

Verfügbarkeitsbewertung von Rohstoffverbräuchen in Ökobilanzen

Markus Berger, Laura Schneider, Vanessa Bach und Matthias Finkbeiner

1.	Ökobilanz.....	141
2.	Bisherige Ansätze zur Bewertung von Rohstoffverbräuchen in Ökobilanzen	142
3.	Neue Ansätze zur Verfügbarkeitsbewertung von Rohstoffverbräuchen in Ökobilanzen.....	145
3.1.	Bewertung der physischen Verfügbarkeit.....	145
3.2.	Bewertung der sozioökonomischen Verfügbarkeit	146
4.	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	148
5.	Literatur	149

Ökobilanzen sind ein anerkanntes Werkzeug zur Analyse der entlang eines Produktlebensweges (Rohstoffgewinnung, Herstellung, Nutzung, Entsorgung) auftretenden ökologischen Konsequenzen. Während bislang überwiegend Umweltwirkungen, wie Klimaänderung, Versauerung, oder Toxizität, im Vordergrund standen, sind zunehmend auch Fragen der eingesetzten Rohstoffe und deren Verfügbarkeit von Interesse. Dies gilt besonders für Produkte, für deren Herstellung verfügbarkeitskritische Rohstoffe eingesetzt werden, wie z.B. Elektroantriebe oder Lithium-Ionen Batterien.

Trotz dieser Entwicklung, ist die Bewertung des Rohstoffverbrauchs in Ökobilanzen bisher unzureichend gelöst, da mit bestehenden Indikatoren erzielte Ergebnisse ausschließlich durch den Verbrauch von fossilen Energieträgern dominiert werden. Als kritisch wahrgenommene Rohstoffe, wie seltene Erden oder Kupfer, liefern i.d.R. keinen nennenswerten Beitrag zu den Indikatorergebnissen.

In dieser Arbeit werden zunächst die Methodik der Ökobilanz als auch die vorhandenen Ansätze zur Bewertung der Rohstoffverfügbarkeit vorgestellt. Anschließend werden neue Ansätze zur Bewertung der physischen und sozioökonomischen Verfügbarkeit von Rohstoffen vorgestellt und anhand eines Beispiels illustriert.

1. Ökobilanz

Die Ökobilanz ist eine standardisierte Methode [11, 12] mit deren Hilfe die ökologischen Konsequenzen von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen entlang ihres gesamten Lebensweges untersucht werden können.

Bei der Durchführung einer Ökobilanz werden zunächst das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Neben der Erläuterung des Untersuchungszwecks werden dabei die funktionelle Einheit, Systemgrenzen, Abschneidekriterien, Allokationsverfahren, Wirkungskategorien, etc. definiert.

In der darauf folgenden Sachbilanz wird ein Modell erstellt, das alle relevanten Stoff- und Energieflüsse in und zwischen den einzelnen Lebenszyklusphasen erfasst und bezogen auf die funktionelle Einheit quantifiziert. Ziel ist es dabei die Vorketten sämtlicher Inputs bis zur Rohstoffentnahme aus der Natur zurückzuverfolgen und neben den Produkten alle Abfälle sowie Emissionen in Luft, Wasser und Boden zu erfassen.

Nachdem alle Stoffströme tabellarisiert wurden, werden die durch sie hervorgerufenen ökologischen Konsequenzen in der sich anschließenden Wirkungsabschätzung betrachtet. Die Verbindung zwischen einem Stofffluss und dem daraus resultierenden Umweltproblem (z.B. $\text{SO}_2 \rightarrow$ Versauerung) wird mit Hilfe von Charakterisierungsmodellen beschrieben. Diese beinhalten einen für den Umweltwirkungsmechanismus verantwortlichen Wirkungsindikator (z.B. H^+ -Freisetzung für Versauerung), auf dessen Grundlage für alle Stoffe individuelle Charakterisierungsfaktoren ermittelt werden. Anhand dieser Faktoren wird der Einfluss der Stoffe auf die jeweilige Wirkungskategorie quantifiziert und relativ zu einer Referenzgröße angegeben. Die sich daraus ergebenden identischen Einheiten (z.B. SO_2 -Äquivalente) ermöglichen die Aggregation der Beiträge verschiedener Stoffe innerhalb einer Wirkungskategorie. Neben den bis hierher obligatorischen Schritten können die Ergebnisse im Verhältnis zu Referenzgrößen (z.B. jährliche Pro-Kopf SO_2 -Emissionen in Europa) normalisiert und danach in Gruppen zusammengefasst und gewichtet werden.

