

Schadstoffverbringung in Senken durch Abfallbehandlung

Dr. Barbara Zeschmar-Lahl, BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH, Oyten

1. Die Aufgaben der Abfallbehandlung

Die originäre Aufgabe der Abfallbeseitigung war und ist es, das im Restabfall vorhandene Potenzial an für Mensch oder Umwelt gefährlichen Organismen und Stoffen zu minimieren. Im Kontext der nachhaltigen Entwicklung hat die Abfallbeseitigung mittlerweile eine weitere Aufgabe erhalten: sie soll die bereits aus der Erdkruste ausgebeuteten Ressourcen effizient nutzen, damit Primärressourcen schonen und die mit der Primärproduktion verbundenen Emissionen minimieren. Auch wenn viele Abfälle verwertet und in einen Konsumkreislauf zurückgeführt werden können, bleibt immer ein Rest, der zu entsorgen ist. Neben der Erfordernissen der Hygiene geht es hierbei um die Entsorgung von Schadstoffen im Abfall, für die eine Kreislaufführung unerwünscht ist, und die schon aus Qualitätsgründen aus den Recycling-Produkten ferngehalten werden müssen. Der alte Arbeitsauftrag der Abfallbeseitigung ist, das wird mitunter verdrängt, daher nicht obsolet geworden [1]: *Ressourcennutzung und Umweltverträglichkeit können nicht getrennt betrachtet werden. Bei jedem Prozess, unabhängig davon, ob es sich um einen Behandlungs- oder einen Verwertungsprozess handelt, entstehen Emissionen und Rückstände, die der Umwelt zu übergeben sind. Das bedeutet, sie sind in geeignete letzte Senken oder Zielprozesse überzuführen. In diesem Zusammenhang ist die Frage von Bedeutung, welche Stoffkonzentrationen verringert (Beispiel Kohlendioxid) oder erhöht (Beispiel Blei) werden müssen. Die Strategien sind sorgfältig auszuwählen, da mit der Festlegung der letzten Senke bzw. des Zielprozesses die Stoffe der Umwelt übergeben werden und i. d. R. keine weitere anthropogene Einflussnahme mehr besteht. Sind Stoffe einmal großräumig verteilt, ist die Energie, die eingesetzt werden müsste, diese Stoffe wieder zu konzentrieren, beinahe unendlich.*

In diesem Beitrag werden verschiedene Verfahren der Behandlung von Restabfall auf die Erfüllung der gestellten Aufgaben untersucht. Hierfür ist die Stoffflussanalyse das geeignetste Instrument [2]. In einem ersten Schritt werden die relevanten Inhaltsstoffe von Restabfall charakterisiert und für diese die Zielprozesse oder letzten Senken definiert. Anhand von Stoffflussanalysen an verschiedenen Abfallbehandlungsanlagen wird untersucht, ob und in welchem Umfang die relevanten Stoffe in Zielprozesse oder Senken verbracht werden.

1.1. Charakterisierung von Restabfall

Restabfall enthält eine Vielzahl lebender Organismen wie Insekten (u.a. Eier, Maden) und deren Allergene, sowie Amöben, Würmer und vor allem Mikroorganismen, darunter auch solche, die für den Menschen eine Gefahr darstellen können. Hierzu zählen verschiedene Pilze (Sporen, Konidien, Hyphenbruchstücke), Bakterien und Actinomyceten (gehören zur

Gruppe der grampositiven Bakterien, zeigen aber ein pilzähnliches Wachstum, das sie von anderen Bakterien unterscheidet), Viren und Pollen. In Restabfällen und Bioabfällen wurden Konzentrationen an lebens- und vermehrungsfähigen Mikroorganismen im Bereich von 10^6 bis 10^{10} Kolonie-bildenden Einheiten pro Gramm (KBE/g) gemessen [3]. Tab. 1 zeigt in Abfallbehandlungsanlagen besonders häufig auftretende Mikroorganismen [u.a. nach [3, 4]].

