

# Abschlussbericht

## **Material- und Energieflussbasierte Kosten- und Klimaanalyse (MEKKA)**

von

Mario Schmidt

unter Beteiligung von:

Bettina Joa, Clemens Raqué  
Nadine Rötzer, Marlene Preiß

Hochschule Pforzheim  
Institute for Industrial Ecology

sowie

Seakle Godschalk, M.A., Environmental & Sustainability Solutions CC (ZA)  
Asako Kimura, Kansai University Osaka (J)  
Michiyasu Nakajima, Kansai University Osaka (J)  
Gladys Zerquera, M.A., Síntesis de Evaluación Ambiental S.C. (MX)

Förderkennzeichen: ZO3R 12001

Laufzeit: 01.11.2012 - 31.10.2014

Die Arbeiten der Projekte der Zukunftsoffensive III werden mit Mitteln des Landes  
Baden-Württemberg gefördert.

Oktober 2015



## **Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

## Impressum:

Prof. Dr. Mario Schmidt  
Hochschule Pforzheim  
Institute for Industrial Ecology  
Tiefenbronner Straße 65  
75175 Pforzheim  
Telefon 07231-28-6406  
Telefax 07231-28-7406

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg  
Kernerplatz 9  
70182 Stuttgart  
Telefon 0711 126-0  
Telefax 0711 126-2881

## Inhalt

1.	Einführung .....	5
1.1	Hintergrund .....	5
1.2	Problemstellung .....	6
1.3	Zielsetzung .....	6
1.4	Methodik .....	7
2.	MFCA und die Modellierung mit I/O- und A/E-Graphen .....	10
2.1	Ausgangspunkt: Kosten- und Leistungsverrechnung .....	10
2.2	Anwendung auf Kuppelproduktsysteme .....	13
2.3	Modellierung von MFCA als eine Kuppelproduktion .....	14
2.4	Anwendung von MFCA auf Umweltwirkungen .....	17
2.5	Aufwand/Ertags-Graphen als Verallgemeinerung .....	17
2.6	MFCA von Recyclingsystemen .....	20
3.	Input-Output-Modellierung und Treibhausgase .....	24
3.1	Hintergrund und Forschungsstand .....	24
3.2	Grundlegende Gleichgewichte in der Input-Output-Modellierung .....	26
3.3	Das nachfrageseitige Input-Output-Modell .....	29
3.4	Ökologische Erweiterung der Input-Output-Modellierung .....	31
3.5	Globale Mehr-Regionen-Modellierung und Ergebnisse .....	32
3.6	Zwischenfazit und Ausblick .....	36
4.	Praxisbeispiele .....	37
4.1	Einleitung .....	37
4.2	MFCA bei der Witzenmann GmbH .....	37
4.3	MFCA in einem anonymen Beispiel .....	40
5.	Internationale Erfahrungen .....	44
5.1	RE-Kongress und Workshop .....	44
5.2	Unternehmensbeispiel aus Südafrika .....	45
5.3	MFCA in der Lieferkette: Ansätze aus Japan .....	54

5.4	MFCA und GEMBA: Erfahrungen aus Japan.....	61
5.5	Erfahrungen aus Mexiko .....	64
6.	IT-mäßige Umsetzung der MEKKA-Ansätze als Ergebnis .....	72
6.1	Anforderungen .....	72
6.2	Umsetzung mit bw!MFCA .....	73
7.	Literatur.....	74

# 1. Einführung<sup>1</sup>

## 1.1 Hintergrund

Die Material- und Energieflussanalyse ist eine wichtige Basis, um betriebliche Abläufe in produzierenden Unternehmen abzubilden, Abfallströme und Emissionen zu identifizieren und umweltrelevante Handlungsoptionen aufzuzeigen. Entscheidend ist hierbei eine Erfassung der Mengenströme in physischen Einheiten und auf der betrieblichen Ebene, also dicht an dem realen produzierenden System. Dieses Mengengerüst kann dann sowohl für eine monetäre als auch für eine ökologische Auswertung genutzt werden. Solche Ansätze wurden vielfach propagiert und methodisch beschrieben, z.B. von Spengler (1998), Möller (2000) oder Schmidt (2002, 2005). In der Vergangenheit wurden dazu auch Software-Tools entwickelt und für den professionellen Einsatzmarkt angeboten, z.B. Umberto, Audit oder STAN.

Im September 2011 wurde von der Internationalen Standardisierungsorganisation ISO die neue Norm ISO 14051 zum so genannten „Material Flow Cost Accounting“ veröffentlicht. Diese Methode basiert auch auf einer Material- und Energieflussanalyse, fokussiert aber auf einen speziellen Aspekt, nämlich der Erzeugung von Material- und Energieverlusten in Form von Reststoffen, Abfällen, Verschnitt usw. und deren monetären Wert. Dabei werden die Anteile dieser Verluste an der gesamten Wertschöpfung im System ermittelt. Diese stellen quasi eine Obergrenze der Einsparpotenziale dar, die möglich wären, wenn die Verluste komplett vermieden werden. Für den betrieblichen Alltag sind diese Angaben wichtige Hinweise, wo die großen Einsparpotenziale existieren und welche versteckten Kosten damit verbunden sind. Gerade letzteres eröffnet häufig einen größeren Spielraum bei Investitionskosten für Maßnahmen im Bereich „Clean Technologies“, als wenn nur z.B. die reinen Entsorgungskosten berücksichtigt würden.

Diese Methode wurde ursprünglich in Deutschland entwickelt (siehe Wagner et al. 2010) und in öffentlich geförderten Pilotprojekten, u.a. auch in Baden-Württemberg, erfolgreich getestet. Sie fand dann jedoch weniger Beachtung in der gewerblichen Praxis, wurde aber in Japan u.a. von dem Industrieministerium METI sehr stark gefördert und in inzwischen über 300 Unternehmen eingesetzt (METI 2002, 2007, 2010). Von Japan gehen auch die heutigen Impulse zu der Entwicklung, Einführung und Verbreitung der Methode vorrangig aus. Sie werden dazu genutzt, die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen zu steigern und Abfälle und Emissionen zu reduzieren. Die monetären Einsparpotenziale werden oft auf 20-30 % des Materialeinsatzwertes beziffert, was eine erhebliche ökonomische Bedeutung hat.

Durch das Ansteigen der Rohstoffpreise hat dieses Thema auch für deutsche Unternehmen wieder an Bedeutung gewonnen. Die derzeitige Situation ist allerdings, dass von den diversen Agenturen (efa NRW, DEMEA, DENA...) diese Methode in der Praxis, z.B. in der Beratung von Unternehmen, kaum eingesetzt wird. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass die Methode derzeit wenig operationabel ist und es wenig IT-seitige Unterstützung am Markt gibt. Sie ist zudem eine Sonderauswertung, die eine gesonderte Erfassung von Material- und Energieflüssen erfordert und recht aufwendig sein kann. Gleichzeitig ist aber der Bedarf an Methoden und Instrumenten zur Steigerung der Ressourceneffizienz erheblich.

---

<sup>1</sup> tw. aus dem Projektantrag

## 1.2 Problemstellung

MFCA und insbesondere die ISO 14051 ist als eine Spezialauswertung von Material- und Energieflüssen und ihre monetäre Bewertung angelegt und erfolgt mittels spezieller Tabellen, die von ISO 14051 vorgegeben werden. Es fehlt aber eine methodische Einbettung in ein Gesamtkonzept zur Modellierung der material- und energiebezogenen Flüsse in einem Produktionssystem, das anschlussfähig für verschiedene Erweiterungen, z.B. in Richtung überbetrieblicher Analysen in der Supply Chain, oder ökonomische und ökologische Bewertungen ist. Insbesondere ist eine solche methodische Einbettung erforderlich, um IT-Konzepte und IT-Produkte zu entwickeln, die dann praxistauglich sind und über die nötige Flexibilität für den betrieblichen Einsatz verfügen.

Diese methodische Kompetenz wurde weder mit der ISO 14051 geliefert, noch ist sie in der aktuellen Forschung in Sicht. Dies trifft sowohl auf Deutschland zu, wo die „Flusskostenrechnung“ ursprünglich entwickelt wurde, als auch auf Japan, wo MFCA derzeit sehr propagiert wird. Gleichzeitig wird ein großer Bedarf erforderlich, eine entsprechende Herangehensweise auch für die Umweltbewertung, z.B. die Klimawirksamkeit von Material- und Energieverlusten zu ermitteln. Dies wurde z.B. auf einem internationalen Symposium an der Universität Kobe (Japan) im Dezember 2011 konstatiert. Damit ist gemeint, dass man errechnet, wie groß beispielsweise die Einsparung an Treibhauswirksamkeit (z.B. in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent) wäre, wenn man bestimmte Verluste im Betrieb vermeidet. Denkbar wäre aber auch eine Anwendung eines solchen Konzepts auf andere Umweltwirkungsbereiche, z.B. den in aktueller Diskussion stehenden Water Footprint oder die ökologische Bewertung von Flächen.

## 1.3 Zielsetzung

Es sollte deshalb eine Methodik entwickelt werden,

- die auf einer (über)betrieblichen Material- und Energieflussanalyse aufsetzt,
- nach bestimmten Regeln aus der Produktionstheorie vorgeht,
- flexible Präferenzsetzungen der betrachteten Güter im System zulässt,
- eine stringente monetäre Bewertung nach klassischem Kostenrechnungsschema erlaubt,
- eine MFCA als eine monetäre Spezialauswertung zulässt,
- ebenso eine Berücksichtigung von Umweltwirkungen, speziell am Beispiel Treibhausgasemissionen und Carbon Footprints, zulässt und Scope-3-Emissionen einbezieht,
- daraus ein Carbon Accounting für das betrachtete System ermöglicht,
- und schließlich auch eine dem MFCA analoge Bewertung der Umwelt- oder Klimawirksamkeit von Material- und Energieverlusten im betrieblichen Rahmen möglich macht.

Diese Methodik soll ein wissenschaftlich fundierter Ausgangspunkt für einen flexiblen Einsatz in der betrieblichen Praxis und weiterhin für die Entwicklung geeigneter IT-Hilfsmittel sein. Im Rahmen des Projektes sollte die Einsatztauglichkeit anhand von Fallbeispielen getestet werden. Es umfasst aber nicht die Entwicklung einer professionellen und vermarktungsfähigen Software. Dies bleibt später dem wettbewerblichen Bereich außerhalb dieses Forschungsprojektes vorbehalten. Weiterhin soll Bestandteil des Projektes die Einbeziehung von externem wissenschaftlichen Know-how sein, insbesondere um den Anschluss an die Entwicklung im asiatischen Raum zu gewinnen und einen wissenschaftlichen Austausch mit den international führenden Wissenschaftlern zu erreichen. Dazu waren die explizite Einbeziehung von ausländischen Experten mittels Werkverträgen und die Durchführung eines Workshops im Rahmen dieses Projektes geplant.

## 1.4 Methodik

Folgende Ideen liegen dem Projekt zugrunde: Es soll zwischen verschiedenen Analyseebenen unterschieden werden. Insgesamt gibt es dabei 3 wesentliche methodische Grundpfeiler:

1. Das **Modell der physischen Mengenebene** beschreibt das klassische Material- und Energieflusssystem, nutzt dabei aber die Aufwands- und Ertragsgraphen für eine Systematisierung. Diese können genutzt werden, um für eine klassische Kostenrechnung verwendet zu werden. Damit können auch fortgeschrittene Analysen, wie z.B. der Produktbezug oder die Kostenstellenauflösung, durchgeführt werden.

Neben der üblichen Prozessdarstellung als Input- und Output-Graph ist der so genannte Aufwand- und Ertrags-Graph wesentlich interessanter, da er bereits anzeigt, welche Präferenzen hinter den Energie- und Materialströmen stehen (Möller 2000). Die Frage, was Aufwand und was Ertrag bei einem Prozess ist, hängt von dem Flussobjekt selbst ab und ob es als Input oder Output auftritt. Zum Beispiel: Energie als Output eines Energieerzeugungsprozesses ist erwünscht, sie ist ein Ertrag. Doch die Energie als Input eines Produktionsprozesses ist Aufwand und soll minimiert werden. Diese Dichotomie haben fast alle Güter, die in der Wirtschaft relevant sind und einen Marktpreis besitzen. Ihre Produktion und ihr Besitz ist erwünscht, ihr Verbrauch dagegen nicht, da er mit Kosten verbunden ist.

Doch es gibt auch Flussobjekte, die in dieses Schema nicht passen. Sie besitzen eigentlich keinen oder sogar einen negativen Marktwert – man ist bereit, Geld zu bezahlen, um sich ihrer zu entledigen: Abfälle oder Schadstoffe. Treten Sie auf der Outputseite eines Prozesses auf, so sind sie Aufwand und oft mit Kosten verbunden. Man will sie vermeiden. Sie stellen aber nicht nur einen ökonomischen Aufwand, sondern auch einen ökologischen Aufwand dar. Treten Sie auf der Inputseite auf, so ist das positiv, denn nun werden Abfälle oder Schadstoffe verringert, beseitigt oder unschädlich gemacht. Dies kann als Ertrag verstanden werden, sogar im ökonomischen Sinn, und letztendlich lebt die ganze Entsorgungs- und Recyclingwirtschaft genau von diesem Umstand.

Mit dem Aufwands- und Ertrags-Graphen hat man die notwendige Logik der Kosten- und der Emissionsrechnung, wenn die Flussobjekte alle richtig eingestuft werden – als erwünschte Güter oder als etwas Unerwünschtes: Die Kosten oder Emissionen aller Aufwände eines Prozesses werden auf den Ertrag bezogen. Die Unterscheidung, was erwünscht und was unerwünscht ist, lässt sich in den meisten Fällen anhand des Marktpreises feststellen. Positive Marktpreise stehen für erwünschte Güter. Negative Marktpreise zeigen dagegen an, dass die Entledigung (z.B. von Abfall) mit Kosten verbunden ist. Dyckhoff (1994) hat hierfür das Begriffspaar Gut und Übel eingeführt. Übrigens kann sich ein „Übel“ auch zu einem Gut wandeln, dies ist innerhalb der Technosphäre kontextabhängig: Aus Abfall, der früher teuer entsorgt werden musste, kann ein (Sekundär-)Wertstoff werden, der inzwischen mit hohem Preis gehandelt wird.

Der Vorteil, diese Berechnung explizit auf der Mengenebene durchzuführen, liegt darin, dass der Schritt der Bewertung der Energie- und Materialflüsse – sowohl im ökonomischen Sinn durch eine Bepreisung als auch ökologisch durch entsprechende ökologische Indikatoren (Treibhauspotential, Wasserbedarf etc.) – *danach* erfolgen kann. Die ökonomische und die ökologische Bewertung eines Energie- und Materialflusssystems basiert damit auf ein und dem gleichen Methodik.

2. Auf der **Bewertungsebene** liegt der Wechsel von der monetären Bewertung der Material- und Energieflüsse zu der Umweltwirkung oder Klimawirksamkeit in einem Austausch der

Preise durch entsprechende Emissionsintensitäten oder Emissionsfaktoren für eingekaufte Güter an den Systemgrenzen und eine Einbeziehung indirekter THG-Emissionen (so genannte Scope-3-Emissionen).

Entsprechende Ansätze wurden im Rahmen der Berechnung von Carbon Footprints für Produkte erst jüngst veröffentlicht (Schmidt 2011). Damit wäre praktisch ein Carbon Accounting für Unternehmen möglich. Dies gilt es um den Aspekt der THG-„Einsparungen“ durch Materialeffizienz zu ergänzen.

Die Unterschiede liegen hier insbesondere in der Behandlung vorgelagerter Wertschöpfungsketten, also der so genannten Vorketten, Supply Chains etc. Während bei der Kostenrechnung der ökonomische Aufwand einer Vorleistung quasi automatisch durch das Preissystem berücksichtigt ist, muss er bei der ökologischen Bewertung explizit berücksichtigt werden, durch ökologische Rucksäcke, Carbon Footprints oder wie immer man solche Bewertungsgrößen nennen will. Sie müssen auf die Vorleistungen oder Vorprodukte angewendet werden. Dies verbirgt sich hinter den jüngsten Vorstößen der Einbeziehung der Scope-3-Emissionen (WBCSD/WRI 2011).

Die Schwierigkeit hierbei besteht darin, dass es kein entsprechendes einheitliches System der Bewertung von Produkten und Dienstleistungen, z.B. für das Treibhauspotenzial, gibt wie das ökonomische Bepreisungssystem. Will man entsprechende Kennwerte oder Indikatoren (z.B. Carbon Footprint oder Water Footprint) ermitteln, so muss letztendlich eine einige Analyse im Sinne eines Life Cycle Assessments nach ISO 14040/41 durchgeführt werden oder man greift auf generische Faktoren zurück, wie sie z.B. durch Datenbanken wie der ECOINVENT-Datenbank verfügbar sind (Hischier 2011).

Dies erschwert erheblich die Ermittlung der Einsparpotenziale auf der ökologischen Ebene. Entweder man lässt die Scope-3-Beiträge weg und unterschätzt dann das Einsparpotenzial teilweise erheblich. Dafür wären solche Analysen aber einfach und schnell durchführbar. Oder man bezieht die Scope-3-Beiträge durch entsprechende Datenrecherchen mit ein, was zu verlässlicheren Aussagen bei den Einsparpotenzialen führt, aber einen erheblichen Zusatzaufwand bedeuten würde.

Eine adäquate Methode wäre hier die Einführung kumulierter Größen, die iterativ über die Supply Chain weitergereicht werden – also entsprechend einem Preissystem (vgl. Schmidt & Schwegler 2008). Dies ist aber auf absehbare Zeit nicht realistisch bzw. es stellt sich hier bei der Einführung eines solchen Systems das Startwertproblem (vgl. Haubach 2009). Eine Lösung bietet sich durch neuere Forschungen an, bei der auf die umweltökonomische Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes zurückgegriffen wird und die Leontief'sche Input-/Output-Rechnung für Schätzwerte zum Vorleistungssektor genutzt wird (Haubach 2012, Raqué 2012). Diese Ansätze sind recht vielversprechend, müssen aber konkret für den vorliegenden Anwendungsfall adaptiert werden.

3. Der entscheidende Schritt ist allerdings der Präferenzwechsel in der Modellierung einzelner Produktionsprozesse als eine **Spezialauswertung**. Die Zurechnung von Kosten oder Emission erfolgt typischerweise verursachungsorientiert nach Produkten (oder Erträgen) und ist die Basis der klassischen Kosten- und Leistungsrechnung. Ist eine verursachungsorientierte Schlüsselung nicht möglich, so wird eine Kostenaufteilung oder Allokation nach anderen Kriterien vorgenommen, um lineare Technologien zu modellieren. Werden die Material- und Energieverluste nun ebenso als Kostenträger aufgefasst und erfolgt eine entsprechende Schlüsselung von Kosten oder Emissionen, so könnte MFCA und ebenso

ein MF“carbon“ A als Spezialauswertung aus dem gleichen Mengengerüst erzeugt werden, quasi auf Knopfdruck. Dies ließe sich auch für andere Umweltwirkungen entsprechend einsetzen.

Insbesondere kann die unter Punkt 1 aufgeführte Logik für die Verrechnung von Leistungen und Kosten verwendet werden. Der Aufwand wird in einer Zweck-Mittel-Relation dem Ertrag des einzelnen Prozesses oder sogar eines ganzen Systems zugerechnet. Bei größeren Systemen mit wechselseitigen Abhängigkeiten der Energie- und Materialflüsse bei verschiedenen Prozessen bzw. bei zyklischen Flüssen, wie sie im Recycling auftreten, sind dazu allerdings geschlossene Lösungsverfahren erforderlich. Das kann beispielsweise durch lineare Gleichungssysteme, bei denen lineare Technologien unterstellt werden, gelöst werden. Dies ist auch Grundlage der Kosten- und Leistungsrechnung innerhalb der BWL. Der Unterschied besteht allerdings darin, dass die Berechnung auf der Ebene der Mengenbilanz erfolgt (Schmidt 2005).

Die Herausforderung in diesem Bereich besteht nun darin, eine Zuordnungs- und Verrechnungslogik zu etablieren, die auch mit dem Begriff der *Materialverluste* und des damit verbundenen Aufwandes – in ökonomischer und ökologischer Hinsicht – kompatibel ist. Die Idee ist dabei, den Aufwand im Produktionsverlauf nicht nur dem klassischen Ertrag („Kostenträgern“) zuzuweisen, sondern sie einzelprozessbezogen jeweils auch den Reststoffen im System („material losses“) anteilig anzurechnen. Damit erhält man eine Größe für Einsparpotenziale, die mit diesen Materialverlusten verbunden sind. Die Reststoffe müssten in der Spezialauswertung vom faktischen „Aufwand“ virtuell zu einem „Ertrag“ umgewandelt werden und es müsste eine geeignete Allokationsvorschrift gewählt werden. Besonders die Interpretation einer solchen Sonderrechnung muss sorgfältig gewählt werden, da Material Losses nicht automatisch als Kostenträger fungieren können. Hier müssten ggf. die Einsparpotenziale mittels Szenarierechnung ermittelt und sauber von der klassischen Kostensicht unterschieden werden. Die saubere und entscheidungsunterstützende Interpretation solcher Ergebnisse ist eine wesentliche Aufgabe dieses Projektes.

Insgesamt schließt der Ansatz die Betrachtung der Material- und Energieflüsse, die Bewertung der Kosten und der Klimarelevanz und die Ausweisung der Einsparpotenziale ein. Daraus ergibt sich auch der gewählte Projektname MEKKA.

## 2. MFCA und die Modellierung mit I/O- und A/E-Graphen<sup>2</sup>

### 2.1 Ausgangspunkt: Kosten- und Leistungsverrechnung

Die methodischen Grundlagen von MFCA werden z.B. in Wagner (2005) beschrieben. Nach Jasch (2009, 116) basiert MFCA auf einer Input-Output-Analyse der Materialflüsse und misst die Flüsse eines Produktionsprozesses oder Produkts in physikalischen und monetären Einheiten. Obwohl sie ein Kostenrechnungsprozess ist, richtet sie sich durchweg an die physischen Energie- und Materialflüsse eines Unternehmens. Diese müssen bekannt sein. Das Messen der physischen Basis ist der größte und schwierigste Unterschied im Vergleich zur klassischen Kostenrechnung (Schaltegger, 2000). Gleichzeitig ist es jedoch ein gemeinsames Merkmal vieler für ökologische Zwecke verwendeter Analysen, z.B. Methoden der industriellen Materialflussanalyse (Spengler, 1998; Schmidt, 2000) oder sogar LCA (ISO, 2006). Diese stützen sich ebenfalls auf die physischen Energie- und Materialflüsse.

Methodenbezogene Fragen, die keinesfalls trivial sind, kommen bereits in der physischen Materialflussanalyse auf. Beispielsweise können alle Input- und Outputflüsse von Energie und Material innerhalb des Unternehmens gesammelt werden, die wahre Herausforderung besteht jedoch darin, sie einander zuzuordnen. Unternehmen produzieren normalerweise eine Reihe von Produkten und Nebenprodukten. Der Material- und Energieeinsatz sowie die zurückbleibenden Materialien, Abfälle und Emissionen (mit anderen Worten die Outputseite) müssen diesen Produkten ebenfalls zugewiesen werden. In manchen Fällen mag der eigentliche Zweck eines Unternehmens auf der Inputseite liegen. Beispielsweise verdient eine Müllverbrennungsanlage ihr Geld mit der Annahme von Abfallmaterialien. Dieser Abfalleintrag bildet nun den Bezugspunkt für alle Ausgaben des Unternehmens. So werden die Flüsse nicht länger nach Input und Output sortiert, sondern stattdessen nach Aufwand (Materialien, Energie, Abfälle, Emissionen) und Ertrag (Produkte) im allgemeineren oder physischen Sinne.

Der Wechsel von einer Input/Output- zur einer Aufwand/Ertrag-Darstellung entspricht dem Wechsel von einer unternehmensweiten Analyse, die das ganze Werk oder Unternehmen betrachtet, zu einer produktbezogenen Analyse, wie sie z.B. für die Ökobilanz eines einzelnen Produktes benötigt wird. Möller (2000) zeigt, dass diese Vorgehensweise der Kostenträgerrechnung entspricht, bei der die im Unternehmen anfallenden Kosten den einzelnen Produkten zugeschrieben werden, oder allgemeiner den Kostenträgern. Diese methodenbezogenen Parallelen können genutzt werden, um die gleiche Vorgehensweise für die Kostenträgerrechnung und die produktbezogene Materialflussanalyse zu verwenden (Schmidt, 2005).

Wir sollten nun die Einführung der Kostenträgerrechnung für ein Produktionssystem betrachten, welches immer auf physischen Energie- und Materialflüssen aufbaut. Mit anderen Worten, die Mengen aller Energie- und Materialflüsse in den entsprechenden Einheiten (kJ oder kg) sind bekannt. Sie sind in den folgenden Gleichungen mit der Abkürzung  $x$  bezeichnet. Das „System“ kann ein einzelner Prozess, eine Reihe von Prozessen, ein Unternehmen, oder sogar eine Reihe von Unternehmen innerhalb einer Lieferkette sein. Die Kostenrechnungsmethode sollte unabhängig davon sein, d.h. sie sollte skalierbar sein und sowohl für einzelne Prozess als auch eine ganze Lieferkette anwendbar sein.

---

<sup>2</sup> Auch geplant zur Veröffentlichung in: M. Schmidt (2015): The interpretation and extension of Material Flow Cost Accounting (MFCA) in the context of environmental material flow analysis. Journal of Cleaner Production (in Druck).

Die Herausforderung ist die Verteilung der Kosten des Produktionssystems auf die Produkte oder genauer gesagt die Kostenträger. Der einfachste Fall liegt vor, wenn wir einen Prozess und ein Produkt haben. Alle Kosten des Prozesses müssen dann von diesem Produkt getragen werden (siehe Abb. 2-1). Verschiedene Arten von Kosten können anfallen: Energie- und Materialkosten, die von der Außenseite eingebracht werden und aus der Multiplikation von Menge  $x$  mit Preis  $p$  resultieren, sowie Lohn- und Kapitalkosten, die allgemein an den Prozess oder das Unternehmen als Ganzes gebunden sind. In MFCA werden letztere als „Systemkosten“  $S$  bezeichnet. Das Produkt muss die gesamten Kosten tragen, folglich sind im einfachsten Fall die Kosten des ganzen Systems identisch mit denen des Produkts.

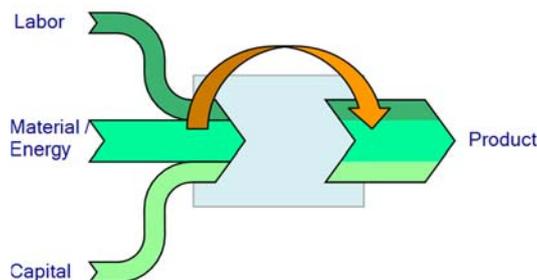


Abb. 2-1. Kostenallokation in einem Ein-Produkt-Fall.

Die Kosten eines Prozess  $i$  sind dann:

$$p_i \cdot x_i = S_i + \sum_j p_j \cdot x_{ij} \quad (2-1)$$

$S_i$ : Systemkosten des Prozesses  $i$  (Lohn, Kapital)

$p_j$ : Preis des Vorprodukts  $j$  (in \$/kg)

$x_{ij}$ : Menge des Vorprodukts  $j$  für den Prozess  $i$  (in kg)

$p_i$ : Preis des Produkts  $i$  (in \$/kg)

$x_i$ : Produzierte Menge des Produkts  $i$  (in kg)

Wenn alle Mengen  $x$  bekannt sind, sowie die Preise der Vorprodukte  $p_j$  und die Systemkosten  $S$  auf der rechten Seite der Gleichung (2-1), kann der Preis des Produktes  $p_i$  einfach berechnet werden. Wie man sieht, bestehen die Materialkosten aus einer Mengen- und einer Preiskomponente. Energieträger werden in diesem Zusammenhang wie Materialien behandelt, da deren Kosten auch aufgeteilt werden können. Die Aufteilung in physische Mengen und Wertkomponenten ist typisch für diese Vorgehensweise. Wenn die Preise mit 1 angesetzt werden und die Systemkosten vernachlässigt werden, dann werden die reinen Energie- und Materialflüsse auf das Produkt verteilt. Wo nur ein Prozess beteiligt ist, ist das eine einfache Angelegenheit. Selbst in einem relativ großen Produktionssystem, ist es somit immer noch möglich zu sagen, wieviel Energie oder welches Material für die Produktion eines bestimmten Produktes benötigt wurde.

Diese Berechnung ist nützlich, wenn es darum geht, Kosten in einem großen System, bestehend aus vielen Prozessen, weiterzugeben. Jeder einzelne Prozess muss als ein linearer Ein-Produkt-Prozess angesehen werden, damit können Methoden wie Koopmans Aktivitäts-Analyse angewendet und Kosten durch das Netz geführt werden (Koopmans, 1951). Somit ist es

möglich die Kosten der „Systemprodukte“ zu bestimmen. Diese können aus mehreren Produkten bestehen (siehe Abb. 2-2). An diesem Punkt ist es wichtig zu verstehen, dass nur die einzelnen physischen Flüsse zusammen mit den Einkaufspreisen und den Systemkosten jedes einzelnen Prozesses bekannt sein müssen. Die Vorgehensweise liefert die internen Verrechnungspreise aller Energie- und Materialflüsse, einschließlich aller Vorprodukte innerhalb des Systems.

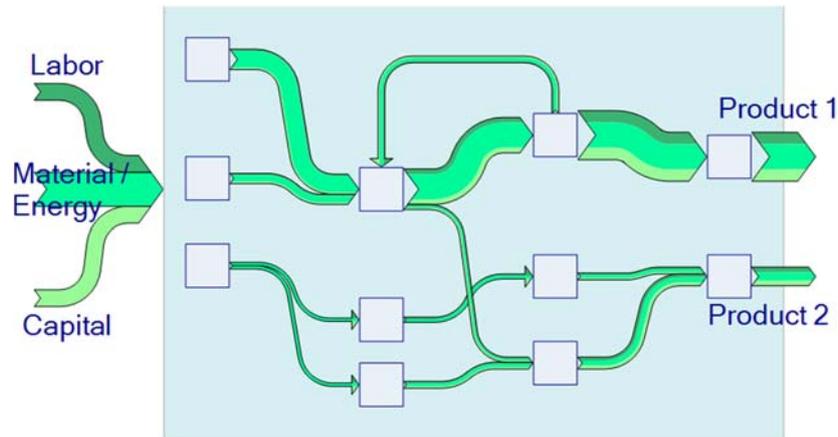


Abb. 2-2. In einem relativ großen Produktionssystem (z.B. ein Unternehmen) mit vielen Prozessen und Produkten, müssen die Kosten des Unternehmens geeignet auf die Systemprodukte verteilt werden.