Abschließend werden innerhalb der Auswertung die Ergebnisse diskutiert und ökologisch kritische Lebenszyklusphasen untersucht, um lohnende Ansätze für ökologische Optimierungen aufzuzeigen. Mit Hilfe von Signifikanzanalysen lassen sich dabei besonders wichtige Parameter im Produktlebenszyklus identifizieren, die zur Simulation von Szenarien herangezogen werden können. Neben der ökologischen Produktoptimierung können Ökobilanzen auch für den Vergleich verschiedener Verfahren oder Organisationen genutzt werden.

2. Bisherige Ansätze zur Bewertung von Rohstoffverbräuchen in Ökobilanzen

Der einfachste, jedoch nicht besonders aussagekräftige, Weg Rohstoffverbräuche in Ökobilanzen zu bewerten, erfolgt über die Addition der Massen aller Rohstoffinputs in das Produktsystem (Kumulierter Rohstoffaufwand). Etwas weiter führt die Bewertung des Rohstoffverbrauchs mit Indikatoren wie der Materialintensität pro Serviceeinheit (MIPS) [14], welche alle Materialbewegungen (abiotische, biotische, Abraum, Bodenbewegung, Wasser, Luft) für die Bereitstellung einer Serviceeinheit berücksichtigt. Im Gegensatz zum Kumulierten Rohstoffaufwand werden also nicht nur Rohstoffe, wie z.B. Bauxit oder Eisenerz, sondern auch ungenutzte Bodenbewegungen sowie Wasser und Luft berücksichtigt. Mithilfe dieser sogenannten ökologischen Rucksäcke, wird der Herstellungsaufwand von Materialien verdeutlicht.

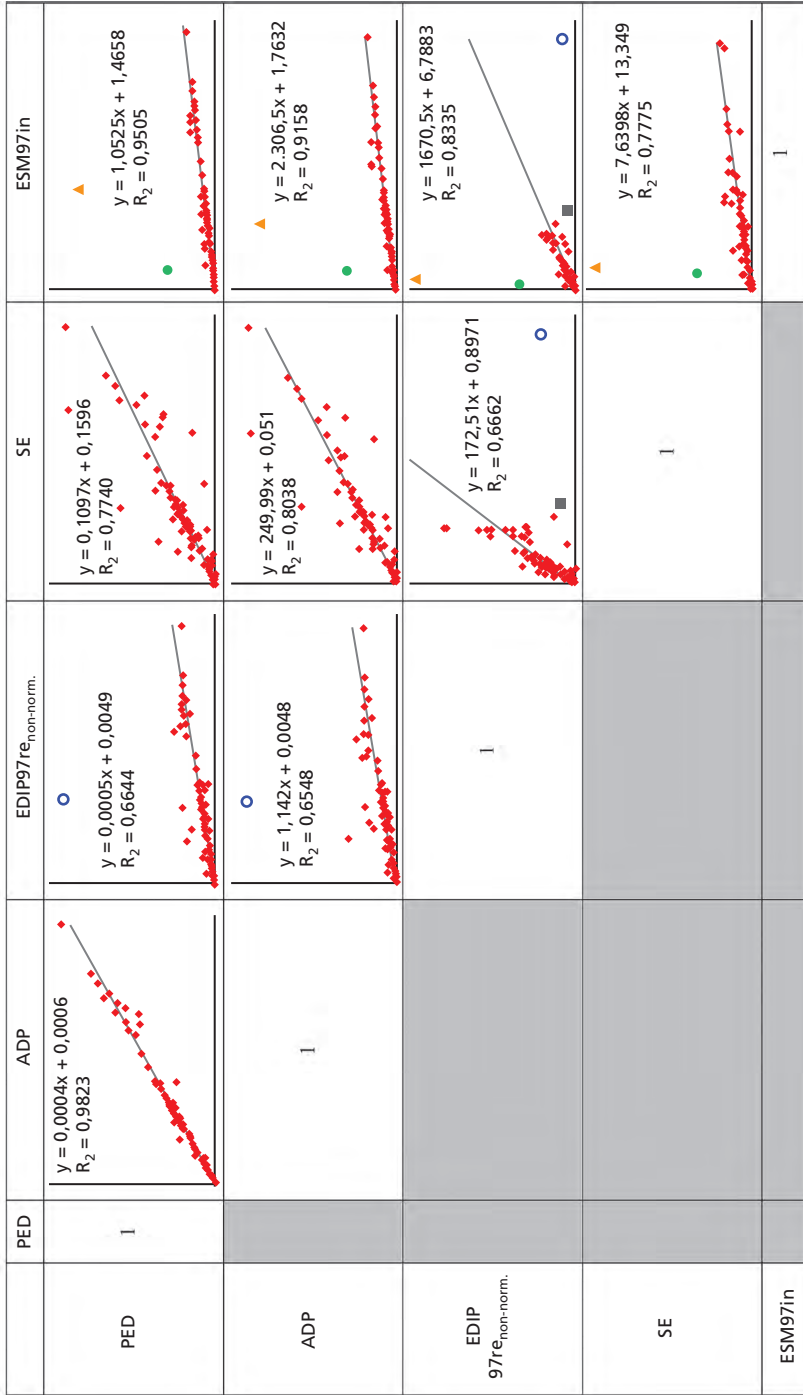
Eine Bewertung mithilfe dieser materialbezogenen Kennzahlen ist zwar pragmatisch und gut kommunizierbar, entbehrt jedoch einer fundierten wissenschaftlichen Grundlage, da die Indikatoren nicht vom Schutzgut abgeleitet wurden. So lassen sich keine konkreten Aussagen über Rohstoffknappheiten oder die Wirkungen des Rohstoffabbaus auf Ökosysteme und die menschliche Gesundheit treffen. Indikatoren wie MIPS ermöglichen also eher eine *Screening Analyse*, da Materialien mit hohen Werten oft auch knapper sind und eine höhere Umweltrelevanz haben (z.B. Stahl 8 t/t und Gold 540.000 t/t).

