

# Algebraische Untersuchung von Ressourcenbelastungen durch preisbehaftete Massenflüsse in einem System mit Massenrückführung bei verlustfreien Prozessausbeuten

Karl-Heinz Feuerherd

**Keywords** : mass flows, system analysis, recycling, environmental burden, sustainable development

## Abstract

By investigating a simple industrial model that comprises of manufacturing, use phase, disposal and recycling steps it has been shown on the basis of mass flows how specific burdens and prices, which are allocated to these activities influence the total environmental burden of the system depending on mass feedback ratio and consumption behavior. Whereas decisions to enforce or avoid recycling operations are made so far by comparing the specific burdens at the manufacturing and disposal stage with those at the recycling stage, this study reveals the necessity to link specific burdens that occur in case of recycling with prices of the alternative non-recycling operations and vice versa.

## 1 Anlass der Untersuchung

Das internationale Geflecht der Flüsse von materiellen Rohstoffen und Energieträgern generiert Werte, die zu wachsendem Wohlstand führen (sollen). Unweigerlich tritt vor dem Hintergrund der Umweltveränderungen der Begriff der Effizienz ins Rampenlicht, mit dem beispielsweise ein wirtschaftlicher Aufwand zu dessen Ergebnis in Beziehung gesetzt wird. Mit verschiedenen Definitionen von „Öko-Effizienz“ wird in den letzten Jahren versucht, die unterschiedlichsten Einwirkungen auf die Umwelt, das Ungeschehen-Machen unerwarteter Resultate und andere Auswirkungen mit wirtschaftlichen Aktivitäten und deren Ergebnissen zu verknüpfen.

In einer vorangegangenen Arbeit<sup>1)</sup> wurde gezeigt, dass sogenannte Systeme, mit denen sich Ökobilanzierer auseinandersetzen, wenn es um die Beschreibung von Materialumwandlungen hinsichtlich ihrer Einwirkungen auf die Umwelt geht, Charakteristika aufweisen, die in der Diskussion über nachhaltige Entwicklung kaum beachtet werden.

Hinsichtlich der Belastungen verschiedenster Art, die durch Massenflüsse in einem System ausgelöst werden, besteht die Möglichkeit, das Systemverhalten aus sogenannter *innerer* und *äusserer Sicht* darzustellen. Diese Tatsache verleiht der bisherigen Art und Weise der Beurteilung von Handlungsoptionen eine neue Dimension.

Auf dieser Erkenntnis aufbauend geht die vorliegende Ausarbeitung einen Schritt weiter und unternimmt den Versuch, einen der Volkswirtschaft entlehnten Denkansatz in die

Betrachtung aufzunehmen.

## 2 Systembeschreibung

Das System nach Abbildung 1 besteht aus den vier Hauptaktivitäten (Modulen) Herstellung 1, Nutzung 2, Entsorgung 3 und Rückführung 4 wie es in ähnlicher Form bereits früher behandelt worden ist<sup>1)</sup>.

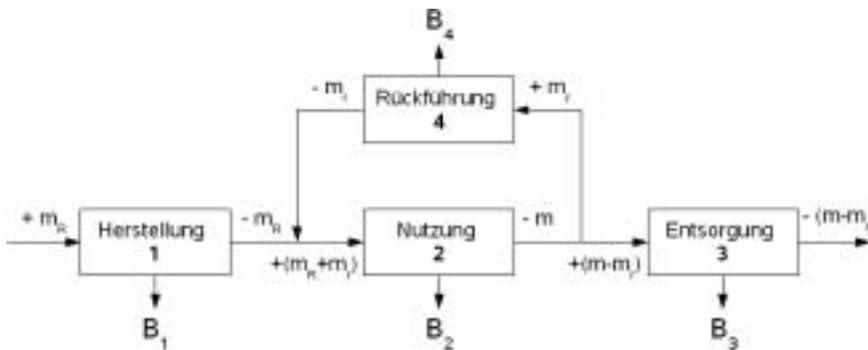


Abbildung 1: Kreislaufsystem bestehend aus vier Aktivitätsstufen (Modulen)

