



Etablierung einer nationalen Rohstoffbuchhaltung und dafür notwendige Informationen und Informationsgüte

Oliver Schwab · Helmut Rechberger · Robert Holnsteiner

Online publiziert: 13. Juli 2016

© Der/die Autor(en) 2016 . Dieser Artikel ist eine Open-Access-Publikation.

Zusammenfassung Der globale Stoffhaushalt wird immer weniger von natürlichen Prozessen, sondern vielmehr von anthropogenen Vorgängen dominiert. Ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit schließen auch den effizienten Umgang mit Rohstoffen ein. Die detaillierte Kenntnis nationaler Stoffströme in Form von Rohstoffbilanzen oder – über die Zeit fortgeschrieben – in Form einer nationalen Rohstoffbuchhaltung ist notwendige Grundlage einer effektiven und strategischen Rohstoffpolitik. In der nationalen Rohstoffbuchhaltung werden die wichtigsten Rohstoffflüsse einer Volkswirtschaft systematisch bilanziert und übersichtlich dargestellt. Durch die Fortschreibung von Bilanzen über die Zeit wird es ermöglicht, die Größe anthropogener Lager und deren Entwicklung abzuschätzen. Kommen die Anforderungen auf der Ver- und Entsorgungsseite können so ermittelt werden. Umfangreiche und detaillierte Bilanzen dienen als Entscheidungsgrundlage in der Rohstoffpolitik und darüber hinaus als Informationsbasis der Nutzung bzw. Bewirtschaftung anthropogener Ressourcen. Die Verfügbarkeit von Informationen, um nationale Rohstoffbilanzen zu erstellen, sowie Möglichkeiten, die Zuverlässigkeit von Daten zu bewerten, sind jedoch sehr begrenzt. Werkzeuge, um die Informationsgrundlage von Rohstoffbilanzen zu

untersuchen und zu bewerten, werden daher in dieser Arbeit vorgestellt. Diese umfassen zum einen eine Methodik zur systematischen Charakterisierung von Rohstoffbilanzdaten und zum anderen eine darauf aufbauende formalisierte Vorgehensweise zur Bewertung der Informationsgüte. Sie sind wesentlich dafür, nationale Stoffsysteme auf wissenschaftlicher Ebene besser zu verstehen, und um Maßnahmen hin zu einer nationalen Rohstoffbuchhaltung im administrativen Kontext zu ergreifen.

Information requirements for implementation of national resource balances

Abstract The influence of anthropogenic processes on global material flow systems increasingly dominates the influence of natural processes. In this context, the provision of detailed knowledge on material flow systems is relevant for decision makers in resource policy. This information can be provided in the form of one-year material balances or, if repeated over a period of consecutive years, in the form of national resource budgets. In national resource budgets, all relevant flows of a material through a national economy are balanced and displayed in neatly arranged diagrams. By updating these material balances over a series of years, the development of material stocks can be estimated. Upcoming challenges both regarding supply and disposal of materials can be identified. Comprehensive balances are useful for decision makers in resource policy and, moreover, as an information basis for future exploitation of anthropogenic resources. However, both availability of data and possibilities for assessing the reliability of data are very limited. In this work, a methodology for investigating and evaluating the information basis of national resource budgets is presented. The methodology includes procedures for systematic characterization of resource budget data and

formal procedures for evaluating their reliability. From a scientific perspective, the methodology contributes to understanding material flow systems better. It also enables implementing procedures towards national resource budgets in an administrative context.

1 Die Nationale Rohstoffbuchhaltung

Der Einfluss anthropogener Vorgänge auf viele Stoffkreisläufe übersteigt heute den Einfluss natürlicher Prozesse (Baccini und Brunner 2012; Klee und Graedel 2004; Schwab et al. 2016). Die teilweise anthropogene Dominanz über den globalen Stoffhaushalt macht daher einen bedachten und im ökologischen und ökonomischen Sinne nachhaltigen Umgang mit Ressourcen umso notwendiger. Um in der nationalen Rohstoffpolitik adäquate Maßnahmen ergreifen zu können, ist eine valide Kenntnis von Stoffströmen erforderlich. Während die detaillierte und systematische Bilanzierung beispielsweise von Finanzströmen eine lange Tradition hat, ist die systematische Erhebung physikalischer Flüsse nur auf einer stark generalisierten Ebene etabliert. Handelsstatistiken erlauben eine vergleichsweise genaue Analyse von Güterbewegungen, die von ökonomischem Interesse sind. Zugleich wächst das Interesse auf der Abfall- und Emissionsseite, wenngleich behördliche Statistiken in diesen Bereichen in wesentlich geringerem Maße standardisiert und weniger genau aufgeschlüsselt sind. Für eine nationale Rohstoffpolitik sind sowohl die inputseitigen (wie Handel, Produktion), die outputseitigen (wie Abfallwirtschaft, Emissionen) wie auch die systeminternen Stoff- und Güterflüsse (z. B. wegen des Recyclingpotenzials) relevant. Damit Rohstoffbilanzen Entscheidungsgrundlage sein können, ist eine vollständige Systembetrachtung und eine hinreichend hohe Systemauflösung notwendig. Im Allgemeinen lässt sich der anthropogene Stoffhaushalt wie in Tab. 1 dargestellt in

Univ.-Ass. Dipl.-Geoökol. O. Schwab (✉) ·
Univ.-Prof. DI Dr. H. Rechberger
Institut für Wassergüte,
Ressourcenmanagement
und Abfallwirtschaft,
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13, 1040 Wien, Österreich
E-Mail: oliver.schwab@tuwien.ac.at

Mag. Dr. R. Holnsteiner
Abteilung III/7 – Roh-
und Grundstoffpolitik,
Bundesministerium für Wissenschaft
Forschung und Wirtschaft,
Denigsgasse 31, 1200 Wien, Österreich

Tab. 1 Teilsysteme von nationalen Rohstoffbilanzen und mögliche Datenquellen

Teilsystem	Spezifizierungen	Mögliche Datenquellen
Bereitstellende Industrien und Handel	Bergbau, Landwirtschaft, Produktion, Verarbeitung	Außenhandelsbilanz, Produktionsstatistik, Konjunkturstatistik, Montanhandbuch, Informationen von Unternehmen und Unternehmensverbänden, Laboruntersuchungen
Nutzung	Konsum bei privaten und gewerblichen Verbrauchern	Versorgungsbilanz, Konsumstatistik, Laboruntersuchungen
Entsorgung und Verwertung	Abfallverwertung, Recycling, Deponierung	Abfallstatistik, Abfallwirtschaftsplan, Laboruntersuchungen