Analog zur massenbasierten Aggregation der eingesetzten Rohstoffe, kann auch der Energiegehalt aller stofflich und energetisch genutzten Energieträger sowie erneuerbarer Energiequellen aggregiert werden. In diesem Fall wird vom Primärenergiebedarf oder dem Kumulierten Energieaufwand (KEA) [21] gesprochen.

Eine qualifiziertere Möglichkeit zur Bewertung des Verbrauchs stofflicher und energetischer Rohstoffe bieten speziell im Rahmen der Ökobilanz entwickelte Wirkungsabschätzungsmodelle. So bewerten Wirkungskategorien wie das Abiotische Ressourcenverbrauchspotential (ADP) [9] oder die im Rahmen des Environmental Design of Industrial Products (EDIP) Programms entwickelte Kategorie *Ressourcen* [10] den Verbrauch von Rohstoffen basierend auf der geologischen Verfügbarkeit. Einen Schritt weiter gehen Indikatoren wie beispielsweise die *environmentally weighted material consumption* (EMC) [20], welche Rohstoffverbräuche entsprechend ihrer Knappheit und der durch ihre Bereitstellung hervorgerufenen Umweltwirkungen beurteilen. Mit dem in der Ökobilanz umstrittenen Schritt der Gewichtung, bieten Ansätze wie die Methode der ökologischen Knappheit [7] oder ReCiPe [8] auch die Möglichkeit Rohstoffverbräuche und verschiedenen Umweltwirkungen zu einem Single-Score Indikator zusammenzufassen. Eine ausführliche Beschreibung dieser Indikatoren findet sich in einem früheren Tagungsband dieser Konferenzreihe [3].

Ob sich die Vielzahl der Rohstoffverfügbarkeitsindikatoren eingrenzen lässt wurde mit Hilfe von Korrelationsanalysen analysiert. Ziel dabei war es zu testen ob, und unter welchen Bedingungen, verschiedene Kennzahlen zu ähnlichen Ergebnissen führen [2]. Wie in Bild 1 dargestellt, wurden signifikante lineare Abhängigkeiten ($R^2=0.65-0.98$) zwischen allen Rohstoffverfügbarkeitsindikatoren identifiziert. Diese signifikanten Korrelationen lassen sich u.a. damit erklären, dass einige der Kennzahlen Rohstoffverbräuche entsprechend der jeweiligen Verfügbarkeitshorizonte bewerten. Somit werden die Ergebnisse aller Indikatoren i.d.R. durch den Verbrauch fossiler Energieträger dominiert, deren Verfügbarkeit ähnlich bewertet wird.

Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass es für die Bewertung des Rohstoffverbrauchs keine entscheidende Rolle spielt, welcher der zurzeit vorhandenen Indikatoren ausgewertet wird. Demzufolge können einfach zu bestimmende Kennzahlen, wie der Kumulierte Energieaufwand, genutzt werden, deren Ergebnisse ausgedrückt in *MJ Primärenergie* zudem leichter verständlich erscheinen als z.B. *kg Antimonäquivalente* (Einheit des Abiotischen Ressourcenverbrauchs (ADP)).



Legende Diagramme: ○ Ferrochrome ▲ Silizium ● Naturkautschuk ■ Stahl (hoch legiert)

Bild 1: Ergebnisse der Korrelationsanalysen von input-orientierten Wirkungskategorien der Ökobilanz für 100 Materialien

Quelle: Berger, M.; Finkbeiner, M.: Correlation analysis of life cycle impact assessment indicators measuring resource use. International Journal of Life Cycle Assessment 16, 2011, 74-81

Trotz vieler vorhandener Ansätze sind wesentliche methodische Herausforderungen für eine zielführende Rohstoffverfügbarkeitsbewertung noch nicht gelöst. So sollten beispielsweise neben geologischen Lagerstätten auch die sich in Materialkreisläufen befindenden anthropogenen Rohstoffvorkommen berücksichtigt werden (Urban Mining).

Des Weiteren können Rohstoffe nicht nur physisch sondern auch aus sozioökonomischen Gründen knapp werden. Die sozioökonomische und die physische Verfügbarkeit können sich hierbei signifikant unterscheiden. So sind z.B. Eisenerz oder Lithium geologisch unkritisch. Die sozioökonomische Verfügbarkeit kann jedoch einen begrenzenden Faktor darstellen, da der Markt für Eisenerz einer oligopolartige Unternehmenskonzentration unterliegt und die Förderkapazitäten für Lithium im Falle eines starken Nachfragewachstums nicht zeitnah angepasst werden können. Weitere, die Verfügbarkeit sozioökonomisch begrenzende Parameter stellen z.B. Handelshemmnisse oder die politische Stabilität in Förderländern dar. Aus diesen Gründen müssen für die Verfügbarkeitsbewertung von Rohstoffen neben den physischen Vorkommen auch ökonomische und soziale Kriterien berücksichtigt werden, die die Rohstoffverfügbarkeit zusätzlich limitieren können.

3. Neue Ansätze zur Verfügbarkeitsbewertung von Rohstoffverbräuchen in Ökobilanzen

3.1. Bewertung der physischen Verfügbarkeit

Aufgrund jahrzehntelanger Förderungen haben sich signifikante Rohstoffreserven in den Wirtschaftskreisläufen aufgebaut, die wie im Fall von Kupfer in ähnlichen Größenordnungen liegen wie die geologisch förderwürdigen Reserven [13]. Basierend auf diesen Überlegungen wurde ein Indikator zur Bestimmung des abiotischen Ressourcenverbrauchs unter Berücksichtigung anthropogener Lagerstätten entwickelt [15].

Das sogenannte *anthropogenic stock extended abiotic depletion potential* (AADP) bildet ein Verhältnis aus Fördermengen zu geologischen Ressourcen und anthropogenen Reserven (Gleichung 1). Wie bei dem zugrunde gelegten Charakterisierungsmodell des ADP [9], wird das Knappheitsverhältnis auf die Referenzressource Antimon normiert.

$$AADP_i = \frac{\frac{\text{Förderrate}_i}{(\text{Ressourcen}_i + \text{anthropogene Vorkommen}_i)^2}}{\frac{\text{Förderrate}_{\text{Antimon}}}{(\text{Ressourcen}_{\text{Antimon}} + \text{anthropogene Vorkommen}_{\text{Antimon}})^2}} \quad (1)$$

Der Vorteil von Indikatoren wie ADP und AADP gegenüber rein massenbasierten Materialkennzahlen liegt darin, dass sie von einem Schutzgut *Rohstoffverfügbarkeit für zukünftige Generationen* abgeleitet wurden. Im Gegensatz zu Indikatoren wie MIPS oder KRA beschreiben sie also einen wissenschaftlichen Wirkungsmechanismus. Auf diese Weise kann die physische Verfügbarkeit von Rohstoffen exakter bewertet werden.

