesamtsystems werden alle analysierten Dimensionen zusammen betrachtet und Schlussfolgerungen gezogen. Die Betrachtung aller in der ESSENZ-Methode berücksichtigten Kategorien für die Bewertung der Ressourceneffizienz ist wichtig, um Zielkonflikte innerhalb sowie zwischen den Dimensionen transparent aufzuzeigen und in die Handlungsempfehlung einfließen zu lassen.

Für das Beispiel des Silber- und Aluminiumkabels können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Bedeutung des eingesetzten Erdöls ist gering.
- Das Ergebnis für die Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ zeigt, dass das potenzielle Risiko einer nicht ausreichenden Verfügbarkeit für Silber größer ist.
- Das Aluminiumkabel ist somit im Hinblick auf die Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ ressourceneffizienter als das Silberkabel.

- Für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ bilden die Kategorien PRS, PS und Kop die Hotspots. Für diese Kategorien hat Silber im Produktsystem ein höheres potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit als Aluminium.
- Für die Kategorien PRS, PS, MK und Kop schneidet das Aluminiumkabel ressourceneffizienter ab als das Silberkabel. Im Gegenzug ist das Silberkabel bezogen auf die Kategorien REX, HH und Konz\_P hingegen ressourceneffizienter.
- Im Hinblick auf die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ ist in der Kategorie Einhaltung der sozialen Standards das potenzielle Risiko für Aluminium höher. Für die Kategorie Einhaltung von Umweltstandards bietet sich ein umgekehrtes Bild.
- Bei der Dimension „Umweltauswirkungen“ sind die Kategorien EP, GWP und POCP vom Aluminium und die Kategorien AP und ODP vom Silber dominiert.

Das Beispiel zeigt, wie wichtig die Betrachtung aller Dimensionen für die Bewertung der Ressourceneffizienz ist. Sowohl zwischen den als auch innerhalb der Dimensionen bestehen Zielkonflikte (z. B. schneidet Silber in der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ schlecht ab, dafür aber besser in der Kategorie Einhaltung sozialer Standards), die mit der ESSENZ-Methode transparent aufgezeigt werden können und in die Handlungsempfehlung einzubeziehen sind.

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

# Kapitel 7

## Aggregation zum Vergleich von Produktalternativen

Die im Folgenden beschriebene Aggregation zum Vergleich zweier Produktalternativen ist optional. Sie kann, muss aber nicht bei vergleichenden Analysen angewendet werden.

Da bei einer Aggregation die transparente Darstellung von bestehenden Zielkonflikten sowohl zwischen den als auch innerhalb der Dimensionen verloren geht, darf die Auswertung, wie in Kap. 6 dargestellt, keinesfalls vernachlässigt werden. Die hier erläuterte Aggregation ist eine Erweiterung der zuvor durchgeführten detaillierten Analyse und unterstützt die Interpretation der Ergebnisse.

Zuerst wird kurz erläutert, warum eine Aggregation aller Dimensionen innerhalb der ESSENZ-Methode nicht möglich ist und daher auf einen prozentualen Vergleich zurückgegriffen werden muss.

In Abb. 7.1 wird schematisch dargestellt, welche methodischen Schritte bei einer Aggregation und/oder Gewichtung in der ESSENZ-Methode notwendig wären. Die Teildimension „Physische Verfügbarkeit“ besteht aus nur einer Kategorie, die mit drei verschiedenen Indikatoren messbar gemacht werden kann. Die drei Indikatoren können nicht zu einem Wert aggregiert werden, sodass die Kategorie ggf. drei nicht aggregierbare Ergebnisse hat, die einzeln dargestellt werden müssen. Die Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ haben aufgrund der verwendeten Skalierung alle die gleiche Größenordnung. Da ihre Berechnung eine Normalisierung beinhalten, können die Kategorie nur miteinander verglichen werden, wenn



**Abb. 7.1** Schematische Darstellung notwendiger Schritte zur Aggregation der einzelnen Dimensionen

eine Gewichtung verwendet wird. Ohne eine Gewichtung kann keine Aussage über die Bedeutung der Kategorien untereinander getroffen werden. Als Standard wird in der ESSENZ-Methode eine Gleichgewichtung verwendet, sodass allen Kategorien die gleiche Bedeutung zukommt. Jedem Anwender steht es allerdings frei, diese Gleichgewichtung seinen individuellen Bedürfnissen anzupassen.

Bei Festlegung von spezifischen Gewichtungsfaktoren ( $GF_K$ ) ist es möglich, die Kategorien zu einem Gesamtergebnis für die Teildimension ( $GD_{\text{Sozio-ökonomische Verfügbarkeit}}$ ) zu aggregieren (siehe Gl. 7.1):

$$GD_{\text{Sozio-ökonomische Verfügbarkeit}} = \sum(GF_K \times GE_K) \quad \text{Gl. 7.1}$$

Die ökologische Dimension besteht aus fünf Kategorien mit unterschiedlichen Einheiten, die normalisiert und gewichtet werden müssten, um sie zu aggregieren. Da mit einer in der Ökobilanz einhergehender Normalisierung [79], [80] auf globale Referenzwerte große Herausforderungen in der Interpretation einhergehen [59], [81], wird in der ESSENZ-Methode keine solche Normalisierung verwendet oder empfohlen. Den Unsicherheiten einer solchen Vorgehensweise würde der Mehrwert einer Aggregation entgegenstehen.

Der Vergleich der Ressourceneffizienz zweier Produktalternativen kann daher nach dem im Folgenden beschriebenen Vorgehen durchgeführt werden. Es gilt, dass aggregierte Ergebnisse nicht für die Verwendung in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen herangezogen werden können. Da bei aggregierten Ergebnissen die Transparenz und Aussagekraft abnimmt, ist die Interpretation der Einzelergebnisse, wie in Kap. 6 beschrieben, nicht durch die hier vorgestellte Vorgehensweise ersetzbar. Der Vergleich zweier Produktalternativen basiert auf den in Kap. 5 ermittelten Ergebnissen.

Bevor eine Aggregation durchgeführt werden kann, müssen für die ermittelten Ergebnisse einer jeden Kategorie die prozentualen Anteile ausgerechnet werden. Dabei wird eine Produktalternative auf 100 % gesetzt und bestimmt, wie die andere Produktalternative prozentual im Vergleich abschneidet. Die Gegenüberstellung der beiden Alternativen zeigt, für welche Kategorie in welcher Dimension ein Produkt besser oder schlechter abschneidet.

In Abb. 7.2 ist ein fiktives Beispiel dargestellt, in dem die Produktalternative A auf 100% gesetzt wird. In dem Beispiel schneidet z. B. die Produktalternative B für die Kategorien Volatilität (V) und Abbau der Ozonschicht (ODP) besser ab als Produktalternative A.

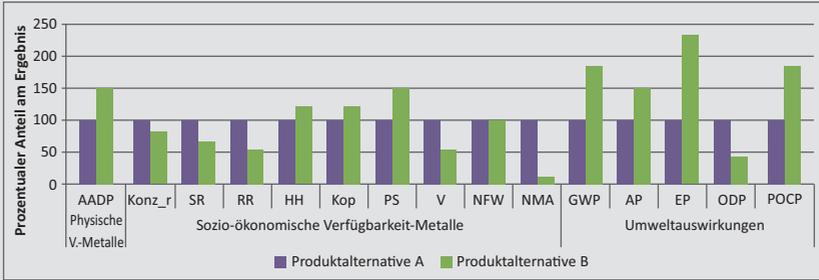


Abb. 7.2 Prozentualer Vergleich der Kategorien zweier Produktalternativen

Das Ergebnis für das Fallbeispiel des Silber- und Aluminiumkabel zeigt, dass aufgrund der hohen Differenz der Ergebnisse für die Wirkungskategorie abiotischer Ressourcenverbrauch für Silber und Aluminium kein sinnvoller Vergleich möglich ist (Abb. 7.3). Der große Unterschied der Ergebnisse von  $10^{11}$  kommt zustande, da der  $ADP_{\text{elementar}}$ -Wert für Aluminium im Gegensatz zu Silber sehr gering ist. Zudem braucht ein Aluminiumkabel auch weniger Material als ein Silberkabel, um die gleiche Funktion zu erfüllen.

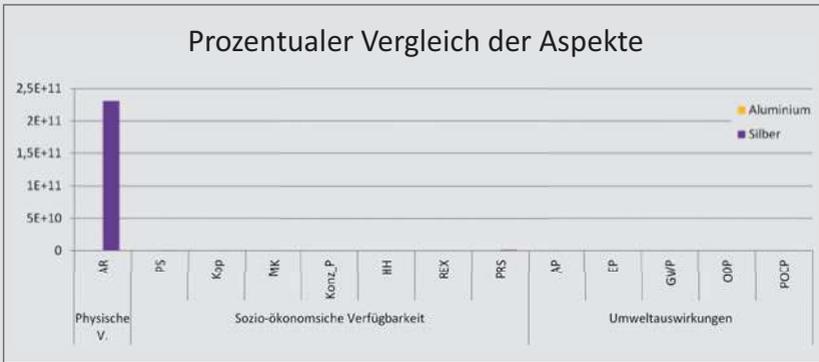
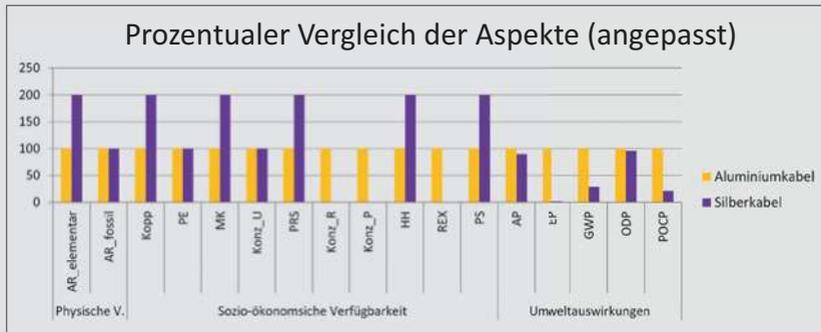


Abb. 7.3 Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: prozentualer Vergleich für alle Kategorien der Dimensionen

Um der Überdimensionierung einzelner Kategorien entgegenzuwirken, wird die maximale Differenz auf 100 % festgelegt. Ist die Abweichung zweier Produktsysteme mehr als 100 %, kann von einem eindeutigen Ergebnis ausgegangen werden. Es gelten die Annahmen in Gl. 7.2:

$$\Delta = \text{Ergebnis A} - \text{Ergebnis B} = \begin{cases} < 0 \cdot \dots \cdot 100\%, \Delta = < 0 \cdot \dots \cdot 100\% \\ \geq 100\%, \Delta = 100\% \end{cases} \quad \text{Gl. 7.2}$$

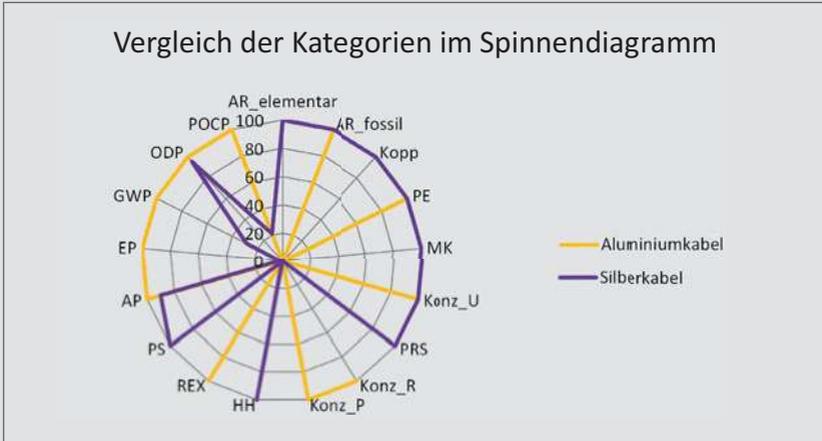
Nach Anwendung der Gl. 7.2 würde das Ergebnis für die Fallstudie dann wie in Abb. 7.4 dargestellt aussehen. Die Unterschiede zwischen den Kategorien sind weiterhin deutlich erkennbar. Allerdings können jetzt alle Kategorie zusammen betrachtet werden, da keiner mehr überdimensioniert dargestellt wird.



**Abb. 7.4** Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: prozentualer angepasster Vergleich für alle Kategorie der Dimensionen

Eine andere Darstellungsform bietet das Spinnendiagramm. In dieser Darstellungsweise wird jeweils die Option, die den größten Beitrag aufweist, auf 100 % gesetzt. Die prozentualen Anteile der anderen Optionen werden entsprechend berechnet. Vorteil dieser Darstellungsweise ist, dass die in Gl. 7.2 beschriebene Umrechnung nicht notwendig ist. Für beide Darstellungsformen sollte bei der Interpretation bedacht werden, dass die Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“ und „Umweltauswirkungen“ nicht automatisch weniger bedeutsam sind, nur weil weniger Kategorien betrachtet werden als in der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“.

In Abb. 7.5 ist das Spinnendiagramm für das Beispiel des Silber- und Aluminiumkabel dargestellt.



**Abb. 7.5** Silber- und Aluminiumkabel: prozentualer Vergleich der Kategorie im Spinnendiagramm

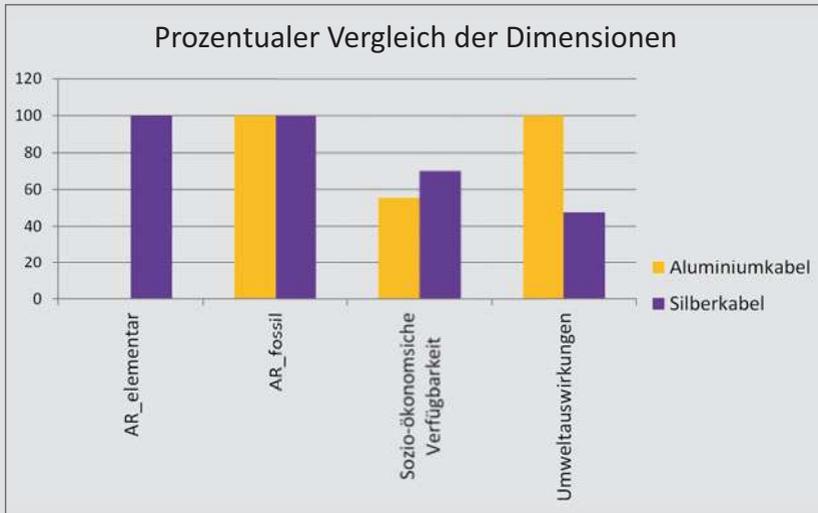
Basierend auf solch einem prozentualen Vergleich können die Teildimensionen „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ und „Umweltauswirkungen“ aggregiert werden. Es wird davon abgeraten die Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ ebenfalls in diese Darstellung einzubeziehen und zu aggregieren, da sie nur über einen Screeningindikator bewertet wird und nicht auf die funktionelle Einheit bezogen ist.

*Es wird an dieser Stelle draufhingewiesen, dass es kein global akzeptiertes Gewichtungssset für die Dimension „Umweltauswirkungen“ oder die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ gibt.* Auch wenn das Thema der Gewichtung von Umweltauswirkungen vielfach diskutiert wird, konnte bisher kein von allen Stakeholdern akzeptierter Konsens erreicht werden. Demnach ist die Festlegung von Gewichtungsfaktoren rein subjektiv und sollte nur der Unterstützung der Interpretation dienen, keinesfalls sollte die Interpretation basierend auf den gewichteten Ergebnissen vorgenommen werden.