Tab. 2 Für nationale Rohstoffbilanzen notwendige Daten. Eine Rohstoffbuchhaltung lässt sich mit ausreichenden Informationen zu den Rohstoffflüssen (Zeile „Fluss“) bewerkstelligen. Lagerstand und Lageränderung lassen sich anhand einer zeitlich fortgeschriebenen Rohstoffbuchhaltung ermitteln

Element	Entität	Spezifizierung	Mögl. Datenquelle	Herkunftsart
Fluss	Masse	Masse pro Zeiteinheit. Masse, die ein System oder ein Teilsystem innerhalb eines Zeitraumes von Input nach Output durchläuft	Behörl. Statistiken, Verbandsinformationen, wissenschaftliche Publikationen	Melddaten, Datenaggregation, Bilanzierung, Modellierung
	Konzentration	Masse/Masse, Masse/Volumen. Massen- oder Volumenanteil eines Stoffes an einem Gut	Laboranalysen, Feldanalysen	Messungen
Prozess	Transfer-koeffizient	Dimensionslos. Anteil, nach dem der Input in mehrere Flüsse und/oder Lager aufgeteilt wird	Unternehmens- und Verbandsinformationen	Prozessmonitoring
Lager	Masse	Masse zu Zeitpunkt. Masse innerhalb eines Systems zu einem definierten Zeitpunkt	Wissenschaftliche Publikationen	Datenaggregation, Bilanzierung, Modellierung
	Konzentration	Masse/Masse, Masse/Volumen. Massen- oder Volumenanteil eines Materialbestandteils an einem Material	Laboranalysen, Feldanalysen	Messungen
	Änderungsrate	Masse/Zeit. Änderung der Masse zu einem Zeitpunkt gegenüber der Masse zu einem Referenzzeitpunkt	Wissenschaftliche Publikationen	Modellierung, Bilanzierung

drei übergeordnete Teilsysteme unterteilen (Brunner und Rechberger 2004; Pauliuk et al. 2015).

Diese drei Teilsysteme können je nach Art des bilanzierten Rohstoffs weiter untergliedert bzw. spezifiziert werden. Mithilfe von Stoffbilanzierungs-Software (z. B. „STAN“, www.stan2web.net) werden Prozesse und Flüsse von Rohstoffhaushalten entsprechend der Methode der Stoffflussanalyse (SFA) nach Baccini und Brunner (1991) bzw. gemäß ÖNORM S 2069 (2005) berechnet und in Form von sogenannten Sankey-Diagrammen übersichtlich dargestellt. Beispiele nationaler Rohstoffbilanzen finden sich für Industriemetalle (z. B. Aluminium in Buchner et al. 2014), Hochtechnologiemetalle (z. B. Palladium in Laner et al. 2015a), Nährstoffe (z. B. Phosphor in Zoboli et al. 2015) oder Kunststoffe (z. B. van Eygen et al. [under revision](#)).

2 Informationen für die nationale Rohstoffbuchhaltung

Daten der nationalen Rohstoffbuchhaltung sind sehr heterogen und stammen aus unterschiedlichen Quellen wie Außenhandelsbilanzen, Konsumstatistiken, Laboranalysen oder aus ExpertInnenschätzungen. Üblicherweise

kommen die meisten Daten nationaler Rohstoffbilanzen aus dem behördlichen Bereich oder der Wissenschaft. Häufig stammen Daten zu Güterströmen aus behördlichen Quellen und Daten zur Güterzusammensetzung (Konzentrationen) aus einem wissenschaftlichen Kontext. Bei schlechter Informationslage werden auch häufig ExpertInnen-schätzungen herangezogen. In Tab. 2 werden typische, für nationale Rohstoffbilanzen notwendige Informationsarten sowie häufig genutzte Quellen gelistet.

Daten nationaler Rohstoffbilanzen sind üblicherweise disziplinenübergreifend und unstrukturiert, haben unterschiedliche Formate und Qualitäten und entstammen verschiedenen Quellen, wie z. B. Handelsstatistiken, Labormessungen, wissenschaftlichen Modellen oder Auskünften von Unternehmen und Verbänden. Daraus resultiert die typische Heterogenität der Datengrundlage. Daten zu strukturieren, zu charakterisieren und zu bewerten sind wichtige formale Bestandteile einer systematischen Rohstoffbuchhaltung. Zumeist sind statistische Methoden zur Datenanalyse beschränkt, da es sich häufig um Einzeldaten und nicht um statistisch auswertbare, empirisch gewonnene Datensätze handelt. Neue,

bedarfsgerechte Methoden zur Datencharakterisierung sowie zur Datenqualitätsbewertung in Rohstoffbilanzen werden daher im Folgenden vorgestellt.

2.1 Charakterisierung von Daten

Ein speziell auf nationale Rohstoffbilanzen zugeschnittener Datencharakterisierungsrahmen wurde in einer Arbeit von Schwab et al. (2016) vorgestellt. Aufbauend auf der Terminologie von Daten und Informationen in der Stoffflussanalyse wird zur Analyse von SFA-Datenbanken in einer Datencharakterisierungsmatrix (DCM) eine aus drei Schritten bestehende Methodik (Erstellung eines Informationsinventars, Spezifizierung von Datenattributen, Auswertung der DCM) eingeführt.

In Schritt 1 wird das Informationsinventar der Studie angelegt, in dem alle Flüsse der Bilanz sowie die zu ihrer Quantifizierung verwendeten Informationselemente (ein Informationselement beschreibt eine Entität, also ein Objekt oder eine Eigenschaft wie „Masse“ oder „Konzentration“) gelistet werden. Ein Stofffluss besteht typischerweise aus zwei Informationselementen, einer Angabe zu einer Menge (z. B. Tonnen eines Gutes pro Jahr, Tonnen/Jahr) sowie einer Stoffkonzentration

Tab. 3 Struktur der Datencharakterisierungsmatrix (DCM): Fluss F1 besteht aus zwei Informationselementen (F1.1 und F1.2), Informationselement F1.2 aus zwei Datenelementen „a“ und „b“

Element	Attribut 1	Attribut 2	Attribut n
F1
F1.1
F1.2
F1.2a
F1.2b
F2
...