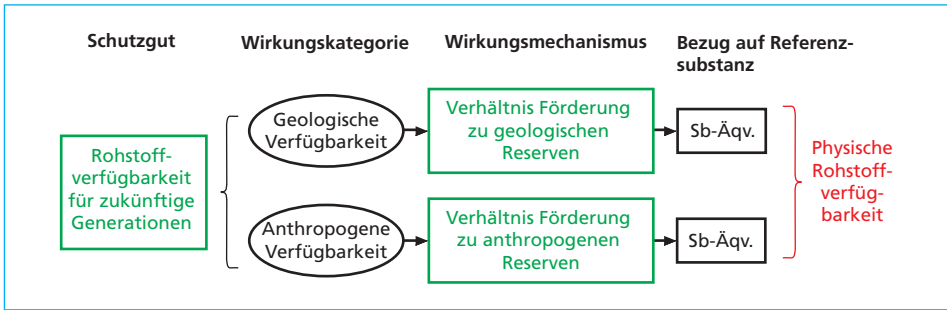


Bild 2: Wirkungskategorien und Wirkungsmechanismen hinsichtlich physischer Rohstoffverfügbarkeit für das Schutzgut *Rohstoffverfügbarkeit für zukünftige Generationen*

Werden die Charakterisierungsfaktoren des AADP mit denen des ADP verglichen, so zeigt sich, dass der Verbrauch von Materialien mit relativ großen anthropogenen Reserven (z.B. Quecksilber oder Antimon) weniger zur Aufzehrung natürlicher Ressourcen beiträgt als Materialien mit geringen anthropogenen Vorkommen (Bild 3).

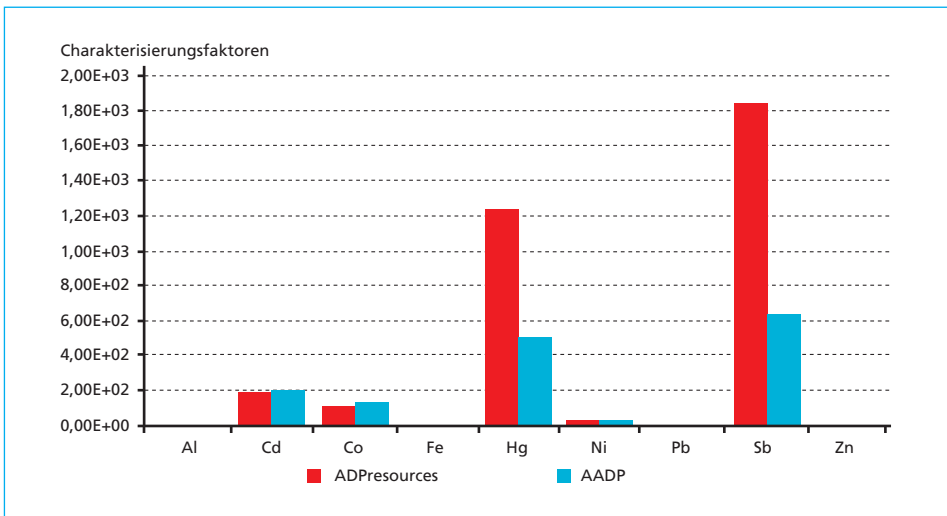


Bild 3: Charakterisierungsfaktoren ADP (basierend auf Ressourcen) und AADP normalisiert auf Kupfer-Äquivalente

Quelle: Schneider, L.; Berger, M.; Finkbeiner, M.: The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. International Journal of Life Cycle Assessment 16, 2011a, S. 929-936

3.2. Bewertung der sozioökonomischen Verfügbarkeit

Wie zuvor erwähnt, wird die Knappheit von Rohstoffen nicht nur durch die physische sondern auch über die sozioökonomische Verfügbarkeit definiert. So können beispielsweise Recyclingraten, die nationale Konzentration der geologischen Reserven oder

monopol- bzw. oligopolartige Unternehmenskonzentrationen die physische Rohstoffverfügbarkeit zusätzlich beschränken. In Kooperation mit der Daimler AG wurden die in Tabelle 1 gezeigten sozioökonomisch begrenzenden Parameter identifiziert und Möglichkeiten zur Quantifizierung erarbeitet [16, 17].

