

## Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen anhand von Stoffflussanalysen

Michael Eder, Gernot Döberl, Renate Huber, Paul H. Brunner, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Technische Universität Wien

In der Studie BEWEND „Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie“ wurden ausgewählte abfallwirtschaftliche Maßnahmenfälle im Hinblick auf die Ziele der Abfallwirtschaft bewertet. Dazu wurde eine neue, auf Stoffflussanalysen und ökonomischen Bewertungsverfahren basierende Methode entwickelt. Besonderes Augenmerk wurde auf die langfristigen Auswirkungen unterschiedlicher Behandlungsoptionen gelegt. Die verschiedenen Maßnahmenfälle wurden anhand von Güter- und Stoffflussanalysen abgebildet. Mit Hilfe einer Kosten-Nutzen-Analyse sowie einer modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse wurden die kurz-, mittel- und langfristigen Stoffflüsse bewertet. Die Ergebnisse beider Bewertungsmethoden zeigen die langfristige Vorteilhaftigkeit thermischer Verfahren gegenüber der Deponierung unbehandelter wie auch mechanisch-biologisch vorbehandelter Abfälle.

### 1 Einleitung

Im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz (AWG 1990) ist als wesentliches Ziel festgeschrieben, dass „nur solche Stoffe als Abfälle zurückbleiben, deren Ablagerung kein Gefährdungspotenzial für nachfolgende Generationen darstellt (Vorsorgeprinzip)“. Dieses Prinzip bedingt, dass unsere heutigen Deponien durch so genannte Endlager ersetzt werden müssen. Das Hauptziel des Endlagerkonzepts ist die „nachsorgefreie Deponie“, die nach Abschluss der Ablagerung nicht mehr betreut werden muss. Das Endlagerkonzept beruht auf drei Schranken zwischen der Deponie und der Umwelt: künstlichen Abdichtungsmaßnahmen, einer geologischen Barriere und, als wichtigster Barriere, dem Deponiematerial selbst. Langfristig kann die Deponie nicht von der Atmosphäre und vom Wasserpfad abgeschlossen werden, daher ist das Hauptaugenmerk auf die

Immobilisierung des Abfalls zu legen. In Zukunft sollen nur noch Abfälle mit „Endlagerqualität“ abgelagert werden, das sind Abfälle, die auch über lange Zeiträume nur umweltverträgliche, die natürlichen Stoffflüsse nicht wesentlich verändernden Emissionen abgeben.

Die Erfüllung des Vorsorgeprinzips bedingt die Optimierung der Zuordnung von Stoffen zu geeigneten letzten Senken. Das Neue an der hier beschriebenen Arbeit ist, dass Stoffflüsse über zum Teil sehr lange Zeiträume bis zur letzten Senke betrachtet werden.

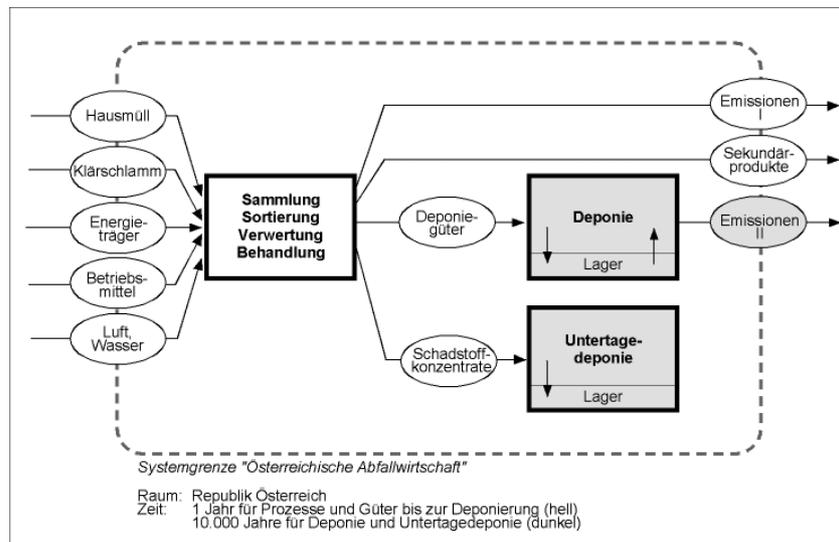
### 2 Systemdefinition

Der gegenständlichen Arbeit liegt eine systemische Betrachtung der Abfallwirtschaft Österreichs anhand der Methode der Stoffflussanalyse (Baccini, Brunner 1991) zugrunde. Elemente des Systems (Abb. 1) sind Prozesse, Güter- und Stoffflüsse und -lager. Jeder Prozess wird bilanziert. Er entspricht einer konkreten Anlage oder auch einer Summe aus verschiedenen Anlagentypen. Innerhalb des Systems werden für Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen sowie für kommunalen Klärschlamm sämtliche Güter-, Energie- und Geldflüsse sowie ausgewählte Emissionen abgebildet. Folgende acht ausgewählten Stoffe und deren für die modellierten Prozesse wesentlichen Verbindungen werden analysiert: Kohlenstoff, Stickstoff, Schwefel, Chlor, Quecksilber, Cadmium, Blei und Zink. In einem zeitlich und räumlich exakt abgegrenzten System werden alle auftretenden Import-, Export-, Input- und Outputflüsse von Gütern und Stoffen quantifiziert und die Prozesse innerhalb dieses Systems bilanziert. Bei der Bilanzierung wird das Massenerhaltungsgesetz berücksichtigt.