Tab. 1: In Abfallbehandlungsanlagen besonders häufig auftretende Gruppen von Mikroorganismen und ihre wichtigsten Vertreter

Gruppe	Gattung
Bakterien	Staphylococcus, Streptococcus, Enterococcus, Acinetobacter, Enterobacter, Citrobacter, Escherichia, Kluyvera, Hafnia, Klebsiella (u.a. K. pneumoniae), Proteus, Salmonella, Pseudomonas (u.a. P. aeruginosa), Serratia, Aeromonas, Yersinia, auch Legionella (u.a. L. pneumophila)
Actinomyceten	Saccharopolyspora (S. rectivirgula), Saccharomonospora (S. viridis), Streptomyces, Thermoactinomyces
Pilze	Mucorales (Rhizopus, Mucor), Aspergillus (A. fumigatus, A. flavus), Penicillium, Candida (C. albicans), Cryptococcus neoformans
Viren	Poliomyelitis-Viren, Hepatitis-A-Viren, Herpes-Viren, Enteroviren

Hygienisch relevant sind weiterhin mikrobielle Zellbestandteile und Stoffwechselprodukte, z.B. Endotoxine, Glucane, Mykotoxine und Proteasen. Zu den Mykotoxinen zählt u.a. das krebserzeugende Aflatoxin des Schimmelpilzes *Aspergillus flavus*. Der am häufigsten und in hohen Konzentrationen an Abfallbehandlungsanlagen nachgewiesene Schimmelpilz ist *Aspergillus fumigatus*. Dieser produziert u.a. das immun- und cytotoxische Gliotoxin sowie die tremorgenen – d.h. Schüttellähmung verursachenden – Toxine Fumitremorgen, Tryptoquivaline und Verruculogen [5]. Diese Toxine wurden teilweise auch in den Sporen der Schimmelpilze nachgewiesen. Pilzsporen sind in der Regel nur 2 bis 8 μm groß [6] und damit überwiegend alveolengängig ($\text{Ø } 4 \mu\text{m}$: 50 %, $\text{Ø } 2 \mu\text{m}$: über 91 % [7]). Schimmelpilze und andere Mikroorganismen bilden zudem flüchtige Bestandteile, die so genannten MVOC, *microbial volatile organic compounds*. Die wichtigsten Vertreter von Schimmelpilz-MVOC sind Dimethyldisulfid, Isobutanol, 1-Octen-3-ol, 3-Methyl-1-Butanol, 3-Methylfuran und 3-Octanon. Auch Bakterien und Actinomyceten produzieren MVOC, insbesondere Dimethyldisulfid und Isopren [8]. Viele MVOC sind sehr giftig und gesundheitsschädlich beim Einatmen.

Mikroorganismen und ihre Bestandteile und Stoffwechselprodukte – kurz *Bioaerosole* – stellen vor allem für die Beschäftigten in der Sammlung und Verarbeitung von Abfällen ein gesundheitliches Risiko dar [9]. Daher sind in der Abfallwirtschaft verschiedene Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten gegenüber biologischen Arbeitsstoffen [10, 11, 12, 13] und wegen des sensibilisierenden Potenzials auch gegenüber schimmelpilzhaltigem Staub [14] vorgeschrieben. Für Anwohner von insbesondere biologischen Abfallbehandlungsanlagen

bestehen ebenfalls – so der Sachverständigenrat für Umweltfragen im Jahr 2004 – gesundheitliche Risiken [[15], hier Kap. 12, Tz. 1080]: *Die Belastungs- und Wirkungsforschung zeigt jedoch, dass die Konzentrationen an Biologischen Aerosolen, die in der Umgebung von Abfallbehandlungsanlagen und Anlagen der Intensivtierhaltungen gemessen wurden, durchaus gesundheitliche Risiken bergen können, die unter Vorsorgegesichtspunkten nicht hingenommen werden sollten.*

Restabfall enthält des weiteren eine Vielzahl organischer und anorganischer Stoffe mit human- oder ökotoxikologischem Gefährdungspotenzial. Tab. 2 zeigt eine Übersicht über wichtige organische Schadstoffe in Produkten, die in den Restabfall gelangen.