Wenn nur Ein-Produkt-Prozesse im System vorkommen, d.h. jeder Prozess produziert genau ein Produkt, dann kann das System ebenfalls mit Gleichung (2-1) berechnet werden. Für  $n$  Prozesse haben wir dann  $n$  Gleichungen. Alle Mengen  $x$  sollten bekannt sein, ebenso die Systemkosten  $S$ . Wenn das System Vorprodukte von außen einkauft, dann sind die Mengen und Preise der Vorprodukte bekannt und können direkt den einzelnen Prozessen  $i$  als Kosten  $C_{ik}$  zugewiesen werden. Nur die (internen) Verrechnungspreise  $p_i$  der Produkte der  $n$  Prozesse sind unbekannte Mengen, mit anderen Worten  $n$  unbekannte Mengen in  $n$  Gleichungen, was mit einem Linearen Gleichungssystem gelöst werden kann.

$$p_i \cdot x_i = \sum_k C_{ik} + S_i + \sum_j p_j \cdot x_{ij} \quad (2-2)$$

$C_{ik}$ : Kosten der extern gekauften Vorprodukte  $k$  für Prozess  $i$

Zum Beispiel erhält man für ein System bestehend aus vier Prozessen das folgende Lineare Gleichungssystem, in dem  $p_1$  bis  $p_4$  die unbekanntenen Preise sind und einfach berechnet werden können:

$$\begin{pmatrix} x_1 - x_{11} & -x_{12} & -x_{13} & -x_{14} \\ -x_{21} & x_2 - x_{22} & -x_{23} & -x_{24} \\ -x_{31} & -x_{32} & x_3 - x_{33} & -x_{34} \\ -x_{41} & -x_{42} & -x_{43} & x_4 - x_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^m C_{1k} + S_1 \\ \sum_{k=1}^m C_{2k} + S_2 \\ \sum_{k=1}^m C_{3k} + S_3 \\ \sum_{k=1}^m C_{4k} + S_4 \end{pmatrix} \quad (2-3)$$

mit der Lösung in Matrix-Schreibweise wobei  $X^{-1}$ , die inverse Matrix von  $X$  ist:

$$\vec{P} = X^{-1} \cdot (C \cdot \vec{1} + \vec{S}) \quad (2-4)$$

$\vec{P}$ : Vektor der Dimension  $n$  mit den Preisen  $p_i$

$X$ :  $n \times n$  Matrix der Materialflüsse im System zwischen Prozess  $i$  und  $j$ , in der negative Werte Inputs sind und positive Werte Outputs. Die Diagonale enthält die reinen Outputs von Prozess  $i$

$C$ :  $n \times m$  Matrix mit den Kosten der  $m$  externen Vormaterialien für die  $n$  Prozesse

$\vec{1}$ : Vektor der Dimension  $m$ , gefüllt mit dem Wert 1

$\vec{S}$ : Vektor der Dimension  $n$ , gefüllt mit  $S_i$ .

Es soll darauf hingewiesen werden, dass diese Vorgehensweise auch verwendet werden kann, um Produktionssysteme mit internen Recyclingflüssen zu lösen, oder in Fällen, in denen Prozesse ein komplexes Netzwerk formen (Schmidt und Keil, 2002). Solche Produktionssysteme können nur simultan mit Gleichungssystemen gelöst werden, weshalb viele professionelle Softwarepakete dieses Vorgehen bevorzugen.

## 2.2 Anwendung auf Kuppelproduktsysteme

Eine Voraussetzung für die beschriebene Methode ist, dass jeder Prozess genau ein Produkt produziert. Wenn ein Prozess zwei oder mehr Produkte produziert, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder kann der Prozess in zwei Prozesse aufgeteilt werden und die Kostenkomponenten können klar den beiden Produkten zugewiesen werden. Das führt zum bereits beschriebenen Fall – Ein-Produkt-Prozesse, bei dem wir wissen welches Produkt welche Kosten verursacht.

Wenn eine Aufteilung in zwei Prozesse nicht möglich ist, liegt eine Kuppelproduktion vor, bei der eine Allokation nötig ist (siehe Abb. 2-3). Es gibt ein umfangreiches Literaturangebot zur Frage, wie Kosten in Kuppelproduktionen verteilt werden sollen, daher wird dies hier nicht weiter diskutiert (Clark, 1923; Young, 1985; Hougaard, 2009). Um der Einfachheit Willen, können wir annehmen, dass die Kosten basierend auf dem Produktgewicht verteilt werden. Dies entspricht dem üblichen Vorgehen in MFCA. Auch dann wird ein Prozess mit zwei Produkten zu zwei Ein-Produkt-Prozessen und wiederum kann die nachstehend beschriebene Methode angewendet werden.

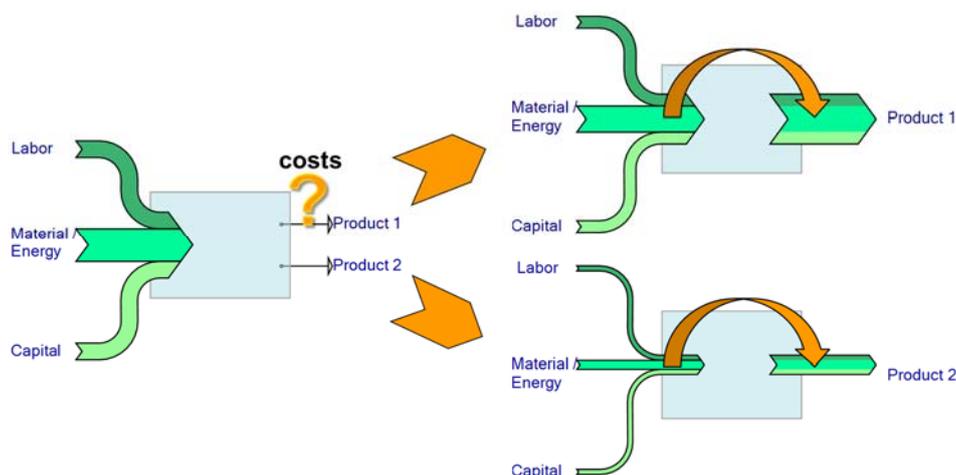


Abb. 2-3. Kostenverteilung in einem Mehr-Produkt Fall auf zwei Ein-Produkt Prozesse.

Dieses Vorgehen führt zu einem sehr wirkungsvollen Instrument, mit welchem komplexe Produktionsstrukturen in einem Unternehmen im Detail betrachtet werden können. Außerdem, wenn die Preise nicht in ökonomischer Hinsicht interpretiert werden und stattdessen durch z.B. Emissionsfaktoren der Produkte ersetzt werden, beispielsweise in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro kg Produkt, dann ist es möglich den gleichen Berechnungsalgorithmus auch für eine umweltbezogene Bewertung zu verwenden, so wie die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks in einem komplexen Produktionssystem. Auf diese Art können die CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke für einzelne Produkte berechnet werden (Schmidt, 2011).

$S_i$  kann dann als die direkten Treibhausgasemissionen im Prozess  $i$  interpretiert werden.  $C_{ik}$  als die CO<sub>2</sub>-Rucksäcke der externen Vorprodukte, d.h. die Emissionen der Vorprodukte in ihrer jeweiligen Vorkette. Preise im ökonomischen System und Emissionsfaktoren im ökologischen System entsprechen einander.

An diesem Punkt sollte erwähnt werden, dass im vorliegenden Fall angenommen wird, dass die Materialflüsse im System bekannt sind. Dies stimmt mit den Umständen in einem Betrieb überein, in dem die Energie- und Materialflüsse gemessen wurden. Manchmal sind diese Flüsse jedoch unbekannt und müssen zuerst berechnet werden, z.B. anhand von Prozessdaten. In solchen Fällen müssen Methoden aus dem Gebiet der Materialflussanalyse vorgelagert integriert werden, um das physische Mengengerüst zu bestimmen (Schmidt et al., 1997).

### 2.3 Modellierung von MFCA als eine Kuppelproduktion

Im Fall der klassischen Kostenrechnung werden die durch Materialverluste und Abfallbehandlung etc. anfallende Kosten schließlich dem System als Ganzes oder dem Produkt als Kostenträger zugewiesen (siehe Abb. 2-4). Schließlich muss das Produkt die Kosten der Materialverluste und deren Abfallbehandlung ebenfalls tragen. Das ist nur die richtige Vorgehensweise, wenn man die tatsächlichen Kosten des Produktes berechnen möchte, um den nötigen Produktpreis zu bestimmen.

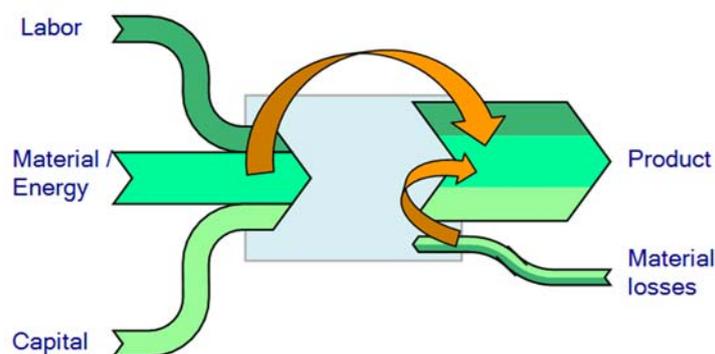


Abb. 2-4. Kostenflüsse und normale Kostenallokation von Materialverlusten eines Prozesses auf das Produkt. Die Pfeile zeigen die Richtung an, in welche die Kosten weiter gegeben werden.

Das Problem dieses Vorgehens ist, dass Abfallmanagementkosten selten den verschiedenen Kostenstellen oder einzelnen Kostenträgern als direkte Kosten zugewiesen werden, aber stattdessen üblicherweise als allgemeine Kosten behandelt werden. In der Kostenrechnung lässt

sich dann nicht mehr nachvollziehen, welches Produkt welche Abfallmanagementkosten verursacht hat. Normalerweise schwimmen diese Kosten in einer üblichen Verteilung von Gemeinkosten zwischen den Kostenstellen (den Prozessen). Hier schafft die physisch basierte MFCA-Methode unerwartete Transparenz für das Verständnis von Produktionssystemen. Wenn sie auf große und komplexe Systeme, wie sie z.B. in der chemischen Industrie vorkommen, angewendet wird, kann sie helfen, verbesserungswürdige Punkte einfacher zu identifizieren (Bode et al., 2011).

Ein weiterer Nachteil in der klassischen Kostenrechnung ist, dass Abfallmanagementkosten nicht klar zeigen, welche Kosten insgesamt im System eingespart werden könnten, wenn die Materialverluste vermieden werden würden. Wenn die Materialverluste reduziert werden, dann sind die Einkaufskosten, die Transport- und Lagerkosten, die Maschinen- und Lohnkosten für die gleiche Produktmenge niedriger. Hier beginnt MFCA.

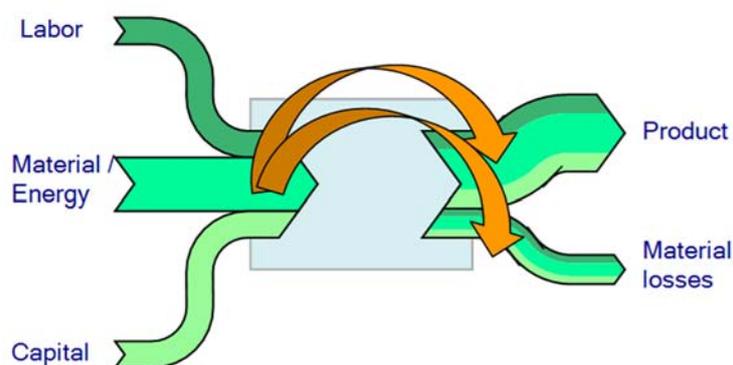


Abb. 2-5. Kostenflüsse und die MFCA übliche Kostenallokation auf Materialverluste eines Prozesses. Die Materialverluste werden ebenfalls als Kostenträger behandelt.

In der Kostenberechnung entspricht die Vorgehensweise von MFCA, der in Kapitel 2 beschrieben. Mit anderen Worten, die Kostenrechnung basiert auf den physischen Mengen und geht gemäß Gleichung 2-3 und 2-4 vor. Es gibt jedoch einen Unterschied. Materialverluste werden jetzt als Kuppelprodukte behandelt. Die Materialverluste erscheinen als zusätzliche Kostenträger neben den eigentlichen Produkten. Die Kosten des Prozesses werden zwischen dem Produkt und dem Materialverlust aufgeteilt (siehe Abb. 2-5). Die Materialmengen in kg, können beispielsweise als Grundlage der Allokation verwendet werden. Dies ist für Rohstoffe sicherlich angebracht. Jedoch ist es auch möglich für andere Kostenkomponenten davon abzuweichen, z.B. Energie, und andere Mengen für die Allokation dieser Kosten zu verwenden.

Folglich werden die Kosten des eigentlichen Produkts reduziert. Auf diese Weise zeigt die Berechnung die Produktkosten, wenn keine Materialverluste aufträten. Umgekehrt werden die im System aufgrund von Materialverlusten anfallenden Kosten, diesen Materialverlusten zugewiesen – einschließlich Rohstoffkosten, Lohn- und Kapitalkosten, Abfallmanagementkosten, Lagerkosten etc. Diese Kosten sind in der Regel bedeutend höher, als es aus der klassischen Kostenrechnung hervorgeht.

Die berechneten Kosten zeigen nicht, wie die Materialverluste technisch vermieden werden können. Dies bleibt einer technischen Analyse vorbehalten. Die Kosten zeigen jedoch, wieviel eingespart werden könnte, wenn die Materialverluste vermieden werden könnten. Da mit den hierfür nötigen Maßnahmen normalerweise Kosten oder Investitionen verbunden sind, zeigen

die neu bestimmten Einsparpotentiale einen generell merklich größeren Rahmen für Aktivitäten des Unternehmens auf. Der Vorteil dieser Methode beruht auf der Tatsache, dass nun alle vorgelagerten Kosten und die Kosten des gesamten Systems zwischen dem Produkt und dem Materialverlust aufgeteilt werden. Es ist dann möglich, an jedem Punkt im System festzustellen welche Wertschöpfung aufgrund von Materialverlusten verloren geht. Zusätzlich bedeutet diese Interpretation, dass die Einsparpotentiale nun auch im Fall von systeminternem Recycling berechnet werden können, da die Lösung des linearen Gleichungssystems auch zyklische Materialflusssysteme erlaubt. Dieser Punkt wird nachfolgend detaillierter erläutert.

Betrachtet man die Berechnungsweise von MFCA, so ist ein Prozess  $i$  formal in zwei Teile geteilt: in einen Prozess  $ip$  für die Produktkomponente und einen Prozess  $il$  für den Materialverlust. Alle Kostenbestandteile müssen mit Allokationsfaktoren zwischen diesen zwei „Kuppelprodukten“ aufgeteilt werden.

$$p_i^p \cdot x_i^p = a_i^p \cdot \left( \sum_k C_{ik} + S_i + \sum_j p_j^p \cdot x_{ij}^p \right) \quad (2-5a)$$

$$p_i^l \cdot x_i^l = a_i^l \cdot \left( \sum_k C_{ik} + S_i + \sum_j p_j^p \cdot x_{ij}^p \right) \quad (2-5b)$$

$x_i^p$  : Produktmenge in Prozess  $i$

$x_i^l$  : Materialverlust in Prozess  $i$

$p_i^p$  : Preis des Produkts in Prozess  $i$

$p_i^l$  : Preis des Materialverlusts in Prozess  $i$

$a_i^p, a_i^l$  : Allokationsfaktoren für Produkt / Verluste in Prozess  $i$

Folgendes muss hierbei immer erfüllt sein:

$$a_i^p + a_i^l = 1 \quad (2-6)$$

Gleichung (2-5a) kann einfach gemäß Gleichung (2-4) berechnet werden, aber die Allokationsfaktoren müssen zusätzlich berücksichtigt werden. Dann kann Gleichung (2-5b) mit den neuen (und niedrigeren) Produktpreisen  $p_j^p$  berechnet werden. Im Prinzip ist es ebenso möglich unterschiedliche Allokationsfaktoren für die unterschiedlichen Kosten jedes Prozesses einzuführen.

Wenn die „Preise“ der Materialverluste berechnet wurden, dann kann das gesamte Einsparpotential SP eines Produktionssystems schnell und einfach angegeben werden:

$$SP = \sum_i p_i^l \cdot x_i^l \quad (2-7)$$

Ein weiterer Vorteil der Methode beruht auf der Tatsache, dass sie zur Analyse von Systemen jeglicher Größe verwendet werden kann. Das können nur interne Prozesse sein, aber auch eine Prozesskette entlang einer Lieferkette. In diesem Zusammenhang ist es möglich, dass

bestimmte Informationen der internen Kostenstruktur des Lieferanten nicht verfügbar sind. Das bedeutet jedoch nur, dass es nicht möglich ist, das maximale Einsparpotential entlang der Lieferkette zu bestimmen. Je mehr Informationen über den Materialverlust beim Lieferanten verfügbar sind, umso genauer kann das Einsparpotential berechnet werden – und es wird generell zunehmen.

## 2.4 Anwendung von MFCA auf Umweltwirkungen

Wenn die Preise  $p_i$  auf 1 gesetzt werden und  $C_{ik}$  und  $S_i$  auf null, wird die Berechnung rein auf der Ebene der physischen Mengen durchgeführt. Es kann dann bestimmt werden, wieviel Energie und wieviel Material verschwendet wurden, um die Verluste zu produzieren.

Die physischen Mengen können jedoch auf die gleiche Weise mit THG Emissionen oder anderen Umweltwirkungen bewertet werden. Anstatt der Preise der eingekauften Materialien, werden der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck oder die Emissionsfaktoren der eingekauften Materialien verwendet. Anstelle der anderen Kosten des Prozesses (Systemkosten einschließlich Lohn und Kapital), werden die direkten THG Emissionen des Prozesses in den Berechnungen verwendet.

Gleichung (2-2) verwandelt sich dann in die nachfolgende Gleichung, in der  $e_i$  nun z.B. für die Emissionsfaktoren von Material  $i$  steht,  $E_{ik}$  sind die Emissionsrucksäcke der extern benötigten Rohstoffe, und  $D_i$  sind die direkten Emissionen von Prozess  $i$ .  $e_j$  sind die unbekanntenen Mengen im System, was wiederum durch ein lineares Gleichungssystem gelöst werden kann.

$$e_i \cdot x_i = \sum_k E_{ik} + D_i + \sum_j e_j \cdot x_{ij} \quad (8)$$

Wenn die Auswertung mit Hilfe von CO<sub>2</sub>-Fußabdrücken und Emissionsfaktoren durchgeführt wird, resultiert das in üblicher CO<sub>2</sub>-Bilanzierung. Es ist nur notwendig, die direkten Emissionen  $D$  anstatt der Systemkosten  $S$  zu betrachten und die Emissionsrucksäcke  $E$  anstatt der extern gekauften Waren  $C$ , was aber kein wesentliches Problem darstellt. Lieferkette und unternehmensinterne Produktion unterscheiden sich nur in der Frage, ob externe oder interne Emissionsfaktoren verwendet werden.

Der große Vorteil des ausgewählten Vorgehens ist, dass es wie in Gleichung (2-5) möglich ist, auch die Emissionen zwischen dem Produkt und den Verlusten zu allozieren und die Verluste so zu beurteilen. Jedoch findet das Ganze hier nicht wie oben auf einer ökonomischen Ebene statt, sondern auf einer ökologischen. Emissionsfaktoren treten an die Stelle von Preisen; THG Emissionen an die Stelle von Kosten. Das bedeutet, es ist möglich, die Einsparung an THG Emissionen zu berechnen, wenn die Materialverluste nicht entstehen würden. Beide Berechnungen – die ökonomischen und die ökologischen Einsparpotentiale – verlaufen identisch im Hinblick auf die Methode und unterscheiden sich nur in der Auswahl der Daten und Einheiten.

## 2.5 Aufwand/Ertags-Graphen als Verallgemeinerung

In der Praxis wäre es wünschenswert, in der Lage zu sein, schnell und einfach zwischen den verschiedenen Kostenrechnungsmethoden zu wechseln – zwischen der klassischen Methode, in der Verluste als Kosten behandelt werden (Abb. 2-4), und MFCA in der Verluste quasi Kostenträger werden (Abb. 2-5). Insbesondere für die praktische Anwendung in Softwareinstrumenten, sollte ein solcher Wechsel idealerweise ohne große Veränderungen des Algorithmus

durchführbar sein. Es sollte möglich sein, die Verluste hervorzuheben und umzuschalten; sie auf der einen Seite als Kosten zu behandeln und auf der anderen Seite als Kostenträger. Jedoch sollte die Methode auch auf Emissionen und andere Umweltauswirkungen anwendbar sein. Dafür ist es notwendig, ein allgemeineres Unterscheidungskriterium als Kosten oder Kostenträger zu sein, zu finden.

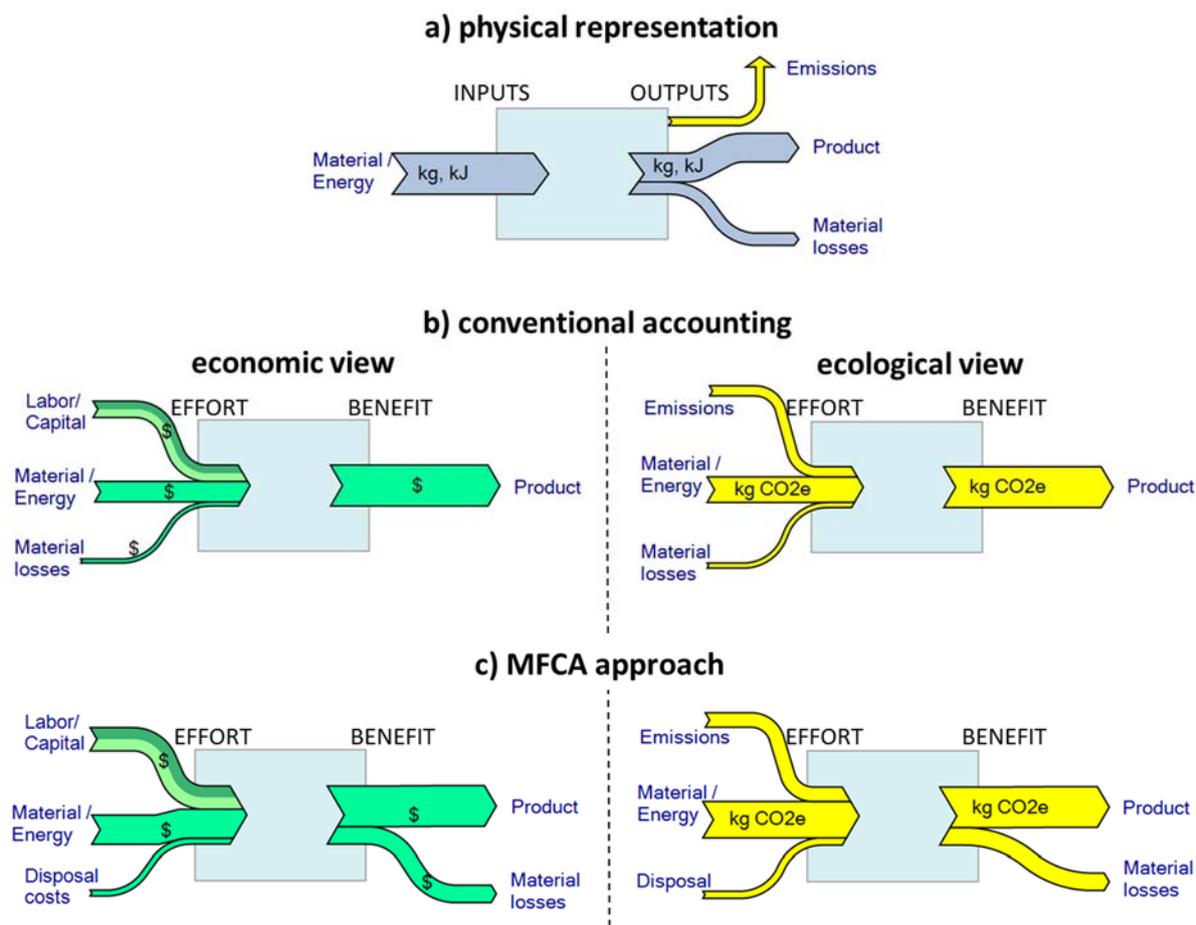


Abb. 2-6. Verschiedene Vorgehensweisen, verschiedene Blickwinkel und der Wechsel von Input/Output-Graphen zu Aufwand/Ertrags-Graphen

Diese Verallgemeinerung ist möglich, wenn wir aufhören in Input/Output-Systemen zu denken und stattdessen die Input/Output-Prozesse in Aufwand/Ertrags-Prozesse verwandeln, die dann miteinander verbunden sind. Hinsichtlich des Kostenaspekts werden die Verluste in der klassischen Kostenrechnung als Aufwände angesehen und produzieren Kosten. In MFCA werden die Verluste als Ertrag angesehen und fungieren somit als Kostenträger.

Die methodische Vorgehensweise wird deshalb gewählt, damit sich in Aufwand/Ertrags-Prozessen die Kostenträger immer auf der Ertragsseite befinden. Wenn ein Prozess nur einen Ertrag hat, dann hat er auch nur einen Kostenträger (das Produkt), dem alle Kosten zugewiesen werden (= klassische Kostenrechnung). Wenn der Prozess zwei Erträge hat, handelt es sich um einen Kuppelprozess und die Kosten werden alloziert, z.B. basierend auf dem Gewicht (immer noch unter Verwendung der klassischen Kostenrechnung). Wenn ein Verlust in einen künstlichen Ertrag verwandelt wird, wird ebenfalls eine Allokation durchgeführt – in diesem Fall

zwischen dem Produkt und dem Verlust, was der MFCA- Methode entspricht. Abb. 6 fasst das Vorgehen noch einmal zusammen.

Die Unterscheidung zwischen Aufwand/Ertrag wurde ursprünglich von Dyckhoff (1994) in der Produktionstheorie eingeführt und von Möller (2000) in der Energie- und Materialflussanalyse angewendet. Die Methode erwies sich als starkes Instrument für die Analyse von komplexen Produktions- und Recyclingsystemen mit IT-Unterstützung (Schmidt, 2005), sowohl für die Kostenrechnung als auch die Analyse von Umweltauswirkungen.

Auf diese Weise kann Folgendes erreicht werden:

1. Ein einheitliches Produktionssystem – innerhalb des Unternehmens oder innerhalb der Lieferkette – wird auf der Mengengrundlage der Energie- und Materialflüsse aufgebaut. Die Flüsse sind bekannt (Abb. 2-6a).
2. Basierend auf den physischen Mengen wird entschieden, ob es sich um einen Aufwand oder einen Ertrag handelt (was ist erwünscht und was nicht?). Dies definiert die interne Berechnungslogik. Für jedes System – im Unternehmen oder in der Lieferkette – ist es dann möglich zu bestimmen, welcher Systemaufwand für einen Systemertrag nötig ist. Die Verluste werden besonders hervorgehoben, da sie einerseits als Aufwände und andererseits als Ertrag behandelt werden können.
3. Die Allokationsregeln für Kuppelprozesse werden festgelegt. Generell wird die Allokation automatisch nach dem Gewicht vollzogen.
4. Extern gekaufte Energieträger und Materialien werden mit einem Preis versehen. Die Systemkosten und Abfallmanagementkosten werden ebenfalls berücksichtigt. Sie werden den einzelnen Prozessen zugeordnet.
5. Die Berechnung wird gemäß den Gleichungen (2-5) bis (2-7) durchgeführt. Werden die Verluste als Aufwände behandelt, haben wir eine klassische Kostenträgerrechnung (Abb. 2-6b links). Werden Verluste als Erträge behandelt, handelt es sich um die Methodik der Materialflusskostenrechnung (Abb. 2-6c links).

Zusammenfassend bedeutet das, dass die Festlegung, ob Verluste als Aufwände oder als Erträge behandelt werden, darüber entscheidet, ob MFCA durchgeführt wird. Diese Festlegung wird bereits auf der physischen Ebene getroffen, also vor der monetären Bewertung und der Kostenrechnung.

Lediglich in Schritt 4 wird festgelegt, wie die Flüsse bewertet werden: mit ihren monetären Werten oder mit ökologischen Parametern. Deshalb kann die gleiche Vorgehensweise verwendet werden, um das Einsparpotential von Umweltauswirkungen, d.h. THG Emissionen zu berechnen.

4. Extern gekaufte Energieträger und Materialien werden mit einem „ökologischen Rucksack“ versehen. Die direkten Emissionen werden den einzelnen Prozessen zugerechnet. Sie können als die Systemkosten in der Kostenrechnung angesehen werden.

In Schritt 5 gibt uns die klassische Berechnung die Emissionen der Produkte wieder (Abb. 2-6b rechts). Alle Emissionen werden allein den Produkten zugewiesen. Werden die Verluste als Ertrag behandelt, dann werden ihnen die Emissionen ebenfalls angelastet. Diese Emissionen sind dann die, die durch die Vermeidung der Verluste eingespart werden können (Abb. 2-6c rechts).

Somit können einfache Algorithmen für Softwareinstrumente entwickelt werden mit denen sich aus einer mengenbasierten Kostenrechnung „auf Knopfdruck“ eine Materialflusssknotenrechnung erzeugen lässt. Alles was man benötigt, ist der Wechsel der Eigenschaft von „Aufwand“ zu „Ertrag“ bei Verlusten. Auf diese Weise können sogar große Produktionssysteme schnell analysiert werden. Lieferketten und Unternehmensproduktionen unterscheiden sich nur in der Frage, ob interne Verrechnungspreise oder externe Marktpreise verwendet werden.

## 2.6 MFCA von Recyclingsystemen

Ein Vorteil der vorgeschlagenen Methode ist, dass sie es erlaubt, interne Recyclingsysteme einfach abzubilden. Abbildung 2-7 zeigt ein Aluminiumwalzwerk als typisches und reales Beispiel. Ein Problem das hierbei auftaucht ist, dass die Materialverluste im Werk verbleiben und „von Anfang an“ wieder verwendet werden. Unternehmen schieben diese Situation oft als Argument vor, warum sie keine Verbesserungen vornehmen. Sie glauben, dass sie mit internem Recycling auf der sicheren Seite sind.

Jedoch ist das System trotzdem sehr ineffizient, da der Prozess große Mengen an Energie verbraucht. Die meisten Unternehmen gehen das Problem mit vereinzelt Verbesserungen des Energieverbrauchs einzelner Prozesse an. Jedoch liegen die eigentlichen Potentiale im Materialfluss durch das gesamte System. Die Recyclingströme passieren die energieintensiven (und teuren) Prozesse mehrmals. Hier tritt die Verschwendung auf. Sollte man Energie im Produktionssystem einsparen wollen, kann das am besten erreicht werden, indem die intern recycelten Mengen und die Ausschuss- oder Schlechtheilquoten der Produkte oder Zwischenprodukte reduziert werden.

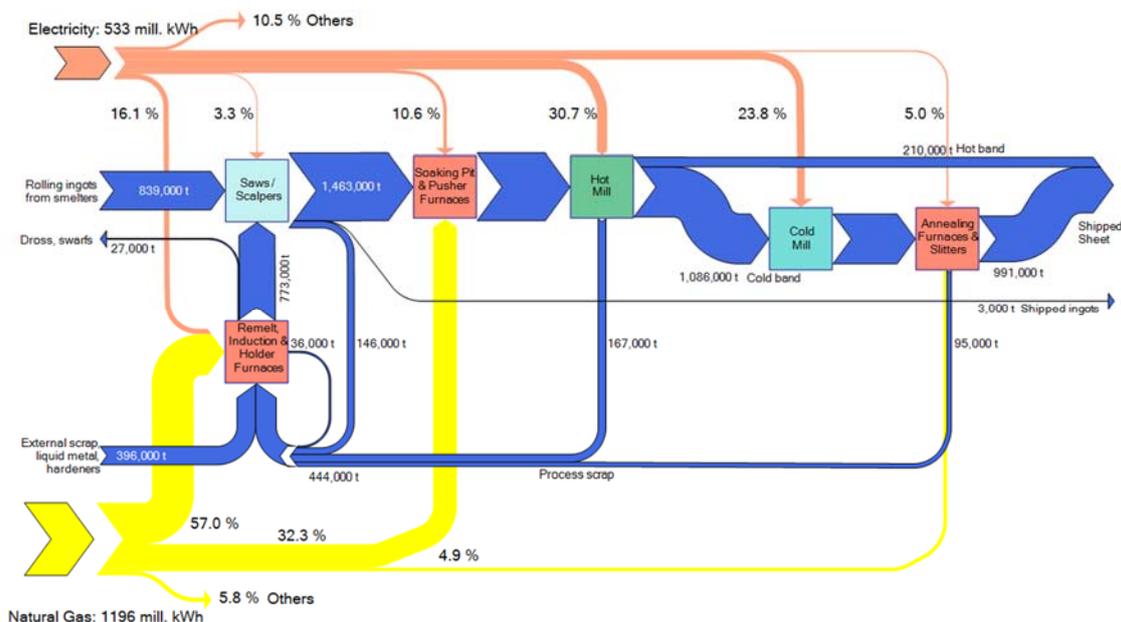


Abb. 2-7. Die jährliche Produktionsmenge und der Energieverbrauch eines Aluminiumwalzwerkes basierend auf echten Daten aus der Praxis. Der Aluminiumfluss ist blau dargestellt, Erdgas gelb und Elektrizität rot.