Die abfallwirtschaftlichen Prozesse sind zu den Subsystemen Sammlung, Sortierung, Verwertung, Behandlung sowie dem Subsystem Deponierung zusammengefasst.

Ausgangspunkt der Modellierung ist ein bereits früher erarbeitetes Berechnungsmodell (GUA, IFIP 1998). Dieses Modell kann für den Bereich der Systemabfälle alle relevanten abfallwirtschaftlichen Prozesse bis zur Übernahme auf Deponien abbilden (Sammlung, Sortierung, Verwertung, Behandlung und Ermittlung der zu deponierenden Mengen). Für die hier beschriebene Arbeit wurde es in mehreren

Abb. 1: Überblick über das betrachtete System



Punkten erheblich erweitert und ausgebaut. Vor allem die Beschreibung des Deponieverhaltens über lange Zeiträume und die detailliertere Modellierung von thermischen und mechanisch-biologischen Verfahren ist hier hervorzuheben. Als Systemimporte werden Abfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen sowie kommunaler Klärschlamm betrachtet. Als Systemexporte treten Emissionen aus allen betrachteten Prozessen und Sekundärprodukte auf. Die Deponiekörper verbleiben im System. Sie werden als „Lager“ betrachtet, in denen Stoffe zuerst akkumuliert und im Laufe der Zeit in veränderter Form als Emissionen wieder an die Umwelt abgegeben werden.

Für jeden Prozess wird eine vollständige Energiebilanz durchgeführt, deren Ergebnis als Aufwand und Gewinn ausgewiesen wird. Analog zur Vorgangsweise bei den Emissionen wird auch hier die Substitution von Energieträgern berücksichtigt.

### 3 Betrachtete Maßnahmenfälle

Für die Prozesse vor der Deponierung werden die in der Tabelle 1 angeführten Maßnahmenfälle festgelegt, die bedingt durch einen jeweils unterschiedlichen Behandlungsaufwand eine bestimmte ökologische Qualität des abzulagernden Materials gewährleisten. Den Systemimport für alle zur Diskussion stehenden Maß-

nahmenfälle bilden identische Abfallmengen und -zusammensetzungen. Um die Unterschiede zwischen den Maßnahmenfällen klarer analysieren zu können, wird das Subsystem Verwertung im Wesentlichen konstant gehalten. Die Güter- und Energiebilanzen der Maßnahmenfälle liefern als Resultat die Eingangsparmeter für die anschließende Deponierung.

Tab. 1: Festlegung der Maßnahmenfälle

Maßnahmenfall		Kurzname
Status-quo-Fortschreibung (Planungsnullfall)		P0
Keine Vorbehandlung, Direktdeponierung		M1
Maximum thermische Behandlung	Rostfeuerung ohne Nachbehandlung der Reststoffe	M2a
	Rostfeuerung mit Zementverfestigung der Reststoffe	M2b
	Hochtemperatur-Schmelz-Redox-Verfahren	M2c
Maximum mechanisch-biologische Behandlung	Leichtfraktion in industrielle Wirbelschicht	M3a
	Leichtfraktion in Zementdrehrohr	M3b
	höherkalorischer Teil der Schwerfraktion in MVA, Leichtfraktion wie M3a	M3c
	höherkalorischer Teil der Schwerfraktion in MVA, Leichtfraktion wie M3b	M3d

#### 4 Subsysteme vor der Deponierung

Vor der Deponierung wurden Prozesse in unterschiedlichen Subsystemen modelliert und bilanziert. Tabelle 2 zeigt die in den Subsystemen Sortierung, Verwertung und Behandlung berücksichtigten Prozesse.

**Tab. 2: Prozesse der Subsysteme Sortierung, Verwertung und Behandlung**

<i>Subsystem</i>	<i>Prozess</i>	<i>Anlagenkapazität</i>
Sortierung	Sortierung Papier	25.000 t/a
	Sortierung Leichtverpackungen	150.000, 300.000 m <sup>3</sup> /a
	Sortierung Metallverpackungen	150.000, 300.000 m <sup>3</sup> /a
	Sortierung Sperrmüll	150.000, 300.000 m <sup>3</sup> /a
	Sortierung Glas	150.000 t/a
	Sortierung Textilien	3.000 t/a
Verwertung	Stoffliche Verwertung Papier	370.000 t/a
	Landwirtschaftliche Kompostierung	5.000, 10.000, 20.000 t/a
	Low-Tech Kompostierung	5.000, 10.000 t/a
	High-Tech Kompostierung	20.000 t/a
	Anaerobes Verfahren	15.000, 40.000 t/a
	Stoffliche Verwertung Kunststoffe	5.400 t/a
	Stoffliche Verwertung NE-Metalle	34.400 t/a
	Stoffliche Verwertung Fe-Metalle	337.500 t/a
	Verwertung Glas	56.700 t/a
Behandlung	Mechanische Trennung	80.000 t/a
	Biologische Behandlung	48.000 t/a
	Wirbelschicht Klärschlamm	60 MW
	Zementdrehrohr	24.000 t/a
	Wirbelschicht	60 MW
	Rostfeuerung ohne integrierte Nachbehandlung	60.000, 150.000, 300.000 t/a
	Rostfeuerung mit Zementverfestigung	60.000, 150.000, 300.000 t/a
	Hochtemperatur-Schmelz-Redox-Verfahren	67.500, 150.000, 300.000 t/a