Um die Analyse übersichtlich zu halten, beschränkt sich die Betrachtung auf materielle Produkte, die auf der Nutzungsstufe durch ihre Masse  $m$  ausgedrückt werden. Dienstleistungen sind kein Gegenstand der Betrachtung. Bei allen vier Hauptaktivitäten im System soll bei Umwandlungsprozessen kein Massenverlust auftreten. Natürliche Rohstoffe mit der Masse  $m_R$  werden daher im Modul „Herstellung“ zu Produkten mit der selbem Masse  $m_R$  umgewandelt. Mit dem Umwandlungsprozess ist eine Belastung  $B_1$  verbunden, die je nach Gegenstand einer Untersuchung vorab unterschiedlich definiert werden kann. Beispielsweise kann darunter der Energieverbrauch, die Emissionsmenge von Kohlendioxid, die Masse der Deponieabfälle usf. verstanden werden.

Die Größe der Massenflüsse und die Bezeichnung der damit verbundenen Belastungen gehen aus Abbildung 1 hervor. Der Anteil der Masse  $m$ , die rückgeführt wird, trägt die Bezeichnung  $m_r$  und ist über den Rückführungsgrad  $r$  mit der Masse  $m$  verknüpft. Für den Rückführungsgrad gilt  $0 \leq r \leq 1$ . Die Beziehungen sind nachfolgend aufgeführt.

$$\begin{aligned} m &= m_R + m_r \\ m_r &= r m \\ m_R &= (1 - r) m \end{aligned} \quad (1)$$

Die Systembelastung in Bezug auf die Masse  $m$ , welche die Nutzungsphase kennzeichnet, wird als interne oder *innere Systembelastung*  $B_{int}$  bezeichnet, wobei unter  $\beta$  die massenbezogene spezifische Belastung verstanden wird.

$$B_{int} = m \{ \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + [ \beta_4 - (\beta_1 + \beta_3) ] r \} \quad (2)$$

Drückt man die Masse  $m$  der Nutzenphase mit Hilfe der Ressourcenmasse  $m_R$  nach Gleichung (1) aus, so erhält man die Gleichung für die sogenannte externe oder *äussere*

Systembelastung  $B_{ext}$ :

$$B_{ext} = m_R \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + [\beta_4 - (\beta_1 + \beta_3)]r}{1 - r} \quad (3)$$

Dieser Ausdruck beschreibt, wie sich das Gesamtsystem aus Sicht der Masse  $m_R$  der beanspruchten Ressourcen verhält. Durch entsprechendes Umstellen der Glieder in beiden Gleichungen lassen sich die innere und äussere Systembelastung auch in folgender Weise schreiben.

$$B_{int} = [\beta_2 + (\beta_1 + \beta_3)(1 - r) + \beta_4 r] \cdot m \quad (4)$$

$$B_{ext} = \frac{\beta_2 + (\beta_1 + \beta_3)(1 - r) + \beta_4 r}{1 - r} \cdot m_R \quad (5)$$

Beide Gleichungen unterscheiden sich formal im Quotienten  $(1 - r)$ , mit dem der Unterschied zwischen  $m$  und  $m_R$  berücksichtigt wird. Der Klammerausdruck in Gleichung (4) ist identisch mit dem Zähler von Gleichung (5). Dieser Ausdruck spiegelt das für die weitere Untersuchung bedeutsame Systemverhalten wider. Das Glied  $\beta_2$  steht für die spezifische Belastung auf der Nutzungsstufe 2. Die daraus resultierende Gesamtbelastung wächst linear mit der bewegten Masse  $m$  im System. Die Summe  $(\beta_1 + \beta_3)$  steht für die Belastungen bei Herstellung und Entsorgung. Mit zunehmendem Massenrückführungsgrad  $r$  wird das Produkt  $(\beta_1 + \beta_3) \cdot (1 - r)$  kleiner und der Einfluss dieses Gliedes auf die Gesamtbelastung entsprechend geringer. Im Gegensatz dazu gewinnt das Glied  $\beta_4 r$  an Gewicht, d.h. die Belastungen im Zuge der Materialrückführung erhalten größere Bedeutung. – Fazit: die Gleichungen (4) und (5) beschreiben hinsichtlich der generierten Belastungen das Systemverhalten in erwarteter Weise.

