

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.

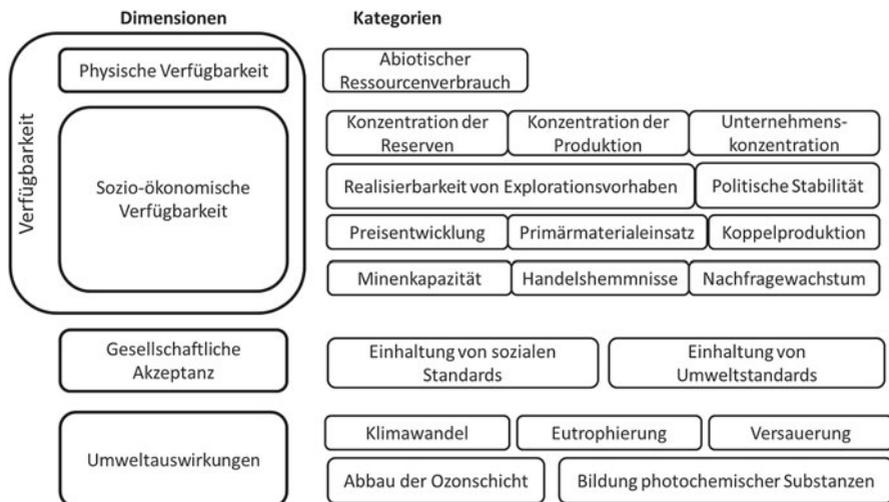


Abb. 4.1 Übersicht der betrachteten Dimensionen und Kategorien

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).

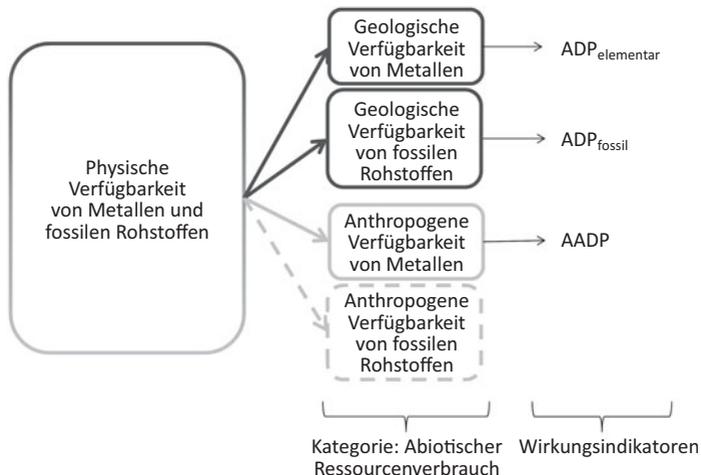


Abb. 4.2 Zusammensetzung der Teildimension „Physische Verfügbarkeit“

In der ESSENZ-Methode wird die Kategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch mit dem Wirkungsindikator¹ 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_{elementar}-Indikator anzuwenden, welcher auf die ultimativen Reserven² 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_{elementar}-Indikator auch auf die Reservenbasis³ oder die Reserven⁴ bezogen sein. In der Praxis wird allerdings hauptsächlich mit dem ADP_{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_{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