Auch hier kann das MFCA Vorgehen helfen, da es aufzeigt welche Einsparpotentiale mit den Recyclingflüssen verbunden sind. Das kann dazu führen, dass Maßnahmen zur Qualitätskontrolle des Produktflusses oder zum Prozessmanagement der Prozesskette, die bisher aus Kostengründen nicht betrachtet wurden, sich nun als wirtschaftlich erweisen.

Viere et al. (2010) haben bereits geeignete Wege vorgeschlagen um Recyclingsysteme in der MFCA-Systematik darzustellen. Der obere Teil von Abb. 2-8 zeigt die Material- und Energieflüsse für ein einfaches Beispiel eines internen Materialkreislaufes in einem Produktionssystem. Da das System nur einen Ertrag in Form eines Produktes produziert, können in der klassischen Kostenrechnung alle Aufwände (Material- und Energiekosten, andere Prozesskosten etc.) diesem Ertrag zugewiesen werden, wie im unteren Teil der Abbildung dargestellt. Eine Materialflusskostenrechnung, die das interne Materialrecycling nicht berücksichtigt, kommt für das gezeigte System zum gleichen Ergebnis wie die klassische Kostenrechnung. Da es keinen Abfallfluss gibt, der das System verlässt, gibt es auch keine Basis Kosten bezüglich der Reststoffe auszuweisen.

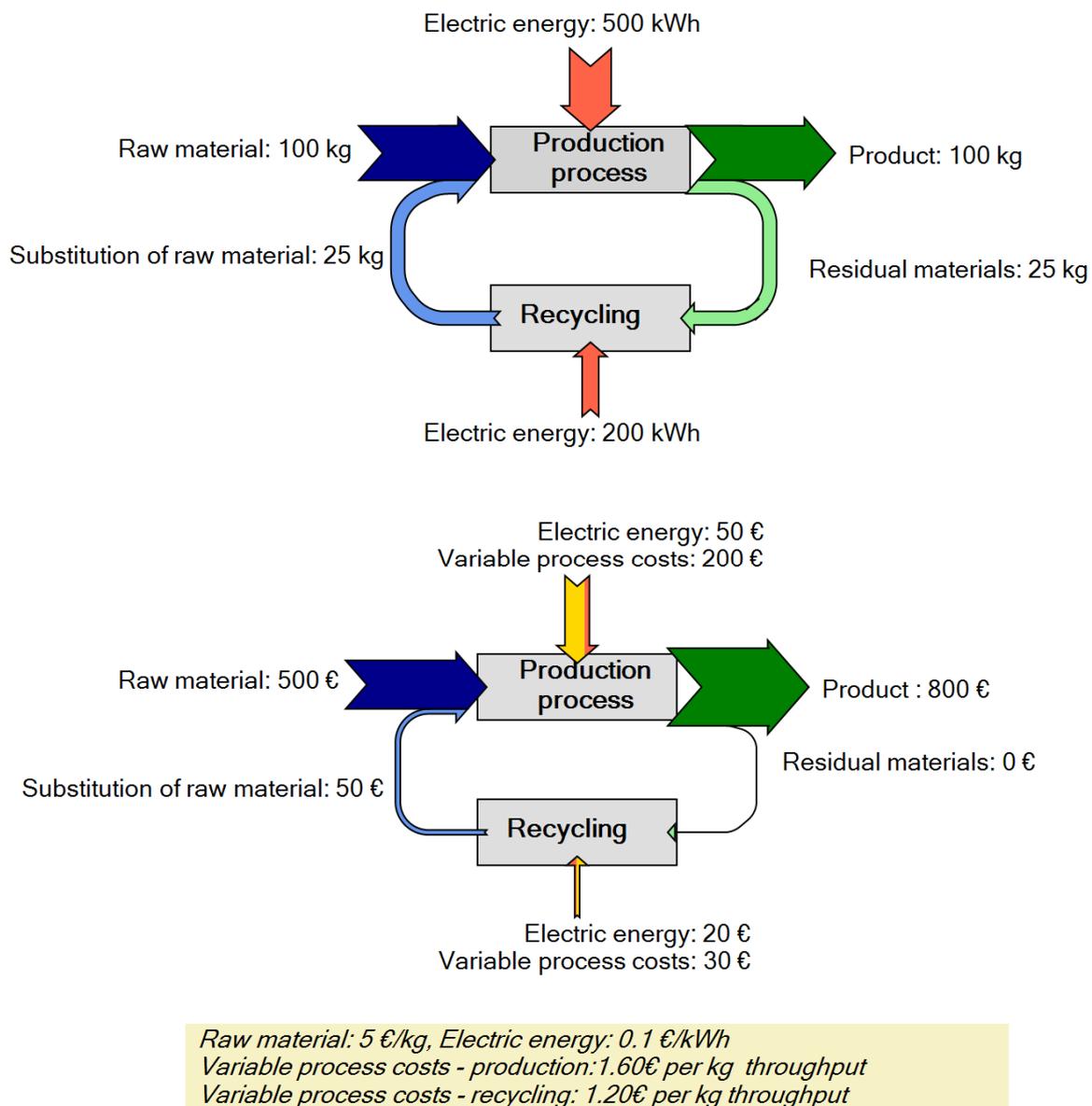


Abb. 2-8. Beispiel der Material- und Energieflüsse und der "Kostenflüsse" eines internen Kreislaufsystems. Nach: Viere et al. (2010)

In der MFCA Berechnung werden die Reststoffe als „Ertrag“ interpretiert. Sie müssen dann auch intern einen Teil der Kosten tragen (siehe Abb. 2-9). Die Allokation des Aufwands wird dann – wie es für MFCA üblich ist – auf einer gewichtsspezifischen Basis des Produkts und der Reststoffe vorgenommen. Mit den materialflussbezogenen internen Verrechnungspreisen, können alle relevanten Mengen im Kreislaufsystem mit den Gleichungen (2-5) bis (2-7) berechnet werden.

Da jedoch keine Reststoffe entfernt werden, ist es nötig das Einsparpotential des Kreislaufsystems gesondert auszuweisen. Die Interpretation der Größen, insbesondere der möglichen internen Verrechnungspreise für die recycelten Reststoffe ist nicht intuitiv.

Daher wird das folgende Vorgehen empfohlen. An dem Punkt, an dem der Reststoff das externe Rohmaterial ersetzt und praktisch zurück zum Systemanfang fließt, wird der Marktpreis des Rohmaterials als interner Verrechnungspreis für den Reststoff verwendet. Dieses Vorgehen lässt sich rechtfertigen, wenn der Reststoff, der wiederverwendet (und aufbereitet) wird, dieselbe Qualität hat wie der Rohstoff. Jedoch zeigt die Kostenrechnung einen höheren internen Verrechnungspreis für den Reststoff, da dieser auch die vergeudete Wertschöpfung des Produktionsprozesses und die Kosten der Wiederaufbereitung beinhaltet. Das Management würde es dann vorziehen, komplett ohne internes Recycling zu arbeiten, dies wäre aber nicht wünschenswert. Das bedeutet der Reststoff müsste zum Preis des Rohstoffes in das System zurückgeführt werden.

Der Unterschied zwischen dem Rohstoffpreis und dem internen Verrechnungspreis zeigt welche Einsparpotentiale im Recycling liegen. Diese können als besondere Recyclingkosten dargestellt werden, wie es z.B. in Abb. 2-9 (unten) zu sehen ist. Die Daten entsprechen ebenso den Reststoffkosten der MFCA. Diese Kosten sind jedoch nicht an einen ausgehenden Materialfluss gebunden, sondern an die Recyclingschleife.

Abbildung 2-9 zeigt, dass der Rohstoffersatz, der durch die Wiederaufbereitung entstanden ist, als Input in den Produktionsprozess entsprechend des eigentlichen Rohstoffs bewertet wird, mit anderen Worten mit 5 €/kg, und hat somit einen Gesamtwert von 125 €. Die Gesamtkosten des Prozesses belaufen sich auf 875 € und werden basierend auf der Menge aufgeteilt; 20% werden den Reststoffen zugewiesen und 80% dem Produkt. Durch die Wiederaufbereitung werden dem Reststoff, der zum Rohstoffersatz aufgewertet wird, weitere Kosten zugewiesen. Diese Kosten von 175 € + 50 € = 225 € im Vergleich zu Kosten von 5 €/kg \* 25 kg = 125 € für den Ersatz des Rohstoffes zeigen, dass Kosten in Höhe von 100 € durch das Recycling verursacht werden und eingespart werden könnten.

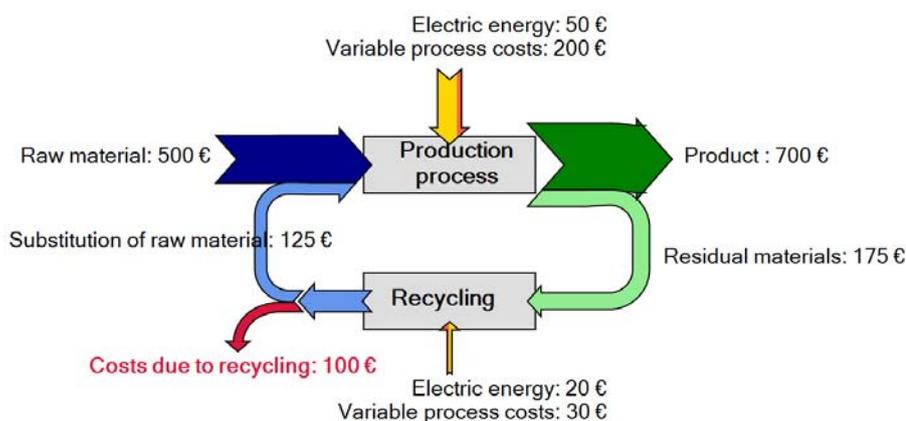


Abb. 2-9. Ausschleusen der Kreislaufkosten im MFCA Vorgehen. Nach: Viere et al. (2010).

In MFCA kann eine Regel eingeführt werden; die besagt, dass wann immer ein interner Materialfluss einen Rohstoff teilweise ersetzt, der Mengenstrom mit der Differenz zwischen dem internen Verrechnungspreis und dem Rohstoffpreis bewertet wird. Dieser Wert wird gleichwertig neben den Reststoffkosten der MFCA geführt und zeigt auf welche Einsparpotentiale durch internes Recyclingmanagement im System existieren.

Das ökologische MFCA Vorgehen kann ebenfalls für Recyclingsysteme durchgeführt werden, wie Abbildung 2-10 zeigt. Hierbei wurde die Materialflusskostenrechnung auf die Umweltauswirkungen übertragen, in diesem Fall auf das Treibhauspotential. 150 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente (16% der Gesamtemissionen) könnten eingespart werden, wenn der Produktionsprozess den gesamten Rohstoff ohne Recycling in ein Produkt umwandeln würde.

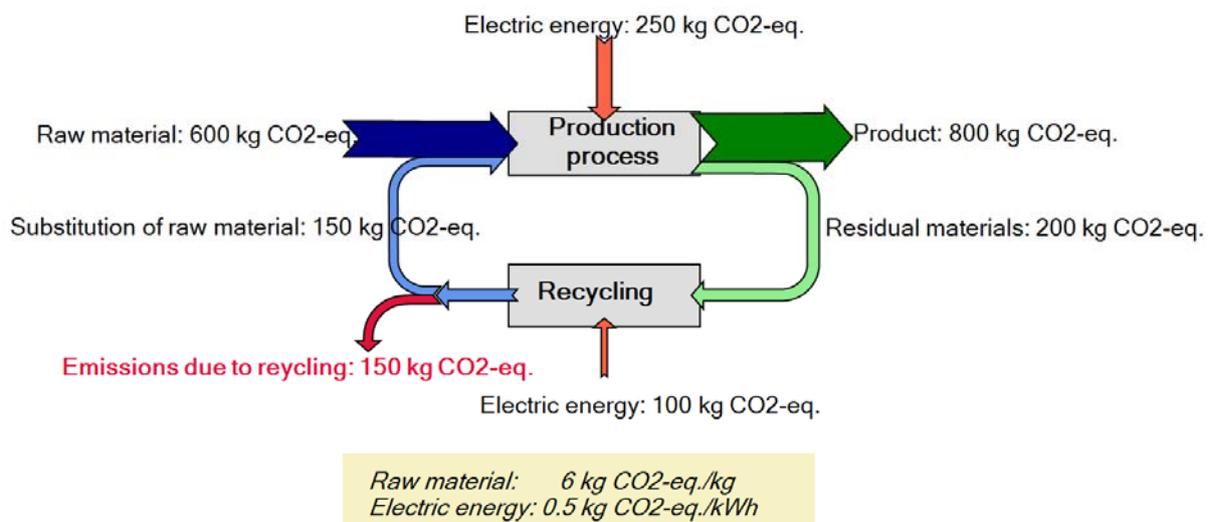


Abb. 2-10. Bewertung des Beispiels aus Abbildung 8 und 9 mit THG Emissionen. Nach: Viere et al (2010)

Somit stellt die Ausweisung der recyclingbedingten Kosten und Emissionen das Einsparpotential im Falle der vollständigen Vermeidung der Reststoffe und deren Wiederaufbereitung dar. Ein internes Recycling stellt die zweitbeste Lösung dar. Die Möglichkeiten des externen Recyclings oder der Entsorgung sind davon klar zu trennen. In vielen Fällen wird letzteres die schlechteste Lösung sein und die größte Wertvernichtung mit sich bringen. Im MFCA Vorgehen wird dies mit gewöhnlichen Reststoffkosten ausgewiesen.

### 3. Input-Output-Modellierung und Treibhausgase

#### 3.1 Hintergrund und Forschungsstand

Sowohl für die Berechnung eines Carbon Footprints für ein Produkt oder einen Betrieb als auch für eine MFCA, angewandt auf die Treibhausgasemissionen ist man darauf angewiesen, Emissionsfaktoren für die Einsatzmengen an Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie Energie zu erhalten. Im Rahmen des Life Cycle Assessments wird dies mit umfangreichen Datenrecherchen jedesmal produktspezifisch durchgeführt, ggf. auf gängige Datenbanken zurückgegriffen. Für betriebliche Carbon Footprints (oder „Carbon Accounting“) wurden lange Zeit nur die direkten Emissionen, also am Standort oder des Unternehmens betrachtet. Die Einbeziehung der Vorkette, also der Vorleistungen durch Lieferanten, wird als Scope-3-Emissionen bezeichnet (WRI & WBCSD 2011). Ihre Ermittlung hängt aber von der Datenbereitstellung der Lieferanten ab oder ist wieder auf generische Daten aus gängigen Datenbanken angewiesen (Hischer 2011).

Deshalb wurde auf einen Ansatz zurückgegriffen, die Emissionen der Vorleistung aus dem Input in ein Unternehmen und branchengängigen Daten aus der volkswirtschaftlichen und umweltökonomischen Gesamtrechnung zu ermitteln. Die Inputdaten sind dann typischerweise nicht mehr mengen-, sondern wertbezogen. Mit einfachen Branchenkennwerten könnte man so relativ einfach das Problem der Vorleistungen lösen. Dies setzt aber voraus, dass diese Kennwerte aus Branchendaten berechnet werden können. Dies erfordert eine Auseinandersetzung mit dem Leontief'schen Input-Outputmodell, das der volkswirtschaftlichen und umweltökonomischen Gesamtrechnung zugrunde liegt. Insbesondere ist dabei die Lieferung aus internationalen Wirtschaftsräumen zu berücksichtigen (s.u.).

Die ökologische Erweiterung des nachfragegetriebenen Input-Output-Modells geht auf Leontief (1970) zurück. Die Integration direkter Umweltwirkungsintensitäten in das Input-Output-Modell ermöglicht die Quantifizierung der direkten und indirekten Umweltwirkungen in Abhängigkeit der letzten Verwendung. Dementsprechend können die direkt und indirekt verursachten Umweltwirkungen einer beliebigen letzten Verwendung bestimmt werden.<sup>3</sup> Als Benchmark zur prozessbasierten produktbezogenen Ökobilanzierung wurde die ökologisch erweiterte Input-Output-Modellierung von Moriguchi et al. (1993) verwendet, welche die beiden Ansätze anhand der Kohlendioxidemissionen aus der Herstellung eines Autos verglichen. Die Ergebnisse der ökologisch erweiterten Input-Output-Modellierung entsprechen dabei ungefähr jenen der prozessbasierten Ökobilanzierung.<sup>4</sup> Zur Schätzung des kumulierten Energieaufwandes in der Herstellung von Produkten wurde die erweiterte Input-Output-Modellierung allerdings bereits von Bullard et al. (1978) vorgeschlagen. Bullard et al. (1978) stellten dabei auch einen hybriden Ansatz vor, wobei der kumulierte Energieaufwand innerhalb einer gewählten Systemgrenze mittels Prozessanalyse und jenseits dieser Systemgrenze über die erweiterte Input-Output-Modellierung quantifiziert wird.<sup>5</sup>

---

<sup>3</sup> Siehe hierzu Leontief, Wassily (1970): "Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach", in: *The Review of Economics and Statistics*, 52. Jg., Heft 3, 262-271.

<sup>4</sup> Vgl. Moriguchi, Yuichi/Kondo, Yoshinori/Shimizu, Hiroshi (1993): "Analysing the life cycle impacts of cars: the case of CO<sub>2</sub>", in: *Industry and Environment*, 16. Jg., Heft 1, 43.

<sup>5</sup> Siehe hierzu Bullard, Clark W./Penner, Peter S./Pilati, David A. (1978): "Net Energy Analysis - Handbook for Combining Process and Input-Output Analysis", in: *Resources and Energy*, 1. Jg., Heft 3, 276, 281-289.

Zur Überwindung von Systemgrenzen in der Ökobilanzierung schlugen Lave et al. (1995) die Anwendung der ökologisch erweiterten Input-Output-Modellierung vor.<sup>6</sup> Darauf basierend beschäftigte sich Joshi (1998) mit dem Einsatz der ökologisch erweiterten Input-Output-Modellierung zur Ökobilanzierung individueller Produkte, heterogener Produkte innerhalb eines Wirtschaftsbereiches, neu eingeführter Produkte sowie einer Integration der Verwendungs- und Wiederverwertungsphase.<sup>7</sup> Hendrickson et al. (2006) bezeichnen den Einsatz der erweiterten Input-Output-Analyse als günstige und schnelle Möglichkeit die Einflüsse der Lieferkette für jegliche Einkäufe zu bestimmen.<sup>8</sup> Minx et al. (2007) sehen die Stärke des Einsatzes der ökologisch erweiterten Input-Output-Modellierung zur Quantifizierung indirekter Treibhausgasemissionen von Gütern und Dienstleistungen darin, dass alle vorgelagerten Emissionen berücksichtigt werden und multi-regionale Spezifikationen eine Berücksichtigung der jeweiligen Produktionstechnologien in unterschiedlichen Ländern oder auch Teilen der Welt erlauben.<sup>9</sup>

Wood und Lenzen (2003) verwendeten die ökologisch erweiterte Input-Output-Modellierung zur Überwindung der Systemgrenzen bei der Quantifizierung ökologischer Fußabdrücke von Institutionen.<sup>10</sup> Darauf basierend schlugen Foran, Lenzen und Dey et al. (2005) die ökologisch erweiterte Input-Output-Modellierung zur Überwindung der Systemgrenzen in der betrieblichen Umweltbilanzierung vor.<sup>11</sup> Lenzen (2008) präsentiert zwei Fallstudien zum Einsatz der erweiterten Input-Output-Modellierung in der betrieblichen Nachhaltigkeitsberichterstattung. Während direkte Auswirkungen auf Primärdaten aus dem Unternehmen basieren, werden die indirekten vorgelagerten Auswirkungen anhand von Daten der Unternehmensausgaben und des Umsatzes über die erweiterte Input-Output-Modellierung quantifiziert.<sup>12</sup> Huang und Lenzen et al. (2009) sehen die Möglichkeiten der ökologisch erweiterten Input-Output-Modellierung vor allem in der Anwendung als Screening-Methode zur Identifikation der relevanten Emissionen sowie der Ausweitung der Systemgrenzen. Die direkte Anwendung der Input-Output-Modellierung zur Quantifizierung vorgelagerter Emissionen schlagen sie ab der dritten oder vierten Lieferstufe vor. Probleme sehen sie darin, dass die Möglichkeiten der Input-Output-Modellierung für Corporate Carbon Footprints bislang nicht verständlich vermittelt wurden.<sup>13</sup>

---

<sup>6</sup> Siehe hierzu Lave, Lester B./Cobas-Flores, Elisa/Hendrickson, Chris T. (1995): "Using Input-Output Analysis to Estimate Economy-wide Discharges", in: *Environmental Science and Technology*, 29. Jg., Heft 9, 420 A-426 A.

<sup>7</sup> Siehe hierzu Joshi, Satish (1998): *Comprehensive product life-cycle analysis using input-output techniques*. Internet: <http://www.cmu.edu/gdi/docs/satish-joshi.pdf>, 21.10.2014, 41.

<sup>8</sup> Vgl. Hendrickson, Chris T./Lave, Lester B./Mathews, H. Scott (2006): *Environmental Life Cycle Assessments of Goods and Services - An Input-Output-Approach*. Washington: Resources for the Future, 15.

<sup>9</sup> Vgl. Minx, Jan/Wiedmann, Thomas/Barrett, John et al. (2007): *Methods review to support the PAS process for the calculation of the greenhouse gas emissions embodied in good and services - A research report for the Department for Environment, Food and Rural Affairs by the Stockholm Environment Institute and the University of Minnesota - February 2008*. London: DEFRA, 17-18.

<sup>10</sup> Siehe hierzu Wood, Richard/Lenzen, Manfred (2003): "An Application of a Modified Ecological Footprint Method and Structural Path Analysis in a Comparative Institutional Study", in: *Local Environment*, 8. Jg., Heft 4, 370.

<sup>11</sup> Vgl. Foran, Barney/Lenzen, Manfred/Dey, Christopher et al. (2005): "Integrating sustainable chain management with triple bottom line accounting", in: *Ecological Economics*, 52. Jg., Heft 2, 146-147, 151.

<sup>12</sup> Vgl. Lenzen, Manfred (2008): "Sustainable island businesses: a case study of Norfolk Island", in: *Journal of cleaner Production*, 16. Jg., Heft 18, 2021.

<sup>13</sup> Vgl. Huang, Y. Anny/Lenzen, Manfred/Weber, Christopher L. et al. (2009): "The Role of Input-Output Analysis for the Screening of Corporate Carbon Footprints", in: *Economic System Research*, 21. Jg., Heft 3, 220 und 240.

Minx et al. (2009) präsentieren einen Überblick von Anwendungen der Input-Output-Modellierung in der Treibhausgasbilanzierung. In Bezug auf die betriebliche Treibhausgasbilanzierung betonen sie, dass die Quantifizierung sämtlicher indirekten Emissionen für viele Unternehmen eine administrativ komplexe, teure und methodisch herausfordernde Aufgabe ist. Nach Minx et al. (2009) hilft die Input-Output-Modellierung bei der Erfolgsmessung betrieblicher Emissionsminderungsziele in der Lieferkette sowie der Priorisierung von Emissionsminderungsmaßnahmen.<sup>14</sup> Haubach (2009) beschäftigt sich auf Grundlage eines Ansatzes von Schmidt und Schwegler (2008), bei welchem die vorgelagerten Emissionen eines Unternehmens über kumulierte Intensitäten erfasst werden,<sup>15</sup> mit dem Einsatz der ökologisch erweiterten Input-Output-Modellierung zur Erweiterung der Systemgrenzen betrieblicher Treibhausgasbilanzen. Als Lösungsansatz zur Startwertproblematik beim Einsatz kumulierter Emissionsintensitäten schlägt Haubach (2009) vor,<sup>16</sup> Emissionen aus Vorleistungen auf Basis einer erweiterten Input-Output-Analyse unter Berücksichtigung der Umwelt nach Leontief (1970) zu schätzen.<sup>17</sup> Berechnet werden die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen je monetärer Einheit letzter Verwendung nach Gütergruppen.<sup>18</sup>

### 3.2 Grundlegende Gleichgewichte in der Input-Output-Modellierung

Allgemeine Grundlage von Input-Output-Modellen sind beobachtete Daten eines Wirtschaftsraums für eine Periode, welche Flüsse zwischen Sektoren abbilden. Diese Flüsse können sowohl physisch als auch monetär dargestellt werden. In der Regel werden die Flüsse jedoch monetär abgebildet. „Zwischen Sektoren“ bedeutet, dass die Verkäufe von Sektor  $i$  nach Sektor  $j$  abgebildet werden.<sup>19</sup> Dazu wird eine Volkswirtschaft zunächst in  $n$  Sektoren aufgeteilt.<sup>20</sup>

$$x_i = z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{ij} + \dots + z_{in} + y_i \quad \text{Gl. 3-1}$$

wobei:

$x_i$  = Gesamte Verwendung von Gütern aus Sektor  $i$

$z_{ij}$  = Vorleistungen von Sektor  $i$  an Sektor  $j$

$y_i$  = Letzte Verwendung von Gütern aus Sektor  $i$

<sup>14</sup> Vgl. Minx, J.C./Wiedmann, T./Wood, R. et al. (2009): "Input-Output Analysis and Carbon Footprinting: An Overview of Applications", in: Economic Systems Research, 21. Jg., Heft 3, 201-202.

<sup>15</sup> Siehe hierzu Schmidt, Mario/Schwegler, Regina (2008): "A recursive indicator system for the supply chain of a company", in: Journal of cleaner Production, 16. Jg., Heft 15, 1658-1664.

<sup>16</sup> Siehe dazu Haubach, Christian (2009): "Die Startwertproblematik bei der Berechnung von kumulierten Emissionsintensitäten im Kontext der Treibhausgas-Bilanzierung", in: UmweltWirtschaftsForum, 17. Jg., Heft 2, 174.

<sup>17</sup> Siehe dazu Leontief, Wassily (1970), op. cit., 262-271.

<sup>18</sup> Vgl. Haubach, Christian (2009): "Die Startwertproblematik bei der Berechnung von kumulierten Emissionsintensitäten im Kontext der Treibhausgas-Bilanzierung", in: UmweltWirtschaftsForum, 17. Jg., Heft 2, 175.

<sup>19</sup> Vgl. Miller, Ronald E./Blair, Peter D. (2009): Input-Output Analysis - Foundations and Extensions. Cambridge: Cambridge University Press, 2.

<sup>20</sup> Die methodischen Erläuterungen folgen weitgehend Miller, Ronald E./Blair, Peter D. (1985): Input-Output Analysis - Foundations and Extensions. Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice-Hall, 7 ff. Deutsche Bezeichnungen wurden im Wesentlichen der Input-Output-Rechnung des Statistischen Bundesamtes entnommen, siehe hierzu beispielsweise Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2010): Fachserie 18 Reihe 2 - Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Input-Output-Rechnung - 2007. Im Internet: destatis.de, letzter Zugriff: 24.02.2011.

Gl. 3-1 zeigt, wie sich die gesamte Verwendung an Gütern aus Vorleistungen und letzter Verwendung zusammensetzt. Werden entsprechende Gleichungen für alle  $n$  Sektoren aufgestellt, so erhält man das folgende System von Gleichungen:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= z_{11} + z_{12} + \dots + z_{1j} + \dots + z_{1n} + y_1 \\
 x_2 &= z_{21} + z_{22} + \dots + z_{2j} + \dots + z_{2n} + y_2 \\
 &\vdots \\
 x_i &= z_{i1} + z_{i2} + \dots + z_{ij} + \dots + z_{in} + y_i \\
 &\vdots \\
 x_n &= z_{n1} + z_{n2} + \dots + z_{nj} + \dots + z_{nn} + y_n
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 3-2}$$

Mit Gl. 3-2 werden verwendungsseitige Gleichgewichte ausgedrückt. Die Summe der Outputs eines Sektors entspricht dabei der gesamten Verwendung der Güter, die in diesem Sektor produziert werden. Führt man die Wertschöpfung in das Modell ein, so können auch aufkommensseitige Gleichgewichte ausgedrückt werden. Für einen Sektor  $n$  bedeutet dies, dass die Summe aus erhaltenen Vorleistungen und Wertschöpfung dem gesamten Güteraufkommen des Sektors entsprechen:

$$x_j = z_{1j} + z_{2j} + \dots + z_{ij} + \dots + z_{nj} + v_j \tag{Gl. 3-3}$$

wobei:

$x_j =$  Gesamtes Aufkommen an Gütern von Sektor  $j$

$v_j =$  Wertschöpfung aus Sektor  $j$

Werden entsprechende Gleichungen für alle  $n$  Sektoren aufgestellt, so erhält man das folgende System von Gleichungen:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= z_{11} + z_{21} + \dots + z_{i1} + \dots + z_{n1} + v_1 \\
 x_2 &= z_{12} + z_{22} + \dots + z_{i2} + \dots + z_{n2} + v_2 \\
 &\vdots \\
 x_j &= z_{1j} + z_{2j} + \dots + z_{ij} + \dots + z_{nj} + v_j \\
 &\vdots \\
 x_n &= z_{1n} + z_{2n} + \dots + z_{in} + \dots + z_{nn} + v_n
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 3-4}$$

Gl. 3-2 und Gl. 3-4 lassen sich nun in die übliche Form einer Input-Output-Tabelle mit drei besetzten Quadranten überleiten. Der erste Quadrant zeigt als Zentralmatrix die intermediäre Verflechtung der Volkswirtschaft. Im zweiten Quadranten wird die letzte Verwendung und im dritten Quadranten die Wertschöpfung nach Sektoren ausgewiesen.<sup>21</sup> Die Zeilensummen zeigen die gesamte Verwendung und die Spaltensummen das gesamte Aufkommen der Volkswirtschaft:

---

<sup>21</sup> Siehe hierzu auch Brümmerhoff, Dieter/Grömling, Michael (2011): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. München: Oldenbourg, 177-179.