Massenflüsse dienen in der Industriegesellschaft dazu, Werte aus der imaginären Dimension menschlicher Vorstellungen in der physikalisch-chemisch beschreibbaren Raumzeitdimension in Erscheinung treten zu lassen. Vereinfacht ausgedrückt: eine imaginäre Größe wird auf eine reale Größe abgebildet. In Anlehnung an die Interpretationweise von monetären Flüssen in der Volkswirtschaft<sup>3)</sup> erweitern wir das bisherige einfache Modellsystem um einige notwendige Größen wie in Abbildung 2 gezeigt.

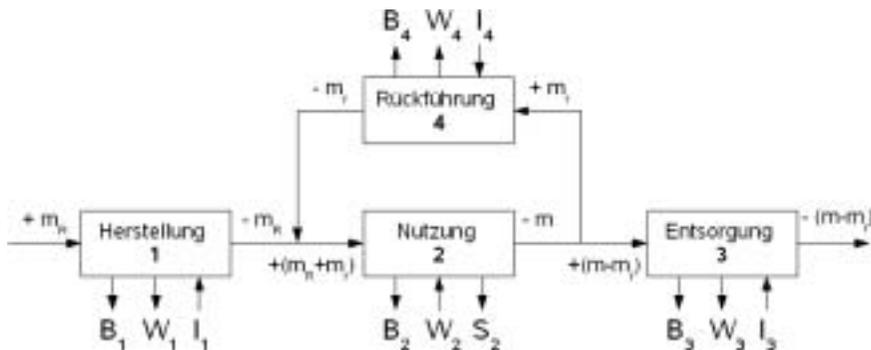


Abbildung 2: Ergänztes Kreislaufsystem mit monetären Größen

Die Systemmodule 1, 3 und 4 verkörpern Aktivitäten von Unternehmen. Diese Aktivitäten rufen die Belastungen  $B_1$ ,  $B_3$  und  $B_4$  hervor, deren Natur prinzipiell nicht vorgegeben ist, zu Beginn einer konkreten Untersuchung jedoch festgelegt werden muss. Dieser Vorgang wird

ausführlich in der Normenreihe ISO14040ff. beschrieben. Davon ist auch die Nutzungsphase 2 nicht ausgenommen.

Die Unternehmen generieren die Werte  $W_1$ ,  $W_3$  und  $W_4$ , die vollständig als Löhne und Gehälter (engl. *wages*) an die Beschäftigten ausgezahlt werden. Die Summe dieser Werte steht den Haushalten auf der Nutzungsstufe für den Konsum zur Verfügung. Unternehmen erzielen Einnahmen durch unternehmerische Aktivitäten, die zu Produkten führen und mit den Preisen  $p_1$ ,  $p_3$  und  $p_4$  bewertet sind. Darüber hinaus fließen den Unternehmen die Geldbeträge  $I_1$ ,  $I_3$  und  $I_4$  für Investitionen zu. Die Investitionsgelder stammen aus den Ersparnissen  $S_2$  der Haushalte. Es soll weder ein Bankensystem existieren, Gelder verzinst noch sollen Investitionsgewinne erzielt werden. Jeder Haushalt ist sein eigener Investor. Mit diesen Vorgaben lassen sich die monetären Flüsse mit den Massenflüssen in folgender Weise verknüpfen:

$$\begin{aligned} W_1 &= p_1 m_R + I_1 \\ W_3 &= p_3 (1 - r) m + I_3 \\ W_4 &= p_4 m_r + I_4 \end{aligned}$$

Die Summe der Löhne und Gehälter fließt den Haushalten zu, d.h.