## 5 Subsystem Deponierung

Im Subsystem Deponierung werden die Mengen der abzulagernden „Reststoffe“ aus den vorangehenden Subsystemen übernommen und den in Tabelle 3 angegebenen Deponietypen zugeordnet.

schlagsmenge für Österreich und einer durchschnittlichen jährlichen Evapotranspirationsrate für rekultivierte Deponieoberflächen angenommen.

- Die Funktionstüchtigkeit von technischen Einrichtungen, Oberflächen- und Basisabdichtungen wird mit 100 Jahren begrenzt,

**Tab. 3: Zuordnung der zu deponierenden Güter zu den Deponietypen**

Art der Vorbehandlung		Gut	Deponietyp
Keine Vorbehandlung		Restmüll	„Restmülldeponie“
		Kommunaler Klärschlamm	„Klärschlammdeponie“
Thermische Verfahren	Konventionelle Rostfeuerung	Schlacke & Filterasche	Reststoffdeponie
		MVA-Filterkuchen	Untertagedeponie
	Rostfeuerung mit Zementverfestigung	Schlacke & Filterasche verfestigt	Reststoffdeponie
		MVA-Filterkuchen	Untertagedeponie
	Hochtemperatur-Schmelz-Redox-Verfahren	Schmelzgranulat	Reststoffdeponie
		Schwermetallkonzentrat	Untertagedeponie
		Gipskuchen	Baurestmassendeponie
	Wirbelschichtfeuerung	Asche & Schlacke der Wirbelschicht	Reststoffdeponie
		Filterkuchen der Wirbelschicht	Untertagedeponie
		Gipskuchen der Wirbelschicht	Baurestmassendeponie
	Zementdrehrohrofen	Klinker – Betonabbruch *	Baurestmassendeponie
	Mechanisch-biologische Verfahren (Restmüllsplitting)		Rottereststoff
Abfälle aus Sortierung & Verwertung		Abfall Eisenschmelze	– **
		Sortierabfälle (sofern nicht thermisch verwertet)	„Restmülldeponie“

\* Aus dem Klinker wird Zement und in weiterer Folge Beton hergestellt. Das aus diesem Beton hergestellte Gebäude hat (einschließlich Recycling) eine modellierte Lebensdauer von 500 Jahren (10x50 Jahre), danach wird der Abbruch auf einer Baurestmassendeponie abgelagert.

\*\* Da diese Abfälle aus dem Eisenrecycling in geringen Mengen und in allen Maßnahmenfällen in ähnlichen Mengen anfallen, werden sie in der Studie nicht weiter betrachtet.

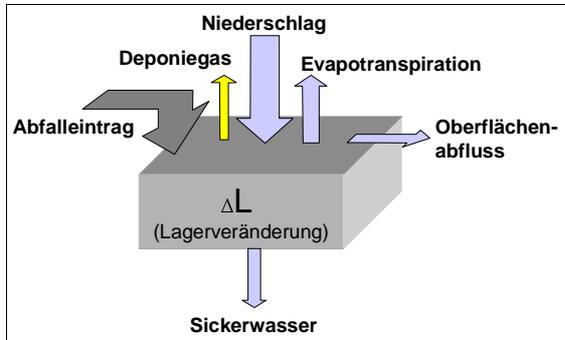
Zur Berechnung der Deponieemissionen über 10.000 Jahre werden ausschließlich Monodeponien betrachtet, die mit dem jeweiligen Gut verfüllt werden. Sämtliche Modelldeponien werden baulich nach Deponieverordnung (DeponieVO 1996) ausgeführt. Die Güterflüsse der verschiedenen Deponietypen sind Abbildung 2 zu entnehmen. Folgende Annahmen und Vereinfachungen wurden getroffen:

- Die mittel- und langfristig jährlich anfallende Sickerwassermenge wird als Differenz einer durchschnittlichen jährlichen Nieder-

ebenso die durchlässigkeithemmende Wirkung der geologischen Barriere. Die schwermetallbindende Funktion der geologischen Barriere im Sinne einer „geochemischen Barriere“ nimmt zwar in Abhängigkeit der Menge emittierter Metalle ab, bleibt aber prinzipiell über den gesamten Betrachtungszeitraum erhalten.