Tabelle 3-1: Grundlegender Aufbau einer Input-Output-Tabelle

Sektor	1	2	...	j	...	n	Letzte Verwendung	Gesamte Verwendung
1	$z_{11}$	$z_{12}$	...	$z_{1j}$	...	$z_{1n}$	$y_1$	$x_1$
2	$z_{21}$	$z_{22}$	...	$z_{2j}$	...	$z_{2n}$	$y_2$	$x_2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
i	$z_{i1}$	$z_{i2}$	...	$z_{ij}$	...	$z_{in}$	$y_i$	$x_i$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
n	$z_{n1}$	$z_{n2}$	...	$z_{nj}$	...	$z_{nn}$	$y_n$	$x_n$
Wertschöpfung	$v_1$	$v_2$	...	$v_j$	...	$v_n$		
Gesamtes Aufkommen	$x_1$	$x_2$	...	$x_j$	...	$x_n$		

*Eigene Darstellung in Anlehnung an Miller, Ronald E./Blair, Peter D. (2009): Input-Output Analysis - Foundations and Extensions. Cambridge: Cambridge University Press, 43.*

Im Folgenden wird die auf Basis von Input-Output-Tabellen durchführbare Input-Output-Analyse näher erläutert. Zur vereinfachten Darstellung dieser Schritte wird an dieser Stelle die Matrixschreibweise eingeführt. Die quadratische Matrix  $Z$  repräsentiert dabei die intermediäre Verflechtung:

$$Z = \begin{pmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1j} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2j} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{i1} & z_{i2} & \dots & z_{ij} & \dots & z_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{nj} & \dots & z_{nn} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-5}$$

Die Spaltenvektoren der letzten Verwendung und der gesamten Verwendung werden mit  $y$  und  $x$  notiert:

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-6}$$

Die Zeilenvektoren werden durch einen Apostroph gekennzeichnet. Dementsprechend wird der Zeilenvektor des gesamten Aufkommens  $x'$  notiert:

$$x' = (x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_j \quad \dots \quad x_n) \quad \text{Gl. 3-7}$$

Werden Matrizen oder Vektoren transponiert, so wird dies ebenfalls mit einem Apostroph gekennzeichnet. Dies steht im Einklang mit der Input-Output-Identität, so dass das transponierte gesamte Aufkommen wiederum dem Spaltenvektor der gesamten Verwendung entspricht:

$$(x')' = x \quad \text{Gl. 3-8}$$

Dementsprechend werden Summierungsvektoren in ihrer horizontalen Form mit  $i'$  und in ihrer vertikalen Form mit  $i$  notiert:

$$i' = (1 \quad 1 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 1), \quad i = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-9}$$

Summierungsvektoren in ihrer horizontalen Form entsprechen in ihrer Dimension grundsätzlich der Anzahl der Zeilen des darauffolgenden Vektors bzw. der drauffolgenden Matrix. Die Dimension der vertikalen Summierungsvektoren wird hingegen durch die Anzahl der Spalten des vorangestellten Vektors bzw. der vorangestellten Matrix bestimmt. Über Gl. 3-5 bis Gl. 3-9 lassen sich nun die Zusammensetzung der gesamten Verwendung aus intermediärer und letzter Verwendung sowie die Zusammensetzung des gesamten Aufkommens aus Vorleistungen und Wertschöpfung in Matrizenform darstellen. Durch Rechtsmultiplikation mit dem vertikalen Summierungsvektor  $i$  wird die intermediäre Verflechtung  $Z$  zu einem Spaltenvektor und somit zur intermediären Verwendung nach liefernden Sektoren aufsummiert. Addiert man zu diesem Ausdruck den Spaltenvektor der letzten Verwendung  $y$  hinzu, so erhält man den Spaltenvektor der gesamten Verwendung  $x$ . Diese Gleichung entspricht dem verwendungsseitigen Gleichgewicht in Matrizenschreibweise:

$$x = Zi + y \quad \text{Gl. 3-10}$$

Weitere Definitionen zur Notation werden unmittelbar vor ihrem Einsatz eingeführt. Im Folgenden werden die bislang in absoluten Werten dargestellten Gleichgewichte in relative Beziehungen übergeleitet. Auf Grundlage der relativen Beziehungen wird das nachfrageseitige Input-Output-Modell erläutert.

### 3.3 Das nachfrageseitige Input-Output-Modell

Bislang wurden die zugrundeliegenden Gleichgewichte der Input-Output-Modellierung nur in absoluten Werten dargestellt. Um die relative Zusammensetzung der Vorleistungen eines empfangenden Sektors zu zeigen, wird auf sogenannte Inputkoeffizienten zurückgegriffen. Dazu werden die absoluten Vorleistungswerte eines empfangenden Sektors ins Verhältnis zu dessen Output gesetzt. Die Inputkoeffizienten  $a_{ij}$  werden wie folgt berechnet:

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \quad \text{Gl. 3-11}$$

Um zur Matrizenschreibweise zurückzukehren, wird für die Inputkoeffizienten die Matrix  $A$  eingeführt:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-12}$$

Jeder Spaltenvektor der Inputkoeffizientenmatrix  $A$  zeigt wie sich eine Einheit Output des entsprechenden empfangenden Sektors aus Gütern sämtlicher liefernder Sektoren zusammensetzt. Insofern ist  $A$  eine Abbildung der Vorleistungsstruktur der gesamten Volkswirtschaft. Soll die Bestimmung der Inputkoeffizientenmatrix in Matrixschreibweise formuliert werden, so muss vorher die Diagonalisierung von Vektoren in die Notation eingeführt werden. Letztere verkörpert die Transformation eines Vektors in eine Matrix, welche die Einträge des zugrundeliegenden Vektors auf ihrer Hauptdiagonalen und sonst ausschließlich Nullen abbildet. Diagonalisierte Vektoren werden mit einem Zirkumflex („Dach“) gekennzeichnet. Der diagonalisierte Vektor des Güteraufkommens wird somit folgendermaßen definiert:

$$\hat{x} = \begin{pmatrix} x_1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & x_2 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & x_j & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & x_n \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-13}$$

Zur Bestimmung der Inputkoeffizientenmatrix muss nun die Matrix der intermediären Verflechtung mit der Inversen des diagonalisierten Güteraufkommens rechtsmultipliziert werden:

$$A = Z\hat{x}^{-1} \quad \text{Gl. 3-14}$$

Wird Gl. 3-14 nach  $Z$  aufgelöst, so kann die intermediäre Verflechtung in Abhängigkeit des Güteraufkommens ausgedrückt werden:

$$Z = A\hat{x} \quad \text{Gl. 3-15}$$

Setzt man Gl. 3-15 in das verwendungsseitige Gleichgewicht aus Gl. 3-10 ein, so erhält man Gl. 3-16:

$$x = Zi + y = A\hat{x}i + y = Ax + y \quad \text{Gl. 3-16}$$

Löst man Gl. 3-16 nach der letzten Verwendung auf, so erhält man Gl. 3-17:

$$y = x - Ax \quad \text{Gl. 3-17}$$

Für die weiteren Schritte wird an dieser Stelle die sogenannte Einheitsmatrix  $I$  eingeführt, welche auf der Hauptdiagonalen aus Einsen und sonst ausschließlich aus Nullen besteht. Die Dimension der Einheitsmatrix ergibt sich stets aus dem Kontext:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-18}$$

Nach Einführung der Einheitsmatrix kann Gl. 3-17 wie folgt ausgedrückt werden:

$$(I - A)x = y \quad \text{Gl. 3-19}$$

Sofern eine Lösung existiert, kann unter Annahme starrer Inputkoeffizienten über den folgenden Zusammenhang das benötigte Güteraufkommen zur Bereitstellung einer beliebigen letzten Verwendung berechnet werden:

$$x = (I - A)^{-1}y \quad \text{Gl. 3-20}$$

Im Folgenden wird  $(I - A)^{-1}$  als Leontief-Inverse bezeichnet. Das Modell eignet sich zur Beantwortung der Frage, welches Güteraufkommen zur Produktion einer beliebigen letzten Verwendung benötigt wird.

### 3.4 Ökologische Erweiterung der Input-Output-Modellierung

Liegen Daten von absoluten Umweltbelastungen nach Sektoren vor, so zeigt das Verhältnis der absoluten Umweltbelastung zum Güteraufkommen das direkte Ausmaß der Umweltbelastung je monetärer Einheit des Sektors. Um auch das indirekte Ausmaß der Umweltbelastung zu berücksichtigen, legt das ökologisch erweiterte Input-Output-Modell die Umweltbelastungen aus der Produktion auf die letzte Verwendung von Gütern um und berücksichtigt dabei die intermediäre Verflechtung. Ziel des ökologisch erweiterten Input-Output-Modells ist somit die Bestimmung der totalen Umweltbelastung je monetärer Einheit eines Sektors, wobei total als Summe aus direkt und indirekt zu verstehen ist. Das Input-Output-Modell wird dazu um eine Matrix direkter Umweltbelastungsintensitäten erweitert. Die direkten Umweltbelastungsintensitäten werden über das Verhältnis des absoluten Ausmaßes der jeweiligen Umweltbelastung eines Sektors zu dessen Güteraufkommen berechnet:<sup>22</sup>

$$q_{jk} = \frac{b_{jk}^{dir}}{x_j} \quad \text{Gl. 3-21}$$

wobei:

$q_{jk}$  = direkte Intensität der Umweltbelastung  $k$  des Sektors  $j$

$b_{jk}^{dir}$  = absolutes Ausmaß der direkten Umweltbelastung  $k$  des Sektors  $j$

Die Matrix  $Q$  der direkten Umweltbelastungsintensitäten bildet in ihren Spalten die berücksichtigten Umweltbelastungsarten und in ihren Zeilen Sektoren ab. Bei einer Anzahl von  $m$  Umweltbelastungsarten nimmt sie folgende Form an:

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1k} & \cdots & q_{1m} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2k} & \cdots & q_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{j1} & q_{j2} & \cdots & q_{jk} & \cdots & q_{jm} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{nk} & \cdots & q_{nm} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-22}$$

Wird die Matrix  $Q$  daraufhin in ihrer transponierten Form  $Q'$  mit der Leontief-Inversen links multipliziert, so erhält man als Ergebnis die transponierte Form  $M'$  der entsprechenden Matrix totaler Umweltbelastungsintensitäten  $M$ :

<sup>22</sup> Siehe hierzu beispielsweise Miller, Ronald E./Blair, Peter D. (2009), op. cit., 447.

$$M' = Q'(I - A)^{-1} = \begin{pmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \cdots & \mu_{1j} & \cdots & \mu_{1n} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \cdots & \mu_{2j} & \cdots & \mu_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{k1} & \mu_{k2} & \cdots & \mu_{kj} & \cdots & \mu_{kn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{m1} & \mu_{m2} & \cdots & \mu_{mj} & \cdots & \mu_{mn} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3-23}$$

Durch Multiplikation der Matrix  $M'$  mit dem Vektor  $y$  der letzten Verwendung lassen sich die Umweltbelastungen auf die letzte Verwendung umlegen. Dadurch eignet sich das Modell beispielsweise für die Untersuchung der Auswirkungen von Nachfrageänderungen auf die Umweltbelastung in einer Volkswirtschaft. Die totalen Umweltbelastungsintensitäten eignen sich jedoch auch zur Quantifizierung der direkten und indirekten Umweltbelastungen entlang der Lieferkette. Dies wird besonders deutlich, wenn man die Leontief-Inverse als Potenzreihe darstellt:

$$(I - A)^{-1} = \sum_{t=0}^{\infty} A^t = I + A + A^2 + A^3 + \cdots + A^{\infty} \quad \text{Gl. 3-24}$$

Die Leontief-Inverse modelliert dadurch eine unendliche Lieferkette, wobei  $t$  die jeweilige Vorleistungsstufe angibt und die potenzierten Inputkoeffizientenmatrizen die Inputs aus der jeweiligen Vorleistungsstufe verkörpern. Über die Multiplikation der direkten Umweltbelastungsintensitäten mit der Leontief-Inversen werden folglich die direkten Umweltbelastungsintensitäten aus jeder Vorleistungsstufe kumuliert. Ausgehend von dieser Interpretation der Leontief-Inversen wird im weiteren Verlauf der Einsatz der ökologisch erweiterten nachfrageseitigen Input-Output-Modellierung zur Quantifizierung von Lieferkettenemissionen in Unternehmen eingeführt. Soll nur eine Umweltbelastung quantifiziert werden, so kann die Matrix  $Q'$  durch den Vektor  $q'$  ersetzt werden. Als Ergebnis erhält man dann den Vektor der entsprechenden totalen Umweltbelastungsintensitäten  $\mu'$ :

$$\mu' = q'(I - A)^{-1} \quad \text{Gl. 3-25}$$

Die Elemente des Vektors  $\mu'$  verkörpern die totalen Umweltbelastungsintensitäten je Einheit letzter Verwendung der einzelnen Sektoren.

### 3.5 Globale Mehr-Regionen-Modellierung und Ergebnisse

Ersetzt man in den Abschnitten 3.1 bis 3.2 den Begriff Sektor durch Volkswirtschaft, so erhält man ein Input-Output-Modell mit mehreren Volkswirtschaften, die als regionale aggregierte Sektoren miteinander interagieren. Durch Disaggregation der Volkswirtschaften in einzelne Sektoren erhält man schließlich ein Mehr-Regionen-Modell nach Sektoren und Volkswirtschaften. Mehr-Regionen-Modelle liefern keine drastische methodische Erweiterung gegenüber Modellen für eine Region. Je nach Anzahl an Regionen und Sektoren sind jedoch die Erweiterungen benötigter Datengrundlagen und Rechenleistungen drastisch. Die Bereitstellung globaler Mehr-Regionen-Input-Output-Tabellen wurde deshalb erst in den letzten Jahren ermöglicht.<sup>23</sup>

Hier wird für globale Modellierungen die World Input-Output Database zugrunde gelegt.<sup>24</sup> In der Datenbank werden globale Input-Output-Daten nach 40 Ländern und der übrigen Welt zu

<sup>23</sup> Vgl. Dietzenbacher, Erik/Lenzen, Manfred/Los, Bart et al. (2013): "Input-Output-Analysis: The Next 25 Years", in: Economic Systems Research, 25. Jg., Heft 4.

<sup>24</sup> Siehe hierzu World Input-Output Database (Hrsg.) (2013b): WIOD Data, November 2013 Release. Internet: [http://www.wiod.org/new\\_site/data.htm](http://www.wiod.org/new_site/data.htm), 28.01.2014.

je 35 Sektoren disaggregiert ausgewiesen.<sup>25</sup> Diese Input-Output-Daten sind für die Berichtsjahre 1995 bis 2011 verfügbar.<sup>26</sup> Emissionsdaten für die Treibhausgase Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Distickstoffmonoxid (N<sub>2</sub>O) sind für die Berichtsjahre 1995 bis 2009 in kongruenter Disaggregation verfügbar.<sup>27</sup> Die Datenbank ermöglicht somit ökologisch erweiterte Input-Output-Modellierungen für drei Kyoto-Gase im Zeitraum von 1995 bis 2009. Als aktuellstes Berichtsjahr steht folglich 2009 zur Verfügung. Tabelle 3-2 zeigt die regionale Untergliederung der World Input-Output Database in ihrer tiefsten Disaggregationsstufe.

Tabelle 3-2: Regionen der World Input-Output Database

Australien (AUS)	Italien (ITA)	Schweden (SWE)
Belgien (BEL)	Japan (JPN)	Slowakei (SVK)
Brasilien (BRA)	Kanada (CAN)	Slowenien (SVN)
Bulgarien (BGR)	Lettland (LVA)	Spanien (ESP)
China (CHN)	Litauen (LTU)	Südkorea (KOR)
Dänemark (DNK)	Luxemburg (LUX)	Taiwan (TWN)
Deutschland (DEU)	Malta (MLT)	Tschechische Republik (CZE)
Estland (EST)	Mexiko (MEX)	Türkei (TUR)
Finnland (FIN)	Niederlande (NLD)	Übrige Welt (RoW)
Frankreich (FRA)	Österreich (AUT)	Ungarn (HUN)
Griechenland (GRC)	Polen (POL)	Vereinigte St. v. Amerika (USA)
Indien (IND)	Portugal (PRT)	Vereinigtes Königreich (GBR)
Indonesien (IDN)	Rumänien (ROM)	Zypern (CYP)
Irland (IRL)	Russland (RUS)	

*Eigene Darstellung auf Basis von Dietzenbacher, Erik/Los, Bart/Stehrer, Robert et al. (2013): "The Construction of World Input-Output Tables in the WIOD Project", in: Economic System Research, 25. Jg., Heft 1, 95.*

Zur Verdeutlichung der globalen Unterschiede wurden für das Berichtsjahr 2009 totale Emissionsintensitäten auf der tiefsten regionalen Disaggregationsstufe mit 40 Ländern und der übrigen Welt sowie auf der höchsten regionalen Aggregationsstufe mit der ganzen Welt als eine Region berechnet. Nach gängigem Standard der betrieblichen Treibhausgasbilanzierung besteht für die Gewichtung einzelner Treibhausgase zur Bestimmung sogenannter CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>-e) eine Wahlmöglichkeit. Die Treibhauspotentiale für einen Zeithorizont von 100 Jahren können entweder der United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) oder der jeweils aktuellsten Veröffentlichung des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) entnommen werden. Sofern die jeweils aktuellsten Werte verwendet werden,

<sup>25</sup> Vgl. Dietzenbacher, Erik/Los, Bart/Stehrer, Robert et al. (2013): "The Construction of World Input-Output Tables in the WIOD Project", in: Economic System Research, 25. Jg., Heft 1, 94.

<sup>26</sup> Siehe hierzu World Input-Output Database (Hrsg.) (2014): World Input-Output Tables. Internet: [http://www.wiod.org/new\\_site/database/wiots.htm](http://www.wiod.org/new_site/database/wiots.htm), 19.11.2014.

<sup>27</sup> Siehe hierzu World Input-Output Database (Hrsg.) (2013a): Environmental Accounts. Internet: [http://www.wiod.org/new\\_site/database/eas.htm](http://www.wiod.org/new_site/database/eas.htm), 19.11.2014, -> AIR.

besteht bei jeder Aktualisierung dieser Werte eine Verpflichtung zur Neuberechnung vergangener Treibhausgasbilanzen, um die Vergleichbarkeit zwischen Berichtsjahren zu gewährleisten.<sup>28</sup> Dies führte letztlich dazu, dass sich in der betrieblichen Treibhausgasbilanzierung hauptsächlich die Treibhauspotentiale der UNFCCC etabliert haben. Zur Vergleichbarkeit werden deshalb auch hier die Treibhauspotentiale der UNFCCC verwendet, so dass CH<sub>4</sub> mit einem Faktor von 21 und N<sub>2</sub>O mit einem Faktor von 310 gewichtet wird.<sup>29</sup> **Abbildung 3-1** zeigt die Ergebnisse nach Sektoren. Die Werte des globalen Eine-Region-Modells werden dabei in der Mitte angezeigt und um die Bandbreite der Ergebnisse auf der tiefsten Disaggregationsebene ergänzt. Die Enden der Bandbreiten zeigen die Regionen und Werte der jeweils höchsten bzw. niedrigsten totalen Emissionsintensitäten.

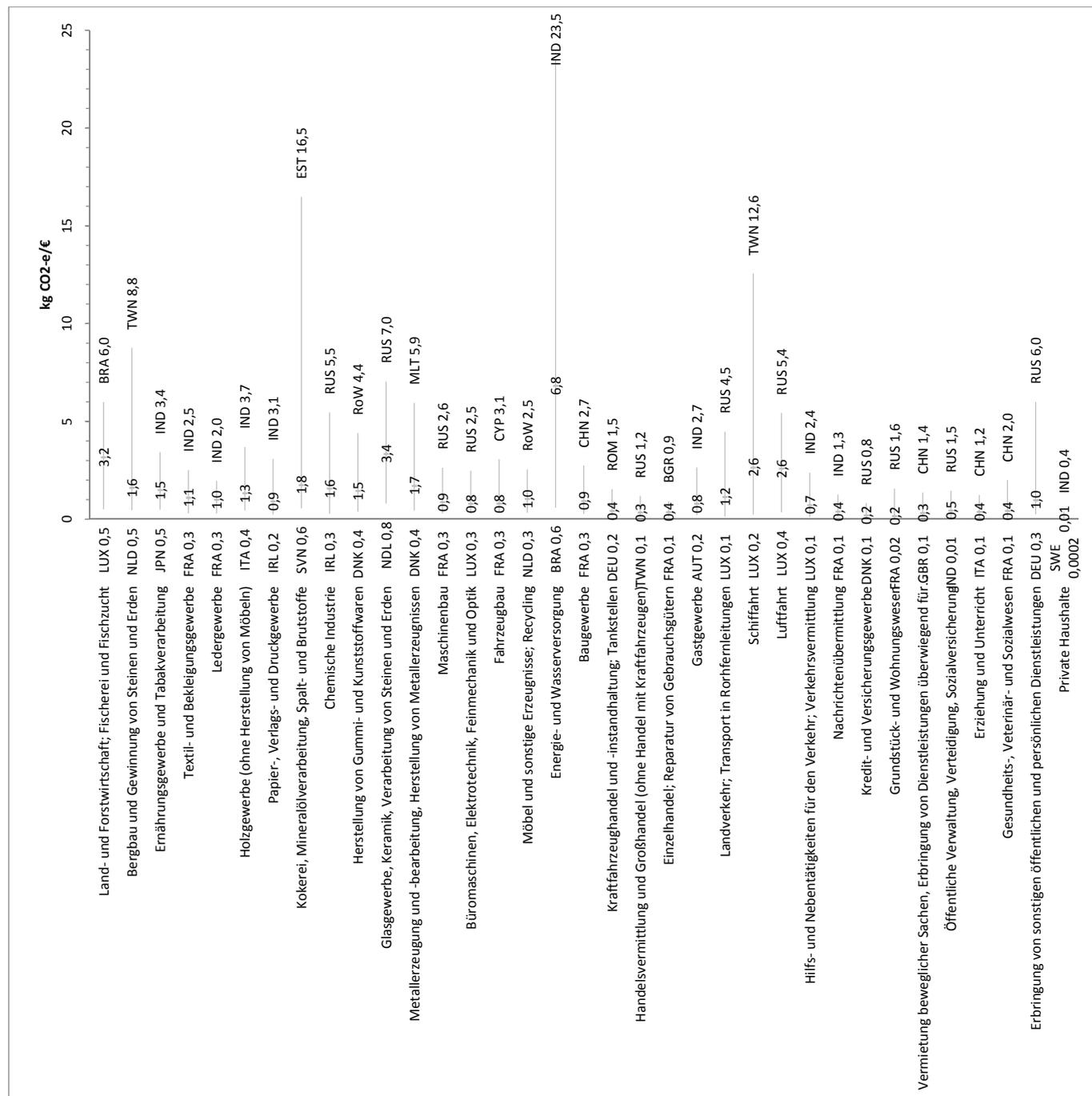
Aus **Abbildung 3-1** wird deutlich, dass die totalen Emissionsintensitäten nicht nur sektoral sondern auch regional deutliche Unterschiede aufweisen. So weist der Sektor *Energie- und Wasserversorgung* mit einer globalen totalen Emissionsintensität von 6,8 kg CO<sub>2</sub>-e/€ eine Bandbreite von 0,6 kg CO<sub>2</sub>-e/€ in Brasilien bis 23,5 kg CO<sub>2</sub>-e/€ in Indien auf. Je nach Sektor gibt es auch erhebliche Unterschiede in den Bandbreiten. Sowohl im Sektor *Schifffahrt* als auch im Sektor *Luftfahrt* beträgt die globale totale Emissionsintensität etwa 2,6 kg CO<sub>2</sub>-e/€. Während die Bandbreite im Sektor *Schifffahrt* von 0,2 kg CO<sub>2</sub>-e/€ in Luxemburg bis 12,6 kg CO<sub>2</sub>-e/€ in Taiwan reicht, erstreckt sich die Bandbreite im Sektor *Luftfahrt* lediglich von 0,4 kg CO<sub>2</sub>-e/€ in Luxemburg bis 5,4 kg CO<sub>2</sub>-e/€ in Russland. Obwohl die globale totale Emissionsintensität im Sektor *Kokerei, Mineralölverarbeitung, Brut- und Spaltstoffe* mit 1,8 kg CO<sub>2</sub>-e/€ niedriger als in den Sektoren *Schifffahrt* und *Luftfahrt* ist, erstreckt sich dort die Bandbreite sogar von 0,6 kg CO<sub>2</sub>-e/€ in Slowenien bis 16,5 kg CO<sub>2</sub>-e/€ in Estland. Die höchste totale Emissionsintensität entsteht bei 11 Sektoren in Russland, bei 10 Sektoren in Indien, bei 4 Sektoren in China sowie bei jeweils zwei Sektoren in Taiwan und der übrigen Welt. Bei den übrigen sechs Sektoren entsteht die jeweils höchste totale Emissionsintensität in Bulgarien, Brasilien, Zypern, Estland, Malta und Rumänien. Die niedrigste totale Emissionsintensität entsteht bei 9 Sektoren in Frankreich, bei 6 Sektoren in Luxemburg, bei jeweils drei Sektoren in Dänemark und den Niederlanden sowie bei jeweils zwei Sektoren in Deutschland und Irland. Bei den übrigen 8 Sektoren entsteht die jeweils niedrigste totale Emissionsintensität in Indien, Taiwan, Brasilien, Österreich, dem Vereinigten Königreich, Japan, Slowenien und Schweden.

---

<sup>28</sup> Vgl. World Resources Institute (WRI)/World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (Hrsg.) (2011): Greenhouse Gas Protocol - Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard - Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard. Internet: <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/Corporate%20Value%20Chain%20%28Scope%203%29%20Accounting%20and%20Reporting%20Standard.pdf>, 18.03.2015, 70 und 104.

<sup>29</sup> Siehe hierzu United Nations Framework Convention on Climate Change (Hrsg.) (2014): Global Warming Potentials. Internet: [http://unfccc.int/ghg\\_data/items/3825.php](http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php), 30.04.2015.

Abbildung 3-1: Globale totale Emissionsintensitäten nach Sektoren mit den niedrigsten, mittleren und höchsten Werten nach Ländern.



Eigene Berechnung und Darstellung auf Basis von World Input-Output Database (2013b): WIOD Data, November 2013 Release. Internet: [http://www.wiod.org/new\\_site/data.htm](http://www.wiod.org/new_site/data.htm), 28.01.2014.

### 3.6 Zwischenfazit und Ausblick

Die ökologisch erweiterte Input-Output-Modellierung im globalen Mehr-Regionen-Modell ermöglicht die Bereitstellung reproduzierbarer totaler Emissionsintensitäten (in kg CO<sub>2</sub>-Eq. pro €) zur Schätzung vorgelagerter Treibhausgasemissionen im betrieblichen Kontext. Die totalen Emissionsintensitäten zeigen die direkten und indirekten Treibhausgasemissionen je monetärer Einheit nach Sektoren und Ländern bzw. Weltregionen. Der monetäre Bezug bietet sowohl für materielle Vorprodukte als auch für Dienstleistungen eine direkte Schnittstelle zum betrieblichen Rechnungswesen. Der Detaillierungsgrad hängt von der verwendeten Datengrundlage ab und reicht momentan von 187 einzelnen Ländern mit je 25 Sektoren in kongruenter Gliederung bis 44 globalen Regionen mit je 129 Sektoren.<sup>30</sup> Auf Grundlage von 41 globalen Regionen mit jeweils 35 Sektoren wurde bereits hier gezeigt, dass die totalen Emissionsintensitäten nicht nur sektoral sondern auch regional deutliche Unterschiede aufweisen. Während dieser Analyse drei Treibhausgase zugrunde gelegt wurden, kann durch Rückgriff auf andere Datengrundlagen auch die Abdeckung an Treibhausgasen erweitert werden.<sup>31</sup>

Allerdings ergibt sich hier keine direkte Kompatibilität zu dem in Kap. 2 vorgestellten Vorgehen. Zwar können mit den Emissionsintensitäten sehr gut überschlägige Carbon Footprints von Unternehmen erstellt werden. Die wesentliche Metrik bei MFCA ist jedoch die mengenbasierte Quantifizierung des Einsatzes von Vorleistungen, also in Gewichts- oder Energieeinheiten. Wollte man monetär-bezogene Emissionsintensitäten an dieser Stelle einfügen, so müsste eine Bewertung über den Einkaufspreis erfolgen, was ein zusätzlicher Berechnungsschritt wäre, der mit Unsicherheiten verbunden wäre.

Es empfiehlt sich an dieser Stelle ein anderer Weg: Solang keine spezifischen Carbon Footprints von Vorleistungen – etwa über die Lieferanten – verfügbar sind, sollte auf generische Emissionsfaktoren für die verschiedenen Materialien oder Materialkategorien zurückgegriffen werden. Diese werden beispielsweise von der Datenbank Ecolnvent für weit über 1000 relevante Materialien und Güter (einschließl. Energien) geliefert. Mit diesen könnte ebenfalls die Emissionsmenge nicht nur des Unternehmens und der Produkte, sondern einschließlich der Vorketten („Scope-3“) erfolgen. Die MFCA-Spezialauswertung würde sich dann nicht nur auf das abgebildete Produktionssystem und die direkten Emissionen, sondern auch auf die komplette Lieferkette beziehen. Eine Erweiterung für die „Nachkette“, also die Nutzungs- und Entsorgungsphase der Produkte, ist grundsätzlich ebenso möglich (vgl. Schmidt 2005 und Schmidt & Schwegler 2008).

---

<sup>30</sup> Siehe hierzu Integrated Sustainability Analysis (Hrsg.) (o.J.-a): Eora - Home. Internet: <http://worldmrio.com/>, 19.03.2015 und Inomata, Satoshi/Owen, Anne (2014): "Comparative Evaluation of MRIO Databases", in: Economic Systems Research, 26. Jg., Heft 3, 240.

<sup>31</sup> Siehe hierzu Integrated Sustainability Analysis (Hrsg.) (o.J.-b): Notes on Eora indicator definitions. Internet: <http://worldmrio.com/IndicatorNotes.doc>, 19.03.2015, 4 und Ahmed, S. Amer/Rose, Steven K./Hertel, Thomas et al. (2014): Development of the Version 8 Non-CO<sub>2</sub> GHG Emissions Dataset - Public Release - Documentation Accompanying Dataset. Internet: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/6686.pdf>, 18.03.2015, 2.

## 4. Praxisbeispiele

### 4.1 Einleitung

Die entwickelte Methode sollte anhand von realen bzw. realistischen Praxisbeispielen angewendet und getestet werden. Wir haben uns aus Flexibilitätsgründen bewusst entschieden, keine festen Praxispartner vorab in das Projekt einzubinden. Es gibt aber zahlreiche produzierende Unternehmen aus der Region, die mit Praxisbeispielen zur Verfügung standen. Datenerhebungen konnten z.B. im Rahmen von studentischen Praxisprojekten oder Thesisarbeiten erfolgen und in das Projekt mit einfließen. Als problematisch hat sich allerdings die Datenfreigabe erwiesen. Mehrere Beispiele dürfen nicht verwendet werden, da die Unternehmen keine Erlaubnis erteilten. Auf eine Darstellung an dieser Stelle muss deshalb tw. verzichtet werden.

### 4.2 MFCA bei der Witzenmann GmbH

Die Witzenmann GmbH mit Hauptsitz in Pforzheim ist ein metallverarbeitendes Unternehmen, das auf flexible metallische Elemente spezialisiert ist. Die Produktpalette umfasst Kompensatoren, Metallschläuche, Metallbälge und Zulieferteile für die Automobilindustrie. Im Jahr 2014 erwirtschafteten 3.700 Mitarbeiter in 23 Unternehmen weltweit einen Umsatz von rund 520 Millionen Euro für Witzenmann. Das Unternehmen strebt eine langfristige Implementierung von Nachhaltigkeit im Unternehmen an. Eine wesentliche Voraussetzung für Nachhaltigkeit in einem Unternehmen ist Ressourceneffizienz, Material soll möglichst effizient und ohne große Verluste verarbeitet werden.



Abb. 4-1: Produktionshalle der Witzenmann GmbH (Quelle: Witzenmann GmbH)

Man war sich bei Witzenmann im Klaren, dass in der Fertigung aus unterschiedlichen Gründen Materialverluste anfallen, die entsorgt werden müssen. Da es sich bei den Materialverlusten um Schrott handelt, für den ein Erlös erzielt wird, schien das monetäre Einsparpotenzial durch die Vermeidung des Materialverlusts gering. Aus Ressourceneffizienzgründen ist es jedoch trotzdem geboten, die Ursachen für die Materialverluste zu ergründen. Um aus Kostengesichtspunkten geeignete Ansatzpunkte zur Verbesserung zu bestimmen, sollte daher untersucht werden, welche die über die Abfallmanagementkosten hinausgehenden Kosten tatsächlich in den Materialverlusten der einzelnen Prozesse stecken.

Anfang des Jahres 2014 wurde die Methode der Materialflusskostenrechnung (engl. Material Flow Cost Accounting (MFCA)), die in der ISO 14051 standardisiert ist, bei Witzenmann für einen ersten Versuch aufgegriffen. Die Methode verfolgt das Ziel Materialverluste, die bei der Herstellung eines Produktes – von der Lagerhaltung der Rohstoffe bis zum Warenausgang -

entstehen, monetär zu bewerten. Damit wird aufgezeigt, was diese Ineffizienzen das Unternehmen kosten. Die mit den Materialverlusten verbundenen Kosten stellen Einsparpotentiale dar, sofern es technisch möglich ist diese Verluste zu verringern oder ganz zu vermeiden. Materialverluste können sowohl Schlechtteile unzureichender Qualität als auch Verluste, die durch technische Begebenheiten entstehen, sein. Kosten werden im Rahmen der Methode in vier Kategorien unterteilt: Materialkosten, Energiekosten, Systemkosten (Personalkosten, Maschinenkosten, etc.) und Abfallmanagementkosten. In Japan findet die Methode bereits breite Anwendung in Unternehmen unterschiedlicher Branchen.