$$W_2 = W_1 + W_3 + W_4 .$$

Damit wird

$$W_2 = p_1 m_R + I_1 + p_3 (1 - r) m + I_3 + p_4 m_r + I_4 .$$

Die Investitionen kommen aus den Ersparnissen der Haushalte, so dass sich schreiben lässt:

$$S_2 = I_1 + I_3 + I_4$$

Damit erhält man

$$W_2 = p_1 m_R + p_3 (1 - r) m + p_4 m_r + S_2 .$$

Die Substitution von  $m_R$  und  $m_r$  durch  $m$  ergibt die Gleichung

$$(W_2 - S_2)_{int} = [(p_1 + p_3)(1 - r) + p_4 r] \cdot m , \quad (6)$$

die das konsumierte Einkommen ( $W_2 - S_2$ ) in Abhängigkeit von Massenfluss, Preisen und Rückführungsgrad bei innerer Systembetrachtung darstellt. In entsprechender Weise erhält man durch Ersetzen von  $m$  durch  $m_R$  das konsumierte Einkommen bei äußerer Systembetrachtung:

$$(W_2 - S_2)_{ext} = \frac{(p_1 + p_3)(1 - r) + p_4 r}{1 - r} \cdot m_R . \quad (7)$$

Mit Hilfe der Gleichungen 4 und 5 für die Systembelastungen sowie 6 und 7 für den Konsum, die jeweils die Abhängigkeit vom Massenfluss darstellen, lässt sich mittels der jeweils korrespondierenden Gleichungen die Systembelastung als Funktion des Konsums ausdrücken. Die Gleichungen 4 und 6 sowie 5 und 7 liefern das selbe Ergebnis, nämlich die wichtige Beziehung

$$B = \frac{\beta_2 + (\beta_1 + \beta_3)(1 - r) + \beta_4 r}{(p_1 + p_3)(1 - r) + p_4 r} \cdot (W_2 - S_2) \quad (8)$$

Durch Eliminieren des Massenflusses verschwindet die Differenzierung der Systembelastung nach  $B_{int}$  und  $B_{ext}$ . Die durch den Rückführungsgrad beeinflussten Belastungen sind im Zähler die spezifischen Belastungen  $(\beta_1 + \beta_3)$  und  $\beta_4$ . Diese Belastungen spiegeln den Stand der technologischen Entwicklung auf den Stufen Herstellung 1 und Entsorgung 3 sowie Massen-

rückführung 4 wider. Durch den Rückführungsgrad werden diese gegenläufig gewichtet. Der selbe Zusammenhang findet sich im Nenner wieder. Hier erfahren jedoch die Preise für die drei Operationen eine Wichtung. Als Unterschied zum Nenner ist im Zähler als weiteres Glied die spezifische Belastung  $\beta_2$  der Nutzungsstufe 2 enthalten.

### 3 Rückführungsgrad und Systemverhalten

Die durch das Gesamtsystem hervorgerufene Belastung  $B$  wird durch den Stand der technologischen Entwicklung  $\beta_1$  bis  $\beta_4$ , den Preisen  $p_1$  bis  $p_4$ , der Summe von Löhnen und Gehältern  $W_2$  sowie den Ersparnissen  $S_2$  (alias Investitionen) bestimmt. Für die Belastungen  $B_0$  und  $B_1$  unter den Grenzbedingungen  $r = 0$  und  $r = 1$  ergibt sich

$$B_0 = \frac{\beta_1 + \beta_2 + \beta_3}{p_1 + p_2} \cdot (W_2 - S_2) \quad (9)$$

$$B_1 = \frac{\beta_2 + \beta_4}{p_4} \cdot (W_2 - S_2) \quad (10)$$

Das jeweilige Ergebnis ist plausibel und daher nicht überraschend. Zu beachten ist, dass in beiden Grenzfällen zwar eine Belastung auf der Nutzungsstufe auftritt, dieser jedoch kein Preis gegenübersteht. Auch das ist einsichtig. Die Nutzung des privaten Autos für einen Wochenendausflug ruft zweifelsohne Belastungen in Form von beispielsweise Abgasen hervor. Der Nutzer als Konsument stellt anderen gegenüber jedoch keine Leistung zur Verfügung, die mit einem Preis versehen ist. Daher entfällt eine denkbare Variable  $p_2$ .

Weiterhin zeigen die Gleichungen (9) und (10), dass mit steigendem Konsum ( $W_2 - S_2$ ) die Belastung steigt. Bleibt das Ersparte  $S_2$  konstant und erhöhen sich die Löhne und Gehälter, dann wächst die Systembelastung ebenfalls. Umgekehrt sinkt die Systembelastung, wenn bei konstanten Löhnen und Gehältern das Ersparte wächst.