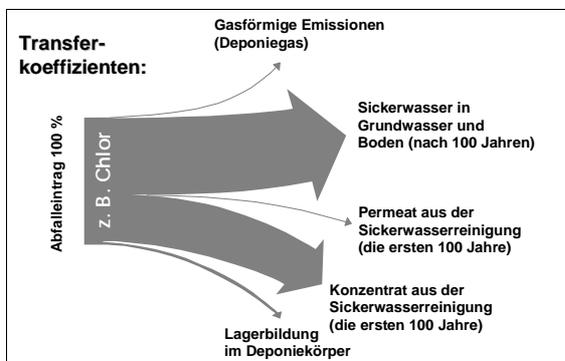
- Zur Beschreibung der Abbaureaktionen wird von einem homogen reagierenden Block ohne bevorzugte (präferentielle) Sickerwege ausgegangen.

**Abb. 2: Schematische Darstellung der Güterflüsse der Modelldeponien**



Die Berechnung der Deponieemissionen folgt einem in Brunner et al. (2001) näher beschriebenen Emissionsschema mittels aus der Literatur entnommenen und für den speziellen Zweck adaptierten Berechnungsmodellen. Für die Sickerwasseremissionen sind dies die Modelle von Belevi, Baccini (1989) bzw. das Emissionsschema aus AGW (1992), für die Gasemissionen das Modell von Marticorena et al. (1993). Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen, die Transferkoeffizienten in die jeweiligen Outputgüter, können wie in Abbildung 3 dargestellt werden. Der Transferkoeffizient  $k_{x,j}$  bezeichnet die Fraktion des gesamten in den Prozess eingeführten Stoffes  $x$ , die in das Outputgut  $j$  transferiert wird. Die Summe der Transferkoeffizienten aller Outputgüter muss immer 1 ergeben.

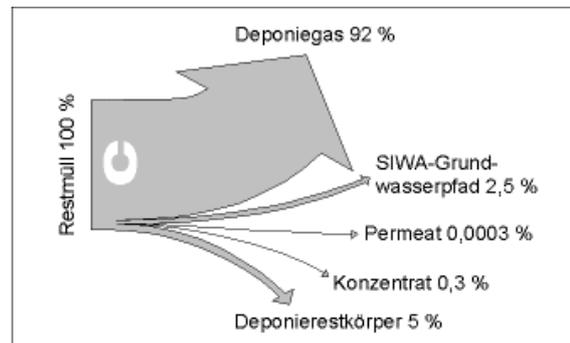
**Abb. 3: Darstellung der Transferkoeffizienten als Sankey-Diagramm für einen Prozess „Deponie“**



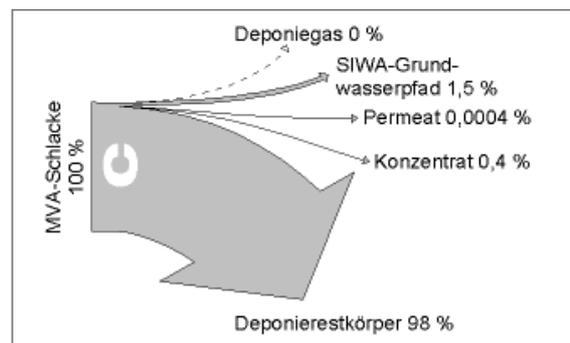
Die folgenden Abbildungen 4 und 5 zeigen beispielhaft die Transferkoeffizienten von Kohlen-

stoff in Restmüll- bzw. Schlackedeponien. Während in der Restmülldeponie im Laufe der Zeit über 90 % des Kohlenstoffs in Form von  $CH_4$  und  $CO_2$  als Deponiegas in die Atmosphäre gelangt, verbleibt bei der Schlackedeponie fast der gesamte Kohlenstoff im Deponiekörper. Zu beachten hierbei ist, dass die Kohlenstoffkonzentration im Restmüll wesentlich höher ist als die Kohlenstoffkonzentration in der Müllverbrennungsschlacke, d. h. die Kohlenstoffmenge, die im Schlackedeponiekörper verbleibt, ist dennoch wesentlich geringer als die Kohlenstoffmenge im Restmülldeponiekörper.

**Abb. 4: Berechnete Stoffverteilungen für die Outputgüter (Transferkoeffizienten) für Kohlenstoff in „Restmülldeponien“**



**Abb. 5: Berechnete Stoffverteilungen für die Outputgüter (Transferkoeffizienten) für Kohlenstoff in „MVA-Schlackedeponien“**



Berechnet wird auch die Verdünnung von Sickerwasseremissionen in einem hydrogeologisch genau definierten Grundwasserkörper sowie die Anreicherung von Schwermetallen im Deponieuntergrund (nach Versagen der

technischen Barrieren). Die jeweils berechneten Werte dienen der Definition eines eventuellen Sanierungs- oder Sicherungsbedarfes. Kosten und Zeitpunkt für diese Sanierungs- und Sicherungsmaßnahmen werden berechnet, zusätzlich auch die betriebswirtschaftlichen Kosten für die Planung, den Bau, den Betrieb und die Nachsorge der modellierten Deponien.

## 6 Bewertung der Stoffflüsse

Als Bewertungsverfahren wird einerseits eine volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) durchgeführt. Andererseits wurde eine neu entwickelte Methode, die „modifizierte Kosten-Wirksamkeits-Analyse“ (mKWA) angewandt. Als Haupteingangsdaten fungieren eine betriebswirtschaftliche Kostenbilanz, eine Güterbilanz, eine Emissionsbilanz sowie eine Energiebilanz der untersuchten Abfallbewirtschaftungsprozesse. Die Güterbilanz sowie die Emissionsbilanz sind die Ergebnisse der Stoffflussanalysen.