Die Aggregation ( $GD_{\text{prozentual,D}}$ ) erfolgt auf prozentualer Ebene durch die Bildung von Mittelwerte mit einem vom Anwender festgelegten Gewichtungsfaktor (GF) (siehe Gl. 7.3). Dabei werden die prozentualen Ergebnisse der einzelnen Kategorien ( $K_{\text{prozentual,D}}$ ) innerhalb einer Dimension zuerst gewichtet und dann durch die Anzahl der betrachteten Kategorie geteilt:

$$GD_{\text{prozentual,D}} = \frac{\sum_1^n (K_{\text{prozentual,D}} \times GF)}{n_K} \tag{Gl. 7.3}$$

In Abb. 7.6 ist das Ergebnis der Aggregation für das Beispiel des Silber- und Aluminiumkabels dargestellt. Wie zu erkennen ist, schneidet das Aluminiumkabel für die Kategorien abiotischer Ressourcenverbrauch ( $AR_{\text{elementar}}$ ) und für die Dimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ besser ab, wohingegen der Beitrag des Silberkabels in der Dimension „Umweltauswirkungen“ geringer ist.



**Abb. 7.6** Ergebnis für Silber- und Aluminiumkabel: prozentualer Vergleich der Dimensionen

Wenn eine Option in allen Dimensionen besser abschneidet, fällt eine Produktentscheidung leicht. Es können jedoch Ergebnisse vorliegen, bei denen eine Produktalternative nur in einer oder zwei Dimensionen besser abschneidet, aber nicht in allen drei Dimensionen. In diesem Fall ist es nicht einfach, eine Entscheidung zu treffen. Generell gilt, dass alle in Kap. 6 betrachteten Dimensionen und Kategorien zusammen betrachtet werden müssen.

Von einer Aggregation der drei Dimensionen wird innerhalb der ESSENZ-Methode abgeraten, da dies zu einer zu hohen Aggregationsebene und somit zu intransparenten Ergebnissen führen kann.

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

## Kapitel 8

# Fazit und Ausblick

Die in diesem Leitfaden vorgestellte ESSENZ-Methode wurde in Kooperation der Technischen Universität Berlin sowie namhaften Industriepartner (Daimler AG, Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e. V., Evonik Industries AG, Siemens AG, ThyssenKrupp Steel Europe AG und Wissenschaftlicher Gerätebau Knauer GmbH) entwickelt. Die ESSENZ-Methode unterstützt die umfassende Messung und Bewertung von Ressourceneffizienz, indem anwendbare Indikatoren zur Verfügung gestellt werden. Dabei werden die Dimensionen „Umweltauswirkungen“, „Physische Verfügbarkeit“ und „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ sowie „Gesellschaftliche Akzeptanz“ betrachtet. Zur umfassenden Bewertung von Ressourceneffizienz zählt auch die transparente Darstellung von Zielkonflikten innerhalb sowie zwischen den Dimensionen, die mithilfe der ESSENZ-Methode möglich ist. Zudem stellt die ESSENZ-Methode eine Operationalisierung von Ressourceneffizienz dar, die es ermöglicht, konkrete Werte zu berechnen und die Ressourceneffizienz eines Produktsystems zu messen. Dabei wird der Nutzen nicht über monetäre Werte – wie sonst üblich –, sondern über die Funktion des Produktsystems bestimmt.

Da Charakterisierungsfaktoren für 36 Metalle und 4 fossile Rohstoffe bereitgestellt werden, ist die Berechnung von Ergebnissen bei Produktsystemen, die nur diese Metalle und fossile Rohstoffe enthalten, einfach umzusetzen.

Sollen weitere Metalle oder andere abiotische (z. B. Sand und Kies) und biotische Ressourcen (z. B. Holz), für die keine Charakterisierungsfaktoren zur Verfügung stehen, ergänzt werden, müssen diese vom Anwender selbst nach dem im Leitfaden erläuterten Schema bestimmt werden.

Zusätzlich zum Leitfaden werden zwei Tabellenkalkulation-Tools zur Verfügung gestellt, die die Anwendung der ESSENZ-Methode erleichtern. Ein Tabellenkalkulation-Tool unterstützt bei der Berechnung der Ergebnisse, indem der Anwender nur die in dem untersuchten Produktsystem verwendeten Mengen an Metallen und fossilen Rohstoffen eintragen muss und die Ergebnisse für die Teildimensionen „Physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ berechnet und visualisiert werden. Dabei kann der Nutzer sowohl die verwendeten Grenzwerte als auch die Gewichtung für die Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ anpassen. Des Weiteren ist es

möglich, mithilfe des Tabellenkalkulation-Tools zwei Optionen miteinander zu vergleichen und wie im Leitfaden erläutert zu visualisieren. Die Ergebnisse der Dimension „Umweltauswirkungen“, die mit einer Ökobilanzsoftware ermittelt werden, müssen manuell eingetragen werden, um alle Dimensionen der ESSENZ-Methode abbilden zu können. Das zweite Tabellenkalkulation-Tool unterstützt den Anwender bei der Berechnung fehlender Charakterisierungsfaktoren für Metalle und fossile Rohstoffe, indem es nach der Eingabe der erforderlichen Werte diese selbst berechnet und mit den bereits existierenden Charakterisierungsfaktoren abgleicht. Die Tools können hier heruntergeladen werden: [www.see.tu-berlin.de](http://www.see.tu-berlin.de). Die in Kap. 9 zur Verfügung gestellten Werte sind mit den bereits dargestellten Unsicherheiten zu betrachten. Die Charakterisierungsfaktoren sollten alle drei Jahre aktualisiert werden, um zu gewährleisten, dass die Werte aktuell sind und zur Entscheidungshilfe herangezogen werden können. Die derzeit zur Verfügung gestellten Charakterisierungsfaktoren sind größtenteils mit Daten aus dem Jahr 2013 ermittelt. Ausnahme bildet der  $WGII_x$ , für den schon Daten für das Jahr 2014 bereitgestellt wurden.

In der ESSENZ-Methode werden bisher in den Teildimensionen „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ und „Gesellschaftliche Akzeptanz“ nur Primärrohstoffe betrachtet, jedoch keine Sekundärrohstoffe. Erste Projekte, um auch das potenzielle Risiko einer eingeschränkten Verfügbarkeit durch sozio-ökonomische Gegebenheiten von Sekundärrohstoffen zu analysieren, wurden bereits durchgeführt [83] und zeigen, dass auch für Sekundärrohstoffe sozio-ökonomische Gegebenheiten eine große Rolle spielen. Teilweise können die gleichen Kategorien wie bei den Primärrohstoffen Anwendung finden.

Die ESSENZ-Methode dient der Bewertung von Produkten und orientiert sich an der etablierten Methode der Ökobilanz [10] – bewertet somit also die Mikroebene. Dennoch ist es auch möglich, die ESSENZ-Methode sowie die bestimmten Charakterisierungsfaktoren für die Verwendung auf Meso- und Makroebene zu verwenden. Die Mesoebene spiegelt die Unternehmensebene wider, auf der die Ressourceneffizienz des Unternehmens gemessen wird. Dies geschieht bereits teilweise, da die betrachteten Produkte und Prozesse Bestandteil von Unternehmen sind. In einem nächsten Schritt könnte die ESSENZ-Methode mit der kürzlich entwickelten Methode „Ökobilanz von Unternehmen“ (Organizational LCA) [83] verknüpft werden, um so die Ressourceneffizienz des gesamten Unternehmens besser bewerten zu können. Auf Makroebene, welche die Länderebene widerspiegelt, wird derzeit zur Messung der Ressourceneffizienz ein Leitindikator aus Bruttoinlandsprodukt (BIP) und dem inländischem Materialverbrauch (DMC) empfohlen [6]. Dieser wird jedoch vielfach kritisiert [4], [84], [85], [86], weil er Ressourceneffizienz nicht adäquat widerspiegeln kann (siehe dazu auch Abschn. 5.5 und Abschn. 6.6). In weiteren Ebenen des Indikators werden auch Umweltauswirkungen betrachtet. Einschränkungen durch sozio-ökonomische Gegebenheiten werden bei dem Konzept nicht betrachtet, jedoch wurde die Kritikalität von Metallen für Europa in einem separaten Forschungsprojekt bestimmt [87]. Die ESSENZ-Methode bietet die Möglichkeit, diese verschiedenen Schnittstellen zu vereinen und eine integrierte Ressourceneffizienzbewertung auf der Makroebene zu ermöglichen, in der sowohl die physische und sozio-ökonomische Verfügbarkeit von Rohstoffen als auch die Umweltwirkungen berücksichtigt werden.

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmaterial nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

# Kapitel 9

## Anhang

### Inhaltsverzeichnis

9.1	Anhang 1: Charakterisierungsfaktoren für Metalle und fossile Rohstoffe	88
9.1.1	Metalle	88
9.1.2	Fossile Rohstoffe	124
9.2	Anhang 2: Wirkungsindikatorbeiträge	128
9.3	Anhang 3: Distance-to-Target-Werte	130
9.4	Anhang 4: Globale Produktionsdaten	132
9.5	Anhang 5: Maximale normalisierte Distance-to-Target-Werte	133
9.6	Anhang 6: Normalisierte Distance-to-Target-Werte	134
9.7	Anhang 7: Auswertung der Stakeholderbefragung	136
9.7.1	Minenkapazität	136
9.7.2	Nachfragewachstum	137
9.7.3	Primärmaterialanteil	138
9.8	Anhang 8: Darstellung der Berechnung der Charakterisierungsfaktoren am Beispiel Silber	139
9.8.1	Bewertung der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“	139
9.8.2	Bewertung der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“	140

## 9.1 Anhang 1: Charakterisierungsfaktoren für Metalle und fossile Rohstoffe

### 9.1.1 Metalle

#### Aluminium

Aspekte	Charakterisierungsfaktoren
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	4,46E-06
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	1,09E-09
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	2,24E+07
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	0
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	0
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	1,91E+06
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	7,86E+06
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	1,87E+07
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	2,10E+07
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Gesellschaftliche Akzeptanz <sup>1</sup>	
Sozial (-)	27,49
Umwelt (-)	72,18

<sup>1</sup> Beide Kategorien der Dimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“ sind dimensionslos.

**Antimon**

<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	1
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	1
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	9,8E+09
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	9,32E+08
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	5,82E+08
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	5,20E+09
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	5,05E+08
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	4,23E+09
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	3,01E+09
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	1,55E+10
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	6,02E+09
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	1,12E+10
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	9,49E+09
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	73,70
Umwelt (-)	83,23

**Beryllium****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,72E+01

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,26E-05

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,14E+12

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,49E+11

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,94E+12

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,70E+13

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,40E+12

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,32E+12

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,70E+13

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,88E+12

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

1,32

Umwelt (-)

54,35

**Bismut****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

4,11E-02

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,90E+11

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,87E+11

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,87E+11

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,36E+11

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,49E+11

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,86E+11

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,85E+11

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,98E+11

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,68E+11

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

35,12

Umwelt (-)

90,63

**Blei****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

5,95E-04

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

6,34E-03

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,08E+08

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,10E+07

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,62E+07

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,76E+06

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,17E+07

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,15E+08

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,57E+08

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,25E+08

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,46E+08

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

35,41

Umwelt (-)

88,04

<b>Chrom</b>	
<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	9,10E-05
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	4,43E-04
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	3,89E+07
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	0
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	2,56E+07
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	1,31E+06
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	7,76E+06
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	1,74E+07
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	3,65E+07
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	25,92
Umwelt (-)	42,62

**Eisen****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

2,35E-06

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

5,24E-08

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,25E+05

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,48E+04

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,38E+03

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,86E+04

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,45E+05

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,87E+05

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

8,39E+05

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

26,80

Umwelt (-)

90,51

**Gallium****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,46E-07

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,70E+13

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,89E+12

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,40E+11

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,05E+11

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,25E+12

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,74E+12

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

0,12

Umwelt (-)

2,70

**Germanium****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

6,52E-07

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,28E+12

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,29E+11

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,16E+12

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,77E+11

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,05E+12

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

8,47E+12

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

48,81

Umwelt (-)

70,54

**Gold****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

5,20E+01

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,85E+11

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

9,68E+09

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,46E+11

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

4,34

Umwelt (-)

74,11

**Indium****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

6,89E-03

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,86E+11

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,04E+12

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,11E+11

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,54E+11

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,13E+11

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,44E+12

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

32,30

Umwelt (-)

72,75

**Kobalt****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

2,27E-01

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,57E-05

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,73E+10

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,99E+09

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,99E+09

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,16E+09

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

8,04E+09

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,07E+10

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

8,86E+09

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,15E+10

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

100

Umwelt (-)

48,73

<b>Kupfer Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	7,82E-04
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	1,37E-03
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	5,02E+06
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	0
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	3,88E+05
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	0
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	0
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	6,84E+07
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	4,08
Umwelt (-)	76,27

**Lithium**

<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	9,03E-03
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	1,15E-05
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	1,01E+10
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	0
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	3,30E+10
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	1,70E+10
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	1,44E+10
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	0
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	5,10
Umwelt (-)	100

**Magnesium****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

2,02E-09

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,27E+07

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,10E+07

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,94E+06

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,11E+06

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,15E+06

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,52E+07

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,97E+07

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,09E+07

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

76,33

Umwelt (-)

83,96

**Mangan****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

2,67E-03

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

2,54E-06

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,69E+07

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,04E+07

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,47E+05

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,33E+06

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,64E+06

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,99E+07

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,11E+07

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

16,06

Umwelt (-)

72,06

**Molybdän****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

2,46E-01

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,78E-02

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,56E+09

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,34E+07

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

8,26E+08

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,47E+09

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,80E+09

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,07E+10

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

20,99

Umwelt (-)

85,53

**Nickel****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

3,84E-02

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

6,53E-05

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,93E+08

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,22E+08

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,56E+07

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,07E+06

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,94E+07

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,76E+08

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

9,58E+08

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

11,42

Umwelt (-)

66,25

**Niob****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,93E-05

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,56E+10

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,52E+09

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,15E+10

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,30E+10

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,25E+10

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,17E+10

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,84E+10

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,55E+10

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,37E+10

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

25,50

Umwelt (-)

91,44

**Palladium**

<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	2,18E+01
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	5,71E-01
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	5,34E+12
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	1,84E+12
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	0
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	2,99E+11
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	1,54E+13
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	3,35E+12
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	5,08E+12
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	5,40E+12
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	7,03E+12
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	30,01
Umwelt (-)	29,90

**Platin****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

2,18E+01

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

2,22E+00

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,40E+12

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,96E+11

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,10E+11

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,70E+13

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,22E+13

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,68E+12

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,99E+12

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

59,01

Umwelt (-)

39,88

**Rhenium**

<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	2,10E+02
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	6,03E-01
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	1,73E+13
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	1,56E+13
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	1,70E+13
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	7,82E+12
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	1,39E+13
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	0
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	5,38
Umwelt (-)	68,73

**Selen****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

7,33E-04

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,94E-01

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,70E+11

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,50E+11

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,68E+10

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,84E+10

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,13E+12

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

0,98

Umwelt (-)

48,61

**Seltene Erden****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,41E+10

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,40E+09

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,02E+10

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,20E+09

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,25E+09

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,34E+10

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

8,12E+09

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,49E+10

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

91,04

Umwelt (-)

90,71

**Silber**

Aspekte

**Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,18E+00

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,03E+10

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,43E+10

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

9,75E+08

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,56E+10

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

9,22E+10

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

6,57

Umwelt (-)

76,73

**Silicium****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,40E-11

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,59E+08

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,48E+07

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,70E+07

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,70E+08

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,07E+08

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,14E+08

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

53,92

Umwelt (-)