Will man daher bei steigendem Konsum die Systembelastung konstant halten, dann muss ein Weg gefunden werden, den Wert des Zählers in Gleichung (8) zu verkleinern und/oder den Wert des Nenners zu vergrößern. Das lässt sich durch technologische Verbesserung und/oder Erhöhung der Preise in Kombination mit einer gezielten Änderung des Massenrückführungsgrads  $r$  erreichen. Allerdings darf nicht ausser Acht gelassen werden, dass die Preise mit den Löhnen und Gehältern verknüpft sind und daher bestimmten Gesetzmäßigkeiten unterliegen. Diesen Zusammenhang vermag das Modell in Form von Gleichung (8) nicht wiederzugeben. Hierfür werden die Gleichungen (6) und (7) benötigt, wodurch die Massen  $m$  und  $m_R$  wieder ins Spiel kommen.

#### Unter welchen Bedingungen „Recycling“ sinnvoll ist

Die Verringerung der Belastung der Umwelt ist das Motiv der meisten Aktivitäten, das Recycling auf breiter Basis voranzubringen. Die Erfahrungen in der Praxis seit Anfang der neunziger Jahre haben gezeigt, dass „Recycling“ als solches kein Selbstläufer ist. Der Aufbau und der Unterhalt von weitflächigen Recyclingsystemen ist mit erheblichen Anstrengungen und Belastungen verbunden, von denen die Kosten häufig als erstes genannt werden.

Der Aufbau eines Recyclingsystems ist nichts anderes als eine Veränderung von Massenflüssen. Massen werden umgelenkt und rückgeführt, wobei der Anteil der rückgeführten Massen mit dem Rückführungsgrad  $r$  ausgedrückt werden kann. Es geht somit um die Beantwortung der Frage, welche Belastungsänderung  $\Delta B$  sich bei einer Änderung des Rückführungsgrads um den Betrag  $\Delta r$  ergibt. Der Grenzwert des Differenzenquotienten  $\Delta B / \Delta r$  ist der Differentialquotient  $dB/dr$  der Systembelastung. Differenzieren von Gleichung (8) nach  $r$  ergibt

$$\frac{dB}{dr} = \frac{(\beta_2 + \beta_4)(p_1 + p_3) - (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)p_4}{[(p_1 + p_3)(1 - r) + p_4 r]^2} \cdot (W_2 - S_2) \quad (11)$$

Diese Gleichung lässt sich wie folgt interpretieren:

Je höher das Konsumniveau ist, desto stärker macht sich eine Änderung der Systembelastung bei einer Änderung des Rückführungsgrades bemerkbar. Das ist plausibel.

Der Rückführungsgrad  $r$  steht nur im Nenner von Gleichung (11) und dort im Quadrat. Da für den Rückführungsgrad  $0 \leq r \leq 1$  gilt, werden die Preise  $(p_1 + p_3)$  und  $p_4$  durch den Wert  $r$  gegenläufig gewichtet, wobei sich das Resultat dieser Wichtung nicht linear, sondern reziprok parabolisch bemerkbar macht. Die Änderung des Rückführungsgrads bewirkt daher nicht notwendigerweise eine „sanfte“ Änderung der Systembelastungen.

Besondere Beachtung verdient der Zähler in Gleichung (11). Wird der Wert des Zählers negativ, dann sinkt die Systembelastung bei steigendem Rückführungsgrad. Das ist das Kredo aller, die für das Forcieren von Recyclingaktivitäten votieren. Diese Bedingung wird erfüllt, wenn  $(\beta_2 + \beta_4)(p_1 + p_3) < (\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)p_4$  eintritt. Nach landläufiger Vorstellung ist Recycling sinnvoll, wenn die spezifischen Belastungen in der Nutzungsphase und Recyclingstufe  $(\beta_2 + \beta_4)$  zusammengenommen kleiner sind als die Summe  $(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3)$  der spezifischen Belastungen auf den Stufen Herstellung, Nutzung und Entsorgung. Da in beiden Summen die Nutzungsphase auftaucht, genügt es, lediglich die Stufen Herstellung und Entsorgung mit der Recyclingstufe zu vergleichen. Das ist die Lehrmeinung, die sich als Ergebnis von Ökobilanzen auf Grundlage der Norm ISO 14041 verfestigt hat.