Verfügbarkeitsaspekt	Messwert	Datengrundlage
Sekundärrohstoffe	Recycling content, new material content	(European Commission 2010)
Nationale Konzentration Reserven	Herfindahl Indexes	(USGS 2012; European Commission 2010; BGR 2007)
Politische Stabilität	Weltbank-Index	(USGS 2012; The World Bank Group 2012; European Commission 2010),
Unternehmens-Konzentration Gewinnung	Herfindahl Indexes	(European Commission 2010), IW
Handelshemmnisse	Anteil der von Handelshemmnissen betroffenen Jahresförderung	(European Commission 2010)
Erwartetes Nachfragewachstum Gesamtmarkt bis 2025	%	(Angerer et al. 2009) RWI Prognosen/eigene Berechnungen

Tabelle 1:

Beispiele für die physische Rohstoffverfügbarkeit zusätzlich limitierende sozioökonomische Faktoren und Möglichkeiten zu ihrer Quantifizierung

Weiterhin wurde untersucht, wie die einzelnen Kriterien und Messwerte in ein konsistentes Charakterisierungsmodell überführt werden können. Als besonders geeignet erwies sich hierbei eine distance-to-target Gewichtung (Gleichung 2) zur Quantifizierung einzelner sozioökonomischer Parameter sowie eine multiplikative Verknüpfung einzelner Aspekte zu einem Gesamtindikator (Gleichung 3).

$$\text{Parameter}_j = \left(\frac{\text{aktueller Wert}_j}{\text{Zielwert}_j} \right)^2 \quad (2)$$

$$\text{Kritikalitätsfaktor}_j = \prod \text{Parameter}_j \quad (3)$$

Ähnlich wie bei der Betrachtung der physischen Rohstoffverfügbarkeit, werden Indikatoren der sozio-ökonomischen Verfügbarkeit ebenfalls vom Schutzgut *Rohstoffverfügbarkeit für zukünftige Generationen* abgeleitet und mithilfe eines wissenschaftlichen Wirkungsmechanismus beschrieben (Bild 4). Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Unterscheidung zwischen physischer und sozioökonomischer Rohstoffverfügbarkeit nicht starr ist, da Förderraten von Rohstoffen und die etwa Anthropogene Verfügbarkeit ebenfalls sozioökonomische Aspekte beinhalten.

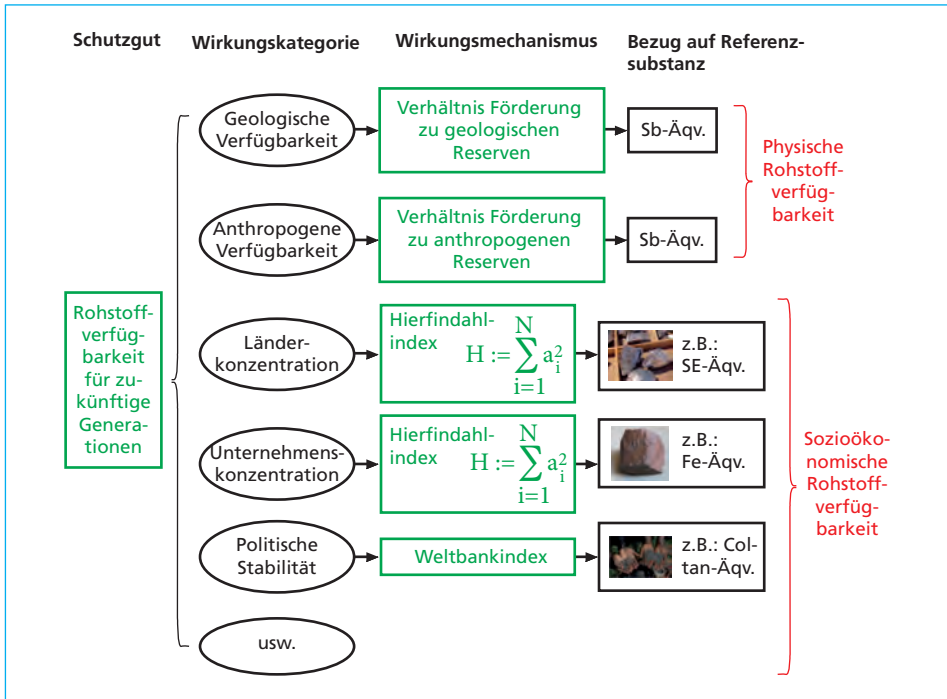


Bild 4: Wirkungskategorien und -mechanismen für physische und sozioökonomische Rohstoffverfügbarkeit für das Schutzgut *Rohstoffverfügbarkeit für zukünftige Generationen*