(kg Stoff/Tonne Gut). Teilweise können auch weitere Informationselemente wie Flächen oder Volumina hinzukommen. Informationselemente bestehen aus mindestens einem Datenelement (ein Einzeldatum, ein Intervall oder ein Datensatz). Falls entsprechende Daten in mehreren voneinander unabhängigen Quellen vorhanden sind, so besteht ein Informationselement aus zwei oder mehr Datenelementen. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn eine Stoffkonzentration in zwei unterschiedlichen Quellen A und B mit a % und b % angegeben wird. Die Struktur der DCM ist in Tab. 3 skizziert.

Die DCM beinhaltet insgesamt 49 Datenattribute, welche nach dem in Abb. 1 dargestellten Konzept in Gruppen gegliedert sind. Gruppe I umfasst statistische Parameter, Gruppe II die Bedeutung und das Format der Informationen, Gruppe III den Informationsproduzenten und die Datengewinnungsmethode und Gruppe IV den Kontextbezug der Daten.

In Schritt 2 werden alle Attribute nach einem vorgegebenen Schema auf einer passenden Skala (absolut, binär, nominal, ordinal) bewertet (frei online zugänglich als „Supporting Information“ des Artikels von Schwab et al. 2016). Eine absolute Skala betrifft numerische Werte wie z. B. die Stichprobenanzahl $n = 1, 2, \dots$. Binär betrifft Attribute, die mit „ja“ oder „nein“ beantwortet werden können (z. B. „Verfügbarkeit“). Nominale Attributspezifizierungen sind Spezifizierungen als Text, beispielsweise der Informationsproduzent (z. B. „Statistikbehörde“). Ordinale Attribute, wie beispielsweise die „Qualität der Datenerhebungsmethode“, werden auf einer Skala von 0–1 bewertet, wobei 0 für „gut“ und 1 für „schlecht“ steht. Bei Attributen, die auf einer ordinalen Skala

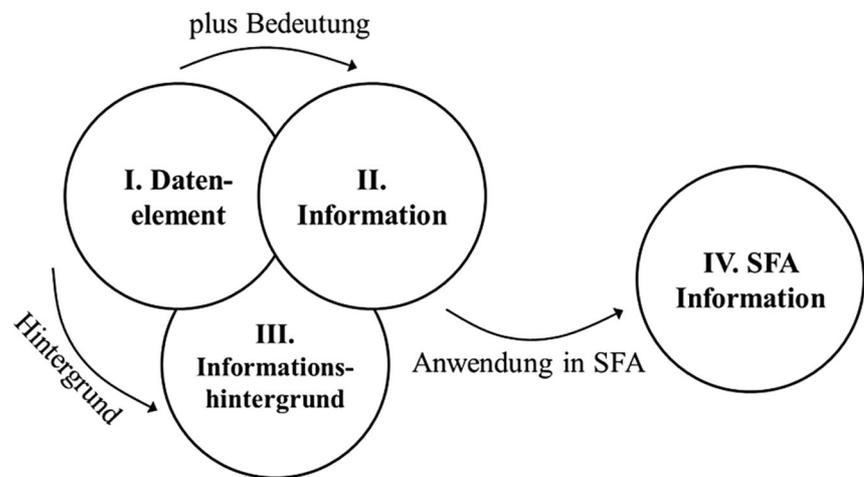


Abb. 1 Vier SFA-Informationsebene: Daten mit Bedeutung bilden Information, diese Information besitzt einen Informationshintergrund. Im Kontext einer Studie wird daraus SFA-Information (Schwab et al. 2016, übersetzt aus dem Englischen)

spezifiziert werden, handelt es sich typischerweise um Einschätzungen, die von Bilanzierenden vorgenommen werden. Daher ist Subjektivität ein unvermeidbarer Bestandteil der Charakterisierungsmethodik. Die potenziell subjektiven Einschätzungen beziehen sich allerdings nicht, wie in manchen anderen Charakterisierungsansätzen, auf ganze Informationen, sondern lediglich auf einzelne Eigenschaften von Datenelementen. Subjektivität wird so nicht ausgeschlossen, aber stark eingeschränkt.

In Schritt 3 wird die DCM spaltenweise ausgewertet. So lässt sich ein Überblick über die Datengrundlage von Rohstoffbilanzen gewinnen, welcher einfach an Dritte kommuniziert werden kann und ein verbessertes Verständnis sowie den Vergleich von Studien ermöglicht. Beispielfhaft wird in Abb. 2 ein Attribut von zwei Rohstoffbilanzen gegenübergestellt.

Die DCM wurde in ein Excel-Spreadsheet implementiert und für jedes Datenattribut werden automatisch Grafiken wie in Abb. 2 erstellt. Für einen bestimmten Analyse- oder Kommunikationszweck passende Grafiken können ausgewählt werden (z. B.: Wer hat die Daten erhoben? Mit welchen Methoden? Sind diese Daten von wirtschaftlichen, technologischen oder gesellschaftlichen Prozessen abhängig? Wie hoch war die Stichprobenzahl? Etc.). Je nach Umfang einer Bilanz werden für die Analyse der Informationsgrundlage typischerweise 30 bis 60 Stunden benötigt. Es ist möglich, die DCM nachträglich auf eine Studie anzuwenden.

Allerdings wird empfohlen, die DCM bereits parallel zur Datensammlung während der Erstellung einer Bilanz anzuwenden, da so die Attribute exakter dokumentiert und charakterisiert werden können. Das ist auch wichtig, um aufbauend auf der Datencharakterisierung in einem folgenden Schritt die Datenqualität zuverlässig abschätzen zu können.

2.2 Bewertung der Datenqualität

ErstellerInnen und NutzerInnen von Stoffflussanalysen wünschen sich oft „bessere Daten“. Kriterien für diese besseren Daten nach Ansicht von MitarbeiterInnen des Fachbereichs Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement der TU Wien sind in (Tab. 4) zusammengefasst.