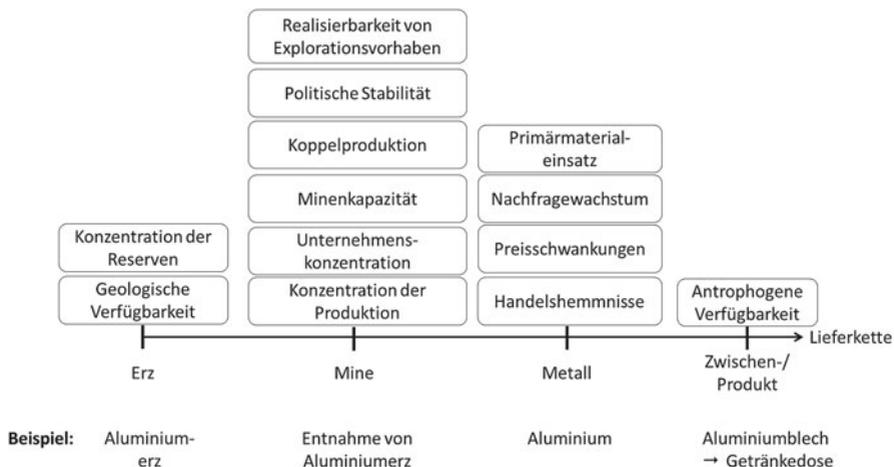


Abb. 4.3 Übersicht über die in der ESSENZ-Methode betrachteten Kategorien und ihre Anordnung in der Lieferkette

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 zur 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.⁵

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.

⁵ 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/>

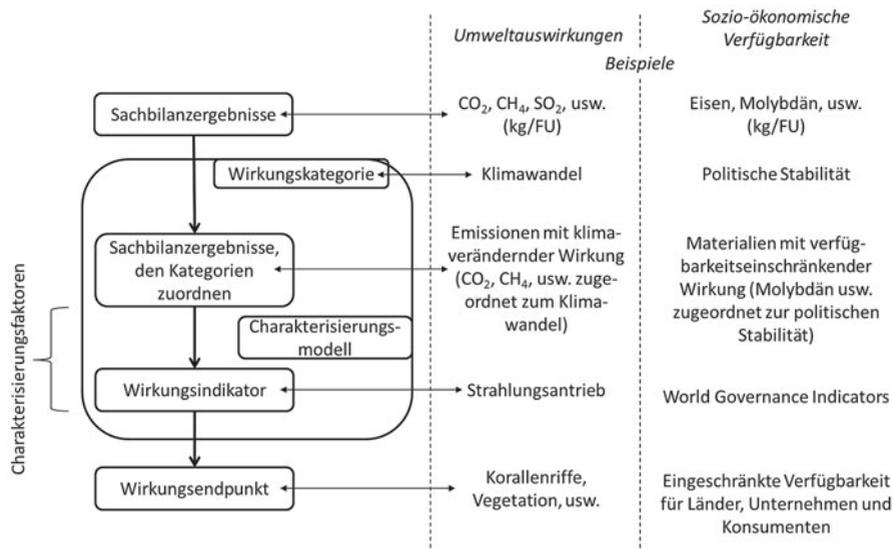


Abb. 4.4 Konzept der Wirkungsindikatoren für die Kategorien Klimawandel und Politische Stabilität nach ISO 14044

Diese werden den Kategorien der Teildimension „Sozio-ökonomischen Verfügbarkeit“ zugewiesen (Klassifizierung) [12]. Die erhobenen Elementarflüsse werden nicht allen Kategorien zugeordnet (z. B. hat SO₂ 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 SO₂ 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 Survey⁶ [22] und des British Geological Survey⁷ (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

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

⁷ <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 Index⁸ (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

⁸ <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)⁹ [35] verwendet (siehe Gl. 4.12):

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

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, 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.¹⁰ 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-

¹⁰ <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_x-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_x-Wert multipliziert wird (siehe Gl. 4.13). Fehlende WGII_x-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_i-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 BGR¹¹ [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.

¹¹ 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*¹² [43] herange-

¹² 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 Charakterisierungsfaktoren¹³ 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 Kategorien 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 CO₂-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 (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 (kg C₂H₄-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 ²
	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 gewonnenen 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 _s)	Soziale Standards werden nicht eingehalten	Einhaltung von sozialen Standards	Im Produktsystem verwendete Metalle und fossile Rohstoffe
	Einhaltung von Umweltstandards (GA _{um})	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

¹ Obwohl die Ergebnisse der Berechnungen mit ADP_{elementar}, ADP_{fossil} und AADP alle zur Wirkungskategorie Abiotischer Ressourcenverbrauch beitragen, müssen sie separat betrachtet werden und können nicht zu einem Gesamtwert zusammengeführt werden.

² 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.