Aus der gewählten Bewertungsmethodik ergeben sich prinzipiell drei Möglichkeiten zur Quantifizierung von Entscheidungsindikatoren: Kosten-Nutzen-Saldo, Barwertrate und Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis.

Durch den gewählten Ansatz, der Anwendung beider Verfahren, besteht einerseits der Vorteil, dass für die gut monetarisierbaren Eingangsvariablen deren Wertigkeiten im Rahmen der KNA korrekt wiedergegeben werden können und andererseits die Möglichkeit, nicht von der KNA erfasste Effekte mittels der mKWA einbeziehen zu können.

Bei der KNA wurden die betriebswirtschaftlichen Kosten und die Kosten externer Effekte (z. B. Emissionen) den durch die Abfallbewirtschaftung induzierten Nutzeffekten (substituierte Primärgüter- und Primärenergieproduktion und deren externe Effekte) gegenübergestellt. Die Kosten-Nutzen-Saldi sowie die Barwertraten wurden als Grundlagen für die Reihung der untersuchten Fälle herangezogen. Monetarisiert wurden folgende externe Effekte: Emissionen von klassischen Luftschadstoffen und Treibhausgasen sowie Emissionen wasserverunreinigender Substanzen in Oberflächengewässer. Emissionen grundwasser- und bodenverunreinigender Substanzen gingen indirekt über die Kosten von Sicherungs- und/oder

Sanierungsmaßnahmen ein. Folgende Effekte erwiesen sich als nicht monetarisierbar (intangible Effekte): Emissionen von ozonabbauenden Substanzen, Dioxinen, Chlorid, Sulfat, Schwefelwasserstoff, Chlorwasserstoff und Ammoniak aufgrund fehlender Vermeidungskosten, Substitution von Primärrohstoffen durch einige Sekundärrohstoffe aufgrund fehlender Kostendaten (aufbereitete Problemstoffe, Gips, Reißtextilien etc.), die Dissipation (Verteilung von Stoffen in der Umwelt, ohne dass Grenzwerte überschritten werden), die Schonung von Ressourcen (Marktpreise für Rohstoffe und Zwischenprodukte bilden die langfristige Verfügbarkeit dieser Güter gar nicht oder zumindest nur unvollständig ab) und die Nachsorgefreiheit von Deponien (wird nur in geringem Ausmaß durch Sanierungskosten berücksichtigt).

Aufgrund des sehr langen Betrachtungszeitraumes, der Entsprechung des Vorsorgeprinzips (explizites Ziel im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz!) und der Nichtabschätzbarkeit des technischen Fortschritts, wurde für die Kosten-Nutzen-Analyse ein Diskontierungszinssatz von 0 gewählt.

Die mKWA stellt einerseits die Kosten eines Maßnahmenfalles dar, andererseits werden die Wirkungen hinsichtlich der Erreichung gesetzter Ziele nicht nur dargestellt, sondern, ähnlich wie bei der Nutzwertanalyse, zu einer Gesamtwirksamkeit zusammengeführt. Ergebnis der Berechnungen ist das Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis, anhand dessen eine Reihung der Maßnahmenfälle vorgenommen werden kann.

Grundlage für die mKWA bildet eine Zielhierarchie, die aus den Zielen des AWG (1990) abgeleitet wurde (siehe Tab. 4). Diese Ziele wurden von den Auftraggebern der Studie BEWEND und ihren Experten gewichtet, um die unterschiedliche „Wichtigkeit“ sowie gesellschaftliche Präferenzen mit einfließen zu lassen. Die Messung der Zielerreichung erfolgt mit Hilfe von integrativen Zielkriterien, wie z. B. Kohlendioxidäquivalente, CFC11-Äquivalente, kritische Wasser- und Bodenvolumina, verbrauchte Fläche, statistische Rohstoffverfügbarkeit, Stoffkonzentrierungseffizienz (SKE) und Energiemengen.

Für jedes Zielkriterium wird ein Sollwert festgelegt (jener Wert, der in der Abfallwirtschaft bei alleiniger Konzentration auf dieses