In einer in Zusammenarbeit mit der Daimler AG durchgeführten Fallstudie wurde beispielhaft der Rohstoffverbrauch der Mercedes Benz S-Klassen S350 und S400 Hybrid mithilfe des abiotischen Ressourcenverbrauchspotentials (ADP) und der sozioökonomischen Verfügbarkeit verglichen. Wie in Bild 5 zu sehen, liefern als kritisch wahrgenommen Materialien wie seltene Erden (REE) keinen Beitrag zum Ergebnis des ADP, welches durch den Verbrauch von Erdöl dominiert wird. Fließen jedoch sozioökonomische Kriterien in die Bewertung ein, ist der Beitrag der seltenen Erden zum Ergebnis des Hybridfahrzeuges signifikant.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die zuvor beschriebene und in Beispielen getestete Methodik ermöglicht eine präzise Verfügbarkeitsbewertung von Rohstoffverbräuchen in Ökobilanzen. Die Indikatoren sind vom Schutzgut *Rohstoffverfügbarkeit für zukünftige Generationen* abgeleitet und berücksichtigen sowohl physische als auch sozioökonomische Verfügbarkeitsaspekte. Im Gegensatz zu bisherigen Indikatoren, deren Bewertung lediglich auf eingesetzten Rohstoffmengen oder geologischer Verfügbarkeit beruht, sind die mithilfe der entwickelten Methodik erzielten Ergebnisse nicht mehr nur vom Verbrauch fossiler Energieträger dominiert. Auf diese Weise können potentiell verfügbarkeitskritische Rohstoffeinsätze entlang des Produktlebensweges identifiziert werden.

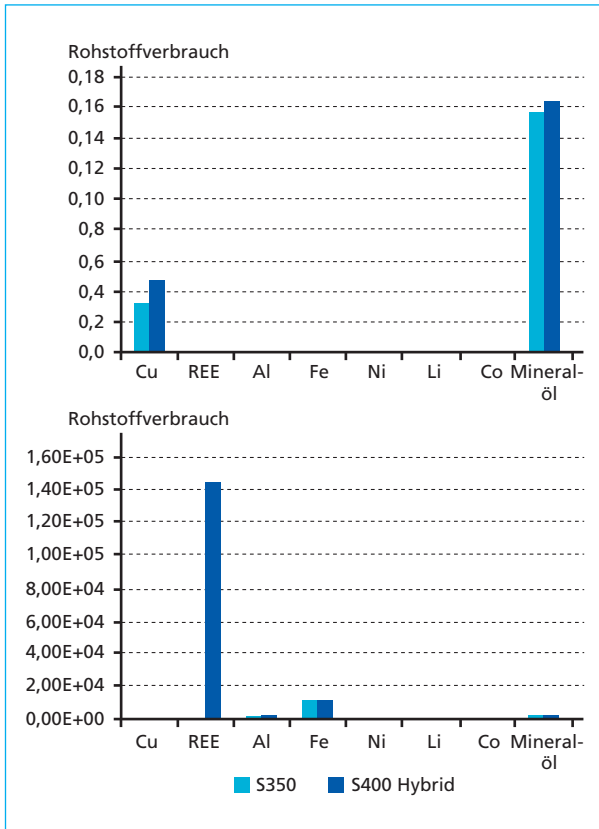


Bild 5:

Bewertung des Rohstoffverbrauchs (dimensionslos) einer Mercedes S-Klasse S350 und S400 Hybrid mittels ADP (oben) und der sozioökonomischen Verfügbarkeit (unten)

Quelle: Schneider, L.; Berger, M.; Finkbeiner, M.: Economic material availability as a new area of protection for life cycle sustainability assessment. In SETAC Europe annual meeting, 15.-19.05.2011, Mailand, 2011b

Aufgrund der limitierten Datenverfügbarkeit besteht eine Herausforderung in der Ausrollung der entwickelten Methodik, um Verfügbarkeitsindikatoren für ein breites Set an Rohstoffen zur Verfügung zu stellen.

Die hier beschriebenen Ansätze werden derzeit im Rahmen der BMBF Fördermaßnahme *r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz* weiterentwickelt [5]. In einem Konsortium bestehend aus Wissenschaft, Verbänden, KMUs, und Großunternehmen wird hierbei eine konsistente, branchenübergreifend anerkannte und anwendbare Methodik zur Messung der Ressourceneffizienz erarbeitet. Des Weiteren fließen die entwickelten Ansätze in das aktuell zu erarbeitende Richtlinienwerk Ressourceneffizienz des VDI ein (VDI 4597-4601) [22].