Für die erste Materialflusskostenrechnung bei Witzenmann wurde ein Metallbalg aus Edelstahl ausgewählt, welcher Überspannungen in elektrischen Komponenten verhindert. Im Falle von Witzenmann wurde die Materialflusskostenrechnung auf der Basis von Stoffstromnetzen berechnet.



Abb. 4-2: Metallbalg (Quelle: Witzenmann GmbH)

In einem ersten Schritt wurde die Herstellung des Metallbalgs von der Anlieferung bis zum fertigen Produkt verfolgt und basierend darauf ein Stoffstrommodell erstellt. Abbildung 3 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt des Modells in der Sankey-Darstellung.

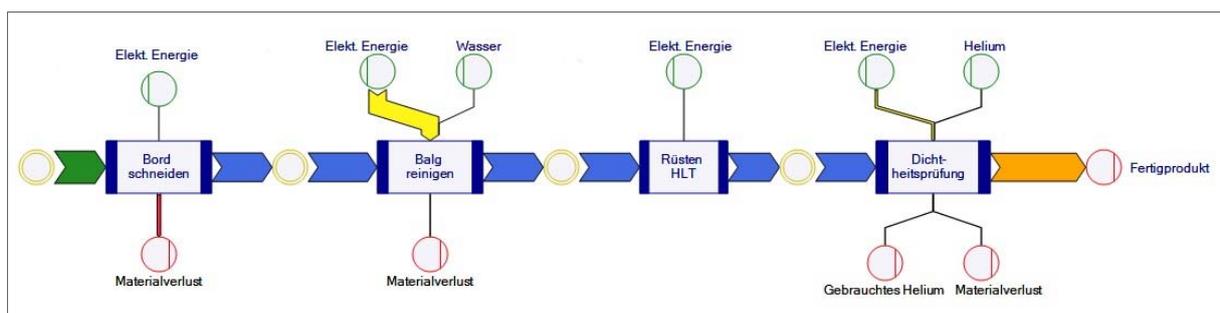


Abb. 4-3: Ausschnitt des Stoffstrommodells

Auf dieses Modell wurde die Materialflusskostenrechnung aufgesetzt. Die einzelnen Fertigungsschritte bildeten die Mengenstellen des Modells. Für jede Mengenstelle muss eine Input-/Outputbilanz erstellt werden und des Weiteren müssen die in der Mengenstelle anfallenden Kosten quantifiziert werden. Anhand auftragspezifischer Daten wurde das Modell mit Werten befüllt. So wurden erstmals die Materialverluste, die bei einem Auftrag anfallen, beziffert. Neben den Materialkosten wurden Personalkosten, Maschinenkosten, Abfallmanagementkosten und Kosten für die elektrische Energie berücksichtigt. Für die Verteilung der Kosten auf das (Zwischen-)Produkt und den Materialverlust gibt es gewisse Regeln/Vorschläge in der Norm. So werden Kosten, die für die Entsorgung des Materialverlustes anfallen, diesem komplett zugeschlagen. Die anderen Kosten (Material, Löhne, etc.) werden in der Regel basierend auf

dem Mengenverhältnis von (Zwischen-)Produkt zu Materialverlust alloziert, man spricht hierbei von physikalischer Allokation. Entsprechend dieser Regeln wurden auch im Fall von Witzemann die Kosten zugewiesen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Materialflusskostenrechnung für den Metallbalg. In Abbildung 4-4 sind die Mengen der Materialverluste in den einzelnen Fertigungsschritten und deren monetäre Bewertung dargestellt. Hierbei lässt sich eine gegenläufige Entwicklung erkennen.

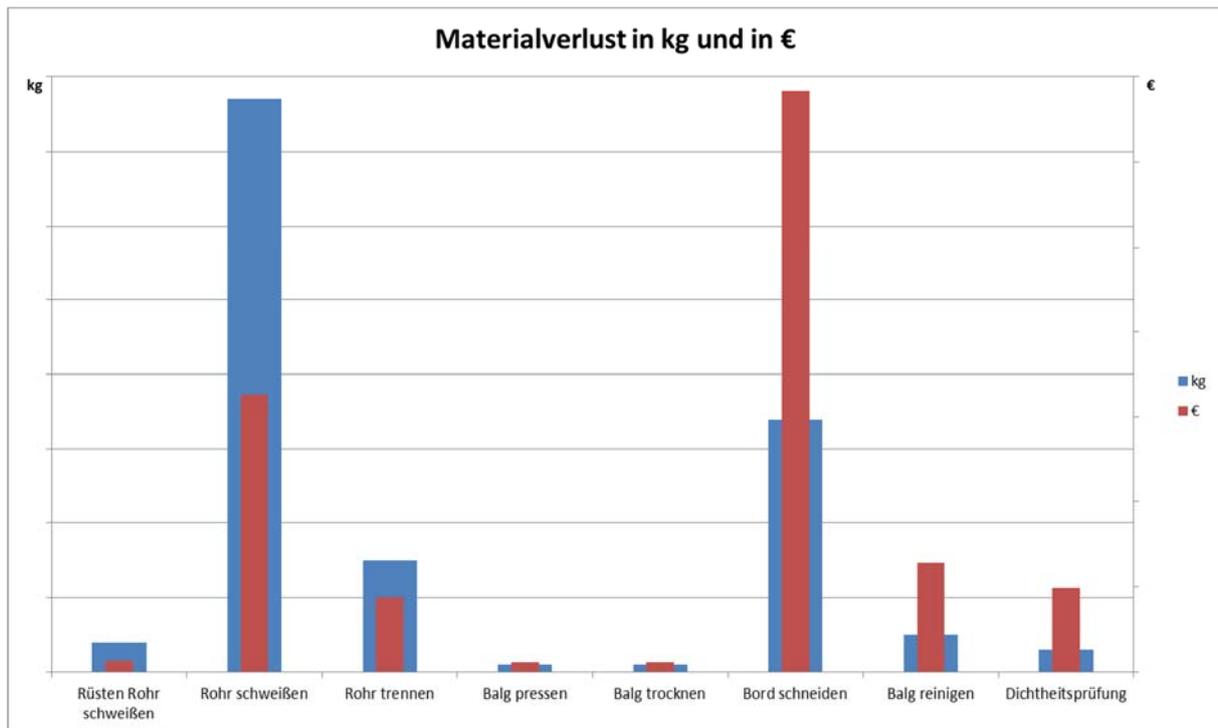


Abb.4-4: Materialverluste in Kilogramm und Euro

Den Wert der Materialverluste in Euro pro Kilogramm der einzelnen Fertigungsschritte zeigt Abbildung 4-5, hier wird ein Anstieg entlang der Wertschöpfungskette deutlich.

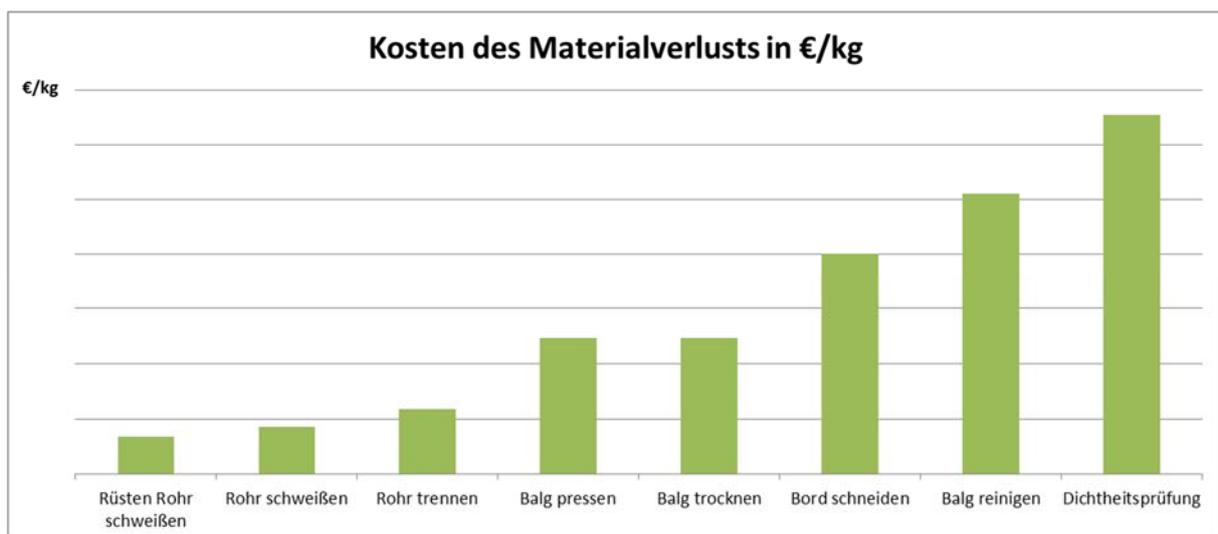


Abb.4-5: Kosten des Materialverlustes in Euro pro Kilogramm

Durch die Materialflusskostenrechnung konnten die versteckten Kosten, die mit den Materialverlusten verbunden sind, visualisiert und quantifiziert werden. Zudem kann die nun vorliegende monetäre Bewertung der Materialverluste als Grundlage für die Diskussion möglicher Änderungen im Produktionsverlauf des Metallbalsgs verwendet werden. Es ist zudem wichtig Materialverluste und mögen sie mengenmäßig noch so gering sein, entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu vermeiden.

Die Materialflusskostenrechnung hat bei Witzmann den Blickwinkel auf Materialverluste verändert. Es werden nicht mehr nur die anfallenden Entsorgungskosten oder die beim Verwerter erzielten Erlöse gesehen, sondern auch die Kosten und Leistungen die von Seiten des Unternehmens in die Materialverluste gesteckt wurden.

Eine der größten Herausforderungen bei der Durchführung einer Materialflusskostenrechnung ist sicherlich die Verfügbarkeit von Daten bzw. deren Aufbereitung. In den meisten Fällen liegen diese zwar in den Unternehmen vor, allerdings nicht in geeigneter Form für die Materialflusskostenrechnung. So sind beispielsweise Energieverbräuche auf Werkshallenebene oftmals bekannt, der Verbrauch der einzelnen Maschinen im Prozess jedoch nicht. Daher müssen entweder geeignete Verteilungsschlüssel gefunden oder eigens Verbrauchsmessungen vorgenommen werden. Diese Aufbereitung bedeutet ergo einen nicht zu unterschätzenden Zeitaufwand und macht einen Großteil der Arbeit aus. Als weitere Anforderung sollte der interdisziplinäre Charakter der Materialflusskostenrechnung bedacht werden, so müssen für eine erfolgreiche Realisierung Personen aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen zusammenarbeiten, was ein hohes Maß an Kommunikation, Transparenz und Koordination erfordert.

Für den Start einer Materialflusskostenrechnung empfiehlt sich die Bildung einer Projektgruppe. Diese sollte im Idealfall aus Personen aus den Bereichen Produktion, Controlling, Logistik, Qualitätsmanagement und Abfallhandling bestehen und von einer mit der Methode vertrauten Person geleitet werden. Diese Gruppe wählt gemeinsam ein Produkt aus, das regelmäßig produziert wird, von dem bekannt ist, dass Materialverluste anfallen und für das eine möglichst gute Datenlage gegeben ist. Für dieses Produkt wird der gesamte Herstellungsprozess erfasst.

### 4.3 MFCA in einem anonymen Beispiel

Das Modell beschreibt die Herstellung eines Getriebes und umfasst 11 Mengenstellen (siehe Abbildung). Die Mengenangaben entsprechen den realen Flussmengen, ebenso die Emissionsangaben. Die Kostangaben für den Materialeinsatz sind realistisch, allerdings sind die Systemkosten mit den Personal- und Maschinenkosten frei erfunden und spiegeln nicht die Realität wider.

Die Mengenstellen 1 – 5 umfassen die Herstellung des Gehäuses. Die Mengenstelle 6-10 stellen die Herstellung weiterer Komponenten dar. Die Montage des Getriebes erfolgt in der Mengenstelle 11.

- Mengenstelle 1: Schrott schreddern
  - o Das Gehäuse wird aus Sekundäraluminium gefertigt, in einem ersten Schritt wird der angelieferte Schrott geschreddert.
- Mengenstelle 2: Magnetische Separation
  - o Der geschredderte Schrott wird einer magnetischen Separation unterzogen, so werden Eisen- und Stahlreste entfernt
- Mengenstelle 3: Aluschrott einschmelzen

- Der reine Aluschrott wird nun eingeschmolzen und nach Bedarf werden Kupfer und Silizium hinzugegeben (→AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub>)
- Mengenstelle 4: Transport zur Druckgussmaschine
  - Das flüssige AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> wird mit Gabelstapler zur Druckgussmaschine transportiert
- Mengenstelle 5: Druckguss Gehäuse
  - Herstellung des Gehäuses mittels Druckgussverfahren
- Mengenstelle 6: Eingangswelle mit Rädern
  - Herstellung aus Stangenmaterial (Stahl)
- Mengenstelle 7: Ausgangswelle mit Rädern
  - Herstellung aus Stangenmaterial (Stahl)
- Mengenstelle 8: Differential
  - Herstellung aus Stahl
- Mengenstelle 9: Schaltteile
  - Herstellung aus Stahl
- Mengenstelle 10: Sonstige Bauteile
  - Herstellung aus Stahl
- Mengenstelle 11: Montage
  - Montage der einzelnen Komponenten zum Getriebe

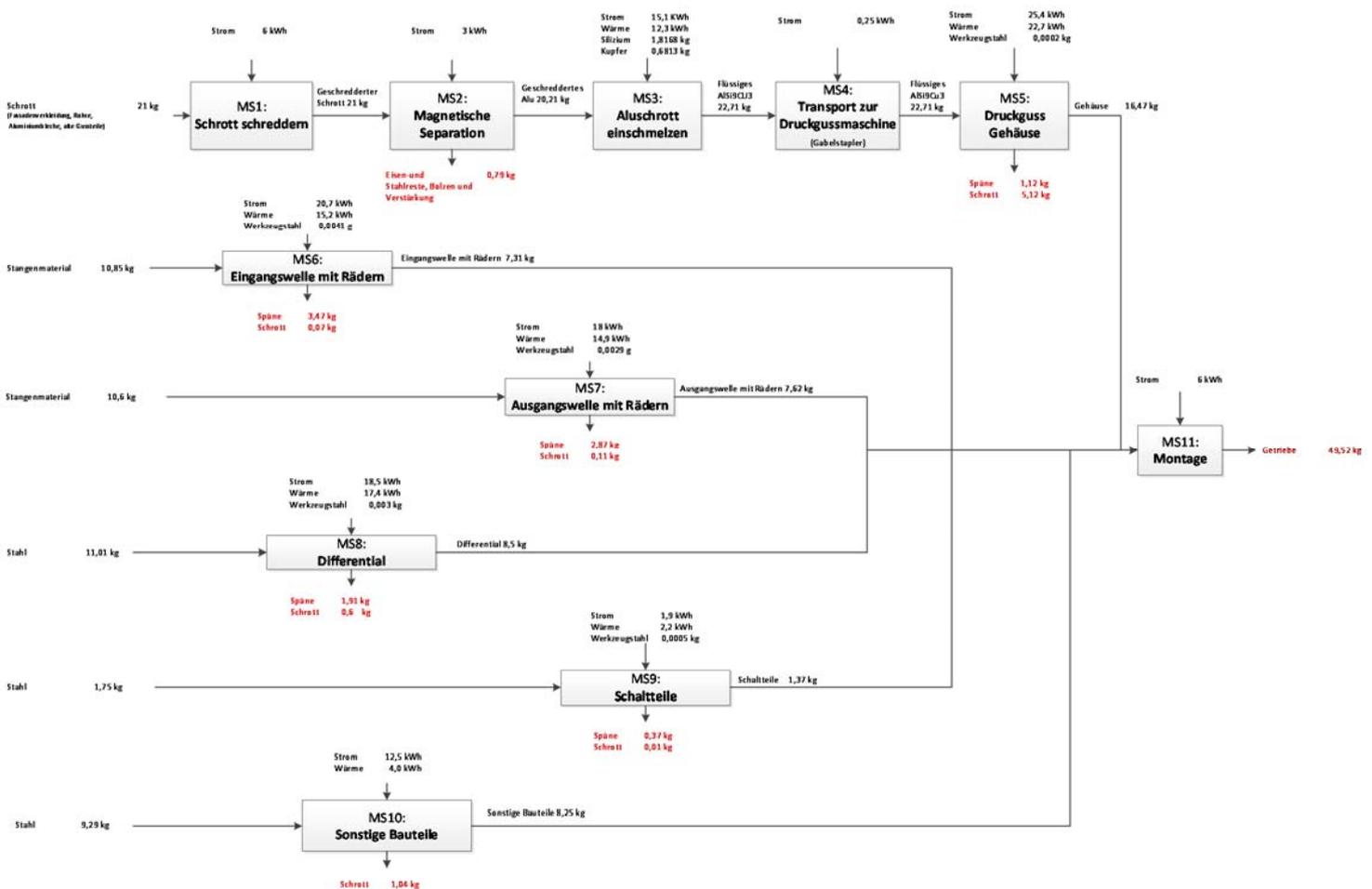


Abbildung 4-6: Fließschema mit den Mengenangaben für die Produktion eines Getriebes.

Stark vereinfacht werden in dem System Stahl, Werkzeugstahl, Stangenmaterial, Kupfer, Aluminiumschrott und Silizium. Materialverlust tritt in Form von Spänen, Schrott und sonstigen Eisen- und Stahlresten auf. An dem Beispiel lässt sich verdeutlichen, wie die unterschiedlichen

Sichten in der Praxis aussehen können. In Tabelle 4-1 sind die Mengenangaben für den In- und Output des Systems beschrieben. In Tabelle 4-2, der sogenannten Kostenmatrix nach ISO 14051 werden die monetären Werte angegeben (keine realen Werte, s.o.) und in Tabelle 4-3 werden die damit verbundenen THG-Emissionen angegeben.

Eingang				Ausgang			
Material	Wert	Einheit	Prozess	Material	Wert	Einheit	Prozess
Strom, Mittelspannung, ab Netz	6,00	kWh	MS1: Schrott schreddern	Schrott	1,04	kg	MS10: Sonstige Bauteile
Aluminiumschrott, neu, ab Werk	21,00	kg	MS1: Schrott schreddern	Getriebe	49,52	kg	MS11: Montage
Nutzwärme, BHKW	4,00	kWh	MS10: Sonstige Bauteile	Eisen-und Stahlreste	0,79	kg	MS2: Magnetische Separation
Strom, Mittelspannung, ab Netz	12,50	kWh	MS10: Sonstige Bauteile	Schrott	5,12	kg	MS5: Druckguss Gehäuse
Blasstahl, Chromstahl 18/8, ab Werk	3,29	kg	MS10: Sonstige Bauteile	Späne	1,12	kg	MS5: Druckguss Gehäuse
Strom, Mittelspannung, ab Netz	6,00	kWh	MS11: Montage	Schrott	0,07	kg	MS6: Eingangswelle mit Rädern
Strom, Mittelspannung, ab Netz	3,00	kWh	MS2: Magnetische Separation	Späne	3,47	kg	MS6: Eingangswelle mit Rädern
Kupfer, primär, ab Raffinerie	0,68	kg	MS3: Aluschrott einschmelzen	Späne	2,87	kg	MS7: Ausgangswelle mit Rädern
MG-Silizium, ab Werk	1,82	kg	MS3: Aluschrott einschmelzen	Schrott	0,11	kg	MS7: Ausgangswelle mit Rädern
Nutzwärme, BHKW	12,30	kWh	MS3: Aluschrott einschmelzen	Schrott	1,91	kg	MS8: Differential
Strom, Mittelspannung, ab Netz	15,10	kWh	MS3: Aluschrott einschmelzen	Späne	0,60	kg	MS8: Differential
Strom, Mittelspannung, ab Netz	0,25	kWh	MS4: Gabelstapler, elektr.	Späne	0,37	kg	MS9: Schalteile
Blasstahl, unlegiert, ab Werk	0,00	kg	MS5: Druckguss Gehäuse	Schrott	0,01	kg	MS9: Schalteile
Nutzwärme, BHKW	22,70	kWh	MS5: Druckguss Gehäuse				
Strom, Mittelspannung, ab Netz	25,40	kWh	MS5: Druckguss Gehäuse				
Blasstahl, unlegiert, ab Werk	0,00	kg	MS6: Eingangswelle mit Rädern				
Nutzwärme, BHKW	15,20	kWh	MS6: Eingangswelle mit Rädern				
Strom, Mittelspannung, ab Netz	20,70	kWh	MS6: Eingangswelle mit Rädern				
Blasstahl, Chromstahl 18/8, ab Werk	10,85	kg	MS6: Eingangswelle mit Rädern				
Blasstahl, unlegiert, ab Werk	0,00	kg	MS7: Ausgangswelle mit Rädern				
Nutzwärme, BHKW	14,90	kWh	MS7: Ausgangswelle mit Rädern				
Strom, Mittelspannung, ab Netz	18,00	kWh	MS7: Ausgangswelle mit Rädern				
Blasstahl, Chromstahl 18/8, ab Werk	10,60	kg	MS7: Ausgangswelle mit Rädern				
Blasstahl, unlegiert, ab Werk	0,00	kg	MS8: Differential				
Nutzwärme, BHKW	17,40	kWh	MS8: Differential				
Strom, Mittelspannung, ab Netz	18,50	kWh	MS8: Differential				
Blasstahl, Chromstahl 18/8, ab Werk	11,01	kg	MS8: Differential				
Blasstahl, unlegiert, ab Werk	0,00	kg	MS9: Schalteile				
Nutzwärme, BHKW	2,20	kWh	MS9: Schalteile				
Strom, Mittelspannung, ab Netz	1,90	kWh	MS9: Schalteile				
Blasstahl, Chromstahl 18/8, ab Werk	1,75	kg	MS9: Schalteile				

Tabelle 4-1: Mengenangaben für die In- und Outputs des Systems

	Anteil Produkte	Anteil Verluste	Kumulierte Kosten
Materialkosten	46,00 €	16,09 €	62,10 €
Energiekosten	13,92 €	4,81 €	18,73 €
Systemkosten	83,76 €	16,74 €	100,50 €
<b>Gesamt</b>	<b>143,69 €</b>	<b>37,64 €</b>	<b>181,33 €</b>

Tabelle 4-2: Kostenmatrix des Systems mit den monetär bewerteten Verlusten

Im System werden 17,48 kg Reststoffe ausgewiesen. Sie entsprechen einem Verlust von knapp 38 €. Damit verbunden sind ca. 81 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent an Treibhausgasemissionen, ein Drittel des betrachteten Systems. Diese Emissionsmenge könnte eingespart werden, wenn die Reststoffe vermieden werden.

	Anteil Produkte	Anteil Verluste	Emissionen kumuliert
Material	156,5	50,0	206,5
Energie	89,6	30,6	120,2
<b>Gesamt</b>	<b>246,1</b>	<b>80,6</b>	<b>326,8</b>

Tabelle 4-3: Emissionsmatrix des Systems mit den Verlusten, angegeben in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent

Die Berechnung der Emissionen erfolgte mit den gleichen Algorithmen, wie die Kostenberechnung.

## 5. Internationale Erfahrungen

### 5.1 RE-Kongress und Workshop

In das Projekt wurden mehrere externe Experten mit ihren Erfahrungen aus Südafrika, Mexiko und Japan integriert. Zu den Experten gehörten der Ingenieur Seakle Godschalk aus Südafrika, Prof. Asako Kimura und Prof. Michiyasu Nakajima von der Kansai University in Japan und Gladys Zerquera aus Mexiko. Bis auf Prof. Kimura waren die Experten auch Mitglied des ISO-Normierungsgremiums zur ISO-Norm 14051, bzw. sind es aktuell für die ISO 14052. Bei dem Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress 2014 in Karlsruhe wurde ein eigenes Forum „Internationale Erfahrungen mit MFCA in Betrieben“ mit den vier Experten durchgeführt, die ihre Beispiele, die im Folgenden vorgestellt werden, präsentierten. Die Beispiele waren auf unterschiedliche Aspekte ausgerichtet. In Südafrika wurde ein Unternehmen konkret mit MFCA modelliert, in Japan ging es einmal um die Einbeziehung der Supply Chain und dann um Verknüpfungen zum Lean Production-Ansatz. In Mexiko wurde ein Recyclingunternehmen analysiert. Die Tiefe der Untersuchungen war dabei sehr unterschiedlich.

Unmittelbar nach dem Kongress fand dann noch ein von der HS Pforzheim organisierter Workshop zum Thema Material Flow Cost Accounting (MFCA) in Heidelberg statt. Der Workshop diente zur Vertiefung und Diskussion der bereits in Karlsruhe vorgestellten Praxisbeispielen und Projekten.

Bei dem Heidelberg-Workshop wurde u.a. über die neue ISO Richtlinie 14052 diskutiert, in der es um die Implementierung von MFCA in der Supply Chain geht. Aus dem MEKKA-Projekt heraus konnten hier Impulse gesetzt werden. Als einer der wichtigsten Aspekte wurde hier die stärkere Verknüpfung der Themen MFCA und Umwelt identifiziert. Bislang steht die Einsparung von Kosten zu sehr im Fokus. Dies soll geändert werden und das Thema MFCA wieder vermehrt in die Themengebiete Umwelt und Ressourceneffizienz bzw. die ISO 14000 Familie eingebunden werden. Neben Einsparungen im monetären Bereich soll auch die CO<sub>2</sub>-Einsparung, die durch MFCA-Projekte realisiert werden kann, beachtet werden. Auch müssen die Anreize für Unternehmen, die MFCA in der Supply Chain einführen, klar dargestellt werden.

Des Weiteren wurde die Namensgebung besprochen. Es wurde festgehalten, dass Accounting ebenfalls einen zu starken Bezug zu Kosten hat. Auch wird der Begriff „Accounting“ je nach Sprache unterschiedlich ausgelegt. Als mögliche Lösung wurde hier eine länderspezifische Übersetzung vorgeschlagen.

Im weiteren Verlauf des Workshops wurden Möglichkeiten zur Implementierung von MFCA in Software-Tools vorgestellt. Um neben den Kosten auch die CO<sub>2</sub>-Einsparungen aus den Vorketten berechnen zu können, könnte z.B. auf ecoinvent V2.2 Datensätze zurückgegriffen werden. Die in der Datenbank enthaltenen Materialien haben sogenannte „CO<sub>2</sub>-Rucksäcke“, wodurch der Carbon Footprint bestimmt werden könnte. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Funktionen (z.B. die Festlegung der Farben bei grafischen Darstellungen) so simpel wie möglich gehalten werden sollten, um diese auch für „Nicht-Fachleute“ verständlich und anwendbar zu machen. Ebenfalls wurde vorgeschlagen, auch den Massenerhalt von einzelnen Prozessen in einer entsprechenden Software zu prüfen.

Prof. Michiyasu Nakajima ging bei seinem Vortrag vermehrt auf die Verknüpfung von MFCA mit Methoden des Lean Managements, insbesondere Kaizen und die Anwendung von MFCA in der Supply Chain ein. Bei der Diskussion der Beispiele wurde deutlich, dass die Allokation nach wie vor ein Problem darstellt. Besonders bei der Verteilung von prozessbedingten Hilfs-

und Betriebsstoffen bzw. Arbeitsschritten wird noch nach einer Lösung gesucht. Hier wurde ein Beispiel aus der Rohrherstellung genannt: Um einen kontinuierlichen Prozess zu erhalten, werden die Rohre zu Beginn zusammengeschweißt, jedoch wird dieser Teil am Ende der Fertigung wieder entfernt und „entsorgt“. Wie ist damit umzugehen? Auch die Verteilung der Energie ist oft schwer, da diese meist nicht für jeden Prozessschritt einzeln erfasst wird. Hier wurde der Vorschlag einer Verteilung nach Fertigungsminuten bzw. Maschinenstunden gemacht. Jedoch wurde auch betont, dass es häufig keine allgemeingültige Lösung gibt und diese je nach Fall gefunden werden muss. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Variation der Anforderungen an die Methode MFCA in den verschiedenen Ländern. So stellt der Verbrauch von Energie und Wasser in Mexiko einen wichtigen Aspekt dar, der stärker berücksichtigt werden muss.

## 5.2 Unternehmensbeispiel aus Südafrika<sup>32</sup>

In Südafrika ist die Materialflusskostenrechnung (MFCA) ein neues Konzept. Südafrika hat an der Entwicklung des ISO 14051 Standards zu Umweltmanagement – Materialflusskostenrechnung- Allgemeine Rahmenbedingungen, der im September 2011 veröffentlicht wurde teilgenommen. Diesen hat Südafrika als SANS 14051 im Mai 2014 adaptiert. Bisher wurden nur sehr wenige Fallstudien zur Implementierung von MFCA in südafrikanischen Unternehmen durchgeführt, während keinerlei Beispiele für die formale Einführung der MFCA Methode in südafrikanischen Unternehmen bekannt sind.

Die vorliegende Fallstudie beschreibt die Anwendung der MFCA Methode bei einem südafrikanischen Stahlrohrproduzenten („das Unternehmen“). Gegenstand der Fallstudie ist ein Stahlrohrproduzent in der Gauteng Provinz in Südafrika. Das Unternehmen produziert hauptsächlich Rohre – in unterschiedlichen Formen und Größen – die in Chargen bestellt werden können. Manchmal wird eine Bestellung storniert oder geändert, dies kann zu Produkthäufungen im Lager führen bis ein anderer passender Kunde gefunden ist.

Im Jahr 2012 hat das Unternehmen eine Abfallanalyse durchgeführt um Materialverluste entlang der Produktionslinie zu verstehen. Das Unternehmen befindet sich momentan in einer Optimierungsanalyse um die Verwendung von Ressourcen im Produktionsprozess zu optimieren. Daher hat sich die Entwicklung dieser Fallstudie gut in die bestehenden Initiativen eingefügt.

Südafrikanische Unternehmen geraten in einem konkurrenzbetonten Umfeld und einer stagnierenden Wirtschaft zunehmend unter Druck die Produktivität zu steigern. Daher liegt der Hauptgrund die MFCA Methode anzuwenden darin, den Ressourcenverbrauch zu optimieren und Kosten zu senken.

### Der ausgewählte Prozess

Unter dem Dach des Herstellers befinden sich vier Rohrwalzen. Diese Walzen unterscheiden sich in der Größe und werden zur Produktion unterschiedlicher Produkte verwendet. Während manche fast Vollzeit in jeder Schicht benutzt werden, werden andere nicht so häufig benutzt. Alle Walzen folgen im Wesentlichen demselben Prozess, der unten beschrieben ist. Es werden für die Walzen keine separaten Aufzeichnungen über die Nutzung von Ressourcen und Generierung von Abfall geführt. Deshalb wurden Daten für das gesamte Produktionswerk gesammelt und analysiert.

---

<sup>32</sup> Autor: Seakle Godschalk

Der Produktionsprozess besteht aus 22 Schritten – von der Annahme des Rohstoffs bis zur Ausfertigung des Produktes. Für den Zweck der Studie wurden einige Schritte zusammengefasst und führten zu den unten aufgeführten Mengenstellen, die die Basis der Analyse bildeten. Dies wurde in Absprache mit den Produktionsmanagern des Werkes getan.