Tab. 2: Relevante organische Schadstoffe in Produkten, die in den Restabfall gelangen

Stoff(gruppe)	Quelle / Beispiele
PFCs (perfluorierte Kohlenwasserstoffe)	Perfluorooctanverbindungen, wie PFOS (Perfluorooctansulfonat) und PFOA (Perfluorooctansäure, „C-8“), u.a. in der Imprägnierung von Polstern, Leder, Textilien etc., in der Wasserfest- Ausrüstung von Papier, Verpackungen etc. (Scotchgard®, Goretex®, Teflon® [16, 17])
Kunststoffe und ihre Additive	<ul style="list-style-type: none"> • Flammenschutzmittel: Organobromverbindungen (Tetrabrombisphe-nol A), Antimontrioxid, HET-Säure, Phosphorsäureverbindungen (Tricresylphosphat), Chlorparaffine • Weichmacher: Ester der Phthalsäure (DOP/DEHP), Ester der Phosphorsäure (Trichlorethylphosphat), Chlorparaffine
FCKW	Schaumstoffe (PUR), Extrudierter Polystyrolschaum (XPS), PS-Schaum für Verpackungen, PE-Schaum
CKW	1,1,1-Trichlorethan, Produkte gewerblicher Verwender: Lösemittel in Farben, Klebstoffen, Reinigungsmittel für metallische Werkstücke, Glas und optische Geräte
Pestizide	PCP und Lindan in Holz (Altlasten), PCP in Lederartikeln, nicht restentleerte Behälter aus dem privaten Einsatz
PCB	in Dichtungsmassen, Transformatoren (Lampen) und Kleinkondensatoren (Elektrogeräte) über Altlasten und Importe
Konservierungs-/ Desinfektionsmittel	Triclosan in Gefrierbeuteln, Lebensmittelverpackungen, Tampons, Zeitungen, Kartonagen, Katzenstreu [18]
aliphatische und aromatische Löse-mittel, nicht chloriert	Butanon-2 (= Methylethylketon), Hexanon (= 1-Butylmethylketon), Butylacetat, Glykole und ihre Ether: Lösemittel in Lacken, Farben, Klebstoffen, Fleckentferner, Putz- und Reinigungsmitteln, Kosmetika
Geruchsstoffe	Produkte von Rotte-/Faulungsprozessen bereits im Abfallsammelgefäß
VOC (volatile organic compounds)	Summenparameter: z.B. Alkane/Alkene, Aromaten, Terpene, Halogenkohlenwasserstoffe, Ester, Aldehyde, Ketone, in diversen Produkten

Die Belastung von Restabfall mit Schwermetallen bewegt sich im Bereich von Gramm pro Tonne Frischsubstanz (Analysen von 1996-2001): ~500-1.200 g Zink, ~280-590 g Kupfer, ~300 g Blei, ~30 g Chrom, ~12 g Nickel, ~7-11 g Cadmium, ~6 g Arsen und ~0,2-2 g Quecksilber [19].

1.2. Festlegung von Senken und letzten Senken

Senke wird allgemein als das Gegenteil einer Quelle definiert. Eine Quelle gibt mehr, eine Senke weniger Stoffe ab, als sie aufnimmt. Nach Kyoto-Protokoll sind Senken Ökosysteme, die Kohlenstoff aufnehmen und damit zu einer CO₂-Abnahme in der Atmosphäre führen. So gelten gezielt durchgeführte Aufforstungen und Wiederaufforstungen als Kohlenstoffsenken.. Da diese Kohlenstoffsenken aber langfristig wieder in den Stoffkreislauf eintreten können – z.B. in Form von Brennholz –, handelt es sich hierbei lediglich um eine temporäre Senke.