**Tab. 4: Darstellung des Zielsystems für die mKWA**

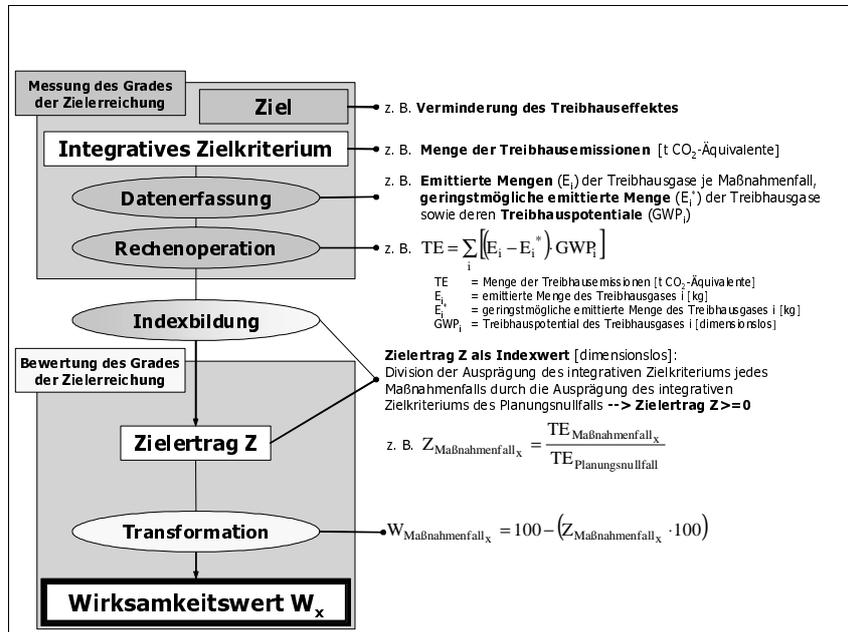
Ziele AWG	Unterziele	Konkrete Unterziele
Schutz des Menschen und der Umwelt	Erhaltung der Luftqualität	Verminderung von Schäden durch regional wirkende Schadstoffe
		Verminderung des Treibhauseffekts
		Verminderung von Schäden an der Ozonschicht
	Erhaltung der Wasserqualität	Verträglichkeit von Immissionen in Oberflächengewässern (Fließgewässern)
		Verträglichkeit von Immissionen in Grundwässern
	Erhaltung der Bodenqualität	Verträglichkeit der Schadstoffanreicherung in Oberflächenböden
Verträglichkeit der Schadstoffanreicherung in tiefen Bodenschichten		
Schonung der Ressourcen	Schonung der Ressource Fläche	Minimierung des Flächenbedarfs für Deponien
	Schonung stofflicher Ressourcen zur Produktgewinnung (Rohstoffe)	Minimierung des Ressourcenverbrauchs durch hohen Grad stofflicher Verwertung
		Maximierung der Schaffung neuer Ressourcen
Schonung materieller Ressourcen zur Energiegewinnung	Saldo der Energiemengen aus den Zielen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Substitution von Primärenergieträgern durch Energieträger der Abfallwirtschaft</li> <li>• Minimierung des Energieeinsatzes für die Abfallbewirtschaftung</li> <li>• Minimierung des Einsatzes von Energieträgern bei der Primärproduktion durch den Einsatz von Abfällen bei der Sekundärproduktion</li> </ul>	
Nachsorgefreiheit von Deponien (Vorsorgeprinzip)	Langfristige Verträglichkeit der Stoffflüsse in die Umwelt	Minimierung des langfristigen Reaktionspotenzials und der langfristigen Schadstoffverfügbarkeit im Deponiekörper
		Minimierung der Schadstoffmenge im Deponiekörper
		Zuordnung unterschiedlicher Abfallarten zu den jeweils geeigneten Deponietypen

eine Ziel erreicht würde) und in der Folge der Grad der Zielerreichung des jeweils betrachteten Maßnahmenfalls ermittelt. Daraus ergibt sich der Zielertrag, der den Bezug zum Planungsnullfall herstellt und der in den Wirksamkeitswert transformiert wird (siehe Abb. 6). Die Wirksamkeitswerte eines Maßnahmenfalles werden auf der Ebene der Unterziele aggregiert und dort gewichtet. Die Summe der gewichteten Wirksamkeitswerte wird zu einem maßnahmenfall-

bezogenen Gesamtwirksamkeitswert transformiert, die Kosten des Maßnahmenfalles auf die Kosten des Planungsnullfalles normiert und je Maßnahmenfall ein Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis ermittelt.

Der Einfluss der bei beiden Bewertungsmethoden zu treffenden Annahmen wurde im Rahmen von umfangreichen Sensitivitätsanalysen untersucht.

Abb. 6: Darstellung der Methodik der Wirksamkeitsmessung im Rahmen der modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse



7 Ergebnisse

Generell lässt sich feststellen (Tab. 5), dass, unabhängig von der Bewertungsmethode KNA (Abb. 7) oder mKWA (Abb. 8), die Gruppe der thermischen Maßnahmenfälle M2 in allen Reihungen die ersten Plätze einnimmt. Danach folgen die mechanisch-biologischen Maßnahmenfälle M3d, 3c und 3b. Der Maßnahmenfall M1 (Deponierung ohne Vorbehandlung) ist in jedem Fall der schlechteste, Maßnahmenfall 3a liegt zweimal vor, einmal hinter dem Planungsnullfall.

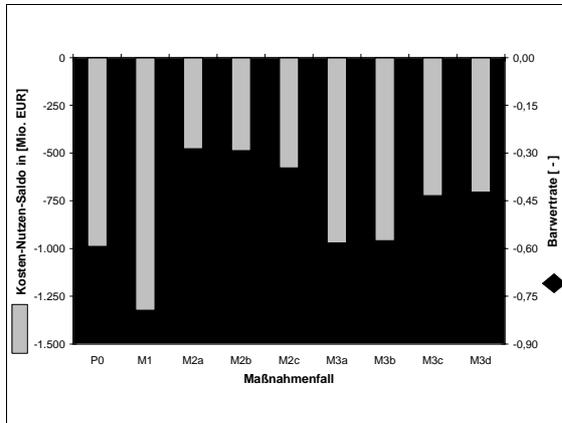
Innerhalb der thermischen Maßnahmenfälle M2 weicht das Ergebnis der mKWA von dem Ergebnis der KNA ab, auf Basis der mKWA liegt Maßnahmenfall M2c vor Maßnahmenfall M2a und Maßnahmenfall M2b, auf Basis der KNA dominiert Maßnahmenfall M2a die Maßnahmenfälle M2b und 2c.