Sind die in Tab. 4 gelisteten Anforderungen an Stoffbilanzdaten nicht erfüllt, führt dies zu einer Verringerung der Datenqualität. Aufgrund der Diversität von Stoffbilanzdaten und der unterschiedlichen Perspektiven von AutorInnen lässt sich die Datenqualität nur schwer quantitativ spezifizieren. Ein Merkmal von Daten nationaler Rohstoffbilanzen ist, dass Datenunsicherheit ein hauptsächlich epistemisches Phänomen ist. Epistemische Datenunsicherheit bedeutet Unsicherheit aufgrund mangelnden Wissens. Sie unterscheidet sich von sogenannter aleatorischer Variabilität, welche nicht auf Wissensmangel sondern auf natürlich gegebene Variabilität zurückzuführen ist (Morgan et al. 1992; Gottschalk et al. 2010). Da in einem zeitlich und

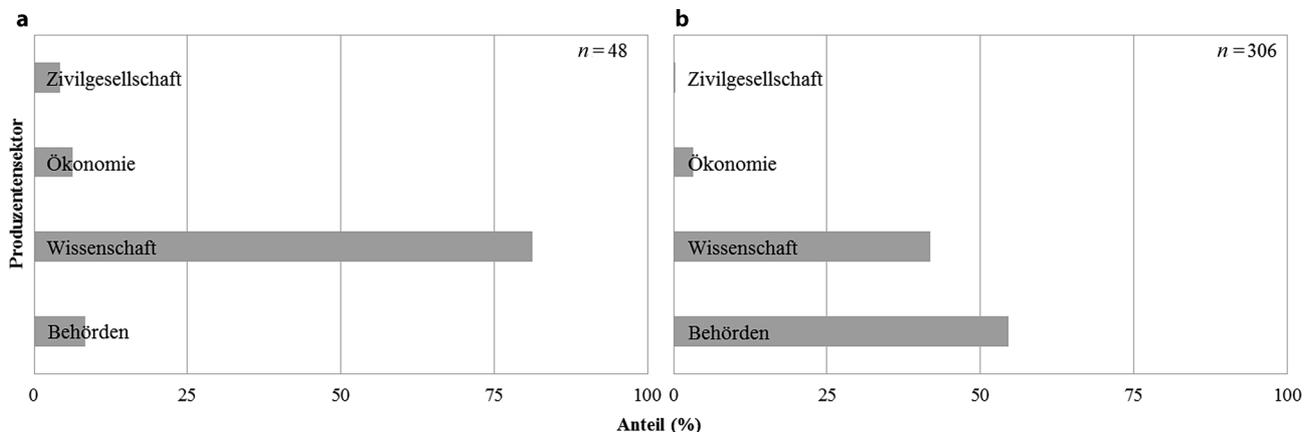


Abb. 2 Gegenüberstellung des Datenattributs „Produzentensektor“ der österreichischen Palladium-Bilanz (2009) und Phosphor-Bilanz (2011). Die Anzahl *n* bezieht sich hier auf die Anzahl an Datenelementen

Tab. 4 Datenanforderungen aus Sicht von Anwendern der Stoffflussanalyse

Anforderung	Spezifizierung	Gegensatz
Daten existieren und sind verfügbar	Die Daten wurden selbst erhoben oder wurden von Dritten ermittelt und zur Verfügung gestellt	Nichtexistenz
Die Daten sind vollständig und ausreichend, um eine exakte Systembeschreibung zu ermöglichen	Es liegen genügend Daten vor, um eine Bilanzrechnung durchführen zu können (exakt bestimmtes oder überbestimmtes System)	Unvollständigkeit
Die Entität, die von einem Datenelement beschrieben wird, ist klar definiert	Es ist genau bekannt, was die Daten beschreiben und abzugrenzen, was sie nicht beschreiben	Bedeutungs-unklarheit
Die Daten sind im System stimmig	Die Daten liegen zeitlich und räumlich innerhalb der Systemgrenze, und sind semantisch stimmig (d. h. beschreiben den richtigen, gewollten Untersuchungsgegenstand)	System-unstimmigkeit
Die Datenauflösung ist ausreichend hoch/ die Datenaggregation ausreichend gering	Die Daten eignen sich zur Quantifizierung der Systemelemente (Flüsse, Prozesse) entsprechend der angestrebten Differenzierung des Systems	Zu hohe Aggregation
Eine definierte, möglichst geringe Unsicherheit ist bekannt	Die Unsicherheit der Daten (quantitativ) ist bekannt und möglichst gering	Zu hohe Unsicherheit
Die Datenquelle ist bekannt und zuverlässig	Es ist bekannt, von wem die Daten stammen	Unbekannte Datenherkunft
Die Datenentstehung ist nachvollziehbar	Es ist nachvollziehbar, wie (mit welchen Methoden) die Daten erhoben worden sind	Unbekannte Datenentstehung
Die Daten sind mit cross-checks verifizierbar	Die Daten können mit Daten zur selben Entität aber mit anderer Herkunft abgeglichen werden, entweder innerhalb des betrachteten Systems (z. B. Daten aus Österreich mit Daten aus Österreich) oder mit einem anderen System (z. B. Daten aus Österreich mit Daten aus Deutschland)	Nicht verifizierbar
Die Datenqualität kann aufgrund ausreichender Meta-Informationen abgeschätzt werden	Um die Datenqualität und darauf aufbauen die Datenunsicherheit abschätzen zu können, sind möglichst umfassende Hintergrundinformationen notwendig	Unzureichende Hintergrund-informationen
Die Daten stammen aus repräsentativen Messungen	Messwerte sollten mittels Verfahren hoher Zuverlässigkeit und ohne systematische Fehler ermittelt worden sein	Messungenauigkeit oder nicht repräsentative Beprobung

räumlich definierten System für jeden Fluss genau ein richtiger Wert existiert, der jedoch in den meisten Fällen nicht genau bekannt ist, ist Datenunsicherheit in Rohstoffbilanzen vielmehr ein epistemisches als ein aleatorisches Phänomen. Aufbauend auf dem Datencharakterisierungsrahmen (Schwab et al. 2016, vgl. Abb. 1) wurde ein Konzept für Datenunsicherheit in Rohstoffbilanzen erstellt (Abb. 3).

Nach Schwab et al. (in press) werden vier sogenannte Informationsdefekte (*ID_i*) unterschieden, also potenzielle

Mängel, die die Zuverlässigkeit von Daten vermindern: die Informationsdefekte „Semantik“ (*ID_S*), „Repräsentativität“ (*ID_R*), „Herkunft“ (engl. „provenance“, *ID_P*) und „Kontext“ (engl. „context“, *ID_C*). Wenn die Bedeutung von Daten nicht exakt bekannt ist, so entsteht ein *ID_S*. *ID_R* entsteht, wenn eine komplexe Entität (also eine Entität mit vielen möglichen Realisierungen wie z. B. „Kupferkonzentration von Handys“) aufbauend auf einer geringen Stichprobenzahl beschrieben wird oder es sich um eine räumlich weit verstreute und

damit schwer zu erhebenden Entität handelt (z. B. Anzahl Handys in Österreich). Ein *ID_P* liegt dann vor, wenn der Informationsproduzent oder die verwendete Datenerhebungsmethode als unzuverlässig eingeschätzt wird (z. B. wird ein gemessener Wert als zuverlässiger angesehen als ein geschätzter). Wenn verwendete Daten nicht in den Kontext einer Studie passen (z. B. zeitliche oder räumliche Abweichung), so wird das mittels des Defekts *ID_C* ausgedrückt. Die Defekte werden auf einer ordinalen Skala von 0–1 gemessen, wo-