In der Stoffflussanalyse wird der Begriff Senke um den der letzten Senke erweitert: *Der Lebenszyklus eines Stoffes in der Anthroposphäre beginnt bei einer Quelle (z.B. Bergwerk) und endet bei einer **Senke**. Eine letzte Senke wird als ein Ort in der Hydro-, Pedo-, Litho- oder Atmosphäre definiert, in dem die Aufenthaltszeit eines Stoffes mehr als 10.000 Jahre beträgt* [1].

Von der Senke oder letzten Senke zu unterscheiden ist das Lager: *Ein **Lager** wird definiert als der Bestand von Gütern oder Stoffen innerhalb eines Prozesses. Es gibt prinzipiell zwei Gruppen von Lagern. Ein Beispiel für die erste Gruppe von „Lager“ im Prozess Müllverbrennungsanlage der Bestand an Müll im Bunker. Neu eingebrachter Restmüll ergibt einen Lagerzuwachs, die Verbrennung von Restmüll führt zu einem Lagerabbau. Ein Beispiel für die zweite Gruppe von „Lager“ ist der Bestand an Bauinfrastruktur (z. B. Gebäude). Neu erstellte Gebäudeteile ergeben einen Lagerzuwachs, der Abriss von Gebäudeteilen führt zu einem Lagerabbau* [1].

Das Ziel der Abfallbehandlung ist, die im Abfall enthaltenen Organismen zu zerstören oder zu inaktivieren und Schadstoffe zu mineralisieren oder in weniger gefährliche Bindungsformen zu überführen. Anorganische Stoffe wie Schwermetalle und Salze können nicht vollständig zerstört, aber in definierten Outputgütern der Behandlung konzentriert und in neue Zielprozesse (→ Verwertung), in temporäre oder in letzte Senken (→ Beseitigung) überführt werden [19, 20]. Diese Definition einer *Senke* und einer *letzten Senke* ist auf Schwermetalle und Salze und der sie bildenden Elemente relativ einfach anzuwenden.

- Senken für Schwermetalle

Schwermetalle weisen in der Regel ein hohes toxisches oder ökotoxisches Gefährdungspotenzial auf. Aus Gründen der Vorsorge sollten sie nicht in der Umwelt verteilt werden, da diese Dissipation irreversibel ist, vgl. Kapitel 1. Sie sollten vielmehr, wenn sie nicht verzichtbar

sind, in geschlossenen Kreisläufen genutzt, oder, wenn dies nicht möglich ist, nach der Nutzung in geeigneten Medien konzentriert und dann zurückgewonnen oder aber in letzte Senken überführt werden. Für eine Vielzahl von Schwermetallen gilt die Deponierung unter Tage als geeignete letzte Senke, unter der Annahme, dass dort Metalle durch geologische Schranken für immer von der Hydrosphäre abgeschlossen sind [22]. Bei einer obertägigen Deponierung schwermetallhaltiger Materialien, die ggf. noch verfestigt oder anderweitig behandelt worden sind, um eine Auslaugung der Metalle zu verringern, werden diese nicht in eine letzte, sondern nur eine zeitweilige Senke verbracht. Auch Deponien sind letztlich menschliche Bauwerke, die noch nicht den Nachweis erbracht haben, Stoffe für mehr als 10.000 Jahre aus dem Stoffkreislauf fernhalten zu können. Im Gegensatz zu anderen Bauwerken wie etwa der Straßenbau sind Deponien, insbesondere jene unter Tage, aber auf eine geologische Zeiträume überdauernde Bestandszeit ausgelegt. Die Verwendung von mit Schwermetallen angereicherten Materialien etwa in der Landwirtschaft (Müllkompost) oder im Straßenbau (MV-Schlacke) stellt dagegen eine Verbringung in eine temporäre Senke (Boden) oder ein Lager (Bausubstanz) dar.