74,97

**Strontium****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

7,07E-07

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,71E+09

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,81E+09

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,72E+09

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,99E+09

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,05E+09

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

8,12E+09

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

16,65

Umwelt (-)

60,16

<b>Tantal</b>	
<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	n/a
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	4,06E-05
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	1,39E+12
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	1,70E+11
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	7,76E+10
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	6,30E+11
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	1,07E+12
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	5,53E+11
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	1,02E+12
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	1,45E+12
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	24,32
Umwelt (-)	27,54

<b>Tellur Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	1,38E-02
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	4,07E+01
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	5,05E+12
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	0
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	7,59E+11
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	5,45E+12
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	2,38E+12
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	0
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	1,70E+13
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	4,24
Umwelt (-)	59,02

<b>Titan</b>	
<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	7,71E-04
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	2,79E-08
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	0
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	0
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	1,43E+07
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	0
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	1,12E+08
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	4,81E+08
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	6,75
Umwelt (-)	70,58

<b>Uran Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	n/a
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	1,39E-04
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	1,70E+13
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	3,00E+12
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	0
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	1,70E+13
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	4,26E+11
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	4,27E+12
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	1,70E+13
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	1,70E+13
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	29,38
Umwelt (-)	54,11

**Vanadium****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

8,73E-03

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

7,70E-07

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,30E+10

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,21E+10

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,02E+09

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,75E+09

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,68E+10

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,51E+10

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,33E+10

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,75E+10

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

49,11

Umwelt (-)

66,26

**Wolfram****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

4,52E-03

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,02E+10

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,44E+07

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,33E+09

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,37E+09

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,21E+10

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,22E+10

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,62E+10

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

74,46

Umwelt (-)

82,89

**Zink****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,47E-03

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

5,38E-04

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,82E+07

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,72E+06

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,00E+07

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,68E+06

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

7,93E+06

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,55E+07

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

6,63E+07

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,14E+08

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

18,62

Umwelt (-)

85,83

**Zinn****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{AADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

n/a

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \ddot{\text{A}}\text{qv.}}{\text{kg}} \right)$$

1,62E-02

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

4,63E+09

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,99E+09

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,56E+08

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,18E+08

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

1,47E+09

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,88E+09

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,09E+09

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

5,43E+09

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

29,48

Umwelt (-)

82,03

**Zirconium**

Aspekte	Charakterisierungsfaktoren
Physische Verfügbarkeit	
AADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	n/a
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	5,44E-06
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	6,66E+08
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	8,97E+08
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	5,85E+08
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	6,64E+08
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	4,86E+08
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	0
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	2,69E+09
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	7,03
Umwelt (-)	87,76

### 9.1.2 Fossile Rohstoffe

#### Braunkohle

Aspekte	Charakterisierungsfaktoren
Physische Verfügbarkeit	
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	11,9
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	0
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	1,06E+07
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	3,56E+05
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	9,67E+05
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	0
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	0
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	2,31E+07
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	23,93
Umwelt (-)	45,74

<b>Erdgas</b>	
<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	44,1
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	0
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	4,55E+05
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	1,52E+04
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	0
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	0
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	0
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	0
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	24,20
Umwelt (-)	44,03

**Erdöl****Aspekte****Charakterisierungsfaktoren**

Physische Verfügbarkeit

$$\text{ADP} \left( \frac{\text{kg Sb} - \text{Äqv.}}{\text{kg}} \right)$$

42,3

Sozio-ökonomische Verfügbarkeit

$$\text{Politische Stabilität (PS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,23E+05

$$\text{Nachfragewachstum (NFW in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Koppelproduktion (Kop in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Primärmaterialeinsatz (PE in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

2,67E+05

$$\text{Minenkapazität (MK in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Unternehmenskonzentration (Konz_U in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

8,96E+03

$$\text{Konzentration der Reserven (Konz_R in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Konzentration der Produktion (Konz_P in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Handelshemmnisse (HH in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

0

$$\text{Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,09E+05

$$\text{Preisschwankungen (PRS in } \frac{1}{\text{kg}} \text{)}$$

3,30E+05

Gesellschaftliche Akzeptanz

Sozial (-)

30,20

Umwelt (-)

42,73

**Steinkohle**

<b>Aspekte</b>	<b>Charakterisierungsfaktoren</b>
Physische Verfügbarkeit	
ADP ( $\frac{kg\ Sb - \ddot{A}qv.}{kg}$ )	26,3
Sozio-ökonomische Verfügbarkeit	
Politische Stabilität (PS in $\frac{1}{kg}$ )	1,78E+05
Nachfragewachstum (NFW in $\frac{1}{kg}$ )	0
Koppelproduktion (Kop in $\frac{1}{kg}$ )	0
Primärmaterialeinsatz (PE in $\frac{1}{kg}$ )	1,63E+05
Minenkapazität (MK in $\frac{1}{kg}$ )	0
Unternehmenskonzentration (Konz_U in $\frac{1}{kg}$ )	5,45E+03
Konzentration der Reserven (Konz_R in $\frac{1}{kg}$ )	1,63E+04
Konzentration der Produktion (Konz_P in $\frac{1}{kg}$ )	8,14E+04
Handelshemmnisse (HH in $\frac{1}{kg}$ )	1,29E+05
Realsierbarkeit von Explorationsvorhaben (REX in $\frac{1}{kg}$ )	0
Preisschwankungen (PRS in $\frac{1}{kg}$ )	3,53E+05
Gesellschaftliche Akzeptanz	
Sozial (-)	48,45
Umwelt (-)	78,46

## **9.2 Anhang 2: Wirkungsindikatorbeträge**

Der Wirkungsindikatorbetrag ist der spezifische Wert eines Metalls oder fossilen Rohstoffs in der entsprechenden Kategorie, der über die Berechnung des Wirkungsindikators ermittelt wurde. Die Wirkungsindikatorbeträge werden in weiteren Schritten dem kategoriespezifischem Grenzwert gegenübergestellt, normalisiert und skaliert. Sie entsprechen nicht den Charakterisierungsfaktoren (Abschn. 9.1) und können nicht zur Bewertung verwendet werden.

	NFW in %	Kop	PE in %	MK	Konz_U	PRS in %	Konz_R	Konz_P	HH	REX	PS
Aluminium	3,62	0,00	65	594	0,04	18	0,15	0,24	3,25	55,15	2,09
Antimon	5,79	0,33	85	12	0,71	22	0,35	0,61	3,36	73,32	2,52
Beryllium	8,27	0,33	83	2	0,82	24	0,66	0,82	2,70	43,09	1,48
Bismut	8,17	1,00	100	110	0,73	25	0,59	0,36	3,15	66,58	2,17
Blei	8,12	0,33	48	16	0,01	25	0,25	0,31	3,25	62,21	2,20
Braunkohle	0,69	0,00	100	2680	0,17	29	0,16	0,08	3,08	51,32	1,67
Chrom	4,82	0,00	81	17	0,06	11	0,24	0,28	3,55	38,02	2,15
Eisen	7,38	0,00	60	28	0,05	30	0,15	0,26	3,30	48,94	2,06
Erdöl	1,11	0,00	100	52	0,17	22	0,09	0,08	3,06	63,11	1,97
Erdgas	1,87	0,00	100	131	0,17	8	0,12	0,12	2,72	30,34	1,64
Gallium	41,61	1,00	63	594	0,50	23	0,15	0,00	0,31	55,15	0,20
Germanium	4,05	1,00	55	17	0,71	21	0,17	0,41	2,43	43,25	1,75
Gold	3,99	0,00	70	20	0,02	4	0,07	0,06	3,40	44,04	2,11
Indium	7,27	1,00	63	312891	0,56	26	0,31	0,30	2,77	54,15	1,78
Kobalt	10,73	0,67	68	58	0,03	30	0,27	0,39	4,01	58,31	2,99
Kupfer	3,04	0,33	71	39	0,04	20	0,15	0,13	3,08	39,82	1,72
Lithium	8,92	0,00	100	397	0,05	14	0,39	0,27	2,81	46,60	1,21
Magnesium	18,32	0,33	67	51	0,20	13	0,20	0,63	3,33	66,66	2,52
Mangan	6,95	0,00	63	28	0,03	20	0,18	0,15	3,47	56,03	1,97
Molybdän	4,29	0,00	67	41	0,05	31	0,24	0,25	3,06	56,15	2,00
Nickel	11,41	0,33	65	32	0,07	29	0,12	0,16	3,39	48,56	2,04
Niob	0,32	0,33	78	72	0,77	26	0,91	0,81	3,63	68,24	1,96
Palladium	0,05	0,67	50	325	0,22	22	0,91	0,32	3,52	58,04	2,12
Platin	0,55	0,33	50	361	0,17	17	0,91	0,58	3,53	58,04	2,02
Rhenium	2,39	1,00	83	51	0,80	15	0,32	0,32	2,93	38,83	1,49
Selen	3,40	1,00	95	53	0,34	29	0,17	0,14	2,91	47,57	1,25
Seltene Erden	2,04	0,67	100	1182	0,78	52	0,31	0,75	3,27	49,52	2,54
Silber	4,05	0,67	73	20	0,02	28	0,13	0,11	3,34	44,81	2,09
Silicium	5,18	0,00	60	0	0,40	16	0,00	0,45	3,18	71,96	2,28
Steinkohle	3,68	0,00	100	100	0,17	29	0,17	0,29	3,28	53,11	2,26
Strontium	3,75	0,00	65	20420	0,68	30	0,39	0,39	3,08	71,96	1,93
Tantal	6,77	0,33	81	85	0,05	24	0,58	0,31	3,79	47,39	2,60
Tellur	4,08	1,00	60	145	0,31	31	0,49	0,24	2,87	13,24	1,31
Titan	3,21	0,00	48	104	0,08	34	0,17	0,12	3,16	54,00	1,65
Uran	6,42	0,00	95	20	0,13	10	0,14	0,20	3,49	55,86	2,05
Vanadium	3,90	1,00	60	217	0,40	29	0,30	0,42	3,54	70,21	2,57
Wolfram	4,10	0,00	54	43	0,50	19	0,36	0,62	3,37	61,93	2,55
Zink	2,47	0,33	78	17	0,02	23	0,17	0,18	3,28	43,25	2,09
Zinn	1,90	0,00	78	14	0,05	25	0,17	0,28	3,44	73,23	2,57
Zirconium	0,20	1,00	100	62	0,75	34	0,47	0,30	3,04	36,28	1,28

### **9.3 Anhang 3: Distance-to-Target-Werte**

Der Distance-to-Target-Wert wird ermittelt, indem die Wirkungsindikatorbeträge dem Grenzwert gegenübergestellt werden. Anschließend wird der Quotient quadriert. Die Distance-to-Target-Werte werden in weiteren Schritten normalisiert und skaliert. Sie entsprechen nicht den Charakterisierungsfaktoren (Abschn. 9.1) und können nicht zur Bewertung verwendet werden.

	NFW	Kop	PE	MK	Konz_U	PRS	Konz_R	Konz_P	HH	REX	PS
Aluminium	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	2,52	1,06	1,01	1,21
Antimon	1,34	1,74	1,28	18,78	22,51	1,23	5,57	16,47	1,14	1,78	1,76
Beryllium	2,73	1,74	1,21	1056,25	30,19	1,49	19,47	30,13	0,00	0,00	0,00
Bismut	0,00	16,00	1,78	0,00	23,39	1,61	15,42	5,64	1,00	1,47	1,30
Blei	2,64	1,74	0,00	10,36	0,00	1,61	2,76	4,36	1,06	1,28	1,34
Braunkohle	0,00	0,00	1,78	0,00	1,28	2,03	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00
Chrom	0,00	0,00	1,17	9,00	0,00	0,00	2,65	3,40	1,27	0,00	1,29
Eisen	2,18	0,00	0,00	3,29	0,00	2,21	1,07	3,10	1,10	0,00	1,18
Erdgas	0,00	0,00	1,78	0,00	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Erdöl	0,00	0,00	1,78	0,00	1,28	1,16	0,00	0,00	0,00	1,32	1,08
Gallium	69,25	16,00	0,00	0,00	11,11	1,37	1,07	0,00	0,00	1,01	0,00
Germanium	0,00	16,00	0,00	8,61	22,40	1,11	1,27	7,57	0,00	0,00	0,00
Gold	0,00	0,00	0,00	6,43	0,00	0,00	0,00	0,00	1,17	0,00	1,24
Indium	2,11	16,00	0,00	0,00	13,94	1,63	4,29	3,87	0,00	0,00	0,00
Kobalt	4,61	7,18	0,00	0,00	0,00	2,24	3,20	6,83	1,62	1,12	2,48
Kupfer	0,00	1,74	0,00	1,67	0,00	1,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lithium	3,19	0,00	1,77	0,00	0,00	0,00	6,84	3,33	0,00	0,00	0,00
Magnesium	13,42	1,74	0,00	0,00	1,78	0,00	1,75	17,59	1,12	1,47	1,76
Mangan	1,93	0,00	0,00	3,09	0,00	0,00	1,50	1,04	1,21	1,04	1,08
Molybdän	0,00	0,00	0,00	1,51	0,00	2,40	2,64	2,70	0,00	1,04	1,11
Nickel	5,21	1,74	0,00	2,47	0,00	2,03	0,00	1,20	1,16	0,00	1,15
Niob	0,00	1,74	1,08	0,00	26,44	1,66	36,91	28,96	1,33	1,54	1,06
Palladium	0,00	7,18	0,00	0,00	2,07	1,19	36,94	4,62	1,25	1,11	1,25
Platin	0,00	1,74	0,00	0,00	1,31	0,00	36,94	15,17	1,26	1,11	1,14
Rhenium	0,00	16,00	1,21	0,00	28,44	0,00	4,53	4,63	0,00	0,00	0,00
Selen	0,00	16,00	1,60	0,00	5,14	2,12	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Seltene Erden	0,00	7,18	1,77	0,00	27,04	6,86	4,23	25,00	1,08	0,00	1,78
Silber	0,00	7,18	0,00	6,07	0,00	2,00	0,00	0,00	1,12	0,00	1,21
Silicium	1,07	0,00	0,00	0,00	7,25	0,00	0,00	9,09	1,02	1,71	1,44
Steinkohle	0,00	0,00	1,78	0,00	1,28	2,03	1,34	3,82	1,08	0,00	1,42
Strontium	0,00	0,00	0,00	0,00	20,55	2,25	6,76	6,76	0,00	1,71	1,04
Tantal	1,83	1,74	1,17	0,00	0,00	1,42	14,87	4,40	1,45	0,00	1,87
Tellur	0,00	16,00	0,00	0,00	4,27	2,34	10,64	2,67	0,00	0,00	0,00
Titan	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,96	1,25	0,00	1,01	0,00	0,00
Uran	1,65	0,00	1,61	6,05	0,00	0,00	0,00	1,73	1,23	1,03	1,17
Vanadium	0,00	16,00	0,00	0,00	7,11	2,15	3,88	7,88	1,26	1,63	1,83
Wolfram	0,00	0,00	0,00	1,37	11,11	0,00	5,82	16,84	1,14	1,27	1,79
Zink	0,00	1,74	1,07	8,61	0,00	1,28	1,27	1,42	1,08	0,00	1,21
Zinn	0,00	0,00	1,08	12,77	0,00	1,55	1,29	3,42	1,20	1,77	1,82
Zirconium	0,00	16,00	1,78	0,00	25,00	2,81	9,84	4,13	0,00	0,00	0,00

## 9.4 Anhang 4: Globale Produktionsdaten

Globale Produktionsdaten für 2013 in kg		Globale Produktionsdaten für 2013 in kg	
Aluminium	4,71E+10	Nickel	2,55E+09
Antimon	1,56E+08	Niob	5,94E+07
Beryllium	2,60E+05	Palladium	2,03E+05
Bismut	2,90E+06	Platin	1,83E+05
Blei	5,60E+09	Rhenium	4,89E+04
Braunkohle	1,06E+11	Selen	2,25E+06
Chrom	2,88E+10	Seltene Erden	1,10E+08
Eisen	3,16E+12	Silber	2,61E+07
Erdgas	2,47E+12	Silicium	7,88E+09
Erdöl	4,20E+12	Steinkohle	6,91E+12
Gallium	4,40E+05	Strontium	3,33E+08
Germanium	1,58E+05	Tantal	1,17E+06
Gold	2,79E+06	Tellur	1,65E+05
Indium	7,99E+05	Titan	7,40E+09
Kobalt	1,25E+08	Uran	5,96E+04
Kupfer	1,81E+10	Vanadium	6,90E+07
Lithium	3,40E+07	Wolfram	7,72E+07
Magnesium	4,69E+10	Zink	1,35E+10
Mangan	2,00E+10	Zinn	3,43E+08
Molybdän	2,70E+08	Zirconium	1,25E+09

## 9.5 Anhang 5: Maximale normalisierte Distance-to-Target-Werte

Die maximalen normalisierten Distance-to-Target-Werten sind die normalisierten Distance-to-Target-Werte (Abschn. 9.6), die den größten Wert aufweisen. Sie werden identifiziert, da sie für die Skalierung notwendig sind (siehe Gl. 4.5).