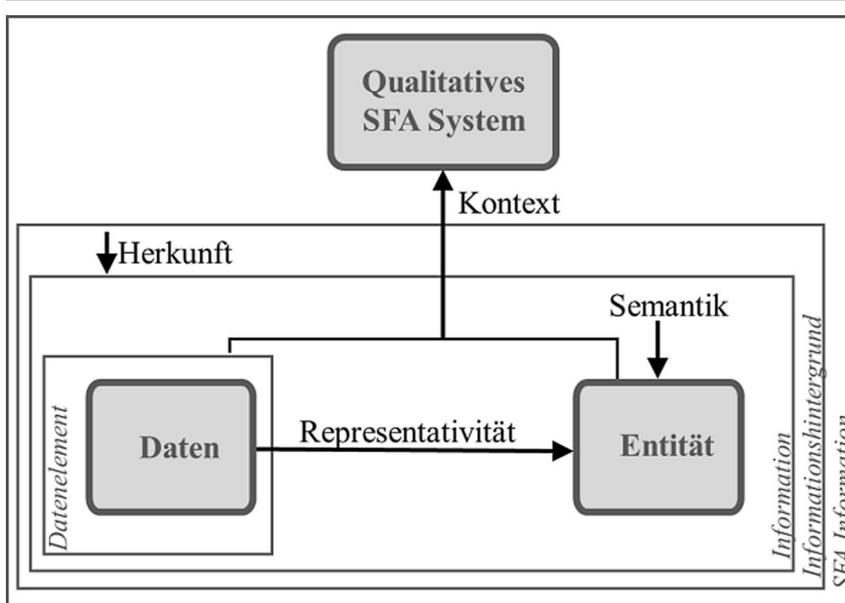


Abb. 3 Konzept für Datenunsicherheit in Rohstoffbilanzen (nach Schwab et al. [in press](#), übersetzt aus dem Englischen)

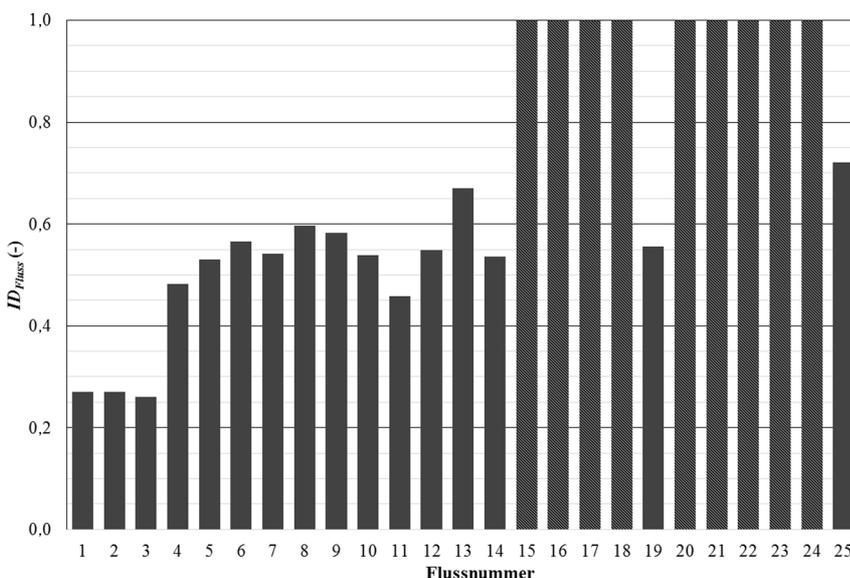


Abb. 4 Grafische Darstellung der bewerteten Datengrundlage einer Rohstoffbilanz (nach Schwab et al. [in press](#), übersetzt aus dem Englischen)

bei 0 für minimale, 1 für maximale Informationsdefekte steht.

Die vier Informationsdefekte ID_i werden zu einem Informationsdefekt pro Informationselement (ID_{tot}) aggregiert, wobei jeweils hohe Informationsdefekte stärker gewichtet werden als niedrige Informationsdefekte. Dies entspricht der Annahme, dass Daten, die in einer der vier Dimensionen als unzuverlässig bewertet werden, nicht mehr insgesamt als zuverlässig gelten können, selbst wenn die Informations-

defekte in den verbleibenden drei Dimensionen niedrig sind. Wenn für ein Informationselement mehr als ein unabhängiges Datenelement vorliegt (z. B. zwei Werte zur Beschreibung der Entität „Kupferkonzentration von Handys“), so bedingt dies im Bewertungsschema eine Verminderung des Informationsdefektes (steigende Stichprobenzahl n verringert den Informationsdefekt ID_R und somit des ID_{tot} , selbst wenn die Defekte ID_S , ID_P und ID_C für alle n gleich sind).

Die ID_{tot} aller Informationselemente, die verwendet wurden, um einen Fluss zu quantifizieren, werden zu einem Informationsdefekt pro Fluss (ID_{Fluss}) kombiniert. Ein Stofffluss wird typischerweise aus zwei Informationselementen berechnet (Gütermenge/Jahr mal Stoffkonzentration). Teilweise sind aber auch direkt verwendbare, autonome Daten verfügbar (d. h. ein Informationselement pro Fluss) oder Flüsse werden aus mehr als zwei Informationselementen berechnet (z. B. Stückzahl Güter/Jahr mal Volumen/Stück mal Stoffmenge/Volumen). In der Datenqualitätsbewertung wird angenommen, dass der Informationsdefekt ID_{Fluss} mit der Anzahl der Informationselemente pro Fluss ansteigt. Wie für ID_i gilt auch für ID_{tot} und ID_{Fluss} der Messbereich 0–1.