- Senken für Salze

Bei der Verbrennung von Restabfall werden Schwefel, Stickstoff, Chlor, Fluor und andere Elemente in Form von Salzen freigesetzt. Ohne Abgasreinigung würden sie in die Atmosphäre (= temporäre Senke) gelangen und dort zur Erniedrigung des pH-Wertes der Niederschläge mit den bekannten Folgen des sauren Regens führen. Sie müssen daher konzentriert und in Zielprozesse wie die Verwertung oder aber in letzte Senken überführt werden. So ist es technisch möglich, das in der Abgasreinigung einer MVA abgeschiedene Chlor zu reinigen, aufzukonzentrieren und am Markt als Säure, Sole oder festes Salz abzusetzen. Dieser Prozess stellt keine Senke, sondern die Überführung in ein Lager dar, aus dem Chlor für neue Produktionsprozesse oder Nutzungsarten entnommen wird. Der Markt für Salzsäure ist allerdings beschränkt, da diese in großem Umfang bei der Produktion von Natronlauge anfällt, die für zahlreiche chemische Prozesse benötigt wird. Dieses dürfte auch der Grund dafür sein, dass nur wenige der gut 60 deutschen MVAs über eine Salzurückgewinnung verfügen.

Salze stammen aus der Erde (Salzbergwerke) und aus dem Meer. Eine geeignete letzte Senke für Chlor aus der MVA Spittelau ist nach Brunner beispielsweise die Donau, weil auch im schlechtesten Fall die aus allen brennbaren Abfällen stammende Chlorfracht nur einen kleinen Anteil an der gesamten anthropogenen Salzfracht der Donau und des Schwarzen Meeres ausmachen würde. Nicht als letzte Senke geeignet wäre nach Rechberger [21] dagegen ein um ein bis zwei Größenordnungen kleineres Binnenmeer [21]. Eine ungeeignete letzte Senke für lösliches Chlorid ist auch die oberirdische Deponie, da der Weg des Chlorids über das Grundwasser zu den Fließgewässern langfristig ein größeres Risiko darstellt als die kontrollierte Direkteinleitung von Chlorid (gilt nicht für Schwermetallchloride) in ein Fließgewässer [22]. Wesentlich ist nach Rechberger auch der Pfad, über den ein Stoff in die letzte Senke

gelangt. Ein kleiner Vorfluter wäre demnach nicht geeignet, weil hohe Salzeinträge in ihm die Umweltbedingungen nachteilig verändern würden. So dürfen anthropogene Stofffrachten nicht nur die Qualität der natürlichen Senken, sondern auch die natürlichen *Förderbänder* [21] zu diesen Senken nicht signifikant verändern – siehe das obige Beispiel saurer Regen.

Die Festlegung von Senken und letzten Senken für Organismen und organische Stoffe erfordert eine Differenzierung. Wird die Betrachtung auf elementarer Ebene, d.h. Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel, Phosphor, durchgeführt, stellt sich die Frage, ob es überhaupt erforderlich ist, diese Stoffe – das gilt analog auch für Salze, s.o. – in eine letzte Senke zu verbringen, wenn sie doch im anthropogenen Stoffkreislauf benötigt werden. Ein Verbringen in Senken, möglichst in letzte Senken, ist dagegen für Stoffe erforderlich, die ein hohes toxisches oder ökotoxisches Potenzial aufweisen, wie z.B. Schwermetalle, Dioxine, PCB, pathogene Mikroorganismen, vgl. Tab. 1 und Tab. 2.