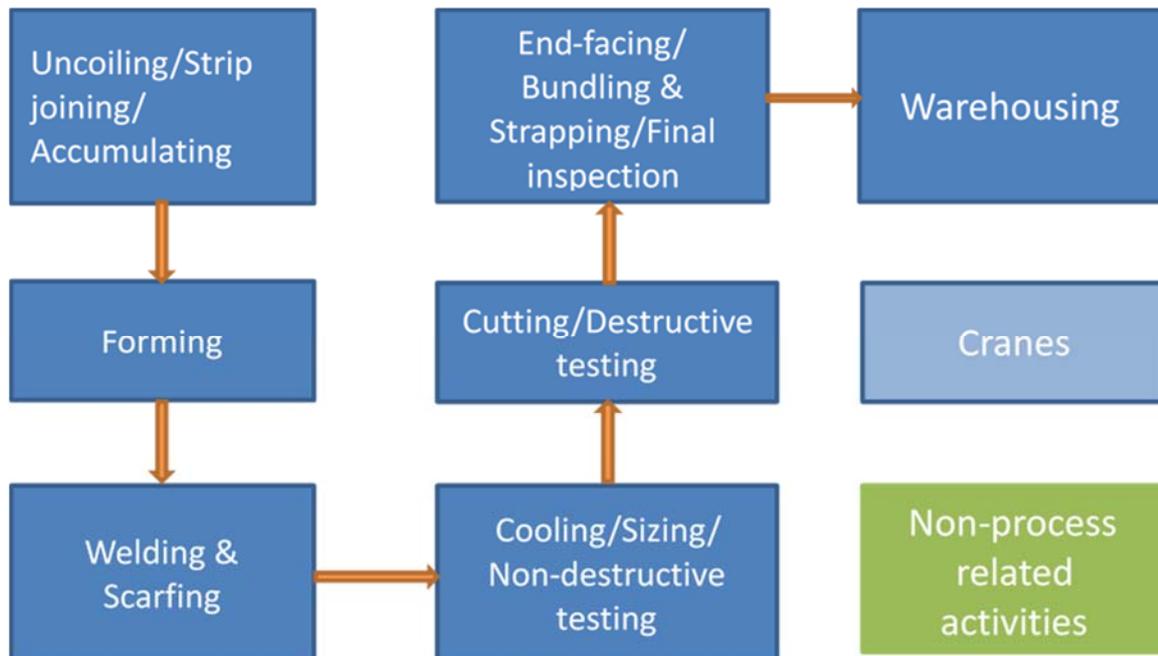


Abbildung 5-1: In der Fallstudie verwendete Mengenstellen im Stahlrohrherstellungsprozess

Der Rohstoff wird in Form von Stahl Coils mit einer durchschnittlichen Dicke von 2mm (10% Abweichung in Dicke sind erlaubt) und einer Breite von 57 bis 556 mm geliefert. Die Stahl Coils sind im Durchschnitt 950m lang, jedoch werden in 5% der Fälle zu kleine, ungefähr halb so große, Coils erhalten.

Nach dem Abwickeln der Coils werden die Stahlstreifen zusammen geschweißt, um eine kontinuierlichen Prozess zu gewährleisten. Im Prozess werden circa 20cm Stahl an jedem Ende abgeschnitten um ein korrektes Verbinden sicherzustellen.

Der Stahlstreifen wird nun in einem Hochdruckprozess in die für die Rohre notwendige spezifische Form gepresst. Die Enden des Streifens werden längsseitig zum Rohr zusammengeschweißt. Die unebene äußere Oberfläche der Schweißnaht wird abgeflammt, um jegliches überschüssiges Schweißmaterial zu entfernen.

Nach dem Abkühlen werden die Rohre auf die benötigte Größe zugeschnitten. Zu diesem Zeitpunkt findet eine zerstörende Prüfung statt. Die Rohre werden bearbeitet um glatte Rohrenden zu erhalten. Die fertigen Rohre werden nun gebündelt, verpackt und nach einer Endkontrolle ins Lager gebracht um an den Kunden ausgeliefert zu werden.

Überkopfkräne werden verwendet um Rohstoffe, Halbzeuge und Produkte durch die Anlage zu bewegen.

Nicht-prozessbezogene Aktivitäten umfassen Elektrizitäts- und Wasserverbräuche in Büros, Waschräumen und Duschen für Mitarbeiter.

## Datensammlung

Zu folgenden Einsätzen wurden Daten gesammelt (sowohl physische Mengen als auch monetärer Wert):

- Rohstoff (Stahl Coils)
- Elektrizität
- Betriebsstoffe
  - Dichtungen
  - Pappkarton Bögen
  - Umreifungsmaterial
  - Farbe
  - Dunnages<sup>33</sup>
- Hilfsstoffe
  - Schutzgas
  - Wasser
  - Hydrauliköl
  - Schmieröl
  - Schweißdraht
  - Sprühfarbe

Die physischen Mengen, der oben aufgeführten Posten, basieren auf dem über die sechs Monate vor der Studie durchschnittlich aufgezeichneten Verbrauch. Kosten pro Einheit basieren auf den aktuellen Preisen.

Aufgrund verschiedener Maßeinheiten der eingesetzten Materialien wurde kein Versuch unternommen, diese Einsätze in eine gemeinsame Einheit umzuwandeln.

Für die Anlagen (Rohrwalzen und Überkopfkräne) wurde Folgendes erfasst:

- Wiederbeschaffungskosten (da über den ursprünglichen Kaufpreis der älteren Rohrwalzen keine Informationen verfügbar waren, wurden Wiederbeschaffungskosten verwendet)
- Monatliche Nutzungsdauer
- Lebensdauer (15 Jahre für jede Walze)

Für Personalkosten wurde folgendes erfasst:

- Schicht der Mitarbeiter
- Stundenlohn pro Schicht
- Stundenanzahl pro Schicht

Bezüglich der Abfallmengen waren wenige Informationen verfügbar, mit Ausnahme der 2012 bestimmten Abfallprozente. Abfallströme wurden wie folgt kategorisiert:

- Anlagenbedingte Prozessverluste
- Verluste durch Rüsten
- Stopp-/Anfahrverluste
- Nicht-anlagenbedingte Prozessverluste

Die Kosten für die städtische Wasserabförderung und die Beseitigung von Schlamm /Öl/ verunreinigtem Wasser wurden erfasst. Die meisten Rohstoffverluste werden als Stahlschrott und -späne verkauft. Die generierten Mengen und Einnahmen wurden ebenfalls erfasst. Alle Daten

---

<sup>33</sup> Dunnages sind Holzstäbe, auf denen das fertige Produkt zum Kunden transportiert wird.

wurden dem Buchhaltungssystem (SAP) oder anderen Quellen entnommen und in Excel Tabellen erfasst und analysiert.

### Allokationen

In Abwesenheit einzelner Messungen der Materialeinsätze für die verschiedenen Mengenstellen, wurde die Expertenmeinung der Produktionsmanager verwendet, um die Einsätze auf die verschiedenen Mengenstellen zu allozieren. Der Prozentsatz von *Rohstoffverlusten* in jeder Mengenstelle basiert auf der Abfallanalyse von 2012 und wurde um neue Erkenntnisse ergänzt.

Zusätzlich führt der Prozess in zwei Fällen zu einem qualitativ unzureichenden Produkt, z.B. Ausschuss (B-Ware) und verrostete Produkte, die aufgrund unvorhersehbarer Umstände über lange Zeit hinweg im Lager lagen. Beide Produkte können immer noch verkauft werden, jedoch nur mit einem beträchtlichen Abschlag. Um die mit diesen Umständen verbundenen finanziellen Verluste zu quantifizieren wurden diese Verluste als Materialverluste erachtet. Dieses Vorgehen erhöhte den berechneten Prozentsatz des gesamten Rohstoffverlustes um 0,6 % aufgrund der B-Ware und um 0,4% aufgrund der verrosteten Produkte.

Die Allokation von Elektrizität, Betriebsstoffen, Anlagen und Personal zwischen Produkt und Verlusten basiert auf dem Rohstoffverteilungsprozentsatz in jeder Mengenstelle. In bestimmten Fällen wurden zusätzliche Verluste erfasst und zu den allozierten Verlusten addiert. Alle *Hilfsstoffe* wurden in jeder Mengenstelle zu den Verlusten gezählt.

### Analyse

Die Prozentsätze der Rohstoffverluste in jeder Mengenstelle sind unten in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 5-1: Prozentsatz der Rohstoffverluste in jeder Mengenstelle (%)

Quantity centre	1	2	3	4	5	6	7	8	
Losses (%)	Uncoiling/ Strip joining/ Accumulating	Forming	Welding & scarfing	Cooling/ Sizing/Non-destructive testing	Cutting/Destructive testing	End-facing/ Bundling & strapping/Blow out/ Final inspection	Warehousing	Cranes	Process sub-total
Raw material start	100.00	98.83	98.73	96.43	96.33	95.73	94.74	94.34	
Scrap - process	0.05	0.00	1.40	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	<b>1.52</b>
Scrap - set-ups	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>1.00</b>
Scrap - stop/ starts	0.12	0.10	0.90	0.10	0.40	0.38	0.00	0.00	<b>2.00</b>
Scrap - non-process	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.61	0.40	0.00	<b>1.14</b>
<b>Total loss</b>	<b>1.17</b>	<b>0.10</b>	<b>2.30</b>	<b>0.10</b>	<b>0.60</b>	<b>0.99</b>	<b>0.40</b>	<b>0.00</b>	<b>5.66</b>
Raw material end	98.83	98.73	96.43	96.33	95.73	94.74	94.34	94.34	

Diese Verluste beinhalten Verluste aufgrund von Ausschuss (0,60% in Mengenstelle 6) und Rost (0,40% in Mengenstelle 7). Der geschätzte Gesamtverlust an Rohstoffen während des Produktionsprozesses beträgt 5,66%.

Die obigen Prozentsätze der Verluste korrespondieren zu den physischen Rohstoffverlusten, die in Tabelle 2 aufgeführt sind. Durchschnittlich gehen 211,18 Tonnen an Rohstoff jeden Monat verloren.

Tabelle 5-2: Physische Menge an Rohstoffverlusten in jeder Mengenstelle pro Monat (Tonnen)

Quantity centre	1	2	3	4	5	6	7	8	
Losses (tons)	Uncoiling/ Strip joining/ Accumulating	Forming	Welding & scarfing	Cooling/ Sizing/Non-destructive testing	Cutting/Destructive testing	End-facing/ Bundling & strapping/Blow out/ Final inspection	Warehousing	Cranes	<b>Process sub-total</b>
Scrap - process	1.87	0.00	52.22	0.00	2.61	0.00	0.00	0.00	<b>56.70</b>
Scrap - set-ups	37.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>37.30</b>
Scrap - stop/ starts	4.48	3.73	33.57	3.73	14.92	14.17	0.00	0.00	<b>74.60</b>
Scrap - non-process	0.00	0.00	0.00	0.00	4.85	22.78	14.96	0.00	<b>42.58</b>
<b>Total loss</b>	<b>43.64</b>	<b>3.73</b>	<b>85.79</b>	<b>3.73</b>	<b>22.38</b>	<b>36.95</b>	<b>14.96</b>	<b>0.00</b>	<b>211.18</b>

Diese massenmäßigen Verluste an Rohstoff entsprechen einem monetären Verlust von 1 731 657 Südafrikanische Rand (ZAR) pro Monat, wie in Tabelle 5-3 aufgeführt.

Die Verluste von Elektrizität und Betriebsstoffen wurden für jede Mengenstelle basierend auf dem Rohstoffverteilungsprozentsatz zwischen Produkt und Verlust berechnet. Diese Verluste umfassen zwei Komponenten:

- Der Verlust an Input, der direkt mit dem Rohstoffverlust in der Mengenstelle verbunden ist
- Verlust an Input, der in den Rohstoffverlust dieser Mengenstelle eingeschlossen ist (z.B. halbfertige Produkte die QC 6 verlassen, beinhalten die in QC 6 verwendeten Betriebsstoffe, jeder Verlust dieser halbfertigen Produkte in QC 7 würde dann auch zum Verlust des aus QC 6 eingegangen, eingebetteten Input führen)

Der Elektrizitätsverbrauch für nicht prozess-bezogene Zwecke (z.B. Büros und Wassererwärmung) wurde auf 10% des Gesamtverbrauchs geschätzt und nicht weiter analysiert.

Die finanziellen Verluste, die mit dem Verlust von Elektrizität und Betriebsstoffen verbunden sind, sind in Tabelle 5-4 detailliert aufgeführt. Es ist nennenswert, dass Betriebsstoffe in der

Regel am Ende des Produktionszyklus hinzugefügt werden (und damit auch verloren sind). Diese Tatsache reduzierte die Auswirkung von eingebetteten Verlusten.

Tabelle 5-3: Monetärer Wert der Rohstoffverluste in jeder Mengenstelle pro Monat (ZAR)

Quantity centre	1	2	3	4	5	6	7	8	
Losses (ZAR)	Uncoiling/ Strip joining/ Accumulating	Forming	Welding & scarfing	Cooling/ Sizing/Non-destructive testing	Cutting/Destructive testing	End-facing/ Bundling & strapping/Blow out/ Final inspection	Warehousing	Cranes	Process sub-total
Scrap - process	15 293	0	428 204	0	21 410	0	0	0	<b>464 907</b>
Scrap - set-ups	305 860	0	0	0	0	0	0	0	<b>305 860</b>
Scrap - stop/ starts	36 703	30 586	275 274	30 586	122 344	116 227	0	0	<b>611 720</b>
Scrap - non-process	0	0	0	0	39 762	186 758	122 650	0	<b>349 170</b>
<b>Total loss</b>	<b>357 856</b>	<b>30 586</b>	<b>703 478</b>	<b>30 586</b>	<b>183 516</b>	<b>302 985</b>	<b>122 650</b>	<b>0</b>	<b>1 731 657</b>

Tabelle 5-4: Monetärer Wert der Elektrizitäts- und Betriebsstoffverluste in jeder Mengenstelle pro Monat (ZAR)

Quantity centre	1	2	3	4	5	6	7	8	
Losses (ZAR)	Uncoiling/ Strip joining/ Accumulating	Forming	Welding & scarfing	Cooling/ Sizing/Non-destructive testing	Cutting/Destructive testing	End-facing/ Bundling & strapping/Blow out/ Final inspection	Warehousing	Cranes	Process sub-total
Electricity	445	98	12 875	656	4 174	7 284	2 949		<b>28 480</b>
Seals						144	62		<b>206</b>
Cardboard sheet						9	7		<b>16</b>
Strapping						989	426		<b>1 416</b>
Paint						16	7		<b>23</b>
Dunnages							32 369		<b>32 369</b>
<b>Total loss</b>	<b>445</b>	<b>98</b>	<b>12 875</b>	<b>656</b>	<b>4 174</b>	<b>8 442</b>	<b>35 820</b>	<b>0</b>	<b>62 509</b>

Der Wasserverbrauch für nicht-produktionsbezogene Zwecke (z.B. Toiletten und Waschräume) wurde auf 20% des Gesamtverbrauchs geschätzt und nicht weiter analysiert.

Die finanziellen Verluste, die mit dem Verlust von Hilfsstoffen verbunden sind, sind detailliert in Tabelle 5-5 aufgeführt.

Tabelle 5-5: Monetärer Wert der Hilfsstoffverluste in jeder Mengenstelle pro Monat (ZAR)

Quantity centre	1	2	3	4	5	6	7	8	
Losses (ZAR)	Uncoiling/ Strip joining/ Accumulating	Forming	Welding & scarfing	Cooling/ Sizing/Non-destructive testing	Cutting/Destructive testing	End-facing/ Bundling & strapping/Blow out/ Final inspection	Warehousing	Cranes	Process sub-total
Shielding gas	1 941								1 941
Water	133	266	4 252	4 518	1 063	399			10 630
Hydraulic oil	648	205	85	205	478	85			1 706
Lubricating oil	2 618	1 428	833	1 428	3 570	2 023			11 901
Welding wire	7 612								7 612
Spraypaint	866			217					1 083
<b>Total loss</b>	<b>13 819</b>	<b>1 899</b>	<b>5 170</b>	<b>6 369</b>	<b>5 111</b>	<b>2 507</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>34 873</b>

Die monatlichen Abfallmanagementkosten enthalten Folgendes:

Tabelle 5-6: Durchschnittliche monatliche Abfallmanagementkosten

Cost category	Amount (ZAR)
Municipal water discharge	5 612
Removal of hazardous waste	26 000
Total waste management cost	31 612

Der Verkauf des Stahlschrotts und der –späne generiert Einnahmen für das Unternehmen.

Tabelle 5-7: Durchschnittliche monatliche Einnahmen aus dem Verkauf des Abfalls

Income category	Amount (ZAR)
Sale of steel scrap	514 740
Sale of steel shavings	152 259
Total income from sale of waste	666 999

Die gesamten monetären Verluste aufgrund von Abfall und Materialineffizienz sind in Tabelle 5-8 aufgeführt. Die gesamten produktionsbezogenen Verluste nach Abzug der für den Schrott erzielten Erlöse betragen mehr als 1,4 Mio (ZAR) pro Monat.

Tabelle 5-8: Monetärer Wert der Verluste aufgrund von Abfall und Materialineffizienzen in jeder Mengenstelle pro Monat (ZAR)

Quantity centre	1	2	3	4	5	6	7	8	
Losses (ZAR)	Uncoiling/ Strip joining/ Accumulating	Forming	Welding & scarfing	Cooling/ Sizing/Non-destructive testing	Cutting/Destructive testing	End-facing/ Bundling & strapping/Blow out/ Final inspection	Warehousing	Cranes	Process sub-total
Raw material	357 856	30 586	703 478	30 586	183 516	302 985	122 650	0	<b>1 731 657</b>
Electricity	445	98	12 875	656	4 174	7 284	2 949		<b>28 480</b>
Operating materials	0	0	0	0	0	1 158	32 871	0	<b>34 029</b>
Auxiliary materials	13 819	1 899	5 170	6 369	5 111	2 507	0	0	<b>34 873</b>
Tubing mills	47 200	10 085	43 390	10 085	17 654	36 935	0	0	<b>165 350</b>
Cranes	0	0	0	0	0	0	0	4 529	<b>4 529</b>
Labour	10 583	1 866	11 901	1 866	7 218	9 232	5 672	3 310	<b>51 649</b>
<b>Total loss</b>	<b>429903</b>	<b>44533</b>	<b>776815</b>	<b>49560</b>	<b>217673</b>	<b>360101</b>	<b>164142</b>	<b>7 840</b>	<b>2 050 658</b>
Waste management cost									31 612
Income from sale of waste									(666 999)
<b>Net loss</b>									<b>1 415 271</b>

## Ergebnisse

Die Studie deckte bedeutende Rohstoffverluste bedingt durch eine Reihe von Gründen auf:

- Anlagenbedingte prozess-bezogene Verluste: abflammen, schneiden und verbinden (nach Wichtigkeit sortiert)
- Verluste durch Rüsten
- Stopp-/Anfahrverluste
- Nicht-direkt-anlagenbedingte Prozessverluste: Ausschuss, Rost und zerstörende Prüfung

Zusätzlich wurden einige andere potentielle Bereiche für Verluste identifiziert, die in der oberen Analyse nicht betrachtet werden. Diese potentiellen Verluste sind alle mit Belangen der Lieferkette verbunden.

- Schnittabfall: das Schneiden der 120cm breiten Stahlrollen zu schmälere Rollen um zu den verschiedenen Rohrgrößen zu passen, wird von einem Lieferanten durchgeführt. Ungenau schneiden oder schneiden in Größen, die nachher nicht verwendet werden, kann zu Verlusten führen.
- Zu kleine Coils: wenn die gelieferten Stahl Coils kürzer sind als die standardmäßigen 950m kann das zu zunehmenden Materialverlusten beim Zusammenfügen führen.
- Schwankungen in der Blechdicke: da das Material nach Gewicht und Produktlänge bezahlt wird, führt ein zu dickes Blech zu Stahlverlusten.
- Fehlerhaftes Material: obwohl jedes fehlerhafte Rohmaterial vom Lieferanten ersetzt wird, führt es zum Verlust von Prozesskosten.

## Einschränkungen

Einige Einschränkungen sollten beachtet werden, wenn die Daten und Ergebnisse dieser Studie interpretiert werden.

- Es wurde keine separate Messung des Materialeinsatzes der einzelnen Rohrwalzen oder der einzelnen Prozesse in einer Rohrwalze durchgeführt. Deshalb musste die Allokation anhand der Expertenmeinung des Produktionsmanagers durchgeführt werden.
- Die in der Studie verwendete Schrottrate basiert auf einer eintägigen Erhebung aus dem Jahr 2012. Dies hat großen Einfluss auf das Ergebnis der Studie.
- Aufgrund zeitlicher Beschränkungen konnten bisher keine Verbesserungsmaßnahmen umgesetzt werden. Deshalb werden die möglichen Einsparungen zwar betrachtet, konnten bisher aber nicht überprüft werden.

## Einsparpotenziale

Das Unternehmen wird sich zuerst auf die beiden Aspekte konzentrieren, die potentiell „low hanging fruits“ darstellen, d.h. Verluste durch Rost und Ausschuss, die zusammen 21% des Rohstoffverlustes betragen.

Es wurden ebenfalls einige andere Bereiche für weitere Untersuchungen und die Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen identifiziert. Diese beinhalten unter anderem Verluste aufgrund von:

- Rüstvorgängen
- Stopps /Anfahren

- Lieferketten-bezogene Fragestellungen, wie in Abschnitt 8 beschrieben
- Gestaltung des Produktionsgebäudes

Um die Untersuchung der Ursachen und der Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen zu ermöglichen, muss das Unternehmen folgendes tun:

- Eine genauere Schrottanalyse durchführen.
- Die Haupteinsätze des Produktionsprozesses für jede Rohrwalze einzeln, und soweit möglich, für die verschiedenen Komponenten des Produktionsprozesses erfassen.
- Eine detailliertere Analyse der Abfallströme wird benötigt.
- Ein Leistungsvergleich der Einsätze als auch der anfallenden Abfälle gegenüber den Produktionszahlen, würde zu einem besseren Verständnis potentieller Verluste und möglicher Auswirkungen von Verbesserungsmaßnahmen beitragen.

Das Unternehmen hat, im Wesentlichen, die MFCA Methode für weitere Untersuchungen und zur Überwachung übernommen.

### 5.3 MFCA in der Lieferkette: Ansätze aus Japan<sup>34</sup>

Die Materialflusskostenrechnung (MFCA) ist ein beliebtes Instrument der Umweltkostenrechnung um Materialineffizienzen von Prozessen innerhalb eines Unternehmens zu verbessern. In Japan haben viele Unternehmen MFCA verwendet um Materialverluste in ihren eigenen Prozessen zu identifizieren, dadurch haben sie Materialverluste verringert und Kosten reduziert. In letzter Zeit wurde jedoch begonnen MFCA auf andere Managementfragen anzuwenden, zum Beispiel Lieferkettenmanagement (Wertschöpfungskettenmanagement), CO<sub>2</sub> (GHG) Emissionsmanagement, Energieverbrauchsmanagement und so weiter.

Diese Managementfragen sind für ein Unternehmen wichtig um Nachhaltigkeit zu erreichen. MFCA wurde zuerst nur innerhalb des Unternehmens eingesetzt und als interne Kostenrechnungsmethode verstanden. Nun versucht MFCA sich logischerweise über das Unternehmen hinaus auszudehnen.

Wenn ein Unternehmen MFCA in den eigenen Prozess einführt, findet das Unternehmen zwei Arten von Materialverlust. Die erste Art von Materialverlust wird durch Kaizen reduziert, basierend auf Entscheidungen des eigenen Managements. Wenn die andere Art verringert werden soll, muss das Unternehmen mit seinen Lieferanten oder Kunden zusammenarbeiten. In letzter Zeit ragt MFCA über die Grenze des üblichen Managements hinaus. Und ist an dem Punkt sich zu einem neuen, nachhaltigen Management über die normale Organisation hinaus zu entwickeln. Dies ist in Abbildung 5-2 dargestellt. Zum Beispiel kann MFCA in das Lieferkettenmanagement (Wertschöpfungskette), Wertstoffmanagement, CO<sub>2</sub> (GHG) Emissionsmanagement und Energieverbrauchsmanagement integriert werden. Das neue MFCA Management wird nicht mehr nur den Umfang der Organisation abdecken, sondern den der Gesellschaft.

---

<sup>34</sup> Autor: Michiyasu Nakajima

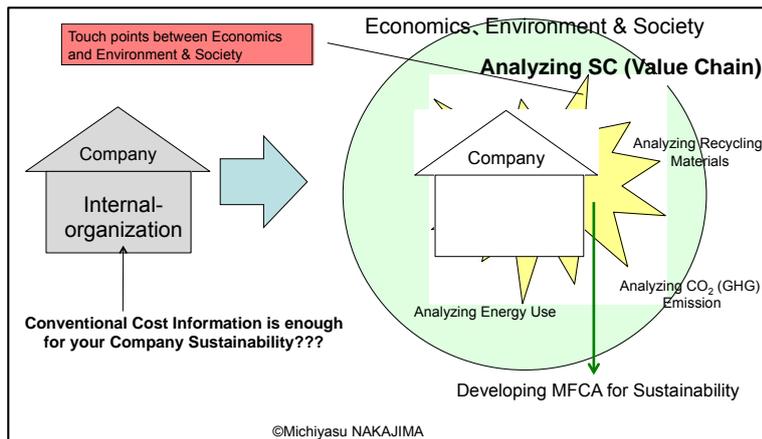


Abbildung 5-2: Über die Grenze hinausragen: durch MFCA Berührungspunkte zwischen Ökonomie, Umwelt und Gesellschaft schaffen

MFCA wurde 2011 als internationaler Standard des Umweltmanagements in der ISO 14051 veröffentlicht. Dieser Standard definiert die grundlegenden Rahmenbedingungen von MFCA. Durch diese internationale Standardisierung wurden die Grundlagen von MFCA in Unternehmen bekannt. In letzter Zeit nehmen die Fallbeispiele von MFCA in Unternehmen weltweit zu. Viele Unternehmen konnten Materialverluste bedingt durch die vorgeschaltete als auch nachgeschaltete Lieferkette finden. Der ISO Prozess zur Erstellung eines neuen internationalen Standards mit dem vorläufigen Titel "ISO 14052: MFCA guidance for practical implementation in a supply chain" wurde bereits begonnen. Wenn die Ausdehnung von MFCA auf die Lieferkette vorangetrieben wird, müssen viele erfolgreiche Praxisbeispiele für MFCA in der Lieferkette gefunden werden.

In Japan gibt es circa 30 Fallbeispiele von MFCA in Lieferketten. Diese zeigen erfolgreiche Fälle, in denen Materialverluste durch Zusammenarbeit mit Lieferanten oder Kunden aufgedeckt wurden und die erzeugten Mengen an Materialverlusten durch gemeinsame Aktionen verringert wurden. Die Grundvoraussetzungen um eine Zusammenarbeit zu erreichen, waren der „MFCA-Leader“, dargestellt in Abbildung 5-3, und die Kommunikation der Unternehmen untereinander. Das gemeinsame Verständnis war wichtig, um Potentiale zur Verbesserung der Materialeffizienz in der Lieferkette zu untersuchen.

Auf Grundlage der Beispiele für MFCA in der Lieferkette wurden einige Ansatzpunkte gefunden, um die Materialeffizienz zu verbessern. Abbildung 5-3 zeigt eine Lieferkette, die aus einigen Lieferanten (mehrere Stufen) und Kunden (mehrere Stufen) besteht, die japanischen Fallbeispiele bestanden jedoch nur aus Teilen einer solchen Lieferkette. Einige technologische Fragen blieben ungelöst, da hierfür neue Investitionen oder zusätzliche Entwicklungen im Produktionsprozess nötig sind.

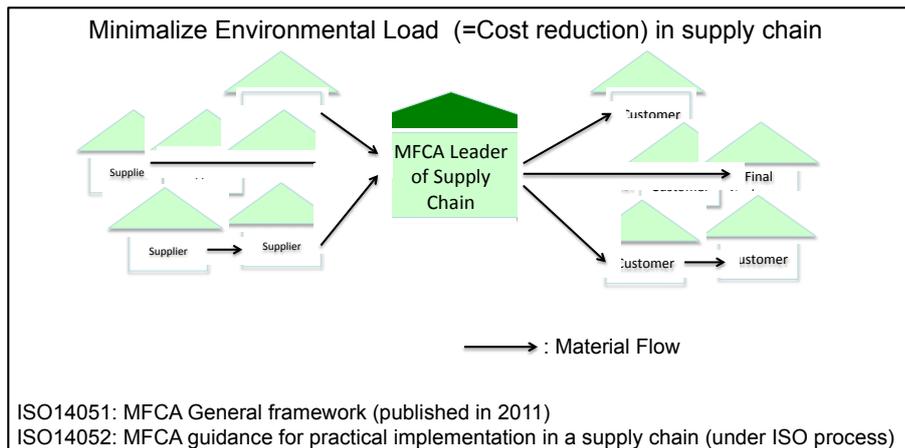


Abbildung 5-3: „MFCALeader“ in der Lieferkette, zwischen Lieferanten und Käufern

Aus japanischen Fallbeispielen ist bekannt, dass ein Grund zur Verursachung großer Materialverluste das Gusswerkzeug ist, zum Beispiel, in einem Kunststoffspritzgussprozess. Der Rohstoff für den Kunststoffspritzguss ist Kunststoffgranulat und das Produkt sind Kunststoffteile, gleichzeitig werden Materialverluste in Form von Angüssen bedingt durch die Gestaltung des Gusswerkzeuges generiert. Einige Kunststoffspritzgussprozesse generieren große Mengen an Materialverlust bezogen auf den Materialeinsatz zum Teil sogar höher als 50%. Einige Teile des Kunststoffmaterialverlusts werden intern rezykliert und als Material wiederverwendet, der Großteil jedoch wird verschwendet. Wenn die Mengen an Kunststoffmaterialverlusten reduziert werden, kann das Unternehmen eine Kostenreduktion von Materialeinsatz pro Produkteinheit erreichen. Um eine solche Erfolgsgeschichte zu erreichen, werden neue technologische Lösungen benötigt, zum Beispiel die Entwicklung neuer Gussformen, neuer -anlagen oder neuer -prozesse.

Abbildung 5-4 zeigt eine Montagefirma für elektrische Bauteile (Buyer X), die einige Kunststoffteilhersteller als Lieferanten hat. „Buyer X“ hat denselben Kunststoffspritzgussprozess wie Lieferant A, B, C und D (Supplier A, B, C, D). Das bedeutet, dass alle Käufer und Lieferanten dieselbe Art von Materialverlust in Form von Angüssen, bedingt durch die Gestaltung des Gusswerkzeuges, generieren.

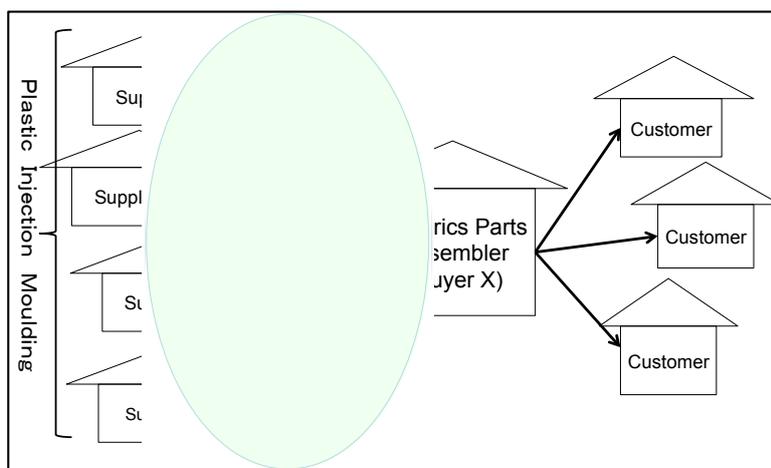


Abbildung 5-4: Ideale Zusammenarbeit zwischen Käufer und Lieferanten (Buyer and Suppliers) im Projekt

„Buyer X“ hat MFCA in den eigenen Produktionsprozess eingeführt, inklusive des Kunststoffspritzgusses. Dabei hat „Buyer X“ herausgefunden, dass eine unerwartet große Menge an Materialverlusten im Kunststoffspritzguss sowohl in seinem Unternehmen als auch in dem der Lieferanten anfällt. Um Verbesserungen bei der Gestaltung der Gussform zu erreichen, muss eine neue Art der Zusammenarbeit zwischen dem Unternehmen („Buyer X“) und den Lieferanten entwickelt werden, sowie neue technische und technologische Verfahren.