Aufgrund dessen, dass in der Kosten-Nutzen-Analyse vor allem Emissionen in Grundwasser und Böden nicht bzw. nur in Form von allfällig auftretenden Sanierungskosten berücksichtigt wurden und Immissionen, die unter festgelegten Grenzwerten liegen, nicht bewertet werden konnten, wird das Ergebnis der mKWA als das „vollständigere“ Ergebnis angesehen.

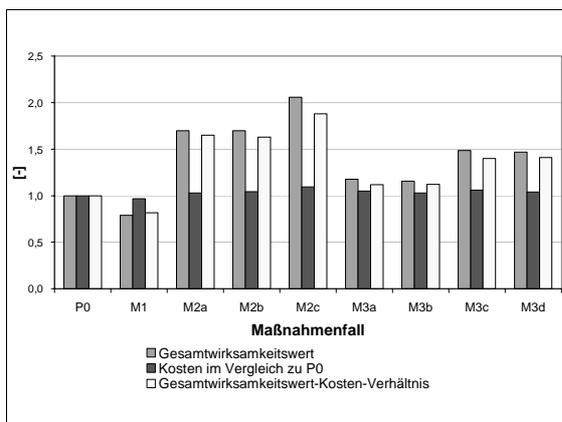
Tab. 5: Reihung der Maßnahmenfälle auf Basis der mKWA und der KNA

Fall	P0	M1	M2a	M2b	M2c	M3a	M3b	M3c	M3d
Reihung auf Basis der mKWA	8	9	2	3	1	7	6	5	4
Reihung auf Basis des Kosten-Nutzen-Saldos	8	9	1	2	3	7	6	5	4
Reihung auf Basis der Barwertrate	7	9	1	2	3	8	6	5	4

**Abb. 7: Ergebnis der Kosten-Nutzen-Analyse: Kosten-Nutzen-Saldo und Barwertrate**



**Abb. 8: Ergebnis der modifizierten Kosten-Wirksamkeitsanalyse: Gesamtwirksamkeitswert, auf den Planungsnullfall normierte Kosten und Gesamtwirksamkeitswert-Kosten-Verhältnis**



## 8 Schlussfolgerungen

*Abfallwirtschaftliche Folgerungen:* Den Zielen der österreichischen Abfallwirtschaft am nächsten kommt das untersuchte Hochtemperatur-Schmelz-Redox-Verfahren, eng gefolgt von den klassischen thermischen Verfahren. Mechanisch-biologische Kombinationen erwiesen sich zwar der direkten Deponierung überlegen, konnten jedoch bezüglich Zielerfüllung nicht mit den thermischen Verfahren mithalten. Hauptverantwortlich für diese Reihung ist die Mitberücksichtigung langer Zeiträume (Nachsorgephase).

*Methodische Folgerungen:* Anhand der Kosten-Nutzen-Analyse und der modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse können die mit

der Stoffflussanalyse ermittelten Stoffflüsse bewertet werden. Ziel dieser Bewertung ist es, Grundlagen für Entscheidungen zur Verfahrensauswahl in der Abfallwirtschaft bereitzustellen, d.h. die Frage zu beantworten, welche Maßnahmen den Zielen des Abfallwirtschaftsgesetzes am nächsten kommen.

Die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) dient vor allem zur Beantwortung der Fragen, ob ein Projekt, und wenn ja, welche Projektalternative, realisiert werden soll. Hierbei werden nicht nur mit Marktpreisen bewertete Kosten- und Nutzenkomponenten, sondern auch durch die Individuen bereits implizit bewertete Güter miteinbezogen. Gelingt es, alle Kosten- und Nutzenströme, die durch ein Projekt hervorgerufen werden, zu monetarisieren, ist das Ergebnis der KNA sehr gut geeignet, zu beurteilen, ob ein Projekt durchgeführt werden soll. Übersteigen die Nutzen, die ein Projekt stiftet, die Kosten desselben oder einer Alternative, ist dieses Projekt positiv zu bewerten.