Das vorgestellte Datenqualitätskonzept wurde in Schwab et al. ([in press](#)) mathematisch formalisiert. Während die DCM im vorhergehenden Schritt der Datencharakterisierung spaltenweise ausgewertet wurde, wird sie zur Datenqualitätsbewertung zeilenweise ausgewertet (vgl. Tab. 3). Datenqualität in Rohstoffbilanzen wird als Funktion von 15 datenqualitätsrelevanten Attributen der DCM ausgedrückt. Diese Attribute decken den Bereich der in Tab. 4 gelisteten Anforderungen an Rohstoffbilanzdaten ab. Einige Attribute in Textform (nominale Skala) müssen hierfür auf eine mathematisch behandelbare Skala übersetzt werden (ordinale oder absolute Skala, siehe hierzu das online frei zugängliche Schema in der „Supporting Information“ des Artikels von Schwab et al. ([in press](#))). Die Ergebnisse des Datenqualitätsbewertungskonzeptes sind beispielhaft in Abb. 4 dargestellt (Bewertung der Palladium-Bilanz von Laner et al. 2015a in Schwab et al. ([in Press](#))). Gute Datenqualität wird durch niedrige Balken (geringe Defekte), schlechte Daten werden durch hohe Balken angezeigt. Flüsse, für die keine Informationen vorliegen (z. B. die Flüsse 15–18 und 20–24) werden mit $ID_{\text{Fluss,max}} = 1$ aufgetragen. So ist darstellbar, wo im System die Datenlage gut ist, wo Daten fehlen und wo Maßnahmen ergriffen werden sollten. Im dargestellten System ist die Datenlage auf der Versorgungsseite (niedrige Flussnummern) besser als auf der Entsorgungsseite (hohe Flussnummern), wo die Datenverfügbarkeit lückenhaft ist.

Sicherlich ist Datenqualität eine qualitative Größe, die, wenn sie in mathematischen Modellen berücksichtigt werden soll, numerisch ausgedrückt werden muss. Bei den hier vorgestellten Informationsdefekten handelt es sich um eine dimensionslose Maßzahl für die Zuverlässigkeit von Daten. Anhand dieser Maßzahlen werden Informationselemente auf einer Skala von 0 bis 1 nach ihrer Zuverlässigkeit gereiht. Die Maßzahlen können unterschiedlich interpretiert und verwendet werden. Zentrale Anwendungsmöglichkeiten der Informationsdefekte werden im Folgenden vorgestellt.

2.2.1 Verwendung der Informationsdefekte

Zunächst können die Informationselemente anhand der Informationsdefekte gereiht werden („Ranking“). Somit kann die Datenqualität verschiedener Flüsse miteinander in Relation gesetzt und verglichen werden. Die Informationsdefekte können ebenso als dimensionslose Faktoren angewendet werden, um die epistemischen Unsicherheit zu berechnen. Sie können mithilfe von Variationskoeffizienten in Unsicherheitsbereiche übersetzt werden (Laner et al. 2014; 2015b). Weiterhin können sie als Variablen in Datenausgleichsalgorithmen wie in Cencic und Frühwirth (2015) oder Džubur et al. (under revision) eingesetzt werden. Eine wesentliche Anwendung der Informationsdefekte ist auch die Berechnung der Zuverlässigkeit der Datenbasis von Rohstoffbilanzen sowie ihres Informationsgehaltes. Damit können verschiedene Bilanzen miteinander verglichen, Schwachstellen erkannt und Verbesserungsmaßnahmen ergriffen, sowie die Weiterentwicklung von Bilanzen über die Zeit gemessen werden. Die zeitlich fortgeschriebene Erstellung von Rohstoffbilanzen im Rahmen einer Rohstoffbuchhaltung dient hierbei nicht dazu, Rohstoffhaushalte besser zu dokumentieren und besser zu verstehen. Sie ermöglicht auch die aktive Gestaltung, Steuerung und Optimierung von Rohstoffhaushalten im Rahmen eines modernen Rohstoffmanagements bzw. einer modernen Rohstoffpolitik.

3 Nationale Rohstoffbilanzen zur Optimierung des Rohstoffhaushalts

Zum einen ist das Abfall- und Emissionsaufkommen aufgrund anthropogener Aktivitäten teils immens, zum anderen spielen viele Rohstoffe eine zentrale ökonomische Rolle. Weiterhin bieten sich innerhalb des Systems zahlreiche Möglichkeiten, die Ressourceneffizienz und das Recycling durch gezielte Maßnahmen zu verbessern oder Abfallströme sinnvoll zu steuern. Die detaillierte Kenntnis des nationalen Rohstoffhaushalts und dessen Entwicklung über die Zeit ist somit sowohl auf der Input-Seite, auf der Output-Seite und systemintern relevant. Aufbauend auf einem fundierten Systemverständnis können Stoffsysteme verwaltet und optimiert werden. Zoboli et al. (2016) zeigen Möglichkeiten des auf der Rohstoffbuchhaltung aufbauenden Managements von Ressourcen anhand des Beispiels Phosphor auf. Wichtige Ziele eines optimierten Phosphorhaushalts sind unter anderem, Gewässer vor Eutrophierung zu schützen, die Ernährungssicherheit zu gewährleisten und Schritte hin zu einer Kreislaufwirtschaft zu integrieren. Die Auswirkungen von politischen und technischen Änderungen auf den Phosphorhaushalt werden quantitativ bewertet. Die Autoren zeigen, dass durch entsprechende Maßnahmen Emissionen um knapp ein Drittel verringert werden können und die Importabhängigkeit stark reduziert werden kann. Die Studie impliziert, dass Optimierungsszenarien auch für andere Rohstoffe erstellt und in der Folge politisch umgesetzt werden können. Wichtige Grundlage für eine effiziente Rohstoffpolitik mit dem Ziel einer optimierten Rohstoffwirtschaft ist eine systematische und zuverlässige Rohstoffbuchhaltung.

4 Datenlücken nationaler Rohstoffbilanzen

Daten für Rohstoffbilanzen können aus verschiedenen Gründen nicht verfügbar sein: entweder sind sie nicht existent, unter Geheimhaltung, zu stark aggregiert und damit nicht anwendbar, oder die Herkunft und Entstehung ist nicht nachvollziehbar, wodurch die Zuverlässigkeitsbewertung erschwert ist. Um die Datenlücken nationaler Rohstoffbilanzen zu schließen, sind Maßnahmen vonseiten der Datener-

zeuger und Datenanwender aus den behördlichen, wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Sektoren nötig. Der Handlungsbedarf, um Datenlücken zu schließen, wird im Folgenden hinsichtlich Informationsarten (Mengen und Konzentrationen), Rohstoffarten und Teilsystemen zusammengefasst.

5 Mengen und Konzentrationen

Insbesondere Daten hinsichtlich der Güterzusammensetzung und Stoffkonzentrationen sind lückenhaft. Eine systematische Erfassung der Zusammensetzung von Gütern ist erforderlich. Diese ist beispielsweise durch wissenschaftliche Studien (Analyse der Zusammensetzung von Gütern) zu erheben oder könnte durch eine Meldepflicht der Unternehmen zur Zusammensetzung ihrer Güter erreicht werden (Auskunft über die Zusammensetzung von Produkten ist beispielsweise in der Lebensmittelbranche bereits seit langem verpflichtend). Hinsichtlich der Daten zu Mengen sollten von behördlicher Seite weitere Teilsysteme in vergleichbar hoher Auflösung in öffentlich zugänglichen Statistiken integriert werden, wie es besonders hinsichtlich des Außenhandels bereits etabliert ist.