Kategorie	$\left[ \frac{1}{kg} \right]$
NFW	1,57E-04
Kop	3,27E-04
PE	2,70E-05
MK	4,06E-03
Konz_U	5,82E-04
PRS	1,42E-05
Konz_R	2,02E-04
Konz_P	1,16E-04
HH	2,06E-05
REX	1,73E-05
PS	1,96E-05

## 9.6 Anhang 6: Normalisierte Distance-to-Target-Werte

Normalisierte Distance-to-Target-Werte werden ermittelt, indem der Distance-to-Target-Wert mit dem metallspezifischen Produktionsdaten (Abschn. 9.4) normalisiert wird (siehe Gl. 4.5). Anschließend werden die ermittelten Werte skaliert. Sie entsprechen nicht den Charakterisierungsfaktoren (Abschn. 9.1) und können nicht zur Bewertung verwendet werden.

	PS $\left[\frac{1}{kg}\right]$	NFW $\left[\frac{1}{kg}\right]$	Kop $\left[\frac{1}{kg}\right]$	PE $\left[\frac{1}{kg}\right]$	MK $\left[\frac{1}{kg}\right]$
Aluminium	2,57E-11	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Antimon	1,13E-08	8,60E-09	1,12E-08	8,23E-09	1,20E-07
Beryllium	0,00E+00	1,05E-05	6,70E-06	4,65E-06	4,06E-03
Bismut	4,48E-07	0,00E+00	5,52E-06	6,13E-07	0,00E+00
Blei	2,39E-10	4,71E-10	3,11E-10	0,00E+00	1,85E-09
Braunkohle	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,68E-11	0,00E+00
Chrom	4,47E-11	0,00E+00	0,00E+00	4,05E-11	3,13E-10
Eisen	3,73E-13	6,90E-13	0,00E+00	0,00E+00	1,04E-12
Erdgas	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,20E-13	0,00E+00
Erdöl	2,56E-13	0,00E+00	0,00E+00	4,23E-13	0,00E+00
Gallium	0,00E+00	1,57E-04	3,64E-05	0,00E+00	0,00E+00
Germanium	0,00E+00	0,00E+00	1,01E-04	0,00E+00	5,45E-05
Gold	4,43E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,31E-06
Indium	0,00E+00	2,64E-06	2,00E-05	0,00E+00	0,00E+00
Kobalt	1,99E-08	3,69E-08	5,75E-08	0,00E+00	0,00E+00
Kupfer	0,00E+00	0,00E+00	9,63E-11	0,00E+00	9,23E-11
Lithium	0,00E+00	9,37E-08	0,00E+00	5,22E-08	0,00E+00
Magnesium	3,75E-11	2,86E-10	3,72E-11	0,00E+00	0,00E+00
Mangan	5,39E-11	9,64E-11	0,00E+00	0,00E+00	1,54E-10
Molybdän	4,10E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,58E-09
Nickel	4,52E-10	2,05E-09	6,84E-10	0,00E+00	9,71E-10
Niob	1,79E-08	0,00E+00	2,93E-08	1,82E-08	0,00E+00
Palladium	6,14E-06	0,00E+00	3,54E-05	0,00E+00	0,00E+00
Platin	6,21E-06	0,00E+00	9,52E-06	0,00E+00	0,00E+00
Rhenium	0,00E+00	0,00E+00	3,27E-04	2,47E-05	0,00E+00
Selen	0,00E+00	0,00E+00	7,10E-06	7,12E-07	0,00E+00
Seltene Erden	1,62E-08	0,00E+00	6,53E-08	1,61E-08	0,00E+00
Silber	4,63E-08	0,00E+00	2,75E-07	0,00E+00	2,32E-07
Silicium	1,83E-10	1,36E-10	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Steinkohle	2,05E-13	0,00E+00	0,00E+00	2,57E-13	0,00E+00
Strontium	3,11E-09	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Tantal	1,60E-06	1,57E-06	1,49E-06	9,97E-07	0,00E+00
Tellur	0,00E+00	0,00E+00	9,70E-05	0,00E+00	0,00E+00
Titan	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Uran	1,96E-05	2,77E-05	0,00E+00	2,70E-05	1,01E-04
Vanadium	2,65E-08	0,00E+00	2,32E-07	0,00E+00	0,00E+00
Wolfram	2,32E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,77E-08
Zink	8,98E-11	0,00E+00	1,29E-10	7,91E-11	6,38E-10
Zinn	5,31E-09	0,00E+00	0,00E+00	3,15E-09	3,72E-08
Zirconium	0,00E+00	0,00E+00	1,28E-08	1,42E-09	0,00E+00

Konz_U $\left[\frac{1}{kg}\right]$	Konz_R $\left[\frac{1}{kg}\right]$	Konz_P $\left[\frac{1}{kg}\right]$	HH $\left[\frac{1}{kg}\right]$	REX $\left[\frac{1}{kg}\right]$	PRS $\left[\frac{1}{kg}\right]$
0,00E+00	2,27E-11	5,34E-11	2,26E-11	2,13E-11	0,00E+00
1,44E-07	3,57E-08	1,06E-07	7,29E-09	1,14E-08	7,90E-09
1,16E-04	7,49E-05	1,16E-04	0,00E+00	0,00E+00	5,72E-06
8,07E-06	5,32E-06	1,94E-06	3,45E-07	5,05E-07	5,56E-07
0,00E+00	4,94E-10	7,79E-10	1,90E-10	2,28E-10	2,88E-10
1,22E-11	1,14E-11	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,92E-11
0,00E+00	9,19E-11	1,18E-10	4,41E-11	0,00E+00	0,00E+00
0,00E+00	3,38E-13	9,83E-13	3,48E-13	0,00E+00	6,99E-13
5,20E-13	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3,06E-13	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,13E-13	2,75E-13
2,53E-05	2,43E-06	0,00E+00	0,00E+00	2,29E-06	3,11E-06
1,42E-04	8,02E-06	4,79E-05	0,00E+00	0,00E+00	7,04E-06
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,18E-07	0,00E+00	0,00E+00
1,74E-05	5,37E-06	4,85E-06	0,00E+00	0,00E+00	2,03E-06
0,00E+00	2,56E-08	5,46E-08	1,30E-08	8,99E-09	1,79E-08
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,69E-11
0,00E+00	2,01E-07	9,80E-08	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3,79E-11	3,73E-11	3,75E-10	2,38E-11	3,13E-11	0,00E+00
0,00E+00	7,49E-11	5,19E-11	6,04E-11	5,18E-11	0,00E+00
0,00E+00	9,78E-09	1,00E-08	0,00E+00	3,86E-09	8,90E-09
0,00E+00	0,00E+00	4,72E-10	4,55E-10	0,00E+00	7,97E-10
4,45E-07	6,21E-07	4,88E-07	2,23E-08	2,59E-08	2,80E-08
1,02E-05	1,82E-04	2,28E-05	6,15E-06	5,49E-06	5,85E-06
7,15E-06	2,02E-04	8,29E-05	6,88E-06	6,09E-06	0,00E+00
5,82E-04	9,26E-05	9,47E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
2,28E-06	5,74E-07	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,39E-07
2,46E-07	3,84E-08	2,27E-07	9,82E-09	0,00E+00	6,24E-08
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,31E-08	0,00E+00	7,67E-08
9,20E-10	0,00E+00	1,15E-09	1,29E-10	2,17E-10	0,00E+00
1,86E-13	1,93E-13	5,53E-13	1,57E-13	0,00E+00	2,94E-13
6,17E-08	2,03E-08	2,03E-08	0,00E+00	5,14E-09	6,76E-09
0,00E+00	1,27E-05	3,76E-06	1,24E-06	0,00E+00	1,21E-06
2,59E-05	6,45E-05	1,62E-05	0,00E+00	0,00E+00	1,42E-05
0,00E+00	1,69E-10	0,00E+00	1,36E-10	0,00E+00	4,01E-10
0,00E+00	0,00E+00	2,90E-05	2,06E-05	1,73E-05	0,00E+00
1,03E-07	5,63E-08	1,14E-07	1,83E-08	2,36E-08	3,12E-08
1,44E-07	7,54E-08	2,18E-07	1,48E-08	1,64E-08	0,00E+00
0,00E+00	9,38E-11	1,05E-10	8,02E-11	0,00E+00	9,46E-11
0,00E+00	3,77E-09	9,97E-09	3,49E-09	5,17E-09	4,52E-09
2,00E-08	7,86E-09	3,30E-09	0,00E+00	0,00E+00	2,24E-09

## 9.7 Anhang 7: Auswertung der Stakeholderbefragung

An der onlinebasierten Stakeholderbefragung beteiligten sich 206 Teilnehmer, die sich in folgende Gruppen aufteilen:

- Unternehmen: 46%,
- Forschungseinrichtungen: 34%,
- Beratung: 8%,
- Industrieverbände: 3%,
- Nichtregierungsorganisationen: 2%,
- Sonstige: 7%.

Ziel der Umfrage war es, geeignete Grenzwerte für die Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ zu finden. Da Grenzwerte wissenschaftlich nicht bestimmbar sind, sondern eine subjektive Meinung abbilden, ist im ESSENZ-Projekt angestrebt worden, Grenzwerte zu finden, die von vielen verschiedenen Stakeholdergruppen unterstützt werden. Daher wurde eine Stakeholderumfrage gestartet mit dem Ziel, für alle Kategorien entsprechende Grenzwerte zu ermitteln. Aus der Stakeholderbefragung konnten allerdings nur für die Kategorien Minenkapazität, Nachfragewachstum und Primärmitteleinsatz geeignete Grenzwerte bestimmt werden. Für die restlichen Kategorien war dies aufgrund sehr inhomogener Antworten nicht möglich. Im Folgenden werden die Befragungsergebnisse dieser drei Kategorien detaillierter dargestellt.

### 9.7.1 *Minenkapazität*

Folgende Frage bezüglich der Minenkapazität wurde an die Stakeholder gerichtet:

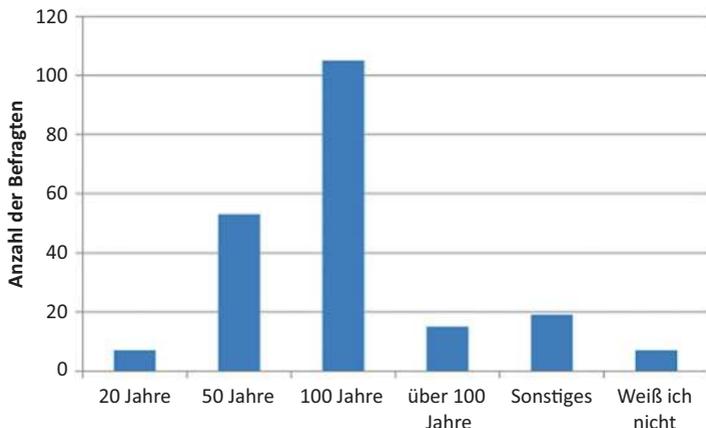
Über welchen Zeitraum sollte Ihrer Meinung nach ein Rohstoff verfügbar sein (Reservenreichweite), um als unkritisch<sup>1</sup> zu gelten?

Antwortmöglichkeiten: 20 Jahre, 50 Jahre, 100 Jahre, über 100 Jahre, weiß ich nicht, Sonstiges.

In Abb. 9.1 ist das Ergebnis der Befragung dargestellt. Zu sehen ist, dass ab einer Reichweite von mehr als 100 Jahren die Mehrheit der Befragten einen Rohstoff als unkritisch erachtet. Ab einer Reichweite unter 50 Jahren erachtet die Mehrheit der Befragten zudem einen Rohstoff als kritisch. Eine Reichweite von 20 Jahren sowie von über 100 Jahren sahen wenige Teilnehmer als unkritisch an. Obwohl viele der Befragten angaben, dass ein Rohstoff mehr als 100 Jahre verfügbar sein sollte, bevor er als unkritisch eingeschätzt werden kann, sahen auch viele der Befragten bereits eine Reichweite kleiner 50 Jahre als kritisch an. Daher wurde beschlossen, 50 Jahre als Grenzwert für die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren zu verwenden.

---

<sup>1</sup> Als unkritisch bzw. kritisch ist in diesem Zusammenhang ein potenzielles Risiko der eingeschränkten Verfügbarkeit zu verstehen.



**Abb. 9.1** Antworten der Stakeholderbefragung zur Frage: Über welchen Zeitraum sollte Ihrer Meinung nach ein Rohstoff verfügbar sein, um als unkritisch zu gelten?

Die ESSENZ-Methode stellt es jedem Anwender frei, die Grenzwerte individuell festzulegen. Demzufolge besteht durchaus die Möglichkeit, mit einem Grenzwert von 100 Jahren zu rechnen, sollte der Grenzwert von 50 Jahren als zu konservativ angesehen werden. Dies bedingt, dass die Charakterisierungsfaktoren neu berechnet werden müssen.

### 9.7.2 Nachfragewachstum

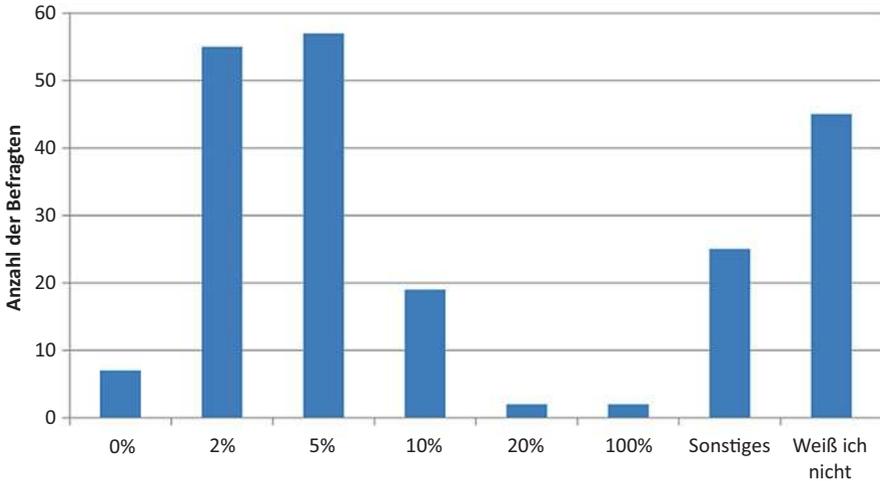
Folgende Frage bezüglich des Nachfragewachstums wurde an die Stakeholder gerichtet:

Die jährliche Nachfrage nach Metallen steigt stetig an. Für Kupfer beträgt dieser Anstieg in den letzten Jahren 5 bis 10% pro Jahr. Wie viel Prozent jährliches Wachstum halten Sie für unkritisch, damit die globale Versorgungssicherheit von Metallen nicht gefährdet wird?