Der Autor hatte bereits MFCA Projekte bei „Buyer X“ durchgeführt. Anschließend wurde ein gemeinsames MFCA Projekt in der Lieferkette mit Lieferant A, B, C und D begonnen. Alle Lieferanten sind Kleine und Mittelständische Unternehmen, sie haben die Fähigkeiten eigene Gusswerkzeuge zu entwickeln und verfügen über aktuelle Technologien im Kunststoffspritzgießen. Der Autor hat die MFCA Methode bei den 4 Lieferanten eingeführt und somit ein gemeinsames Ziel. Die allgemeine Zielvorgabe war die Reduktion von Materialverlust im Kunststoffspritzguss, durch die Untersuchung neuer Gussformen um die Menge an Materialverlust innovativ gegenüber der vorhandenen Form zu verringern.

### Fallbeispiel für MFCA in der Lieferkette

Am Anfang des gemeinsamen Projekts, wurde eine innovative Gussform entwickelt, basierend auf der Zusammenarbeit von Käufern und Lieferanten (siehe Abbildung 5-4). Der Autor hat für einen Zeitraum von ungefähr 3 Jahren regelmäßige Treffen von Käufer und Lieferanten organisiert.

Durch das gemeinsame Projekt wurden über 3 Jahre hinweg Treffen in der Fabrik des Käufers oder der Lieferanten abgehalten. Bei jedem Treffen wurde darüber diskutiert wie durch die Gestaltung der Gussform bedingte Materialverluste reduziert werden können. Zusätzlich wurden Produktionsbesichtigungen bei „Buyer X“ und den Lieferanten in Japan und im Ausland durchgeführt.

Als Ergebnis des gemeinsamen Projekts war die Geschäftsbeziehung zwischen „Buyer X“ und jedem Lieferanten A, B, C und D enger geworden, dies ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Die Informationen zum Materialverlust stellten gemeinsame technologische Fragestellungen zwischen Käufer und Lieferant dar. Die Diskussion dieser Fragestellungen bedarf einer Möglichkeit für eine innovative Veränderung. Eine solche Möglichkeit liegt in der Entwicklungsphase eines neuen Produktes oder einer Investition in den existierenden Produktionsprozess. Wenn Käufer und Lieferant einige technologische Fragestellungen lösen können, werden sie eine engere Beziehung auf Geschäftsebene fortführen.

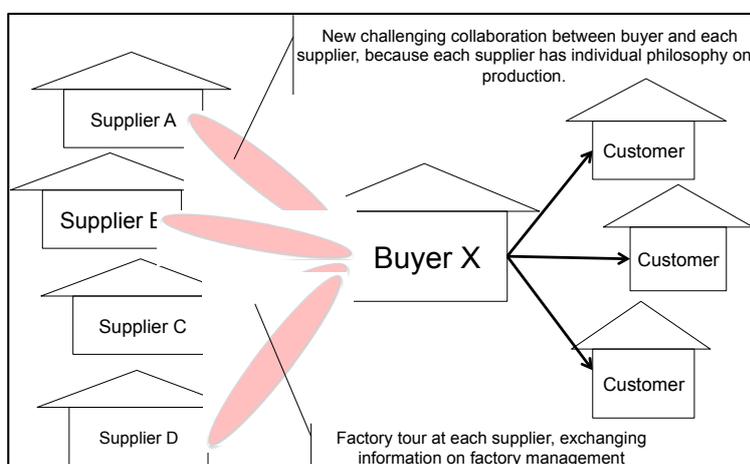


Abbildung 5-5: Ergebnis des Projektes, Zusammenarbeit zwischen Käufer und Lieferant

In dem Projekt wurden viel engere Beziehungen zwischen Käufer und Lieferanten deutlich. Einige Projekte zwischen Käufer und Lieferant konnten zu erfolgreichen Ergebnissen bezüglich der Ressourceneffizienz führen. Für ein paar Lieferanten blieb jeder andere Lieferant jedoch ein Wettbewerber. Deshalb, kam es teilweise zu keiner engeren Zusammenarbeit von Lieferanten untereinander in der Branche von „Buyer X“.

Ein anderes Ergebnis des gemeinsamen Projekts ist in Abbildung 5-6 dargestellt. Jeder Lieferant war ein Wettbewerber um „Buyer X“. Jedoch fand jeder Lieferant neue Partner. Zum Beispiel arbeitet Lieferant A neuerdings mit Lieferant B oder C zusammen. Da jeder Lieferant seine eigene spezielle Technologie besitzt, aber keine alle Belange abdecken kann. Die Lieferanten fanden einige Ansatzpunkte, an denen mit anderen Lieferanten zusammen gearbeitet werden kann. Einige Partnerschaften zwischen Lieferanten können neue Wege aufweisen, Materialverluste gemeinsam zu reduzieren.

Vor diesem Projekt waren alle Unternehmen, Käufer und Lieferanten Wettbewerber, daher hatten sie keine Möglichkeit über eine technische Zusammenarbeit zu diskutieren. Schweigen bedeutet Geheimnisse zu behalten und sich gegenüber den Wettbewerbern zu schützen. MFCA könnte jedoch eine neue Möglichkeit für sie schaffen, Ressourceneffizienz mittels Kommunikation über Materialverluste gemeinsam zu verbessern.

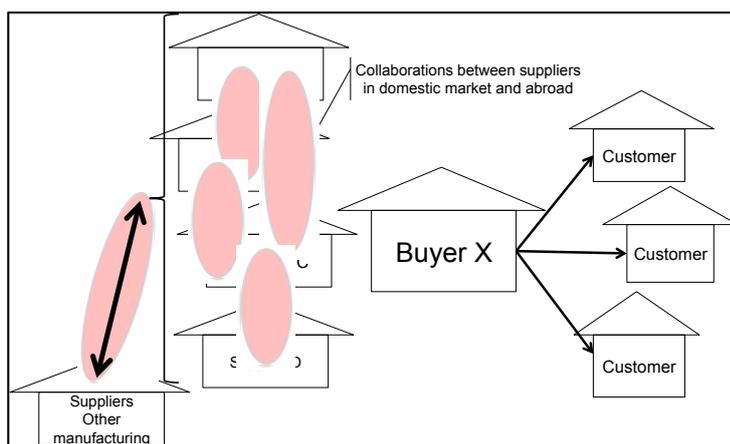


Abbildung 5-6: Ergebnis des Projektes, Zusammenarbeit zwischen den Lieferanten

Es bleibt eine Frage für die Zukunft. In Abbildung 5-6 gibt es keinen Pfeil zwischen den Lieferanten und „Buyer X“. Das bedeutet, dass „Buyer X“ nicht in die Zusammenarbeit mit Lieferanten eingebunden werden konnte, da er nicht genug Vertrauen von den Lieferanten erhalten hatte. Jedoch hat jeder Lieferant die Beziehung zum Käufer fortgeführt. Dies liegt daran, dass der Käufer näher am Kunden (nachgeschaltet) als am Lieferanten angesiedelt ist.

Ein Rahmen für die Kommunikation zwischen Lieferant und Käufer soll entwickelt werden, um innovative Zusammenarbeit in Bezug auf Ressourceneffizienz zwischen Lieferanten und Käufern in der Lieferkette zu ermöglichen. Es wurde versucht Fallbeispiele hierfür zu erstellen.

### Zukünftige Möglichkeiten

In Abschnitt 4 wurden die Ergebnisse einer praktischen Anwendung von MFCA in der Lieferkette in Japan dargestellt. Es konnten nicht alle Möglichkeiten und Fragestellungen für MFCA in der Lieferkette erfasst werden. Jedoch konnten anhand des Projekts einige Möglichkeiten für Unternehmen gefunden werden, um einen Nutzen aus MFCA in der Lieferkette zu ziehen. Diese werden nachfolgend beschrieben.

Manchmal haben Montageunternehmen mehr Kapital als Lieferanten, sowie mehr Marktmacht. In den japanischen Fallbeispielen von MFCA in der Lieferkette, generieren Lieferanten manchmal größere Mengen an Materialverlust, bedingt durch die Qualität oder Abnahmemenge der Einkaufsmaterialien. In diesen Fällen wollen Lieferanten über diese Tatsache sprechen oder sie untersuchen, aber dies ist nicht einfach. Rohstoff produzierende Unternehmen liefern Material in festen Mengen zum Beispiel in Säcken a 20 kg oder Kanistern a 18 l und so weiter. Möchte ein Lieferant von „Buyer X“ eine spezifische eigene Menge beim Rohstoffhändler bestellen, wird der Einkaufspreis hierfür höher. Das größte Hindernis ist, dass Unternehmen glauben, dass eine Verbesserung oder Veränderung zusammen mit den eigenen Lieferanten und Käufern mit gegenseitigem Nutzen nicht möglich ist.

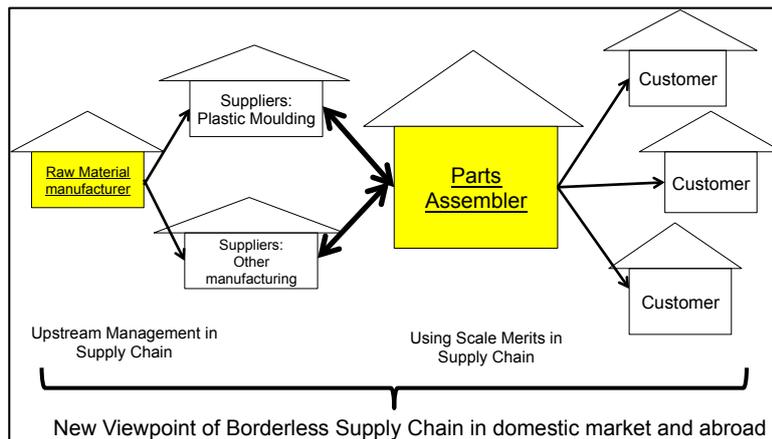


Abbildung 5-7: Zukünftige Möglichkeit (1)

Abbildung 5-7 zeigt die Situation, dass der Teilemonteur (Parts Assembler) mehr Kapital hat und Einfluss auf die Rohstoffhersteller ausüben kann. Wenn die Lieferanten durch MFCA eine engere Beziehung zum Teilemonteur aufbauen, könnte der Teilemonteur zwischen den eigenen Lieferanten und den Rohstoffherstellern vermitteln, um die Ressourceneffizienz zu verbessern. Wenn der Teilemonteur der „MFCA Leader“ in der eigenen Lieferkette ist, könnte die Lieferkette in Hinblick auf Nachhaltigkeit gelenkt werden, um allen vor- und nachgeschalteten Partnern einen Nutzen zu verschaffen.

Als zweite Möglichkeit analysiert MFCA einen Prozess hinsichtlich der Ressourceneffizienz, und fordert vom Unternehmen Ressourcenineffizienzen durch Reduktion von Materialverlusten zu verbessern. MFCA kann basierend auf Informationen zu Masse und monetären Werten Möglichkeiten aufzeigen, Kosten und Umweltauswirkungen zu reduzieren. Die Informationen aus einer MFCA-Analyse bedeuteten eine Art Nachhaltigkeitsleistung des analysierten Prozesses. Durch Entwicklungen der MFCA Methode, können diese Beispiele in der Praxis entstehen.

Wenn eine Lieferkette MFCA einführt und die Ressourceneffizienz verbessert, kann diese Lieferkette eigene Leistungen bezüglich der Ressourceneffizienz aufweisen. Diese Leistungsdaten können für den Kunden wertvolle Marktinformationen überföhrt werden. Ein „grünes“ Produkt ist das Ergebnis eines Unternehmens, aber reflektiert nicht direkt dessen Prozesse. MFCA kann den Stand des „grünen“ Prozesses nicht nur innerhalb des Unternehmens zeigen, sondern auch in der Lieferkette.

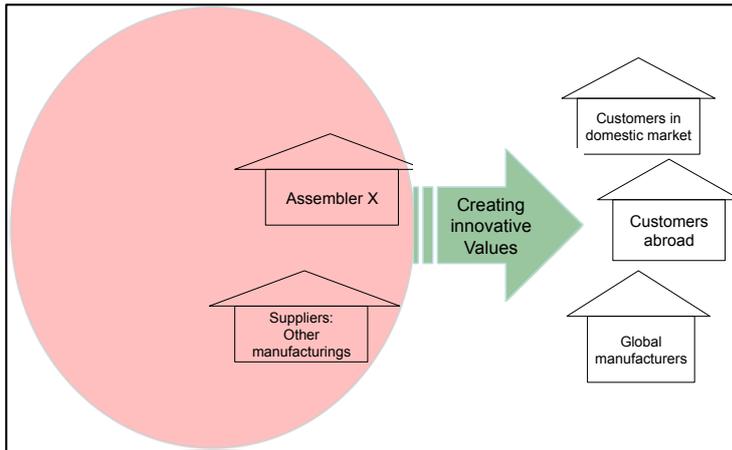


Abbildung 5-8: Zukünftige Möglichkeit (2)

Abbildung 5-8 zeigt eine weitere zukünftige Möglichkeit. Wenn „Assembler X“ und Lieferanten sich zusammenschließen und ihre Informationen zu MFCA teilen sowie eine Prozessleistung ihrer Lieferkette bezüglich Ressourceneffizienz bekanntgeben, wird diese Gemeinschaft zu einem neuen Konzept für Nachhaltigkeit in der Industrie werden. Diese nachhaltige Industrie wird nicht nur niedrigere Preise bieten, sondern auch weniger Ressourcen verbrauchen.

### Schlussfolgerungen

MFCA ist eines der nützlichsten Instrumente der Umweltkostenrechnung. Die Anzahl der Anwender ist weltweit gestiegen. Es gibt viele Fallbeispiele für MFCA nicht nur in Japan, sondern weltweit. Der MFCA Erstinutzer wird zuerst skeptisch gegenüber dem neuen Blickwinkel von MFCA im Vergleich zum normalen Management sein. MFCA zerstört nicht das existierende Produktionssystem eines Unternehmens, sondern kann die momentane Situation des Unternehmens in Hinblick auf Ressourceneffizienz aufzeigen. Ebenso kann MFCA Möglichkeiten aufzeigen Informationen zu Materialverlusten als Profitmöglichkeit zu nutzen.

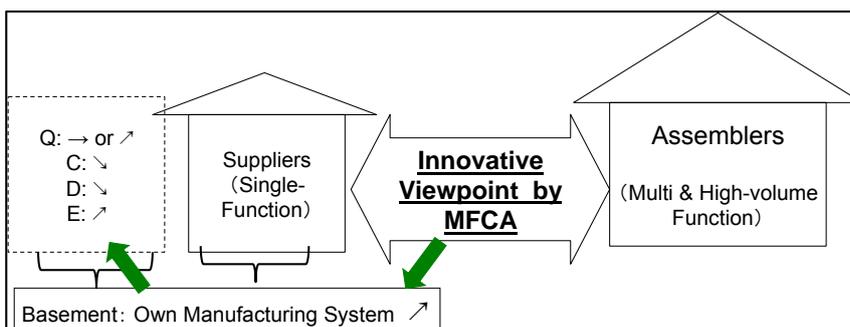


Abbildung 5-9: Bedeutung von MFCA in der Wertschöpfungskette

Abbildung 5-9 zeigt MFCA in der Lieferkette. Monteure als Käufer können eine wertvollere Beziehung zu den Lieferanten aufbauen, und Lieferanten können eine engere Beziehung zu den Käufern aufbauen, um einige Ressourcenineffizienzen durch innovative Lösungen zu verbessern. Lieferanten können den eigenen Produktionsprozess in Verbindung mit Käufern oder Kunden umbauen. Wie in der linken Box in Abbildung 5-9 zu sehen ist, können Lieferanten basierend auf MFCA Informationen zusammen mit Käufern die Qualität halten oder verbessern (Q), Kosten senken (C) Lieferzeiten verkürzen (D) und Umweltauswirkungen verbessern (E).

MFCA kann im Vergleich zum üblichen Management ein ganz anderes Bild ihres Unternehmens zeigen. Wenn herkömmliches Management nicht ausreicht, Nachhaltigkeit im eigenen Unternehmen sicherzustellen, kann das Unternehmen versuchen, MFCA einzuführen. Hat sich das Unternehmen einmal von den Beschränkungen des herkömmlichen Produktionsmanagements gelöst, kann es neue Möglichkeiten finden mit den eigenen Geschäftspartnern langfristig mehr Wirtschaftlichkeit zu schaffen.

MFCA zeigt für Unternehmen die Richtung auf eigene Produktionssysteme durch interne Kaizen Tätigkeiten zu stärken. MFCA Informationen können Unternehmen helfen neue Herausforderungen in der Lieferkette zu meistern. MFCA führt zu praktischen Herausforderungen, eine neue Perspektive für Nachhaltigkeit im Unternehmen zu erkennen.

#### 5.4 MFCA und GEMBA: Erfahrungen aus Japan<sup>35</sup>

Materialflusskostenrechnung (Englisch: MFCA - Material Flow Cost Accounting) ist eine Umweltkostenrechnungsmethode, welche die Ressourceneffizienz erhöht und es somit einem Unternehmen erlaubt sowohl seinen ökologischen Fußabdruck als auch seine Kosten zu reduzieren. In Japan gibt es mehr als 300 Anwendungsbeispiele und die Wahrnehmung der Bevölkerung ist seit der Veröffentlichung des Standards ISO 14051 im September 2011 gestiegen. Bis jetzt wird MFCA auf Unternehmensebene als Umweltmanagementmethode eingesetzt, jedoch wächst der Bezugsrahmen weiter und wird nun auf die gesamte Supply Chain ausgedehnt (METI 2010, S. 69-77).

Dieses Fallbeispiel soll zeigen, wie durch die Einführung von MFCA in Japan ein Umweltbewusstsein bei den Mitarbeitern eines Unternehmens geschaffen werden konnte.

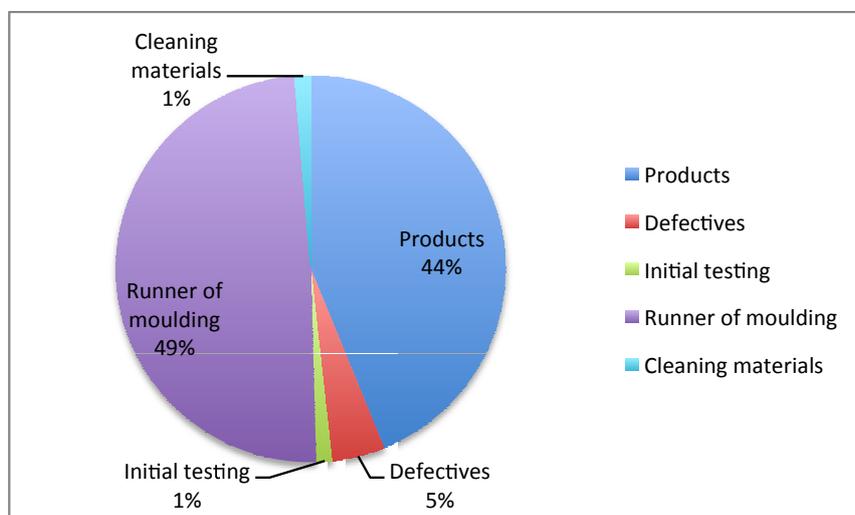


Abbildung 5-10: MFCA Daten eines Spritzguss-Teils

Einer der größten Mehrwerte für Unternehmen, der durch MFCA erzielt wird, ist die Visualisierung der Umweltbelastungen und die Möglichkeit der Priorisierung hervorgehender Reduktionspotentiale. Basierend auf MFCA versuchen Unternehmen durch unterschiedliche Ansätze die Materialverluste auf nahezu null zu reduzieren. Es gibt mehrere Ursachen für das Auftreten

<sup>35</sup> Autorin: Asako Kimura

von Materialverlusten und die Methoden zu deren Reduktion variieren von einfachen Aktivitäten bis hin zu komplexen Vorhaben. Die geeignete Methode muss für jedes Unternehmen individuell gestaltet und umgesetzt werden. Zum Beispiel können die Ursachen für Materialverluste beim Gießen von Kunststoffteilen entweder durch die Gestaltung der Gussform oder aufgrund von Fehlern in Gemba, d.h. „vor Ort in der Produktion“ auftreten. Der Materialverlust, der aufgrund der Form entsteht, liegt in der Natur des Prozesses. Jedoch gibt es auch Fälle, bei denen die Kosten für den Materialverlust extrem hoch sind und sich eine Änderung der Gussform lohnt. Ein solches Beispiel ist in Abbildung 5-10 dargestellt.

In diesem Fall beträgt der Ausschuss 5%, was nur einen geringen prozentualen Anteil darstellt. Nimmt man jedoch beispielsweise an, dass diese Firma 10.000 Einheiten des Produkts im Monat produziert, so entsprechen 5% einem monatlichen Ausschuss von 500 Teilen. Aus Sicht der MFCA kann man das Produkt hinsichtlich zweier Aspekte bewerten, der Menge und der Kosten des Materials. Wenn man davon ausgeht, dass bei der Produktion einer Einheit 50% des Materialeinsatzes durch die Angüsse und das Anfahren verloren gehen und das Gewicht einer Einheit 500g beträgt, ergibt sich folgende Rechnung für den Verlust:

$$500 \text{ Einheiten} * 500\text{g} * 2 = 500\text{kg},$$

Für jede Einheit muss also das Doppelte an Materialeinsatz aufgrund des Verlusts zu Beginn der Produktionskette erbracht werden. Für die Fertigungskosten ergibt sich dieselbe Rechnung. Wenn diese Situation ein ganzes Jahr besteht, so sind 6000 Einheiten des Produkts „verloren“. Und noch mehr sollte sich das Unternehmen Gedanken über den Preis der 6000 Produkte machen.

Unternehmen sollten nicht nur versuchen den Materialverlust durch eine andere Formgestaltung zu reduzieren, sondern auch eine Reduktion des täglichen Ausschusses anstreben, der durch die Mitarbeiter entsteht. Es ist jedoch schwer die Aufmerksamkeit der Angestellten auf das tägliche Geschäft zu richten, da diese sich zwar bewusst sind, dass Kosten wichtig für die Unternehmensperformance sind, jedoch die direkte Wirkung von Umweltaspekten auf die Leistung nicht kennen. Das bedeutet, dass Firmen Anstrengungen unternehmen müssen, um die Aufmerksamkeit der Mitarbeiter auf umweltbezogene Themen zu lenken.

Dieser Bericht soll nicht nur zeigen wie durch die Bereitstellung von Zahlen durch MFCA die Umweltbelastung visualisiert werden kann, sondern soll auch ein Beispiel dafür geben wie die Wahrnehmung der Mitarbeiter verändert werden kann. Und somit den Unternehmen helfen einen Plan zu entwickeln.

Der Konzern PX führte MFCA ab dem Jahr 2008 ein und schickte die Umweltschutzabteilung in jedes Büro. 2009 stellte die Muttergesellschaft MFCA im Unternehmen X vor und empfahl seine Anwendung.

Unternehmen X ist ein Tochterunternehmen von PX mit Hauptsitz in Japan. X besitzt drei Firmensitze in Japan, davon eine Produktionsstätte und beschäftigt ca. 1.000 Mitarbeiter. Des Weiteren besitzt Unternehmen X acht Produktionsstätten in Europa, Amerika und Asien mit etwa 5.000 Mitarbeitern. Das Unternehmenskapital betrug 2012 0,3 Billionen Yen, die Umsätze beliefen sich auf 49,1 Billionen Yen. Das Tochterunternehmen X montiert zugelieferte Kunststoff- oder Metallteile. Die Produkte werden dann an Automobil- oder Elektronikhersteller geliefert.

Mx, der Senior Manager von Unternehmen X, äußerte seine Bedenken bezüglich der Umweltkostenrechnungsmethoden, die vom Mutterkonzern eingeführt wurden. Jedoch verstand der

Senior Manager, dass MFCA dazu beitragen würde, die Kosten durch die geringeren Umweltbelastungen zu reduzieren und entschied sich deshalb für die Einführung in seinem Unternehmen. Das Unternehmen X führte MFCA für eines seiner Hauptprodukte A ein. Der Materialverlust, der bei der Produktion von A entstand, war höher als erwartet. Unternehmen X änderte daher den Herstellungsprozess von Produkt A „vor Ort“ um den Materialverlust, der durch MFCA aufgedeckt wurde zu reduzieren und führte eine neue Produktionstechnologie ein. Der Senior Manager Mx konnte so die Kosten des Prozesses reduzieren und führte „Haiki shiki“ ein, um die Motivation der Mitarbeiter zur Senkung der Umweltbelastung zu erhöhen.

„Haiki shiki“ wurde ursprünglich von Mx's Chef in der Produktion eingeführt, jedoch sobald dieser die Abteilung verließ wieder vernachlässigt und nicht mehr durchgeführt. Mx führte „Haiki shiki“ erneut ein.

Als Ergebnis der Wiedereinführung von „Haiki shiki“ wurden viele Produkte bei der Endkontrolle aussortiert. Der Grad an Perfektion, der von dem Automobilhersteller gefordert wurde, war hoch. Auch ein als einwandfrei deklariertes Produkt wurde vom Automobilhersteller zurückgewiesen, sobald nur ein Teil die Anforderungen nicht erfüllte. Da das Unternehmen X nur die Montage von individuell hergestellten oder ausgelagerten Komponenten ausführt, war die Entsorgung unumgänglich, wenn nur eine der Komponenten die Anforderungen des Käufers nicht vollständig erfüllte. Die Menge an Abfall war hoch und die Endkontrolle legte nur fest, ob eine Komponente weggeworfen wurde oder nicht, der Grund der Entsorgung lag entweder im Herstellungsprozess oder in der Maschineneinstellung. Nichts desto trotz, war die entstandene Abfallmenge nur den Qualitätsmitarbeitern bekannt. Also sammelte der Chef alle aussortierten Komponenten in der Cafeteria, um die große Menge an Ausschuss allen Angestellten zeigen zu können. Die Intension des Chefs war es, den Mitarbeitern das Wissen über die defekten Produkte zu vermitteln, so dass diese die betroffenen Prozesse verbessern und den Ausschuss zumindest ein klein wenig reduzieren konnten. „Haiki shiki“ wurde jeden Monat durchgeführt, jedoch wurde es gestoppt, als der Chef versetzt wurde.

Als Ergebnis der MFCA Analyse konnte Mx eine große Menge an Materialverlust, bestehend aus defekten Teilen und Abfallmaterial beobachten. Abgesehen von den defekten Produkten wird durch MFCA auch die Menge an Materialabfall deutlich, die bei jedem Prozessschritt entsteht. Daher entschied sich der Senior Manager Mx „Haiki shiki“ wieder einzuführen und den Materialabfall welcher nicht in ein Produkt umgewandelt werden konnte in der Cafeteria auszustellen, so dass alle Mitarbeiter ihn sehen konnten. Ursprünglich war es geplant, den Materialverlust monatlich zu sammeln, jedoch war die Menge so enorm, dass der Platz in der Cafeteria nicht ausreichte. Daher entschied man sich den Abfall wöchentlich zu sammeln. Das Ziel des Senior Managers Mx war es nicht nur ein Bewusstsein bei den Angestellten zu schaffen, sondern auch eine tatsächliche Reduktion des aussortierten Materials zu erreichen. Daher wurde als erstes das aussortierte Material eines Tages gesammelt, um es am nächsten Tag im Meeting zu präsentieren, in welchem die Mitarbeiter über die Qualität ihrer Arbeit informiert wurden und somit das Wiederauftreten von gleichen Fehlern verhindert werden sollte. Dieser Prozess wurde jeden Tag durchgeführt und zusätzlich wurde ein wöchentlicher Report erstellt, der die drei Produkte mit den höchsten Materialverlusten beinhaltete. Der Grund und die Maßnahmen wurden festgelegt und die Einzelheiten der Verbesserungsaktivitäten wurden allen Mitarbeitern erläutert. Des Weiteren wurde, insofern die Verbesserungsmaßnahmen etwas Zeit benötigten, der zeitliche Ablauf festgelegt. Basierend auf dem genannten Bericht wurde gemeinsam mit der Qualitätssicherungsabteilung der Muttergesellschaft zwei Mal im Monat ein Qualitäts-Verbesserungs-Meeting abgehalten, um die Randbedingungen der Maßnahmen speziell für die Produktionsstätte anzupassen und Verbesserungen zu planen. Dieses Meeting

bot ebenfalls die Möglichkeit über „Gemba“, also in der Produktion anfallende Belange und die drei Zielprodukte zu informieren. So wurde „Haiki shiki“ ein fest verankerter Teil des Kaizenmechanismus in X’s „Gemba“.

### Schlussfolgerung

Ein Zweck von MFCA als eine Umweltkostenrechnungsmethode war es die Umweltbelastung bezüglich ihrer Menge und ihrer Kosten zu visualisieren und eine Priorisierung für Kaizen zu liefern. Der „Haiki shiki“ Fall zeigt jedoch auch, dass MFCA als eine Managementmethode eingeführt werden kann und nicht nur Zahlen liefert. Das alte „Haiki shiki“ sollte die Mitarbeiter über die Menge an defekten Produkten informieren, die während der Qualitätskontrolle entdeckt wurden und ihre Wahrnehmung ändern. Trotzdem wurde das alte „Haiki shiki“ nur verwendet, um die Menge der defekten Produkte zu zeigen und war nicht mit bestimmten Kaizen-Aktivitäten verknüpft. Später wurde das alte „Haiki shiki“ abgeschafft. MFCA zeigte den Managern die Höhe des ökonomischen Einflusses durch die Visualisierung der Menge und der Kosten des Materialverlusts. Als Ergebnis belebte der Manager das „Haiki shiki“ nicht nur für die defekten Produkte wieder, sondern auch, um den Materialabfall in jedem Prozessschritt zu erfassen. Das neue „Haiki shiki“ wurde mit dem Ziel der Kostenreduktion eingeführt und ermöglichte die Einführung von Kaizen-Aktivitäten anderer Prozesse in Zusammenarbeit mit der Muttergesellschaft. So ist zusätzlich auch die Muttergesellschaft an allen Kaizen-Aktivitäten beteiligt und es entsteht ein gemeinschaftliches, hierarchiestufenüberschreitendes Projekt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass mehr entstanden ist als ein reines Visualisieren, wie es beim alten „Haiki-shiki“ der Fall war. Es wurde den Mitarbeitern bewusst, dass diese durch regelmäßige Aktivitäten die Umweltbelastung senken können. Dieses Fallbeispiel zeigt auch, dass basierend auf der MFCA-Analyse neue Managementmethoden geschaffen werden können.

## 5.5 Erfahrungen aus Mexiko<sup>36</sup>

Um die Materialflusskostenrechnung in Mexiko einzuführen, werden Informationen der Unternehmen sowie Kenntnisse bezüglich des Umweltrechts in Mexiko benötigt. Es ist wichtig zu verstehen, dass „mehr“ nicht mehr gleichbedeutend mit „besser“ ist (McKibben). Daher ist es unumgänglich die politische, ökonomische und ökologische Lage sowie die geografischen Gegebenheiten in Mexiko zu kennen. Tatsachen belegen, dass wesentliche Sparmaßnahmen in Verbindung mit einer großen Bevölkerung eine Steigerung der Armut hervorrufen. In Mexiko lebten 1950 rund 27 Mio. Menschen, jetzt ist Mexiko mit über 113 Mio. Einwohnern das fünft größte Land Amerikas. 23 Mio. davon leben in Mexikostadt.