6 Rohstoffart

Die Erfahrung zeigt, dass die Datenlage für Industriemetalle und Nährstoffe besser ist als für Hochtechnologiemetalle und Kunststoffe. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass das wissenschaftliche und behördliche Interesse an Nährstoffen und Industriemetallen in der Vergangenheit groß genug für ausgedehnte wissenschaftliche Studien war, und diese zur heute verfügbaren Datengrundlage beitragen. Daten zu Stoffen in Spezialanwendungen (wie Hochtechnologiemetalle) werden oft geheim gehalten, was damit begründet wird, dass die Stellung am Markt nicht gefährdet werden soll. Allerdings ist fraglich, inwiefern die Marktstellung durch die Preisgabe derartiger Informationen tatsächlich gefährdet wäre (zu Problemen der Datengeheimhaltung für die nationale Rohstoffbuchhaltung und zu möglichen Lösungen siehe Rechberger 2015). Eine zuverlässige Datenerhebung wird zudem dadurch erschwert, dass sich Stoffe wie Kunststoffe in praktisch allen gewerblichen und privaten Bereichen finden. Die Verfügbarkeit von historischen Daten

(Zeitreihen) ist für viele Güter und die meisten Stoffe limitiert.

7 Teilsysteme

Im Vergleich zum Versorgungssektor (Handel, Produktion) ist die Datenlage im Nutzungs- und Entsorgungssektor lückenhaft (vgl. Abb. 4). Im Konsumbereich ist besonders die Datenlage sehr begrenzt, um Güterströme zu Konsumsektoren zuzuordnen. Die verfügbaren Informationen sind zu stark aggregiert, um direkt in Rohstoffbilanzen angewendet werden zu können. Wünschenswert ist es, nationale Statistiken hinsichtlich der Zuordnung von Gütern zu Konsumsektoren zu erweitern. Weiterhin sind kaum systematisch erhobene Daten zu Produktlebensdauern und KonsumentInnenverhalten vorhanden. Hinsichtlich der Entsorgung fehlen häufig nicht nur Daten zu Stoffkonzentrationen im Abfall, sondern auch zu Abfallmengen. Zudem ist in der Abfallwirtschaft die Informationslage sehr begrenzt, um Abfallströme zu Verwertungsrouten zuzuordnen. Teilweise sind vorhandene Informationen nicht öffentlich zugänglich. Das elektronische Datenmanagement (EDM) des Umweltbundesamtes und des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) könnte hier wesentliche Datenlücken schließen, allerdings sind die Daten nicht umfassend öffentlich zugänglich. Eine Möglichkeit, um die Datenlage zu verbessern, ist hier eine Anpassung des Bundesabfallwirtschaftsplans, insbesondere hinsichtlich einer Zuordnung von Abfallströmen zu klar definierten Entsorgungsrouten und weiterhin die möglichst vollständige Dokumentation von Meta-Informationen zu den Datensätzen (Bedeutung und Herkunft der Daten). Weiterhin ist es wichtig, dass vorhandene Daten für wissenschaftliche Studien zugänglich gemacht werden.

Insgesamt ist auffällig, dass die Datenlage zu prinzipiell messbaren Entitäten („intensive Daten“, also Daten, die sich mit der Systemgröße nicht ändern wie z. B. Stoffkonzentrationen) schlechter ist als die Verfügbarkeit von Daten, die auf Meldedaten oder Modellierungen beruhen (meist „extensive Daten“, die sich verändern, wenn die Systemgröße variiert wird, z. B. Güterflüsse). Obwohl die Datenlage zu letzteren besser ist, bleibt es fraglich, ob Daten aus Messungen andererseits

nicht zuverlässiger sind als Daten, die aus Meldedaten hochgerechnet werden. Dies würde nahelegen, Dinge, die messbar sind, auch zu messen, um damit die Informationen aus Modellen und Hochrechnungen in nationalen Rohstoffbilanzen zu ergänzen.

Der hier identifizierte Handlungsbedarf müsste von unterschiedlichen Datenerzeugern umgesetzt werden. Wenngleich von wissenschaftlicher Seite heute umfassende Methoden zur Stoffbilanzierung und zum Umgang mit Datenlücken und Datenunsicherheiten existieren (Brunner und Rechberger 2004; Cencic und Rechberger 2008; Cencic und Frühwirth 2015; Laner et al. 2014; Schwab et al. *in press*; Džubur et al. *under revision*; Laner et al. 2015b), sind Informationsengpässe immer noch ein wesentliches Hemmnis für die nationale Rohstoffbuchhaltung.

8 Ausblick und Schritte auf dem Weg zur nationalen Rohstoffbuchhaltung

In ihrem Endausbau wird die nationale Rohstoffbuchhaltung nicht mehr an einem Universitätsinstitut, sondern von einer Bundesbehörde, nachgelagerten Dienststelle oder einer Abteilung der Industriellenvereinigung, der Wirtschaftskammer oder einer ähnlichen Institution geführt. Diese routinemäßige Durchführung der Rohstoffbuchhaltung durch eine außeruniversitäre Institution würde dazu dienen, der Politik eine valide Grundlage für rohstoffpolitische Entscheidungen zu geben und die Wirksamkeit dieser Entscheidungen zu überprüfen. Eine begleitende wissenschaftliche Betreuung durch Universitätsinstitute wäre teilweise sicherlich sinnvoll. Diese Betreuung könnte sich beispielsweise auf Fragen der Modellierung von Szenarien und der dazu notwendigen mathematischen und statistischen Methoden beziehen.

Die Rohstoffbuchhaltung selbst ist ein computerbasiertes Modell, das für die wesentlichen industriellen Rohstoffe in systematischer und regelmäßiger Weise eine ausreichend hoch aufgelöste Stoffbilanz fortführt. Die dafür notwendigen Dateninputs erfolgen standardisiert und routinemäßig von den diversen Datenquellen (Statistik Austria, Fachverbände der Wirtschaftskammer, EDM etc.). Durch die regelmäßige Aktualisierung der Stoffbilanzen werden Zeitreihen aufgebaut, die das Verständnis und die Genauigkeit der

quasi-dynamischen Stoffbilanzen wesentlich erhöhen (vgl. Buchner et al. 2015, Zoboli et al. 2015). Generell kann angenommen werden, dass sich Genauigkeit und Auflösung und damit der Nutzen der Rohstoffbilanzen über die Jahre vergrößern werden, indem durch die Analyse von Datenzeitreihen und Systemreaktion laufend zusätzliches Systemverständnis generiert wird.