Antwortmöglichkeiten: 2%, 5%, 10%, 20%, 100%, weiß ich nicht.

In Abb. 9.2 ist das Ergebnis der Befragung dargestellt. Zu sehen ist, dass die Mehrheit der Befragten ein jährliches Nachfragewachstum von mehr als 2 und 5% als kritisch einstufen. Abb. 9.2 ist ebenfalls zu entnehmen, dass eine große Anzahl an Befragten (21%) sich nicht zutrauten, eine Bewertung abzugeben, und daher mit „weiß ich nicht“ antworteten. Unter „Sonstiges“ sind Kommentare der Befragten zusammengefasst, die auf keine Zahl zurückzuführen sind, sondern sich mit der Thematik allgemein beschäftigen. Wenn aus der Antwort ein Zahlenwert (wie bei 0%) abgelesen werden kann, wird dieser in Abb. 9.2 entsprechend angezeigt.

Da die Mehrheit der Befragten 5% jährliches Wachstum als kritisch einschätzt, wurde dieser Wert als Standardgrenzwert für die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren verwendet. In der ESSENZ-Methode können die Grenzwerte von



**Abb. 9.2** Antworten der Stakeholderbefragung zur Frage: Wie viel Prozent jährliches Wachstum halten Sie für unkritisch, damit die globale Versorgungssicherheit von Metallen nicht gefährdet wird?

jedem Anwender individuell angepasst werden, somit kann auch mit einem Grenzwert von 2% gerechnet werden, falls der Grenzwert von 5% als zu hoch angesehen wird.

### 9.7.3 Primärmaterialanteil

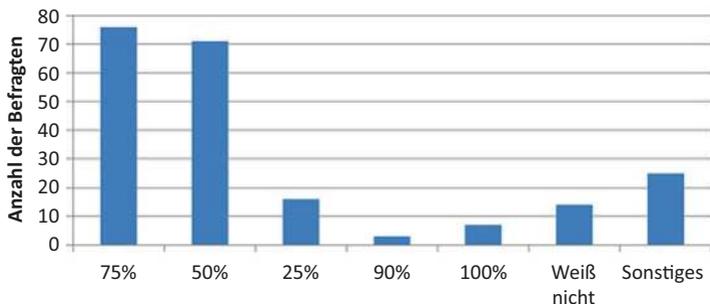
Folgende Frage bezüglich des Primärmaterialanteils wurde an die Stakeholder gerichtet:

Wie groß sollte der Sekundärmaterialanteil auf Materialebene (z. B. Anteil des recycelten Metalls in einem Metallbogen) Ihrer Meinung nach für eine langfristige Sicherung der Materialversorgung sein?

Antwortmöglichkeiten: 10%, 25%, 50%, 75%, Ich bin mir nicht sicher, Sonstiges.

In Abb. 9.3 ist das Ergebnis der Befragung dargestellt. Zu sehen ist, dass die Mehrheit der Befragten (insgesamt 68%) einen Sekundärmaterialanteil von 50% und 75% als notwendig erachtet, um die Materialversorgung langfristig zu sichern. Unter „Sonstiges“ sind Kommentare der Befragten zusammengefasst. Wenn aus der Antwort ein Zahlenwert (wie bei 100%) abgelesen werden kann, wird dieser in Abb. 9.2 entsprechend angezeigt.

Da die Mehrheit der Befragten 75% Primärmaterial als kritisch einschätzen, wurde dieser Wert als Standardgrenzwert für die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren verwendet. In der ESSENZ-Methode können die Grenzwerte von jedem Anwender individuell angepasst werden, somit kann auch mit einem Grenzwert von 50% gerechnet werden, falls der Grenzwert von 75% als zu hoch angesehen wird.



**Abb. 9.3** Antworten der Stakeholderbefragung zur Frage: Wie groß sollte der Sekundärmaterialanteil auf Materialebene Ihrer Meinung nach für eine langfristige Sicherung der Materialversorgung sein?

## 9.8 Anhang 8: Darstellung der Berechnung der Charakterisierungsfaktoren am Beispiel Silber

Im Folgenden wird die Bestimmung der Charakterisierungsfaktoren für die verschiedenen Kategorien der Teildimensionen „Physische Verfügbarkeit“ und „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ am Beispiel Silber erläutert.

### 9.8.1 Bewertung der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“

Die Teildimension „Physischen Verfügbarkeit“ mit der Kategorie abiotischer Ressourcenverbrauch wird mit dem Wirkungsindikator Abiotic Depletion Potential (ADP) [14] quantifiziert (siehe Gl. 4.1). Die Charakterisierungsfaktoren für ADP stehen für viele Metalle und fossile Rohstoffe zur Verfügung, können aber auch selbst wie folgt berechnet werden (siehe Gl. 9.1):

$$\begin{aligned}
 ADP_{\text{elementar, Ag}} &= \frac{\text{Extraktionsrate}_{\text{Ag}}}{(\text{ultimative Reserven}_{\text{Ag}})^2} \times \frac{(\text{ultimative Reserven}_{\text{Sb}})^2}{\text{Extraktionsrate}_{\text{Sb}}} \\
 &= \frac{2,60^4 \text{ t}}{(1,62^{12} \text{ t})^2} \times \frac{(4,63^{12} \text{ t})^2}{1,54^5 \text{ t}} = 1,84 \frac{\text{kg Sb-Äquivalente}}{\text{kg}}.
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 9.1}$$

Daten für die Extraktionsrate finden sich in den Datenbanken von USGS [22] und BGS [23]. Daten für die ultimativen Reserven sind aus der Veröffentlichung von Guinee (1995) [88] zu entnehmen.

Um neben der geologischen auch die anthropogene Verfügbarkeit zu bewerten, wird der Wirkungsindikator Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential (AADP) [15], [16] verwendet (siehe Gl. 4.3). Die Charakterisierungsfaktoren

für AADP stehen für ausgewählte Metalle und fossile Rohstoffe zur Verfügung, können aber auch selbst wie folgt berechnet werden (siehe Gl. 9.2):

$$\begin{aligned}
 AADP_{i, \text{Ressourcen}} &= \frac{\text{Extraktionsrate}_i}{(\text{Ressourcen}_i + \text{anthropogene Vorkommen}_i)^2} \\
 &\quad \times \frac{(\text{Ressourcen}_{Sb} + \text{anthropogene Vorkommen}_{Sb})^2}{\text{Extraktionsrate}_{Sb}} \\
 &= \frac{2,60 \times 10^4 t}{(8,75 \times 10^5 + 1,75 \times 10^6)^2} \times \frac{(6,61 \times 10^6 + 6,41 \times 10^6)^2}{1,54 \times 10^5 t} \\
 &= 0,228 \frac{\text{kg Sb} - \ddot{A}qv.}{\text{kg}}.
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 9.2}$$

Sowohl die Daten für die Extraktionsrate als auch für die Ressourcen und anthropogenen Vorkommen finden sich in den Datenbanken von USGS [22] und BGS [23].

### 9.8.2 Bewertung der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“

Für die Bewertung der Teildimension „Sozio-ökonomische Verfügbarkeit“ werden insgesamt 11 Kategorien betrachtet, deren Berechnung im Folgenden für Silber erläutert wird. Dazu wird wie in Abschn. 4.1.2.1 beschrieben vorgegangen. Zuerst erfolgt die Ermittlung der Wirkungsindikatorbeträge für jede Kategorie. Die einzelnen Kategorien sind in Abschn. 4.1.2.2 umfassend erläutert.

#### 1) Berechnung der Wirkungsindikatorbeträge

##### Konzentration

Es werden drei verschiedene Konzentrationen bestimmt: Die Konzentration der Reserven, die Konzentration der Produktion und die Unternehmenskonzentration. Als Wirkungsindikator dient der Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) [31], der die Summe der quadrierten Anteile darstellt (siehe Gl. 4.7, Gl. 4.8, Gl. 4.9).

Die Berechnung des Wirkungsindikatorbetrages für die Kategorie Konzentration der Reserven anhand des Beispiels Silber erfolgt nach Gl. 9.3 mit den in Tab. 9.1 dargestellten Werten:

$$\text{HHI}_{R_{Ag}} = \sum (\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an den globalen Reserven}_{Ag})^2
 \tag{Gl. 9.3}$$

Zur Berechnungen werden die Daten für die globalen Reserven aus der USGS-Datenbank und entsprechend die prozentualen Anteile der Länder ermittelt. Daraufhin wer-

**Tab. 9.1** Darstellung der globalen Reservendaten, Marktanteilen und quadrierten Marktanteilen für die Berechnung der Konzentration der Reserven für Silber

Land	Reserven in t 2013 (basierend auf USGS)	Prozentualer Anteil eines Landes an den globalen Reserven (Marktanteile)	Quadrierte Marktanteile
USA	25.000	0,0472	2,23E-03
Australien	85.000	0,1604	2,57E-02
Bolivien	22.000	0,0415	1,72E-03
Kanada	7000	0,0132	1,74E-04
Chile	77.000	0,1453	2,11E-02
China	43.000	0,0811	6,58E-03
Mexiko	37.000	0,0698	4,87E-03
Peru	98.900	0,1866	3,48E-02
Polen	85.000	0,1604	2,57E-02
Andere Länder	50.000	0,0943	8,89E-03
Russland	keine Daten		
			<i>Summe= 0,13</i>

den die jeweiligen Marktanteile für jedes Land quadriert, und anschließend wird die Summe über die quadrierten Marktanteile gebildet. Länder, für die keine Daten zur Verfügung stehen, können nicht mit in die Berechnung einbezogen werden. Andere Länder (mehrerer Länder sind zusammengefasst) sollten als ein Land mit in die Berechnung einfließen. Für Silber ergibt sich eine Konzentration der Reserven von 0,13.

Als Nächstes wird die Konzentration der Produktion nach Gl. 9.4 und Tab. 9.2 ermittelt:

$$HHI_{P_{Ag}} = \sum (\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an der globalen Produktion}_{Ag})^2. \tag{Gl. 9.4}$$

Zur Berechnungen werden zuerst die Daten für die globale Produktion aus der BGS-Datenbank und die darauf basierenden prozentualen Anteile der Länder bestimmt. Daraufhin werden diese Marktanteile für jedes Land quadriert, und anschließend wird die Summe über die quadrierten Marktanteile gebildet. Für Silber ergibt sich eine Konzentration der Reserven von 0,11.

Die Berechnung des Wirkungsindikatorbetrages für die Kategorie Unternehmenskonzentration anhand des Beispiels Silber erfolgt nach Gl. 9.5 nach dem in Tab. 9.2 dargestellten Prinzip:

$$HHI_{P_{Ag}} = \sum (\text{Anteil eines Unternehmens}_x \text{ in \% an globalen Produktion}_{Ag})^2. \tag{Gl. 9.5}$$

**Tab. 9.2** Darstellung der globalen Produktionsdaten, Marktanteile und quadrierten Marktanteile für die Berechnung der Konzentration der Produktion für Silber

Land	Produktion in t 2013 (basierend auf BGS)	Prozentualer Anteil eines Landes an der globalen Produktion (Marktanteile)	Quadrierte Marktanteile
Argentinien	6,81E-04	6,81E-04	6,81E-04
Armenien	2,50E-07	2,50E-07	2,50E-07
Australien	4,97E-03	4,97E-03	4,97E-03
Azerbaidshan	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Bolivien	2,43E-03	2,43E-03	2,43E-03
Botswana	8,10E-07	8,10E-07	8,10E-07
Brasilien	6,40E-07	6,40E-07	6,40E-07
Bulgarien	4,41E-06	4,41E-06	4,41E-06
Kanada	6,10E-04	6,10E-04	6,10E-04
Chile	2,02E-03	2,02E-03	2,02E-03
China	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02
Kolumbien	2,50E-07	2,50E-07	2,50E-07
Kongo	5,29E-06	5,29E-06	5,29E-06
Dominikanische Republik	9,00E-06	9,00E-06	9,00E-06
Ecuador	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eritrea	3,60E-07	3,60E-07	3,60E-07
Äthiopien	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Finnland	1,52E-05	1,52E-05	1,52E-05
Ghana	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Griechenland	2,25E-06	2,25E-06	2,25E-06
Guatemala	1,04E-04	1,04E-04	1,04E-04
Honduras	3,61E-06	3,61E-06	3,61E-06
Indien	1,80E-04	1,80E-04	1,80E-04
Indonesien	5,93E-05	5,93E-05	5,93E-05
Iran	2,25E-06	2,25E-06	2,25E-06
Irland	9,00E-08	9,00E-08	9,00E-08
Japan	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Kasachstan	1,36E-03	1,36E-03	1,36E-03
Südkorea	3,61E-06	3,61E-06	3,61E-06

**Tab. 9.2** (Fortsetzung)

Land	Produktion in t 2013 (basierend auf BGS)	Prozentualer Anteil eines Landes an der globalen Produktion (Marktanteile)	Quadierte Marktanteile
Nordkorea	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Laos	1,44E-06	1,44E-06	1,44E-06
Makedonien	1,44E-06	1,44E-06	1,44E-06
Mexiko	4,97E-02	4,97E-02	4,97E-02
Mongolei	1,21E-06	1,21E-06	1,21E-06
Marokko	9,60E-05	9,60E-05	9,60E-05
Namibia	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Neuseeland	1,60E-07	1,60E-07	1,60E-07
Nicaragua	2,50E-07	2,50E-07	2,50E-07
Peru	1,98E-02	1,98E-02	1,98E-02
Philippinen	2,25E-06	2,25E-06	2,25E-06
Polen	1,77E-03	1,77E-03	1,77E-03
Portugal	2,56E-06	2,56E-06	2,56E-06
Rumänien	4,90E-07	4,90E-07	4,90E-07
Russland	2,93E-03	2,93E-03	2,93E-03
Saudi-Arabien	4,00E-08	4,00E-08	4,00E-08
Serbien	9,00E-08	9,00E-08	9,00E-08
Slowakei	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Solomonen	1,16E-05	1,16E-05	1,16E-05
Südafrika	6,76E-06	6,76E-06	6,76E-06
Spanien	1,44E-06	1,44E-06	1,44E-06
Sudan	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Schweden	1,72E-04	1,72E-04	1,72E-04
Tadschikistan	1,00E-08	1,00E-08	1,00E-08
Tansania	1,60E-07	1,60E-07	1,60E-07
Thailand	1,44E-06	1,44E-06	1,44E-06
Türkei	5,04E-05	5,04E-05	5,04E-05
USA	1,75E-03	1,75E-03	1,75E-03
Usbekistan	5,29E-06	5,29E-06	5,29E-06
			<i>Summe= 0,11</i>

Die in der ESSENZ-Methode verwendeten Daten für die Unternehmen sind aus der kommerziellen SNL-Datenbank [32] entnommen und können daher hier nicht wiedergegeben werden. Die Berechnung der Unternehmenskonzentration erfolgt nach demselben Prinzip wie die Berechnung der Konzentration der Reserven und der Konzentration der Produktion. Für Silber ergibt sich eine Unternehmenskonzentration von 0,02.