Gleichung (11) hingegen lehrt etwas überraschend neues. Es dürfen nicht die spezifischen Belastungen der betreffenden Stufen als solche miteinander verglichen werden, sondern die Produkte aus den spezifischen Belastungen mit den Preisen sind zu vergleichen. Dieses Resultat kommt jedem entgegen, der wirtschaftlich zu denken gewohnt ist. Allerdings, und hier wartet die eigentliche Überraschung, es sind *nicht* die korrespondierenden Preise der jeweiligen Stufen, sondern die Preise der „Wettbewerbsstufen“, d.h. die Summe (!) der spezifischen Belastungen von Nutzungsstufe und Recyclingstufe sind mit der Summe (!) der Preise von Herstellstufe und Entsorgungsstufe zu multiplizieren und die Summe der spezifischen Belastungen auf den Stufen Herstellung, Nutzung und Entsorgung mit dem Preis der Recyclingstufe.

## 4 Zusammenfassung

An einem einfachen System bestehend aus den Aktivitäten Herstellung 1, Nutzung 2, Entsorgung 3 und Rückführung (Recycling) 4 wurde gezeigt, wie die mit diesen Aktivitäten verbundenen spezifischen Belastungen und Preise mit den Massenflüssen als Bezugsgröße in Abhängigkeit von Rückführungsgrad und Konsum die Gesamtbelastung des Systems bestimmen.

Im Gegensatz zur landläufigen Auffassung, wonach die Entscheidung für oder gegen eine Massenrückführung (Recycling) anhand eines Vergleichs der spezifischen Belastungen auf den Stufen Herstellung und Entsorgung mit jener auf der Rückführungsstufe (Recyclingstufe) gefällt werden muss, kommt die vorliegende Untersuchung zu einem differenzierterem Ergebnis.

**Die Änderung der Belastung des Gesamtsystems als Antwort auf eine Änderung des Rückführungsgrads (Recyclingsgrads) ist abhängig von der Höhe des Konsums, dem reziproken Wert des Quadrats des Rückführungsgrads sowie der Differenz der mathematischen Produkte aus der Summe der spezifischen Belastungen mit der Summe der Preise der jeweils konkurrierenden Alternativen.**

Aufgrund dieser wechselseitigen Abhängigkeiten und Einflüsse von spezifischen Belastungen und Preisen auf die Änderung der Belastung des Gesamtsystems bei Änderung des Massenrückführungsgrades darf mit Fug und Recht behauptet werden, dass ein rein werkstoffbezogener Umweltindikator nicht ausreicht, die Vorteilhaftigkeit eines Werkstoffs gegenüber einem anderen zu begründen. Es wird sich nicht vermeiden lassen, sowohl den technologischen als auch wirtschaftlichen Kontext einzubeziehen, in dessen Rahmen ein Werkstoff verwendet wird, sofern die Absicht besteht, in Hinsicht auf eine umweltberücksichtigende nachhaltige Entwicklung<sup>2,4)</sup> keine gravierenden Fehlentscheidungen zu treffen.

### Literatur

- 1) Karl-Heinz Feuerherd. Algebraische Untersuchung von Ressourcenbelastungen durch Massenflüsse in einem System mit Massenrückführung bei verlustfreien Prozessausbeuten. Research Note 06-05, Kobe Yamate University, 2006.
- 2) Friedrich Schmidt-Bleek. *Wieviel Umwelt braucht der Mensch? Faktor 10 - das Maß für ökologisches Wirtschaften*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1997.
- 3) Alfred Stobbe. *Volkswirtschaftliches Rechnungswesen*. Springer-Verlag, Heidelberg, 1972.
- 4) Ernst Ulrich Von Weizsäcker, Amory B. Lovins, and L. Hunter Lovins. *Faktor vier – Doppelter Wohlstand, halbiertes Verbrauch, Der neue Bericht an den Club of Rome*. Droemersch Verlagsanstalt Th. Knauer Nachf., München, 1995.