Obwohl die Ergebnisse aus der Kosten-Nutzen-Analyse und der modifizierten Kosten-Wirksamkeits-Analyse (mKWA) in ihren Grundaussagen im vorliegenden Fall zum gleichen Ergebnis kommen (Bevorzugung von Verbrennungsverfahren), kann daraus nicht geschlossen werden, dass beide Methoden im gegenständlichen Projekt als gleichwertig anzusehen sind. Die KNA konnte viele relevante externe Effekte nicht berücksichtigen. Als Alternative zur KNA bieten sich Verfahren wie die mKWA an, die geeignet sind, auf einer nicht-monetären Basis ein Projekt zu bewerten. Es werden aus den im Abfallwirtschaftsgesetz vorgegebenen Zielen Unterziele entwickelt, welche messbare Bewertungsgrößen besitzen. Die anschließend erfolgende Gewichtung ermöglicht eine Aggregation bis hin zur obersten Zielebene, im vorliegenden Fall der Ziele der österreichischen Abfallwirtschaft. Durch die Anwendung der mKWA gelingt es, in der KNA vorliegende intangible (marktmäßig nicht bewertbare, z.B. Umwelt-) Effekte zu bewerten.

Nach Ansicht des Projektteams stellt die mKWA eine für den politischen Entscheidungsträger leichter verwertbare Entscheidungsgrundlage dar, als jene, die die klassische Kosten-Wirksamkeits-Analyse liefert, da diese den Entscheidungsträger, zumindest im gegenständlichen Projekt, mit einer Fülle an Daten

(Wirksamkeiten für ca. 140 Ziele der untersten Zielebene, sowie Kosten für jeden Maßnahmenfall) „allein“ lässt.

### Literatur

AGW, 1992: Emissionsabschätzung für Kehrichtschlacke. Zürich: Amt für Gewässerschutz und Wasserbau des Kantons Zürich

AWG, 1990: Abfallwirtschaftsgesetz. Wien: Bundesgesetzblatt BGBl 325/1990

Baccini, P.; Brunner, P.H., 1991: Metabolism of the Anthroposphere. Heidelberg und New York: Springer

Belevi, H.; Baccini, P., 1989: Long-Term Behaviour of Municipal Solid Waste Landfills. In: Waste Management & Research 7, 43-56

Brunner, P.H.; Döberl, G.; Eder, M.; Frühwirth, W.; Huber, R.; Hutterer, H.; Pierrard, R.; Schönböck, W.; Wöginger, H., 2001: Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen mit dem Ziel der nachsorgefreien Deponie – BEWEND. Wien: Umweltbundesamt Monographien Band 149

DeponieVO, 1996: Deponieverordnung. Wien: BGBl 164/1996

GUA, IFIP, 1998: Gesamtwirtschaftliche Kosten und Nutzen der Bewirtschaftung von Abfällen aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen in Österreich. Wien: Gesellschaft für umfassende Analysen GmbH & Institut für Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik der Technischen Universität Wien, unveröffentlicht

Martimorena, B.; Attal, A.; Camacho, P.; Manem, J.; Hesnault, D.; Salmon, P., 1993: Prediction Rules for Biogas Valorisation in Municipal Solid Waste Landfills. Water Science & Technology 27/2, S. 235-241

### Kontakt

Paul H. Brunner  
 Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft  
 Abteilung Abfallwirtschaft und Stoffhaushalt  
 Technische Universität Wien  
 Karlsplatz 13/E226, A-1040 Wien, Österreich  
 Tel.: +43 - 1 - 588 01 - 226 40  
 Fax: +43 - 1 - 504 22 34  
 E-Mail: paul.h.brunner@tuwien.ac.at  
 Internet: <http://www.iwa.tuwien.ac.at>

»

## Stoffstromanalysen zum Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen im Flugzeugbau

von Bernd Reßler, Matthias Achternbosch, Klaus-Rainer Bräutigam, Christel Kupsch, Gerhard Sardemann, ITAS

Als ein Beispiel für eine vergleichende Stoffstromanalyse im Bereich „Neue Verfahren und Werkstoffe“ werden die im Rahmen des HGF-Strategiefondsprojektes „Schwarzer Rumpf“ durchgeführten Arbeiten vorgestellt. Darin wird der mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung von FlugzeugrumpfkompONENTEN verbundene Stoff- und Energieeinsatz bestimmt. Als Materialien für die Rumpfbauteile werden Aluminiumknetlegierungen und carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) betrachtet. Die Prozessschritte beider Produktlinien konnten weitestgehend identifiziert und hinsichtlich ihrer Stoffströme und Energieverbräuche qualitativ und quantitativ beschrieben werden.

### Einleitung

In der Umweltforschung und Umweltpolitik gewinnt aufgrund des steigenden Stoffverbrauchs durch Wirtschaft und Gesellschaft die Analyse der damit verbundenen Stoffströme immer mehr an Bedeutung. Durch diese Analysen sollen Beiträge zur effizienteren Ressourcennutzung und eine wissenschaftliche Basis zur Steuerung und Bewertung von Stoffströmen (Stoffstrommanagement) erarbeitet werden.

Stoffstromanalysen haben das Ziel, die Stoff- und Energieeinträge sowie den Verbleib der ein- bzw. umgesetzten Stoffe in einem definierten Untersuchungssystem qualitativ und quantitativ zu erfassen und die mit den Stoffströmen verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt zu beschreiben. Hierbei sind innerhalb der Bilanzgrenzen sämtliche wesentlichen Verzweigungen und Umwandlungen im Stoffstrom zu identifizieren. Dabei kann der Untersuchungsbereich sowohl die Herstellung, Nutzung und Entsorgung einzelner Produkte als auch bestimmte Technologien oder technische