Abbildung 5-11 Weltkarte – Mexiko

---

<sup>36</sup> Autorin: Gladys Zerquera

Mexiko befindet sich in Nordamerika. Es hat sowohl eine Atlantik-, als auch eine Pazifikküste, grenzt im Norden an die Vereinigten Staaten und im Süden an Guatemala. Mexiko ist ein instabiles Land, Drogenhandel und Kartelle gehören zum Alltag. Zwischen Mexiko und seinen beiden Nachbarländern gibt es aufgrund unterschiedlicher Kulturen politische Spannungen, wie auch mit vielen anderen Ländern auf der Erde. Bislang ist Mexiko noch nicht bereit für eine tragende globale Rolle. Einige Länder wie China und die Vereinigten Staaten haben einen großen Einfluss auf die mexikanische Binnenwirtschaft. Dies führt dazu, dass der mexikanische Markt instabil ist und viele angreifbare Unternehmen einfach verschwinden.

2007 wurde die mexikanische Wirtschaft auf Rang 15 der Welt gewählt, knapp hinter Australien. Armut ist ein Problem, aber die Größe der Wirtschaft bestimmt, welcher Anteil der Ressourcen für militärische und ähnliche Zwecke eingesetzt werden können.

Im Falle von Mexiko ändern sich die Rahmenbedingungen, besonders im Hinblick auf die Umwelt, mit der jeweiligen Regierung, welche alle sechs Jahre gewählt wird. Daher ist es für den Erfolg des Projekts wichtig, innerhalb einer Legislaturperiode, also sechs Jahren, abgeschlossen zu werden.

Teilweise durchläuft das Projekt einen langen und aufwendigen administrativen Prozess, sowohl vor, während als auch nach der Durchführung. Dies führt dazu, dass die Deadlines nicht mit dem administrativen Vorgehen übereinstimmen.

### **Anwendung**

Die Anwendung der Materialflusskostenrechnung in Mexiko ist eine Herausforderung, da es notwendig ist, mehr als nur unternehmensinterne Faktoren zu berücksichtigen. Zu den unternehmensinternen Faktoren zählen: Manager, Kosten, Emissionen, Produkte, Materialien, Bestände, etc. All diese Informationen müssen für eine bestimmte Zeitperiode vorliegen, ebenso wie externe Informationen zur Geografie, Politik und Wirtschaft.

In Mexiko hat die Ökobilanzierung (engl. Life Cycle Assessment – LCA) großes Interesse geweckt, da sie als Ansatz gesehen wird, der die Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung abdeckt. LCA zielt darauf ab, die Beziehungen zwischen Input, Output (funktionale Einheit oder Referenzfluss) sowie den damit verbundenen Umwelteinflüssen zu analysieren. Einige Anwender sind auch an Instrumenten interessiert, welche die Bewertung ausführen und eine einzige Kennzahl zur Verfügung stellen, wie bspw. der Carbon Footprint.

Dennoch gibt eine Ökobilanz keinen vollständigen Einblick. Im Besonderen sind hier die Funktions- und Zeitabhängigkeit von Beständen und die Korrelationseffekte einer gemeinsamen Lieferkette (engl. Supply Chain) nicht abgedeckt. Einige Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung verlangen nach Veränderungen im Zusammenspiel von Stoffflüssen und Beständen: Knappheit von Rohstoffen, Produkte in der Nutzungsphase und die Konzentration von Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre. Aus diesem Grund wurde der MFCA-Ansatz in Unternehmen eingeführt.

Die durchgeführte MFCA-Studie ist wichtig, da die Methode und deren Anwendung in Mexiko noch nicht sehr verbreitet sind. In diesem Fallbeispiel wurde ein produzierendes Unternehmen, welches PET recycelt, untersucht. In den letzten 15 Jahren sind viele PET-Recyclingunternehmen von der Bildfläche verschwunden. Nun ist genug Zeit vergangen, um eine ganzheitliche Analyse, basierend auf der Materialflusskostenrechnung, durchzuführen, welche den Bedarf an einer Ausgewogenheit der ökonomischen wie auch ökologischen Systemkosten erkennt.

Ziel ist es, Verbesserungen im Umweltmanagement zu unterstützen, um so die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens zu erhöhen, dazu gehören die Produktionseffizienz und die ökologische Performance.

Mexiko ist in Lateinamerika führend in der Produktion und im Verbrauch von PET.

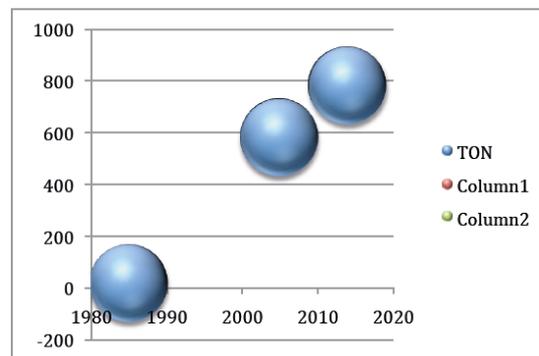
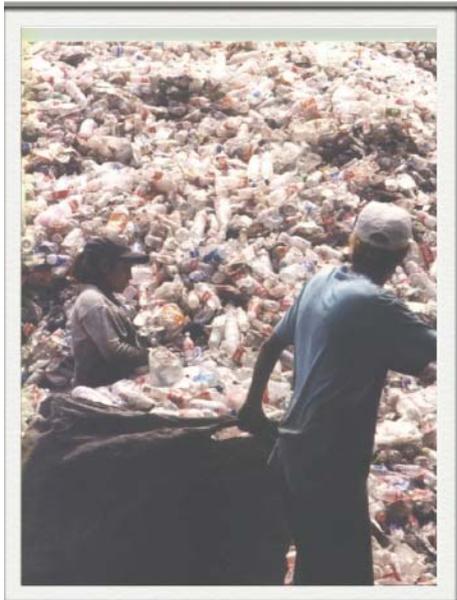


Abb. 5-12 Plastikmüll in Mexiko    Abb.5-13 Zuwachs an produziertem PET Mexiko 1985-2015

In dieser Fallstudie möchten wir drei Elemente hervorheben: Material, Stoffflüsse und Kostenrechnung. Durch das Vorgehen sollen Materialverluste und die damit verbundenen Kosten sichtbar gemacht und anschließend auf deren Basis die Verursacher identifiziert werden, um die zugrundeliegenden Probleme lösen zu können.

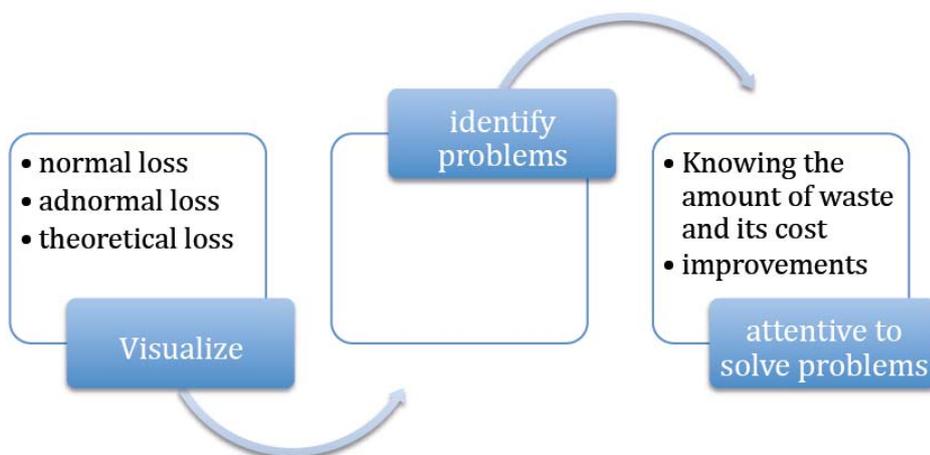
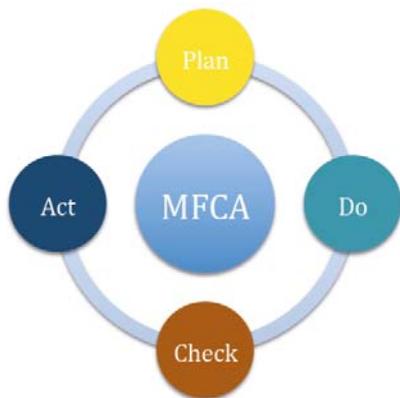


Abbildung 5-14    Vorgehensweise der Materialflusskostenrechnung

Die Vorgehensweise entspricht der Plan-Do-Check-Act (PDCA)-Methodik (siehe Abbildung 5). Nachfolgend werden die einzelnen Schritte erläutert.



PLAN
6.2 Involvement of management
6.3 Determination of necessary expertise
6.4 Specification of a boundary and a time period
6.5 Determination of quantity centres

Source:ISO14051:2011

Abbildung 5-15 PDCA-Kreis und MFCA      Abbildung 5-16      Plan (PDCA-Kreis)

### Schritt 1 - Plan

Einbeziehung des Managements: Eine erfolgreiche Einführung der Materialflusskostenrechnung benötigt eine aggressive Unterstützung des Top-Managements, gefolgt von einem Bottom-up-Ansatz vor Ort.



Abbildung 5-17      Zusammenspiel von Management, Experten und Komitee

Eine Präsentation der Vorteile von MFCA wurde vor dem Top-Management gehalten, um deren Unterstützung zu erhalten. Folgendes wurde hervorgehoben: Reduzierung von Abfall, Emissionen und Verlusten führen zu einer erhöhten Effizienz und verbessern das Image. In diesem Schritt sind vier Perspektiven erforderlich:

Management:

- Einführung leiten
- Verantwortlichkeit, Aktionen und Rollen festlegen

Experten:

- Ressourcen bereitstellen
- Fortschritt überwachen
- Ergebnisse überprüfen

Management und Experten:

- Verbesserungsmaßnahmen festlegen

Komitee:

- Erstellung eines Teams bzw. Komitee zur MFCA-Einführung. In einem solchen Team sollten die Geschäftsführung, die Leitungen von Finanzen, Qualitätskontrolle und der Supply Chain sowie der entsprechende Werksleiter enthalten sein.

MFCA Einführungsschritte: um die Materialflussplanung zu visualisieren, müssen das Produkt, die Systemgrenzen, die Periode und die Materialflüsse bekannt sein.



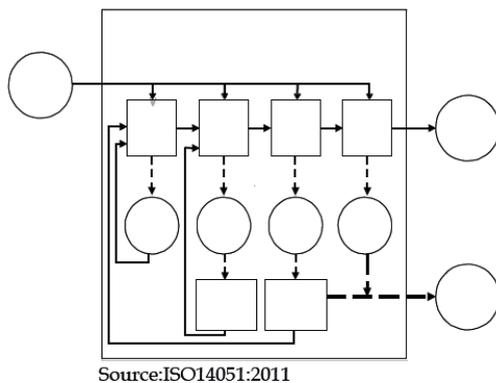
Abbildung 5-18 Materialflussplanung - Produkt

Für das Produkt müssen sein Wert, die mit ihm verbundenen Verluste sowie saisonale Trends und Markttrends analysiert werden.



Abbildung 5-19 Materialflussplanung – Systemgrenzen

In der Fallstudie wurde wie folgt vorgegangen: Auswahl eines Pilotprozesses, Festlegung der Systemgrenzen und Mengenstellen, Analyse der Lieferkette und Produktionsstätte.



QC1	QC2	QC3	QC4
Pre-selection	Whased and flake	Fiber	Packaging
			

Abbildung 5-20 Prozessschema und Mengenstellen



Abbildung 5-21 Materialflussplanung- Zeitperiode

In diesem Schritt wird die zu betrachtende Zeitperiode festgelegt.



Abbildung 5-22 Materialflussplanung- Materialflussmodellierung

Die Materialflussmodellierung enthält die Erstellung eines Materialflussmodells und die anschließende Festlegung der Inputs und Outputs. Danach wird die vorläufige Massenbilanz erstellt und evaluiert bzw. verfeinert. Zusätzlich werden die Mengenstellen festgelegt.

### Schritt 2 - Do

DO
6.6 Identification of inputs and outputs for each quantity centre
6.7 Quantification of material flows in physical units
6.8 Quantification of the material flows in monetary units

Source:ISO14051:2011

Abbildung 5-23 Do (PDCA-Kreis)

### Schritt 3 - Check

CHECK
6.10 Communication of MFCA results
6.11 MFCA data summary and interpretation

Source:ISO14051:2011

Abbildung 5-24 Check (PDCA-Kreis)

Interpretation der Ergebnisse und Erörterung/ Einführung von Verbesserungsmaßnahmen sowie Kommunikation der Ergebnisse

## Schritt 4 - Act

ACT
6.11 identification and assessment of improvement opportunities

Source:ISO14051:2011

Abbildung 5-25 Act (PDCA-Kreis)

Identifikation und Bewertung von Verbesserungsmöglichkeiten.

## Das Unternehmen

- Hersteller von recyceltem PET
- Hauptprodukte: Fasern (weiß, grün und schwarz)
- Produktion: 40.000 t/Monat



Abbildung 5-26: Produkte des Unternehmens

Die Finanzabteilung und die Produktion glauben, dass die Materialkosten zuzüglich der variablen Kosten (72%) zu hoch sind. Daher versuchen sie die Kosten zu senken.

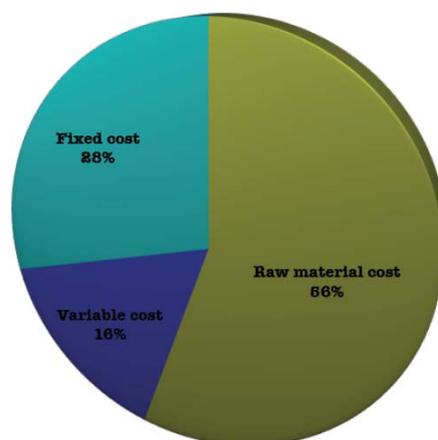


Abbildung 5-27: Kostenzusammensetzung

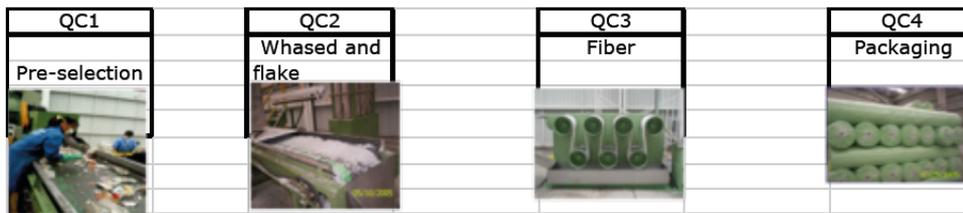


Abbildung 5-28: Mengenstellen



Abbildung 5-29: Materialflüsse dargestellt in physikalischen und monetären Einheiten

Insgesamt fallen ein Viertel der eingesetzten Sekundärmaterialien als Reststoffe an. Kostangaben durften leider nicht nach außen kommuniziert werden. Signifikante Materialverluste entstehen durch die Vorauswahl sowie die Nachbearbeitung von fehlerhaften Fasern. Die Einführung eines Managementsystems zur Senkung der defekten Produkte könnte somit direkt in Kosteneinsparungen umgesetzt werden. 15% des Materialverlusts könnten durch Vermeidung von Nacharbeit und Vorauswahl eingespart werden, da hier der Materialverlust besonders hoch ist (35%).

Im vorliegenden Fall sind besonders die externen Faktoren wie z.B. der Regen oder die Saison von Bedeutung für die entstehenden Materialverluste.

In dieser Fallstudie erlaubt die Materialflusskostenrechnung die tatsächlichen Ausgaben im Zusammenhang mit Abfall zu ermitteln, was innerhalb kurzer Zeit zu einer Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit führt.

### Fazit

Durch die Anwendung von MFCA in Mexiko konnte gezeigt werden, dass die Herstellung von Recyclingprodukten genauso billig sein kann, wie die Herstellung von Produkten aus Primärrohstoffen. Die Materialflusskostenrechnung kann in jeder Art von Unternehmen in Mexiko eingesetzt werden, von komplexen, großen bis hin zu einfachen, kleinen Firmen.

## 6. IT-mäßige Umsetzung der MEKKA-Ansätze als Ergebnis

### 6.1 Anforderungen

Aus dem Projekt MEKKA heraus ergab sich der Vorschlag, die entwickelte Berechnungsmethode zukünftig auch in Software-Tools zu nutzen. Die Idee war dabei, parallel zur normalen Energie- und Stoffstromrechnung auf Mengengrundlage und der konventionellen Kostenrechnung auch MFCA als eine Option zuzulassen. Die Berechnungsmethode ermöglicht dies, da sie MFCA auf Kernfunktionen dieser Ansätze zurückgreift, etwa auf die Verrechnung der Kosten auf Produkte (Kostenträger), die Auflösung und Verteilung der Kosten nach Kuppelprodukten (Produkten) oder der mengenbasierten Kostenrechnung.

Ziel war es deshalb, die Anforderungen an eine Software, die ein Material Flow Cost Accounting (MFCA) gemäß ISO 14051 erlaubt und auf breiter Ebene in Unternehmen eingesetzt werden kann, zu formulieren. Mit der Software soll die Ermittlung der entgangenen Wertschöpfung (in monetären Einheiten) durch Materialverluste, Reststoffe etc. möglich sein. Darüber hinaus soll auf der gleichen methodischen Grundlage auch die Ermittlung der einsparbaren THG-Emissionen durch die Vermeidung der Materialverluste möglich sein.

Dazu sind folgende Schritte erforderlich:

1. Aufstellung eines **physischen Mengengerüsts** eines Produktionssystems (in kg, kJ, kWh etc.), bei dem die Inputs und Outputs verschiedener Prozesse erfasst und die Flüsse zwischen den Prozessen abgebildet werden. Es sollten mindestens 15 Prozesse in einer Prozesskette abgebildet werden können. Freie Definition der Flussobjekte (Produkte, Rohstoffe, Energien etc.). Es sollten mindestens 100 Flussobjekte zusätzlich definiert werden können.  
*Für die bequeme IT-Umsetzung empfiehlt sich hier ein graphischer Editor zur Definition eines Produktionssystems und eine objektbezogene Eingabe der Daten.*
2. Möglichkeit der **Mehrfachertragsprozesse** (Kuppelprozesse), sowohl auf der Input- wie auch auf der Outputseite (Produktions- und Entsorgungsprozesse)
3. **Kategorisierung der Flussobjekte** (Rohstoffe, Produkte, Hilfs- und Betriebsstoffe, Abfälle, Energien...) nach der Dyckhoff'schen Unterscheidung aus der Produktionstheorie nach Gut/Übel/Neutrum. Damit wird es möglich, MFCA als Spezialfall der Allokation zu betrachten.
4. **Allokationsmöglichkeit** bei Mehrfachertragsprozessen nach i.d.R. Ausbringungsmengen und zusätzlich nach individuellen Einstellungen bei Einzelprozessen.
5. Kostenbewertung des Faktoreneinsatzes (Stoffe, Energien) mittels einer **Kosten- und Leistungsverrechnung** bezogen auf einzelne Produkte (bzw. Ertrag) sowie auf das Gesamtsystem. Die Kosten- und Leistungsverrechnung sollte in der Lage sein, **zyklische Systeme** aufzulösen.
6. Einfache Berücksichtigung von „**Systemkosten**“ durch prozessbezogene Angaben bzgl. des Personal- und Maschineneinsatzes, der Abschreibung von Investitionsgütern etc. Berechnung gängiger Abschreibungsmethoden.
7. Verwendung der gleichen Kosten- und Leistungsverrechnung zur **Berechnung von THG-Emissionen** in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Dazu Einführung von CO<sub>2</sub>-Rucksäcken von externem Faktoreneinsatz (entsprechend Marktpreisen).
8. **Bereitstellung von CO<sub>2</sub>-Rucksäcken** für einen Satz von gebräuchlichen Roh-, Werk-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Energien auf der Basis einer anerkannten Datenbank.

9. Zusätzliche zentrale Definition von Flussobjekten (Materialien, Reststoffen, ...) als „**Losses**“ mit der dualen Kategorisierung als Gut und Übel. Möglichkeit der zentralen Umschaltung zwischen diesen beiden Sichtweisen bei allen „Losses“. Berücksichtigung der unterschiedlichen Allokation bei den Einzelprozessen.  
*Damit wird sowohl die Kostenrechnung als auch die THG-Emissionsberechnung zu einer MFCA.*
10. Darstellung der physischen Flüsse, der Kosten und der Emissionen als **Sankeydiagramm**. Möglichkeit der Farbzuzuordnung für die einzelnen jeweils lokalen Flussobjekte, weiterhin die Aufteilung der physischen Flüsse, Kosten und Emissionen nach **Verbleib** (in den Produkten und Losses) und nach **Herkunft** (z.B. nach Gruppierung oder einzelem Faktoreinsatz).
11. Tabellarische Darstellung der Ergebnisse jeweils auf physischer Mengen-, Kosten- und Emissionsbasis als „**Cost Matrix**“ entsprechend der ISO 14051 für das Gesamtsystem und wahlweise für Einzelprozesse.
12. Sankey-Diagramme und Tabellen sollten in einer MS-Office-Welt einfach in andere Programme (z.B. Powerpoint) **exportierbar** sein.
13. In Hinblick auf die Anwendung in KMU sollte als Sprache Deutsch verwendet werden.

Die Berücksichtigung von betriebsinternen Recyclingströmen wäre wünschenswert, ist aber methodisch knifflig und erfordert wahrscheinlich einen größeren zeitlichen Vorlauf.

Eine entsprechende Software wäre ein wichtiger Anknüpfungspunkt, um mit Unternehmen bzgl. Ressourceneffizienz ins Gespräch zu kommen und dazu betriebliches Know-how aufzubauen. Es kann kaum erwartet werden, dass diese Software ad-hoc im großen Stil eingesetzt wird, sondern es müssen flankierende Maßnahmen ergriffen werden, z.B. Publikationen, Schulungen, Vorträge etc. Dies ist auch die Erfahrung bei dem weitaus trivialeren bw!Sankey-Tool, dass vom Land Baden-Württemberg kostenlos bereitgestellt wurde und allgemein sehr gelobt wird, aber für den professionellen Einsatz auch einer Einweisung bedarf.

## 6.2 Umsetzung mit bw!MFCA

Das Land Baden-Württemberg stellt inzwischen (Oktober 2015) die Software bw!MFCA zur kostenlosen Anwendung in produzierenden Unternehmen mit Standort in Baden-Württemberg zur Verfügung. Die Software wurde auf dem Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftskongress 2015 in Stuttgart vorgestellt. Von Umwelttechnik Baden-Württemberg werden auch Schulungen angeboten.

Die Software erfüllt im Wesentlichen die o.g. Anforderungen. So kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse des MEKKA-Projektes bereits zu einer konkreten Umsetzung und Verwertung geführt haben. Weiterhin kann festgestellt werden, dass wesentliche Ideen aus dem MEKKA-Projekt durch die Einbindung internationaler Experten im ISO-Normierungsprozess (ISO 14052) berücksichtigt werden.

## 7. Literatur

- Ahmed, S. Amer/Rose, Steven K./Hertel, Thomas et al. (2014): Development of the Version 8 Non-CO2 GHG Emissions Dataset - Public Release - Documentation Accompanying Dataset. Internet: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/download/6686.pdf>, 18.03.2015.
- Brümmerhoff, Dieter/Grömling, Michael (2011): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen. München: Oldenbourg.
- Bullard, Clark W./Penner, Peter S./Pilati, David A. (1978): "Net Energy Analysis - Handbook for Combining Process and Input-Output Analysis", in: Resources and Energy, 1. Jg., Heft 3, 267-313.
- Dietzenbacher, Erik/Lenzen, Manfred/Los, Bart et al. (2013): "Input-Output-Analysis: The Next 25 Years", in: Economic Systems Research, 25. Jg., Heft 4, 369-389.
- Dietzenbacher, Erik/Los, Bart/Stehrer, Robert et al. (2013): "The Construction of World Input-Output Tables in the WIOD Project", in: Economic System Research, 25. Jg., Heft 1, 71-98.
- Dyckhoff, H. (1994): Betriebliche Produktion, Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft, Springer Berlin/Heidelberg 1994.
- Foran, Barney/Lenzen, Manfred/Dey, Christopher et al. (2005): "Integrating sustainable chain management with triple bottom line accounting", in: Ecological Economics, 52. Jg., Heft 2, 143-157.
- Furukawa Y. (2008) Material Flow Cost Accounting (MFCA) Japan Environmental Management Association for Industry.
- Haubach, C. (2009): Die Startwertproblematik bei der Berechnung von kumulierten Emissionsintensitäten im Kontext der Treibhausgas-Bilanzierung. Umweltwirtschaftsforum 17(2): 171-178.
- Haubach, C. (2012): Die Initialisierungsproblematik bei der Einführung eines Systems kumulierter Emissionsintensitäten. Inaugural-Dissertation an der Universität Heidelberg, Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.
- Haubach, Christian (2009): "Die Startwertproblematik bei der Berechnung von kumulierten Emissionsintensitäten im Kontext der Treibhausgas-Bilanzierung", in: UmweltWirtschaftsForum, 17. Jg., Heft 2, 171-178.
- Hendrickson, Chris T./Lave, Lester B./Mathews, H. Scott (2006): Environmental Life Cycle Assessments of Goods and Services - An Input-Output-Approach. Washington: Resources for the Future.
- Hischier, R. (2011): ecoinvent – eine konsistente, transparente und qualitätsgesicherte Hintergrunddatenbank für Ökobilanzen & Co. In: Chemie Ingenieur Technik 2011, 83, No. 10, 1590-1596.
- Huang, Y. Anny/Lenzen, Manfred/Weber, Christopher L. et al. (2009): "The Role of Input-Output Analysis for the Screening of Corporate Carbon Footprints", in: Economic System Research, 21. Jg., Heft 3, 217-242.

Inomata, Satoshi/Owen, Anne (2014): "Comparative Evaluation of MRIO Databases", in: Economic Systems Research, 26. Jg., Heft 3, 239-244.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía <http://www3.inegi.org.mx> agosto 2014.

Integrated Sustainability Analysis (Hrsg.) (o.J.-a): Eora - Home. Internet: <http://worldmrio.com/>, 19.03.2015.

Integrated Sustainability Analysis (Hrsg.) (o.J.-b): Notes on Eora indicator definitions. Internet: <http://worldmrio.com/IndicatorNotes.doc>, 19.03.2015.

Jasch Ch. Environmental and Material Flow Cost Accounting page 2-4 Vienna, Austria 2009.

Joshi, Satish (1998): Comprehensive product life-cycle analysis using input-output techniques. Internet: <http://www.cmu.edu/gdi/docs/satish-joshi.pdf>, 21.10.2014.

Lave, Lester B./Cobas-Flores, Elisa/Hendrickson, Chris T. (1995): "Using Input-Output Analysis to Estimate Economy-wide Discharges", in: Environmental Science and Technology, 29. Jg., Heft 9, 420 A - 426 A.

Lenzen, Manfred (2008): "Sustainable island businesses: a case study of Norfolk Island", in: Journal of cleaner Production, 16. Jg., Heft 18, .

Leontief, Wassily (1970): "Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach", in: The Review of Economics and Statistics, 52. Jg., Heft 3, 262-271.

METI Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (2002): Environmental Management Accounting (EMA) Workbook. Tokyo.

METI Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (2007): Guide for Material Flow Cost Accounting (Ver.1). Tokyo.

METI Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan (2010): Material Flow Cost Accounting. MFCA Case Examples. Tokyo.

Miller, Ronald E./Blair, Peter D. (1985): Input-Output Analysis - Foundations and Extensions. Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice-Hall.

Miller, Ronald E./Blair, Peter D. (2009): Input-Output Analysis - Foundations and Extensions. Cambridge: Cambridge University Press.

Minx, J.C./Wiedmann, T./Wood, R. et al. (2009): "Input-Output Analysis and Carbon Footprinting: An Overview of Applications", in: Economic Systems Research, 21. Jg., Heft 3, 187-216.

Minx, Jan/Wiedmann, Thomas/Barrett, John et al. (2007): Methods review to support the PAS process for the calculation of the greenhouse gas emissions embodied in good and services - A research report for the Department for Environment, Food and Rural Affairs by the Stockholm Environment Institute and the University of Minnesota - February 2008. London: DEFRA.

Möller, A. (2000): Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme. Bochum.

Moriguchi, Yuichi/Kondo, Yoshinori/Shimizu, Hiroshi (1993): "Analysing the life cycle impacts of cars: the case of CO<sub>2</sub>", in: Industry and Environment, 16. Jg., Heft 1, 42-45.

- Nakajima M. (2009) Evolution of Material Flow Cost Accounting (MFCA): Characteristics on Development of MFCA Companies and Significance of Relevance of MFCA. ISO standard (ISO 14051) Material Flow Cost Accounting (MFCA) in 2011.
- Raqué, C. (2011): "Aufwandsreduzierte Schätzung von Lieferkettenemissionen". In: Horizonte. Forschung an Fachhochschulen in Baden-Württemberg, 38: 53-56.
- Raqué, C. (2012): "Treibhausgasemissionen, Einkaufsdaten und Preiskonzepte". In: Horizonte. Forschung an Fachhochschulen in Baden-Württemberg, 39: 42-44
- Schmidt, M. (2002): Verknüpfung gekapselter Produktionsmodelle durch Stoffstromnetze und Einbindung von Tools des Operations Research. In: Fichtner, W., Geldermann, J. (Hrsg.): Einsatz von OR-Verfahren zur techno-ökonomischen Analyse von Produktionssystemen. Frankfurt/M., S. 75-94.
- Schmidt, M. (2005): A production-theory-based framework for analysing recycling systems in the e-waste sector. In: Environmental Impact Assessment Review 25 (2005) 505-524.
- Schmidt, M. (2011): Von der Material- und Energieflussanalyse zum Carbon Footprint – Anleihen aus der Kostenrechnung. In: Chemie Ingenieur Technik 2011, 83, No. 10, 1541-1552.
- Schmidt, M., Schwegler, R. (2008): A recursive ecological indicator system for the supply chain of a company. Journal of Cleaner Production 16 (2008) 1658–1664
- Schmidt, Mario/Swegler, Regina (2008): "A recursive indicator system for the supply chain of a company", in: Journal of cleaner Production, 16. Jg., Heft 15, 1658-1664.
- Spengler, T. (1998): Industrielles Stoffstrommanagement. Berlin
- Statistisches Bundesamt (Hrsg.) (2010): Fachserie 18 Reihe 2 - Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Input-Output-Rechnung - 2007. Im Internet: destatis.de, letzter Zugriff: 24.02.2011.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (Hrsg.) (2014): Global Warming Potentials. Internet: [http://unfccc.int/ghg\\_data/items/3825.php](http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php), 30.04.2015..
- Wagner, B. et al. (2010): Materialflusskostenrechnung – die internationale Karriere einer Methode zu Identifikation von Ineffizienzen in Produktionssystemen. Umweltwirtschaftsforum 2010, No. 5/6, DOI 10.1007/s00550-010-0189-1.
- Wood, Richard/Lenzen, Manfred (2003): "An Application of a Modified Ecological Footprint Method and Structural Path Analysis in a Comparative Institutional Study", in: Local Environment, 8. Jg., Heft 4, 365-386.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) / World Resources Institutes (WRI) (2011): The Greenhouse Gas Protocol Initiative, Corporate Value Chain (Scope 3), Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard, Washington.
- World Input-Output Database (Hrsg.) (2013a): Environmental Accounts. Internet: [http://www.wiod.org/new\\_site/database/eas.htm](http://www.wiod.org/new_site/database/eas.htm), 19.11.2014.
- World Input-Output Database (Hrsg.) (2013b): WIOD Data, November 2013 Release. Internet: [http://www.wiod.org/new\\_site/data.htm](http://www.wiod.org/new_site/data.htm), 28.01.2014.
- World Input-Output Database (Hrsg.) (2014): World Input-Output Tables. Internet: [http://www.wiod.org/new\\_site/database/wiots.htm](http://www.wiod.org/new_site/database/wiots.htm), 19.11.2014.

World Resources Institute (WRI)/World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) (Hrsg.) (2011): Greenhouse Gas Protocol - Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard - Supplement to the GHG Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard. Internet: <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/Corporate%20Value%20Chain%20%28Scope%203%29%20Accounting%20and%20Reporting%20Standard.pdf>, 18.03.2015.