**Minenkapazität** Zur Quantifizierung wird der Wirkungsindikator statische Reichweite verwendet (siehe Gl. 4.10). Um die statische Reichweite (SR) für das Beispiel Silber zu ermitteln, werden die Reserven (Daten aus USGS [22]) durch die entsprechende jährliche Produktion dividiert (Daten aus BGS [23]) (siehe Gleichung Gl. 9.6):

$$SR_i = \frac{\text{Reserven}_{Ag}}{\text{jährliche Produktion}_{Ag}} = \frac{53.0000}{26.107} = 20,3 \text{ Jahre.} \quad \text{Gl. 9.6}$$

Für Silber ergibt sich somit eine statische Reichweite von 20,3 Jahre. Der Berechnung des Kehrwerts ergibt sich nach Gl. 9.7:

$$\text{Statische Reichweite}^* = \frac{1}{\text{Statische Reichweite}} = \frac{1}{20,3 \text{ Jahre}} = 4,93 \times 10^{-2}. \quad \text{Gl. 9.7}$$

Es ergibt sich somit für Silber ein Wert von  $4,93 \times 10^{-2}$ .

### Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben

Als Wirkungsindikator zur Messung der Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben wird der Policy Potential Index ( $PPI_x$ ) [33] verwendet (siehe Gl. 4.11). Für Silber wird er nach Gl. 9.8 mit den in Tab. 9.3 aufgeführten Daten bestimmt:

$$PPI_{Ag} = \sum(\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an den Reserven}_{Ag} \times PPI_x). \quad \text{Gl. 9.8}$$

Zur Berechnung werden die Daten für die globalen Reserven aus der USGS-Datenbank und entsprechend die prozentualen Anteile der Länder ermittelt. Zudem müssen für jedes Land die dazugehörigen  $PPI_x$ -Werte identifiziert werden. Diese werden mit dem prozentualen Anteil des Landes an den globalen Reserven multipliziert, und anschließend wird die Summe gebildet. Länder, für die keine Daten zur Verfügung stehen, können nicht mit in die Berechnung einbezogen werden. Für Silber ergibt sich ein  $PPI_{Ag}$  von 53,19.

**Handelshemmnisse** Für die Quantifizierung von Handelshemmnissen wird der Enabeling Trade Index ( $ETI_x$ ) [35] verwendet (siehe Gl. 4.12). Die Berechnung des Wirkungsindikatorbetrags für Silber erfolgt nach Gl. 9.9 und Tab. 9.4:

$$ETI_{Ag} = \sum(\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an der globalen Produktion}_{Ag} \times ETI_x). \quad \text{Gl. 9.9}$$

**Tab. 9.3** Darstellung der globalen Reservendaten, Marktanteile und PPI-Werte für die Berechnung für Silber

Land	Reserven in t 2013 (basierend auf USGS)	Prozentualer Anteil eines Landes an den globalen Reserven	PPI-Werte der Länder	PPI x Anteile
USA	25.000	0,0472	32,92	1,55
Australien	85.000	0,1604	83,26	13,35
Bolivien	22.000	0,0415	24,41	1,01
Kanada	7000	0,0132	31,16	0,41
Chile	77.000	0,1453	82,66	12,01
China	43.000	0,0811	51,37	4,17
Mexiko	37.000	0,0698	49,51	3,46
Peru	98.900	0,1866	62,83	11,72
Polen	85.000	0,1604	34,31	5,50
Andere Länder	50.000	0,0943		
Russland	Keine Daten			
				<i>Summe= 53,19</i>

Zur Berechnungen werden die Daten für die globale Produktion aus der BGS-Datenbank und entsprechend die prozentualen Anteile der Länder bestimmt. Zudem müssen für jedes Land die dazugehörigen  $ETI_x$ -Werte identifiziert werden. Diese werden mit den Marktanteilen multipliziert, und anschließend wird die Summe gebildet. Für Silber ergibt sich ein Wert von 3,34.

**Koppelproduktion** Für die Quantifizierung der Kategorie Koppelproduktion (Kop) wird der Wirkungsindikator „Anteil des durch Koppelproduktion gewonnen Materials“ ermittelt. Die IZT-Studie *Kritische Rohstoffe für Deutschland* [36] stellt hierzu Angaben zu Haupt- und Nebenprodukten bereit. Dabei werden die Metalle in die Kategorien „nur Hauptproduktion“, „überwiegend Hauptproduktion“, „überwiegend Nebenprodukt“ und „nur Nebenprodukt“ eingeteilt und in der ESSENZ-Methode quantifiziert (Tab. 4.1).

Für Silber, welches überwiegend als Nebenprodukt abgebaut wird, ergibt sich ein Wert von 0,67.

**Politische Stabilität** Die Quantifizierung der Kategorie erfolgt mithilfe der von der Weltbank erhobenen und entwickelten sechs Worldwide Governance Indicators [37], die, wie in Abschn. 4.2 beschrieben, zu einem Index zusammengerechnet werden ( $WGII_x$ ). Für Silber wird er nach dem in Gl. 9.10 und Tab. 9.5 dargestellten Vorgehen bestimmt:

$$WGII_{Ag} = \sum (\text{Anteil eines Landes}_x \text{ in \% an der globalen Produktion}_{Ag} \times WGII_x).$$

Gl. 9.10

**Tab. 9.4** Darstellung der globalen Produktionsdaten, Marktanteile und ETI-Werte für die Berechnung für Silber

Land	Produktion in t 2013 (basierend auf BGS)	Prozentualer Anteil eines Landes an der globalen Produktion (Marktanteile)	ETI-Werte	ETI-Werte x Marktanteile
Argentinien	682,60	0,0261	3,9	1,02E-01
Armenien	14,08	0,0005	3,3	1,65E-03
Australien	1840,00	0,0705	2,7	1,90E-01
Azerbaidshjan	1,90	0,0001	3,7	3,70E-04
Bolivien	1288,00	0,0493	3,9	1,92E-01
Botswana	22,60	0,0009	3,9	3,51E-03
Brasilien	20,00	0,0008	3,8	3,04E-03
Bulgarien	55,00	0,0021	3,6	7,56E-03
Kanada	645,98	0,0247	2,6	6,42E-02
Chile	1172,85	0,0449	2,5	1,12E-01
China	3670,21	0,1406	3,3	4,64E-01
Kolumbien	13,97	0,0005	3,6	1,80E-03
Kongo	60,43	0,0023	4,4	1,01E-02
Dominikanische Republik	78,23	0,003	3,7	1,11E-02
Ecuador	1,20	0	3,5	0,00E+00
Eritrea	15,80	0,0006	6,6	3,96E-03
Äthiopien	1,40	0,0001	4,4	4,40E-04
Finnland	100,89	0,0039	2,4	9,36E-03
Ghana	3,90	0,0001	4	4,00E-04
Griechenland	39,76	0,0015	3,6	5,40E-03
Guatemala	265,94	0,0102	3,5	3,57E-02
Honduras	50,90	0,0019	3,8	7,22E-03
Indien	349,77	0,0134	4	5,36E-02
Indonesien	200,00	0,0077	3,4	2,62E-02
Iran	40,00	0,0015	4,6	6,90E-03
Irland	7,82	0,0003	2,8	8,40E-04
Japan	3,64	0,0001	2,5	2,50E-04
Kasachstan	963,58	0,0369	3,9	1,44E-01
Südkorea	50,00	0,0019	3,7	7,03E-03

**Tab. 9.4** (Fortsetzung)

Land	Produktion in t 2013 (basierend auf BGS)	Prozentualer Anteil eines Landes an der globalen Produktion (Marktanteile)	ETI-Werte	ETI-Werte x Marktanteile
Nordkorea	3,90	0,0001	2,9	2,90E-04
Laos	32,26	0,0012	3,5	4,20E-03
Makedonien	32,00	0,0012	3,5	4,20E-03
Mexiko	5821,00	0,223	3,5	7,81E-01
Mongolei	29,33	0,0011	4,6	5,06E-03
Marokko	255,00	0,0098	3,2	3,14E-02
Namibia	2,01	0,0001	3,7	3,70E-04
Neuseeland	11,22	0,0004	2,4	9,60E-04
Nicaragua	13,75	0,0005	3,6	1,80E-03
Peru	3674,28	0,1407	3,3	4,64E-01
Philippinen	40,04	0,0015	3,5	5,25E-03
Polen	1100,00	0,0421	3,3	1,39E-01
Portugal	40,62	0,0016	3,1	4,96E-03
Rumänien	18,00	0,0007	3,7	2,59E-03
Russland	1412,00	0,0541	4,1	2,22E-01
Saudi-Arabien	4,16	0,0002	3,3	6,60E-04
Serbien	8,40	0,0003	3,9	1,17E-03
Slowakei	0,51	0	3,3	0,00E+00
Solomonen	89,67	0,0034	4	1,36E-02
Südafrika	68,78	0,0026	3,4	8,84E-03
Spanien	31,00	0,0012	2,8	3,36E-03
Sudan	0,70	0	3,8	0,00E+00
Schweden	341,35	0,0131	2,5	3,28E-02
Tadschikistan	1,80	0,0001	3,6	3,60E-04
Tansania	11,01	0,0004	4,1	1,64E-03
Thailand	32,38	0,0012	3,4	4,08E-03
Türkei	186,62	0,0071	3,3	2,34E-02
USA	1090,00	0,0418	2,6	1,09E-01
Usbekistan	60,00	0,0023	3,7	8,51E-03
				<i>Summe= 3,34</i>

**Tab. 9.5** Darstellung der globalen Produktionsdaten, Marktanteile und WGII-Werte für die Berechnung für Silber

Land	Produktion in t 2013 (basierend auf BGS)	Prozentualer Anteil eines Landes an der globalen Produktion (Marktanteile)	WGII-Werte	WGII-Werte x Marktanteile
Argentinien	682,60	0,0261	2,48	6,47E-02
Armenien	14,08	0,0005	2,28	1,14E-03
Australien	1840,00	0,0705	0,55	3,89E-02
Azerbaidtschan	1,90	0,0001	2,82	2,82E-04
Bolivien	1288,00	0,0493	2,66	1,31E-01
Botswana	22,60	0,0009	1,45	1,31E-03
Brasilien	20,00	0,0008	2,14	1,71E-03
Bulgarien	55,00	0,0021	1,99	4,18E-03
Kanada	645,98	0,0247	0,52	1,28E-02
Chile	1172,85	0,0449	0,94	4,22E-02
China	3670,21	0,1406	2,66	3,74E-01
Kolumbien	13,97	0,0005	2,42	1,21E-03
Kongo	60,43	0,0023	3,68	8,47E-03
Dominikanische Republik	78,23	0,003	2,40	7,20E-03
Ecuador	1,20	0	2,69	0,00E+00
Eritrea	15,80	0,0006	3,60	2,16E-03
Äthiopien	1,40	0,0001	3,03	3,03E-04
Finnland	100,89	0,0039	0,27	1,05E-03
Ghana	3,90	0,0001	2,04	2,04E-04
Griechenland	39,76	0,0015	1,81	2,71E-03
Guatemala	265,94	0,0102	2,73	2,79E-02
Honduras	50,90	0,0019	2,80	5,32E-03
Indien	349,77	0,0134	2,46	3,30E-02
Indonesien	200,00	0,0077	2,47	1,90E-02
Iran	40,00	0,0015	3,24	4,85E-03
Irland	7,82	0,0003	0,70	2,10E-04
Japan	3,64	0,0001	0,81	8,09E-05
Kasachstan	963,58	0,0369	2,80	1,03E-01
Südkorea	50,00	0,0019	3,75	7,13E-03

**Tab. 9.5** (Fortsetzung)

Land	Produktion in t 2013 (basierend auf BGS)	Prozentualer Anteil eines Landes an der globalen Produktion (Marktanteile)	WGII-Werte	WGII-Werte x Marktanteile
Nordkorea	3,90	0,0001	1,36	1,36E-04
Laos	32,26	0,0012	2,17	2,60E-03
Makedonien	32,00	0,0012	2,17	2,60E-03
Mexiko	5821,00	0,223	2,27	5,07E-01
Mongolei	29,33	0,0011	2,30	2,53E-03
Marokko	255,00	0,0098	2,46	2,41E-02
Namibia	2,01	0,0001	1,76	1,76E-04
Neuseeland	11,22	0,0004	0,31	1,23E-04
Nicaragua	13,75	0,0005	2,65	1,32E-03
Peru	3674,28	0,1407	2,36	3,32E-01
Philippinen	40,04	0,0015	2,43	3,65E-03
Polen	1100,00	0,0421	1,28	5,39E-02
Portugal	40,62	0,0016	1,16	1,85E-03
Rumänien	18,00	0,0007	1,97	1,38E-03
Russland	1412,00	0,0541	2,83	1,53E-01
Saudi-Arabien	4,16	0,0002	2,42	4,84E-04
Serbien	8,40	0,0003	2,22	6,65E-04
Slowakei	0,51	0	1,41	0,00E+00
Solomonen	89,67	0,0034	2,56	8,72E-03
Südafrika	68,78	0,0026	1,89	4,90E-03
Spanien	31,00	0,0012	1,30	1,56E-03
Sudan	0,70	0	3,73	0,00E+00
Schweden	341,35	0,0131	0,31	4,08E-03
Tadschikistan	1,80	0,0001	1,15	1,15E-04
Tansania	11,01	0,0004	2,57	1,03E-03
Thailand	32,38	0,0012	2,41	2,90E-03
Türkei	186,62	0,0071	2,19	1,56E-02
USA	1090,00	0,0418	1,34	5,61E-02
Usbekistan	60,00	0,0023	3,36	7,74E-03
				<i>Summe= 2,09</i>

Zur Berechnungen werden die Daten für die globale Produktion aus der BGS-Datenbank und entsprechend die prozentualen Anteile der Länder bestimmt. Zudem müssen für jedes Land die dazugehörigen  $WGII_x$ -Werte identifiziert werden. Diese werden mit den Marktanteilen multipliziert, und anschließend wird die Summe gebildet. Für Silber ergibt sich ein Wert von 2,09.

**Preisschwankungen** In der ESSENZ-Methode wird die Kategorie Preisschwankungen (PRS) über den Wirkungsindikator Volatilität quantifiziert. Werte für die Volatilität vieler Metalle und fossile Rohstoffe werden von der BGR [40] über den Zeitraum der letzten 5 Jahre bereitgestellt.

Für Silber ergibt sich eine Volatilität von 28,3%.