5. Literatur

- [1] Angerer, G.; Erdmann, L.; Marscheider-Weidemann, F.; Scharp, M.; Lüllmann, A.; Handke, V.; Marwerde, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. ISI-Schriftenreihe *Innovationspotenziale*: Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [2] Berger, M.; Finkbeiner, M.: Correlation analysis of life cycle impact assessment indicators measuring resource use. *International Journal of Life Cycle Assessment* 16, 2011, 74-81

- [3] Berger, M.; Finkbeiner, M.: Methoden zur Messung der Ressourceneffizienz. In: Thome-Kozmiesky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin: TK Verlag, 2008
- [4] BGR: Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2007
- [5] BMBF: <http://www.r3-innovation.de/de/15427>. Zugriff 07.01.2013
- [6] European Commission: Critical raw materials for the EU. 2010
- [7] Frischknecht, R.; Steiner, R.; Jungbluth, N.: Ökobilanzen: Methode der ökologischen Knappheit – Ökofaktoren 2006 – Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Bern, Switzerland: Öbu – Netzwerk für nachhaltiges Wirtschaften, 2009
- [8] Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Huijbregts, M.; de Schryver, A.; Struijs, J.; van Zelm, R.: ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, Report I: Characterization. Den Haag, The Netherlands, 2009
- [9] Guinee, J. B.; Gorree, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; de Koning, A.; van Oers, L.; Sleeswijk, A. W.; Suh, S.; Udo de Haes, H. A.; de Bruijn, H.; van Duin, R.; Huijbregts, M. A. J.: Life cycle assessment – An operational guide to the ISO standards. Dordrecht, The Netherlands: Kulwer Academic Publishers, 2002
- [10] Hauschild, M.; Wenzel, H.: Environmental Assessment of Products. 2 vols. Vol. 2. New York, NY, USA: Chapman & Hall, Thomson Science, 1998
- [11] ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. In ISO 14040: 2006, edited by International organisation for standardisation. Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation, 2006
- [12] ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. In ISO 14040: 2006, edited by International organisation for standardisation. Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation, 2006
- [13] Kapur, A.; Graedel, T. E.: Copper mines above and below the ground. Environmental Science & Technology 40 (3135-3141), 2006
- [14] Ritthoff, M.; Rohn, H.; Liedtke, C.: Calculating MIPS – Resource productivity of products and services. Wuppertal: Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, 2002
- [15] Schneider, L.; Berger, M.; Finkbeiner, M.: The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. International Journal of Life Cycle Assessment 16, 2011a, S. 929-936
- [16] Schneider, L.; Berger, M.; Finkbeiner, M.: Economic material availability as a new area of protection for life cycle sustainability assessment. In SETAC Europe annual meeting, 15.-19.05.2011, Mailand, 2011b
- [17] Schneider, L.; Berger, M.; Finkbeiner, M.: Measuring material scarcity – limited availability despite sufficient reserves. In Expert Workshop on Security of Supply and Scarcity of Raw Materials – A Methodological Framework for Supply Chain Sustainability Assessment. European Commission – Joint Research Centre, Ranco, Italien, 2012
- [18] The World Bank Group: Worldwide Governance Indicators, 2012
- [19] USGS: Mineral Commodity Summaries. U.S. Geological Survey, 2012
- [20] Van der Voet, E.; van Oers, L.; Moll, S.; Schütz, H.; Bringezu, S.; de Bruyn, S.; Sevenster, M.; Warringa, G.: Policy Review on Decoupling: Development of indicators to assess decoupling of economic development and environmental pressure in the EU-25 and AC-3 countries. Leiden, The Netherlands: Institute of Environmental Sciences (CML), Leiden University, 2005
- [21] VDI 4600: VDI 4600 – Kumulierter Energieaufwand – Begriffe, Definitionen, Berechnungsmethoden, Verein Deutscher Ingenieure, 1997
- [22] VDI: <http://www.vdi.de/technik/fachthemen/energie-und-umwelt/fachbereiche/ressourcenmanagement/themen/richtlinienwerk-zur-ressourceneffizienz-zre/>. Zugriff 07.01.2013, 2013

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Recycling und Rohstoffe – Band 6

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013

ISBN 978-3-935317-97-9

ISBN 978-3-935317-97-9 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2013

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky,

Dr.-Ing. Stephanie Thiel, M.Sc. Elisabeth Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Ina Böhme, Petra Dittmann, Sandra Peters,

Martina Ringgenberg, Ginette Teske, Ulrike Engelmann, LL. M.

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

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 dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.