Der wesentliche Endnutzen der Rohstoffbuchhaltung besteht darin, dass gesicherte quantitative als auch qualitative Aussagen über das potenzielle anthropogene Lager an Rohstoffen gemacht (in Ergänzung des Nationalen Rohstoffplans), als auch Szenarien für die Freiwerdung dieser Materialien berechnet werden können. Diese Informationen dienen der Rohstoff- und Recyclingindustrie als Planungsgrundlage für die Deckung ihres Rohstoffbedarfs bzw. die Planung des Anlagenbedarfs und sind Grundlage für politische und legislative Maßnahmen zur optimalen Nutzung der anthropogenen Ressourcen. Die Einrichtung einer Rohstoffbuchhaltungs-Institution hätte Vorbildcharakter auf EU-Ebene und sollte auf Mitgliedstaatenebene – mit einer darüber stehenden EU-Institution (z. B. Eurostat) – umgesetzt werden.

Als erster Schritt hin zu einer Rohstoffbuchhaltung auf administrativer Ebene empfiehlt sich die Durchführung einer Rohstoffbilanz in einem administrativen Kontext anhand weniger, ausgewählter Rohstoffe. Wünschenswert ist es, dass hierbei verschiedene administrative und behördliche Einrichtungen mitwirken, um alle Bereiche des Rohstoffhaushaltes von der Versorgung über den Konsum bis zur Entsorgung in vergleichbarer Schärfe darstellen zu können und so den Rohstoffhaushalt umfassend abzubilden.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen der vom Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Sektion III/7 (Roh- und Grundstoffpolitik) geförderten Projektserie „EDNA“ (Ermittlung des Datenbedarfs für nationale Rohstoffbilanzen). Die Autoren danken den KollegInnen am Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien, für nützliche Hinweise zu einer vorhergehenden Version dieses Artikels.

Open access funding provided by Technische Universität Wien (TU Wien).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz ([http://](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de)

creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Au-

tor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. ■

Literatur

Baccini, P. und Brunner, P. H. (2012): Metabolism of the anthroposphere. Cambridge: MIT Press.

Baccini, P. und Brunner, P. H. (1991): Metabolism of the anthroposphere. Springer-Verlag.

Brunner, P. H. und Rechberger, H. (2004): Practical Handbook of Material Flow Analysis. Boca Raton: Lewis Publishers.

Buchner, H., Laner, D. Rechberger, H. und Fellner, J. (2014): In-depth analysis of aluminum flows in Austria as a basis to increase resource efficiency. *Resources, Conservation and Recycling* 93(0): 112–123.

Buchner, H., Laner, D. Rechberger, H. und Fellner, J. (2015): Dynamic Material Flow Modeling: An Effort to Calibrate and Validate Aluminum Stocks and Flows in Austria. *Environmental Science & Technology* 49(9): 5546–5554.

Cencic, O. und Rechberger, H. (2008): Material Flow Analysis with Software STAN. *Journal of Environmental Engineering and Management* 18(1): 3–7.

Cencic, O. und Frühwirth, R. (2015): A general framework for data reconciliation—Part I: Linear constraints. *Computers & Chemical Engineering* 75: 196–208.

Džubur, N., Sunanta, O. und Laner, D. (submitted): A fuzzy set-based approach for data reconciliation in material flow modeling *Applied Mathematical Modelling*.

Gottschalk, E., Scholz, R. W. und Nowack, B. (2010): Probabilistic material flow modeling for

assessing the environmental exposure to compounds: Methodology and an application to engineered nano-TiO₂ particles. *Environmental Modelling & Software* 25(3): 320–332.

Klee, R. J. und Graedel, T. E. (2004): Elemental cycles: A Status Report on Human or Natural Dominance. *Annual Review of Environment and Resources* 29(1): 69–107.

Laner, D., Rechberger, H. und Astrup, T. (2014): Systematic Evaluation of Uncertainty in Material Flow Analysis. *Journal of Industrial Ecology* 18(6).

Laner, D., Rechberger, H. und Astrup, T. (2015a): Applying fuzzy and probabilistic uncertainty concepts to the material flow analysis of palladium in Austria. *Journal of Industrial Ecology*.

Laner, D., Feketitsch, J. Rechberger, H. und Fellner, J. (2015b): A novel approach to characterize data uncertainty in MFA and its applications to plastic flows in Austria. *Journal of Industrial Ecology*.

Morgan, M. G., Henrion, M. und Small, M. (1992): *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*: Cambridge University Press.

ÖNORM S 2069 (2005): Stoffflussanalyse – Teil 1: Anwendung in der Abfallwirtschaft – Begriffe; Teil 2: Anwendung In der Abfallwirtschaft – Methodik; Teil 3: Stoffflussanalyse - Vorgangsweise bei der Bewertung. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

Pauliuk, S., Majeau-Bettez, G. und Müller, D. B. (2015): A General System Structure and Accounting Framework for Socioeconomic Metabolism. *Journal of Industrial Ecology*.

Rechberger, H. (2015): Die Geheimhaltung von Daten als Hindernis für die sog „Nationale Rohstoffbuchhaltung“. In *Jahrbuch Abfallwirtschaftsrecht 2015*, edited by C. Piska and B. Lindner: Neuer Wissenschaftlicher Verlag.

Schwab, O., Zoboli, O. und Rechberger, H. (2016): A Data Characterization Framework for Material Flow Analysis. *Journal of Industrial Ecology*.

Schwab, O., Laner, D. und Rechberger, H. (in press): Quantitative evaluation of data quality in regional Material Flow Analysis. *Journal of Industrial Ecology*.

van Eygen, E., Feketitsch, J. Laner, D. Rechberger, H. und Fellner, J. (under revision): Comprehensive analysis and quantification of national plastic flows: the case of Austria. *Resources Conservation and Recycling*.

Zoboli, O., Zessner, M. und Rechberger, H. (2015): Added Value of Time Series in MFA: The Austrian Phosphorus Budget from 1990 to 2011. *Journal of Industrial Ecology*.

Zoboli, O., Zessner, M. und Rechberger, H. (2016): Supporting phosphorus management in Austria: Potential, priorities and limitations. *Science of the total Environment*.