**Nachfragewachstum** Die Kategorie Nachfragewachstum (NFW) wird in der ESSENZ-Methode über die Bestimmung der Nachfrage quantifiziert, indem das Wachstum der Produktion über die letzten 5 Jahre mit BGS-Daten [23] betrachtet wird (siehe Gl. 4.15). Für Silber wird der Wirkungsindikatorbetrag nach Gl. 9.11 und Tab. 9.6 bestimmt:

$$\begin{aligned} NFW_{Ag} &= \frac{\sum_1^5 \left\{ \left( \frac{\text{globale Produktion im Jahr } (n+1)_{Ag}}{\text{globale Produktion im Jahr } n_{Ag}} - 1 \right) \right\}}{5} \\ &= \frac{\left( \frac{22379}{21524} - 1 \right) + \left( \frac{23436}{22379} - 1 \right) + \left( \frac{23476}{23436} - 1 \right) + \left( \frac{36449}{23476} - 1 \right) + \left( \frac{26107}{26449} - 1 \right)}{5} \\ &= \frac{-1\% + 13\% + 0,2\% + 5\% + 5\%}{5} = 4\%. \end{aligned} \tag{Gl. 9.11}$$

Zur Berechnungen werden zuerst die Daten für die globale Produktion aus der BGS-Datenbank für die letzten 6 Jahre ermittelt. Für das Jahr 2009 wird die jährliche Veränderung im Vergleich zu 2008 folgendermaßen ermittelt: Die globale Produktion aus dem Jahr 2009 wird durch die globale Produktion von 2008 dividiert, und anschließend wird der Wert 1 subtrahiert. Dieses Vorgehen wird ebenso für die anderen Jahre angewendet. Abschließend wird über die 5 ermittelten jährlichen Veränderungen der Mittelwert gebildet. Für Silber ergibt sich ein Nachfragewachstum von 4%.

**Primärmaterialeinsatz** Zur Quantifizierung der Kategorie Primärmaterialeinsatz (PE) wird der Wirkungsindikator Primärmaterialanteil (PMA) ermittelt. Daten zum Sekundärmaterialanteil werden aus dem UNEP Bericht *Recycling Rates of Metals* [43] herangezogen. Für Silber wird er nach dem in Gl. 9.12 dargestellten Vorgehen bestimmt:

$$PMA_i = 100 - \text{Sekundärmaterialanteil}_{Ag} = 100\% - 27\% = 73\%. \tag{Gl. 9.12}$$

Für Silber ergibt sich ein Primärmaterialanteil von 73%.

**Tab. 9.6** Darstellung der globalen Produktionsdaten und jährliche Veränderungen für die Berechnung des Nachfragewachstums für Silber

Jahr	Globale Produktion	Jährliche Veränderung
2013	26.107	-1 %
2012	26.449	13 %
2011	23.476	0,2 %
2010	23.436	5 %
2009	22.379	4 %
2008	21.524	
		Mittelwert= 4 %

### Berechnung der Charakterisierungsfaktoren

Nachdem für alle 11 Kategorien die Wirkungsindikatorbeträge für Silber bestimmt wurden, erfolgt die Berechnung der Charakterisierungsfaktoren nach Gl. 9.13. Dabei wird jedem Wirkungsindikatorbetrag ein spezifischer Grenzwert gegenübergestellt und das Ergebnis anschließend quadriert (Distance-to-Target-Wert – DtT-Wert). Anschließend wird über die globale Produktion normiert (Tab. 9.7):

$$nDtT - Wert_{K,i} = \frac{1}{globale\ Produktion_i} \times \left( \frac{Wirkungsindikatorbetrag_{i,j}}{Grenzwert_j} \right)^2.$$

Gl. 9.13

In der ESSENZ-Methode sind zur Berechnung Standardgrenzwerte festgelegt (Abschn. 4.1.2), die aber vom Anwender individuell angepasst werden können. Zur Berechnung der DtT-Werte wird der Wirkungsindikatorbetrag durch den Grenzwert dividiert (Ausnahme: Minenkapazität – Abschn. 4.1.2). DtT-Werte, die Werte <1 aufweisen, werden vor der Normierung auf 0 gesetzt. Für die Normierung wird die globale Produktionsmenge von Silber (26.107.000 kg) aus dem Jahr 2013 verwendet (Abschn. 9.4).

Die nDtT-Werte werden anschließend noch entsprechend Gl. 9.14 skaliert. Um die Skalierung für die nDtT-Werte durchzuführen, werden die maximalen Wirkungsindikatorbeträge für jede Kategorie herangezogen (Abschn. 9.5). Die Skalierung erfolgt linear, daher wird der maximale nDtT-Wert (nDtT<sub>max</sub>) auf 1,7\*10<sup>13</sup> gesetzt, und die anderen nDtT-Werte werden über eine lineare Funktion entsprechend ermittelt. Der Quotient aus 1,7\*10<sup>13</sup> und dem maximalen nDtT-Wert (nDtT<sub>K,max</sub>) der Kategorie wird mit dem nDtT-Wert (nDtT<sub>K,i</sub>) multipliziert.

Da für Silber nur für die Kategorien MK, HH, Kop und PRS Ergebnisse größer 0 ermittelt wurden, müssen auch nur für diese Kategorien die skalierten Ergebnisse bestimmt werden. Wenn der nDtT-Werte 0 ergibt, ist auch der skalierte Werte 0. Die

**Tab. 9.7** Ergebnisse der nDtT-Werte aller Kategorien für Silber

Kategorie	Wirkungs- indikatorbetrag	Grenzwert	DfT-Wert	DfT-Wert*	nDtT-Werte
Konz_R	0,13	0,15	0,75	0	0
Konz_P	0,11	0,15	0,54	0	0
Konz_U	0,02	0,15	0,02	0	0
MK	$4,93 \cdot 10^{-2}$	0,025	3,89	3,89	$1,49 \cdot 10^{-7}$
REX	53,19	55	0,94	0	0
HH	3,34	3,5	0,91	0	0
Kop	0,7	0,25	7,84	7,84	$3 \cdot 10^{-7}$
PS	2,09	3,8	0,4	0	0
PRS	28,3%	20%	2,00	2	$7,66 \cdot 10^{-8}$
NFW	4%	5%	0,64	0	0
PE	73%	75%	0,95	0	0

\* DfT-Werte < 1 werden auf 0 gesetzt

Anwendung von Gl. 9.14 ist beispielhaft für die Kategorie „Handelshemmnisse“ dargestellt:

$$CF_{HH,Ag} = \begin{cases} 2,06 \cdot 10^{-5} \cdot HH_{max} \gg 1,7 \cdot 10^{13} \\ nDtT_{HH,Ag} \gg \frac{1,7 \cdot 10^{13}}{2,06 \cdot 10^{-5} \cdot max,K} \times 4,31 \cdot 10^{-5} \cdot HH_{Ag} = 3,56 \cdot 10^{10} \end{cases}$$

Gl. 9.14

Im Folgenden werden für Silber alle ermittelten Charakterisierungsfaktoren aufgelistet (Tab. 9.8).

### **Bewertung der Teildimension „Gesellschaftliche Akzeptanz“**

In der ESSENZ-Methode wird ein Screeningindikator zur Bewertung der Kategorie Einhaltung sozialer Standards (GAs) angewendet. Für die drei betrachteten Gesichtspunkte „Kinderarbeit“ (KA), „Zwangsarbeit“ (ZA) und „Konfliktgebiete“ (KG) können aus der Social Hotspot Database (SHDB) [49] die entsprechenden Risikowerte für den Abbau von Metallen und fossilen Rohstoffen entnommen werden. Der Wirkungsindikator ( $WI_{gesellschaftliche\ Akzeptanz,s,i}$ ) für ein Metall oder fossilen Rohstoff wird ermittelt, indem der prozentuale Anteil an der Produktion mit den länderspezifischen Risikofaktoren aus der SHDB multipliziert wird. Diese werden zu einem Gesamtergebnis aufsummiert. Da es sich bei der SHDB um eine kommerzielle Datenbank handelt, können die entsprechenden Risikowerte hier nicht wiedergegeben werden. Die Berechnung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie im vor-

**Tab. 9.8** Charakterisierungsfaktoren für Silber

Kategorie	Charakterisierungsfaktor $\left[ \frac{1}{kg} \right]$
Nachfragewachstum	0
Koppelproduktion	1,4335E+10
Primärmaterialeinsatz	0
Minenkapazität	975066512
Unternehmenskonzentration	0
Preisentwicklung	9,2159E+10
Konzentration der Reserven	0
Konzentration der Produktion	0
Handelshemmnisse	3,5604E+10
Realisierbarkeit von Explorationsvorhaben	0
Politische Stabilität	4,0253E+10

herigen Abschnitt für die Berechnung der Wirkungsindikatorbeträge der Kategorien Realisierbarkeit des Rohstoffabbaus, politische Stabilität und Handelshemmnisse dargestellt.

Zur Quantifizierung der Kategorie Einhaltung von Umweltstandards wird der Wirkungsindikator ( $WI_{GAz,um,i}$ ) nach Gl. 4.18 ermittelt. Dazu wird der prozentuale Anteil der globalen Produktion in einem Land  $x$  ( $pAgP_x$ ) mit dem entsprechenden Environmental Performance Index (EPI) [55] – genauer den Subindikatoren für den Bereich Schutz der Natur – Critical Habitat Protection, CHP (Schutz kritischer Habitats), Marine Protected Areas, MPA (Schutz mariner Gebiete) und Terrestrial Protected Areas, TPA (Schutz terrestrischer Gebiete) – multipliziert. Die Berechnung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie im vorherigen Abschnitt für die Berechnung der Wirkungsindikatorbeträge der Kategorien Realisierbarkeit des Rohstoffabbaus, politische Stabilität und Handelshemmnisse dargestellt.

### Bewertung der Umweltauswirkungen

Umweltauswirkungen werden über den gesamten Lebensweg basierend auf der Ökobilanzmodellierung, wie in Kap. 3 erläutert, bewertet. Insgesamt werden die fünf Umweltauswirkungen Klimaänderung, Versauerung, Eutrophierung, Abbau der Ozonschicht und Bildung photochemischer Substanzen (Smog) betrachtet. Ökobilanzsoftware wie GaBi oder SimaPro können dabei helfen, die Bewertung der Umweltauswirkungen von Produktsystemen zu erleichtern.

**Open Access** Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung-Nicht kommerziell 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche für nicht kommerzielle Zwecke die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, ein Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Etwaige Abbildungen oder sonstiges Drittmateriale unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende oder der Quellreferenz nichts anderes ergibt. Sofern solches Drittmateriale nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht, ist eine Vervielfältigung, Bearbeitung oder öffentliche Wiedergabe nur mit vorheriger Zustimmung des betreffenden Rechteinhabers oder auf der Grundlage einschlägiger gesetzlicher Erlaubnisvorschriften zulässig.

# Glossar

**Charakterisierungsfaktor** Faktor, der aus dem Charakterisierungsmodell abgeleitet ist und die Umwandlung der Sachbilanzergebnisse einer Kategorie in eine gemeinsame Einheit erlaubt.

**Charakterisierungsmodell** Es modelliert das Verhalten von Substanzen in der Umwelt und setzt die Sachbilanzdaten mit dem Wirkungsindikator in Beziehung.

**Elementarfluss** Stoff- oder Energiefluss, der aus der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wird (z. B. Frischwasser), oder ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird (z. B. CO<sub>2</sub> Emissionen).

**Funktionelle Einheit** Sie quantifiziert den Nutzen des untersuchten Produktsystems und dient zudem als Einheit für den Vergleich von mehreren Produktalternativen.

**Hintergrundsystem** Es setzt sich aus den Vor- und nachgelagerte Prozessen zusammen, die nur indirekte beeinflusst werden können.

**Material** Stoffe, Stoffgemisch und Rohmaterial, das für die Herstellung von Produkten bestimmt ist

**Mengengerüst** Mengenangabe der im Produkt enthaltenen Materialien.

**Referenzfluss** Maß für die Outputs von Prozessen eines vorhandenen Produktsystems, die zur Erfüllung der Funktion notwendig sind.

**Reserve** Teil der Reservebasis, die zum Zeitpunkt der Datenerhebung wirtschaftlich abbaubar ist.

**Reservenbasis** Ressourcen, die das Potenzial haben, in naher Zukunft technisch und wirtschaftlich abbaubar zu werden.

**Resource** Mittel, das es ermöglicht, eine bestimmte Handlung auszuüben:

- Abiotische Ressourcen: unbelebte und nicht erneuerbare Elemente und Mineralien, die in der Erdkruste vorliegen (Energieträger, Erze und sonstige mineralische Rohstoffe) sowie Bestandteile der natürlichen Ressourcen (Wasser, Land).
- Anthropogene Ressourcen: sich in der Technosphäre befindende Materialien (urban mining); z. B. seltene Erden in Elektrogeräten.

- Geologische Ressourcen: sich in der Erde befindende Rohstoffe.
- Natürliche Ressourcen: Bestandteile der Natur – darunter fallen sowohl biotische und abiotische Primärrohstoffe als auch Umweltmedien, physikalischer Raum, strömende Ressourcen wie Windenergie sowie Biodiversität.

**Ressourceneffizienz** Verhältnis aus Wertschöpfung bzw. Nutzen und Ressourceneinsatz.

**Rohstoff** Stoff oder Stoffgemisch, das in unbearbeitetem Zustand in den Produktionsprozess eingeht:

- Abiotische Rohstoffe: nicht erneuerbare Rohstoffe, die aus der natürlichen Umwelt durch menschliche Aktivität entnommen werden.
- Biotische Rohstoffe: belebte erneuerbare Rohstoffe tierischen oder pflanzlichen Ursprungs, die aus der natürlichen Umwelt durch menschliche Aktivität entnommen werden.
- Primärrohstoffe: werden durch Entnahme aus der Natur gewonnen und sind noch nicht weiterbearbeitet.
- Sekundärrohstoffe: Durch Aufarbeitung aus entsorgtem Material gewonnene Rohstoffe.

**Rohmaterial** Stoff oder Stoffgemisch, das in gering bearbeitetem Zustand in den Produktionsprozess geht z. B. Kupferkonzentrat.

**Stoff** In chemisch einheitlicher Form vorliegende Materie, gekennzeichnet durch charakteristische physikalische und chemische Eigenschaften.

**Stoffgemisch** Gemisch, welches aus zwei oder mehreren Stoffen besteht.

**Ultimative Reserve** Ein geologisches Ressourcenvorkommen in der Erdkruste.

**Umweltmedien** Elemente der natürlichen Umwelt, die Lebensraum für Organismen darstellen (Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre).

**Vordergrundsystem** Ein System, das sich aus Prozessen bzw. Materialien zusammensetzt, die direkt beeinflusst werden können.

**Wirkungsindikator** Der Wirkungsindikator ist die quantifizierbare Darstellung der Wirkungskategorie.

# Referenzen

1. BIO Intelligence Service, "Assessment of resource efficiency indicators and targets. Final report prepared for the European Commission, DG Environment. Institute for Social Ecology (SEC) and Sustainable Europe Research Institute (SERI)." 2012.
2. G. Angerer, L. Erdmann, F. Marscheider-Weidemann, M. Scharp, A. Lüllmann, V. Handke, and M. Marwerde, *Rohstoffe für Zukunftstechnologien Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. 2009.
3. L. Schneider, V. Bach, and M. Finkbeiner, "LCA Perspectives for Resource Efficiency Assessment," in *Special types of LCA*, Springer Berlin/Heidelberg, accepted, 2015.
4. B. und R. (BMUB) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, "Überblick zum Deutschen Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes)," 2015. [Online]. Available: <http://www.bmub.bund.de/themen/wirtschaft-produkte-ressourcen/ressourceneffizienz/progress-das-deutsche-ressourceneffizienzprogramm/>.
5. Bundesregierung Deutschland, "Nationale Nachhaltigkeitsstrategie Fortschrittsbericht 2012," 2012. [Online]. Available: [http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Nachhaltigkeitsstrategie/1-die-nationale-nachhaltigkeitsstrategie/nachhaltigkeitsstrategie/\\_node.html;jsessionid=AB7764D74BA79942AF3B8D330034811D.s3t2](http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Nachhaltigkeitsstrategie/1-die-nationale-nachhaltigkeitsstrategie/nachhaltigkeitsstrategie/_node.html;jsessionid=AB7764D74BA79942AF3B8D330034811D.s3t2).
6. European Commission, "Resource Efficiency .The Roadmap's approach to resource efficiency indicators," 2015. [Online]. Available: [http://ec.europa.eu/environment/resource\\_efficiency/targets\\_indicators/roadmap/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/resource_efficiency/targets_indicators/roadmap/index_en.htm). [Accessed: 01-Aug-2015].
7. Europäische Kommission, "MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DEN RAT, DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIAL-AUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen (670)." 2005.
8. M. Ritthoff, H. Rohn, and C. Liedtke, "Calculating MIPS – Resource productivity of product-and services. Wuppertal: Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy," 2002.
9. L. Schneider, "A comprehensive approach to model abiotic resource provision capability in the context of sustainable development." 2014.
10. International Organization for Standardization, "ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz -Anforderungen und Anleitungen." 2006.
11. J. B. Guinée, M. Gorrae, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. van Oers, A. W. Sleeswijk, S. Suh, H. A. U. de Haes, H. de Bruijn, R. van Duin, and M. A. J. Huijbregts, "Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background," 2002.
12. W. Klöpffer and B. Grahl, *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
13. A. Kapur and T. E. Graedel, "Copper mines above and below the ground," *Environ. Sci. Technol.*, pp. 3135–3141, 2006.

14. L. van Oers, A. de Konig, J. B. Guinée, and G. Huppes, "Abiotic resource depletion in LCA Abiotic resource depletion in LCA Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the new Dutch LCA Handbook," 2002.
15. L. Schneider, M. Berger, and M. Finkbeiner, "Abiotic resource depletion in LCA – background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model," *Int. J. Life Cycle Assess.*, 2015.
16. L. Schneider, M. Berger, and M. Finkbeiner, "The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 16, pp. 929–936, 2011.
17. A. Knast, *Darstellung und kritische Analyse des Risikomanagements in der unternehmerischen Wohnungswirtschaft*. GRIN Verlag, 2010.
18. T. E. Graedel, R. Barr, C. Chandler, T. Chase, J. Choi, L. Christoffersen, E. Friedlander, C. Henly, C. Jun, N. T. Nassar, D. Schechner, S. Warren, M.-Y. Yang, and C. Zhu, "Methodology of metal criticality determination," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 1063–70, Jan. 2012.
19. VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., "Fachbereich Ressourcenmanagement," 2012. [Online]. Available: <http://www.vdi.de/technik/fachthemen/energie-und-umwelt/fachbereiche/ressourcenmanagement/themen/richtlinienwerk-zur-ressourceneffizienz-zre/>.
20. R. Frischknecht, R. Steiner, and N. Jungbluth, "Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006 Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen," 2006.
21. R. Müller-Wenk, S. Ahbe, and B. A., "Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung." BUWAL, Bern, Schriftenreihe Umwelt 133, 1990.
22. United States Geological Survey, "Commodity Statistics and Information," 2015. [Online]. Available: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/>. [Accessed: 20-May-2004].
23. J. Brown, C. E. Wright, E. R. Raycraft, R. A. Shaw, E. A. Deady, J. Rippingale, T. Bide, and N. Idoine, "World Mineral Production," 2014.
24. D. Rosenau-Tornow, P. Buchholz, A. Riemann, and M. Wagner, "Assessing the long-term supply risks for mineral raw materials—a combined evaluation of past and future trends," *Resour. Policy*, vol. 34, no. 4, pp. 161–175, 2009.
25. European Commission, "Critical raw materials for the EU," 2010.
26. P. Buchholz, D. Huy, and H. Sievers, "DERA Rohstoffinformationen 10 DERA-Rohstoffliste 2012 Angebotskonzentration bei Metallen und Industriemineralen – Potenzielle Preis- und Lieferisiken," 2012.
27. T. E. Graedel, R. Barr, C. Chandler, T. Chase, J. Choi, L. Christoffersen, E. Friedlander, C. Henly, C. Jun, N. T. Nassar, D. Schechner, S. Warren, M. Y. Yang, and C. Zhu, "Methodology of metal criticality determination," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 2, pp. 1063–1070, 2012.
28. S. Lutter, S. Giljum, and M. Lieber, "Global Material Flow database. Material extraction data. Technical Report. Version 2014.2," 2013.
29. OECD, "Measuring Material Flows and Resource Productivity Volume III. Inventory of Country Activities," 2008.
30. P. von der Lippe, *Deskriptive Statistik*. Gustav Fischer, 1993.
31. S. A. Rhoades, "The Herfindahl-Hirschman index," *Fed. Reserv. Bull.*, 1993.
32. SNL, "Metals & Mining," 2015. [Online]. Available: [www.snl.com](http://www.snl.com).
33. M. Cervantes, F. McMahon, and A. Wilson, "Survey of Mining Companies: 2012/2013," 2013.
34. R. Schnell, P. B. Hill, and E. Esser, *Methoden der empirischen Sozialforschung*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2011.
35. M. D. Hanouz, T. Geiger, and S. Doherty, "The Global Enabling Trade Report 2014." 2014.
36. L. Erdmann, S. Behrendt, and M. Feil, "Kritische Rohstoffe für Deutschland „Identifikation aus Sicht deutscher Unternehmen wirtschaftlich bedeutsamer mineralischer Rohstoffe, deren Versorgungslage sich mittel- bis langfristig als kritisch erweisen könnte“,“ no. September, 2011.
37. D. Kaufmann, A. Kraay, and M. Mastruzzi, "The Worldwide Governance Indicators: Methodology and Analytical Issues," *Hague J. Rule Law*, vol. 3, no. 02, pp. 220–246, 2011.
38. Sandschneider, *Stabilität und Transformation politischer Systeme Politikwissenschaftliche Aspekte einer Theorie der Systemtransformation*. Opladen: Leske und Budrich, 1995.

39. S. Moeckli, *Das politische System der Schweiz verstehen: Wie es funktioniert – Wer partizipiert – Was resultiert*. Mörschwil: Kaufmännischer Lehrmittel Verlag KLV, 2012.
40. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, “Volatilitätsmonitor.” 2014.
41. E. Von Ledebur and J. Schmitz, “Preisvolatilität auf landwirtschaftlichen Märkten,” no. April. 2011.
42. G. Stiller, “Nachfrage,” 2015. [Online]. Available: <http://www.wirtschaftslexikon24.com/d/nachfrage/nachfrage.htm>. [Accessed: 01-Apr-2015].
43. T. E. Graedel, *UNEP Recycling rates of metals - A Status Report, a Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the international Resource Panel*. 2011.
44. The Guardian, “Sustainable mining: an inherent contradiction in terms?,” 2015. [Online]. Available: <http://www.theguardian.com/sustainable-business/2015/jan/05/sustainable-mining-business-poverty-environment-new-framework>. [Accessed: 01-Aug-2015].
45. 3sat, “Afrikas giftigste Müllhalde. Der Handel mit Elektroschrott in Ghana,” 2012. [Online]. Available: <http://www.3sat.de/page/?source=/scobel/160141/index.html>. [Accessed: 01-Aug-2015].
46. C. Benoit-Norris, D. A. Cavan, and G. Norris, “Identifying Social Impacts in Product Supply Chains: Overview and Application of the Social Hotspot Database,” *Sustainability*, vol. 4, no. 12, pp. 1946–1965, Aug. 2012.
47. Internationale Arbeiterorganisation, “ILO Kernarbeitsnormen,” 2015. [Online]. Available: <http://www.ilo.org/berlin/arbeits-und-standards/kernarbeitsnormen/lang--en/index.htm>. [Accessed: 01-Aug-2015].
48. Süddeutsche Zeitung, “Apple will auf Mineralien aus Konfliktregionen verzichten,” 2014. [Online]. Available: <http://www.sueddeutsche.de/digital/zuliefererkette-apple-will-auf-mineralien-aus-konfliktregionen-verzichten-1.1887413>. [Accessed: 01-Aug-2015].
49. C. B. Norris, G. Norris, and D. Aulisio, “Social Hotspots Database,” 2013. [Online]. Available: <http://socialhotspot.org/>.
50. Global Trade Analysis Project, “GTAP Data Bases: GTAP 8 Data Base,” 2015. [Online]. Available: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/v8/>. [Accessed: 01-Aug-2015].
51. A. Lehmann, E. Zschieschang, M. Traverso, M. Finkbeiner, and L. Schebek, “Social aspects for sustainability assessment of technologies—challenges for social life cycle assessment (SLCA),” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 18, pp. 1581–1592, 2013.
52. S. Neugebauer, M. Traverso, R. Scheumann, Y.-J. Chang, K. Wolf, and M. Finkbeiner, “Impact pathways to address social well-being and social justice in SLCA – fair wage and level of education,” *Sustainability*, vol. 6, no. 8, pp. 4839–4857, 2014.
53. S. Neugebauer, C. Hellerström, J. Ivanova, M. Traverso, and M. Finkbeiner, “Calculation of fair wage equivalents throughout products’ life cycle – introduction of a new midpoint impact category for social life cycle assessment,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. submitted, 2015.
54. R. Kirchner, “Die wahren Kosten der Seltenen Erden,” *Deutschlandradio Kultur*, 2012. [Online]. Available: [http://www.deutschlandradiokultur.de/die-wahren-kosten-der-seltenen-erden.979.de.html?dram:article\\_id=152987](http://www.deutschlandradiokultur.de/die-wahren-kosten-der-seltenen-erden.979.de.html?dram:article_id=152987). [Accessed: 01-Aug-2015].
55. Yale Center for Environmental Law & Policy, “2014 Environmental Performance Index- Full Report and Analysis,” 2014.
56. Joint Research Centre, “International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook- Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context,” 2011.
57. Joint Research Centre, “International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (LCA),” 2010.
58. A. Lehmann, V. Bach, and M. Finkbeiner, “Product Environmental Footprint in policy and market decisions – applicability and impact assessment,” *Integr. Environ. Assess. Manag. - Spec. Issue*, vol. submitted, 2014.
59. M. Finkbeiner, R. Ackermann, V. Bach, M. Berger, G. Brankatschk, Y.-J. Chang, M. Grinberg, A. Lehmann, J. Martínez-Blanco, N. Minkov, S. Neugebauer, R. Scheumann, L. Schneider, and K. Wolf, “Challenges in Life Cycle Assessment: An Overview of Current Gaps and Research Needs,” in *Background and Future Prospects in Life cycle Assessment*, Springer Berlin/Heidelberg, 2014, pp. 207–258.

60. Intergovernmental Panel on Climate Change, "IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change," *IPCC Climate Change Fourth Assessment Report: Climate Change*, 2007. [Online]. Available: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>.
61. D. Schimel, "Radiative forcing of Climate Change, IPCC model IS92a," 1996.
62. J. Seppälä, M. Posch, M. Johansson, and J.-P. Hettelingh, "Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 11, no. 6, pp. 403–416, 2006.
63. R. F. Wright, R. Helliwell, J. Hruska, T. Larssen, M. Rogora, D. Rzychoń, B. L. Skjelkvåle, and A. Worsztynowicz, "Impacts of Air Pollution on Freshwater Acidification under Future Emission Reduction Scenarios; ICP Waters contribution to WGE report," 2011.
64. M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, and R. van Zelm, "ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level Report I: Characterisation," 2009.
65. E. M. Bennett, S. R. Carpenter, and N. F. Caraco, "Human Impact on Erodeable Phosphorus and Eutrophication: A Global Perspective," *Bioscience*, vol. 51, no. 3, pp. 227–234, 2001.
66. A. F. Bouwman, D. P. VAN Vuuren, R. G. Derwent, and M. Posch, "A global analysis of acidification and eutrophication of terrestrial ecosystems," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 141, no. 1–4, pp. 349–382, 2002.
67. I. P. on C. C. IPCC, *Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2005.
68. World Meteorological Organization, "Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010 Global Ozone Research and Monitoring Project—Report No. 52," 2010.
69. International Organization for Standardization, "ISO 14045: Environmental management – Ecoefficiency assessment of product systems – Principles, requirements and guidelines." 2012.
70. ISO 14044, "International Standard – Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines." International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.
71. L. van Oers, A. de Koning, J. B. Guinée, and G. Huppes, "Abiotic resource depletion in LCA Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as recommended in the Dutch LCA Handbook," 2002.
72. The World Bank Group, "The Worldwide Governance Indicators," 2013. [Online]. Available: <http://info.worldbank.org/governance/wgi/index.aspx#home>.
73. J. B. Guinée, R. Heijungs, H. A. U. de Haes, and G. Huppes, "Quantitative life cycle assessment of products – 2. Classification, valuation and improvement analysis," *J. Clean. Prod.*, vol. 1, no. 2, 1993.
74. R. Heijungs, J. B. Guinée, G. Huppes, R. M. Lankreijer, H. A. Udo de Haes, and A. Wegener Sleswijk, "Environmental life cycle assessment of products – guide and backgrounds (Part 2)," 1992.
75. European Commission, "Product Environmental Footprint (PEF) Guide." p. 22, 2012.
76. O. Jolliet, J. Bare, A.-M. Boulay, C. Bulle, P. Fantke, S. Gheewala, M. Hauschild, N. Itsubo, M. Margni, T. E. McKone, L. M. Canals, L. Postuma, V. Prado-Lopez, B. Ridoutt, G. Sonnemann, R. K. Rosenbaum, T. Seager, J. Struijs, R. Zelm, B. Vigon, and A. Weisbrod, "Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: Findings of the scoping phase," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 4, pp. 962–967, Apr. 2014.
77. A. Lehmann, "Lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsanalyse von Technologien: am Beispiel eines Projekts zum Integrierten Wasserressourcenmanagement." Berlin, 2013.
78. L. Schneider, M. Berger, E. Schüler-Hainsch, S. Knöfel, K. Ruhland, J. Mosig, V. Bach, and M. Finkbeiner, "The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment," *Int. J. Life Cycle Assess.*, Nov. 2013.
79. R. Heijungs, J. Guinée, R. Kleijn, and V. Rovers, "Bias in normalization: Causes, consequences, detection and remedies," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 12, no. 4, pp. 211–216, Jul. 2006.
80. L. Benini, L. Mancini, S. Sala, E. Schau, S. Manfredi, and R. Pant, "Normalisation method and data for Environmental Footprints." 2014.

81. M. Finkbeiner, "Product environmental footprint—breakthrough or breakdown for policy implementation of life cycle assessment?," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 2, pp. 266–271, Dec. 2014.
82. Stainless steel industry, "Future availability of chrome and stainless steel scrap more critical than crude oil," 2012. [Online]. Available: <http://www.oryxstainless.com/en/news/detail-Print/295>.
83. J. Martínez-Blanco, A. Inaba, A. Quiros, S. Valdivia, L. Milà-i-Canals, and M. Finkbeiner, "Organizational LCA: the new member of the LCA family – introducing the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative guidance document," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 20, no. 8, pp. 1045–1047, Aug. 2015.
84. R. E. Scoreboard, "Thirty indicators to measure resource efficiency in the EU," no. December, 2013.
85. M. Fischer-Kowalski, M. Swilling, E. U. von Weizsäcker, Y. Ren, Y. Moriguchi, W. Crane, F. Krausmann, N. Eisenmenger, S. Giljum, P. Hennicke, P. Romero Lankao, A. Siriban Manalang, and S. Sewerin, "Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel.," 2011.
86. M. Berger and M. Finkbeiner, "Methoden zur Messung der Ressourceneffizienz," in *Recycling und Rohstoffe, Band 1*, 2008.
87. European Commission, "Critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials," *Eucom*, vol. 39, pp. 1–84, 2010.
88. J. B. Guinée, "Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products: with a case study on margarines," Leiden, Netherlands, 1995.