- Senken für Organismen

Eine letzte Senke für Organismen stellt jeder Prozess dar, in dem der Organismus abstirbt, denn dies ist das Ende des Lebenszyklus des „Stoffes“ Organismus. Hochtemperaturverfahren wie die Müllverbrennung (mindestens 850°C) oder die thermische Abgasbehandlung mittels regenerativer thermischer Oxidation (800-1.000°C [23]) töten Organismen und führen zu einer weitgehenden Mineralisierung. Niedertemperaturverfahren wie Rotteprozesse erreichen maximal Temperaturen von etwas über 60°C (*Heißrotte*). Das reicht aus, um einen Großteil der (Mikro-)Organismen zu inaktivieren oder zu töten, doch sind im Rotteendprodukt in der Regel noch lebens- und vermehrungsfähige Mikroorganismen und Dauerformen von Lebewesen (Dauersporen, Samen, Eier) vorhanden. Der Organismus – z.B. ein Fäkalkeim – ist zwar zerstört, auf molekularer oder atomarer Ebene sind aber neue Stoffe wie Kohlendioxid und Wasser (thermische Oxidation) oder aber auch Endotoxine oder Glucane (biologische Abbauprodukte gramnegativer Bakterien bzw. Pilze) entstanden. Die Senke des einen Stoffes ist zugleich die Quelle eines oder mehrerer neuen Stoffe.

- Senken für organische Verbindungen

Für organische Verbindungen gilt das gleiche wie für Organismen. Sie können vollständig mineralisiert oder nur anteilig abgebaut werden. Ob die Abbauprodukte in ein Lager, eine temporäre oder eine letzte Senke überführt werden, hängt vom Verbleib der Outputgüter des Systems, in die sie gelangen, ab. Beim biologischen Abbau und der Verbrennung organischer Verbindungen entsteht vor allem CO₂. Dieses gelangt in die Atmosphäre und wird von photosynthetisierenden Pflanzen wieder verstoffwechselt. Viele der bei thermischer oder bei mechanisch-biologischer Abfallbehandlung freigesetzten flüchtigen organischen Verbindungen werden durch physikalische (UV-Strahlung) oder chemische Prozesse (Oxidation) in der Atmosphäre letztlich auch zu CO₂ abgebaut. In sofern stellt die Atmosphäre für Kohlenstoff ein Lager und keine Senke dar. Echte Kohlenstoffsenken gibt es derzeit nicht, die in Biomasse

gebundene CO₂-Menge ist langfristig wieder verfügbar. Viele synthetische organische Verbindungen wie FCKW werden über Jahre, Jahrzehnte oder Jahrhunderte in der Atmosphäre verbleiben. So weist etwa das Oberflächenausrüstungsmittel Perfluorooctansäure (PFOA) eine troposphärische Halbwertszeit von mehr als 2.000 Jahren auf [24]. Die Atmosphäre und die Troposphäre werden damit zu einer – ungewollten – letzten Senke.

Die Rückstände der mechanisch-biologischen Behandlung von Restabfall werden auf Deponien abgelagert. Aufgrund der Restgehalte an organischen Stoffen finden auch nach Ablagerung, wenn auch in reduziertem Umfang, noch biologische Abbauprozesse statt. Ein Teil des Kohlenstoffs wird damit ins Lager Atmosphäre verbracht oder wird durch Niederschläge ausgewaschen, der größere Rest dient der Bildung von Humus im Boden. Da Boden einen Lebensraum darstellt, der – auch ohne Nutzung durch den Menschen – einen intensiven Stoffumsatz aufweist, wird er als temporäre und nicht als letzte Senke angesehen.

2. Senken in der mechanischen Restabfallbehandlung

Die mechanische Restabfallbehandlung trennt Abfall durch mechanische und physikalische Trennverfahren in verschiedene Fraktionen auf. In der Regel schließen sich weitere biologische oder thermische Behandlungsschritte an. Diese Behandlung oder aber die Beseitigung findet teils in der selben Anlage (→ MBA), teils in anderen Anlagen (MVA, Deponie) statt.

2.1. Stoffflussanalyse an einer mechanischen Restabfallaufbereitungsanlage

Die Aufbereitungs- und Sortieranlage für Hausmüll (ABA) in Wien ist mit Unterbrechungen seit Februar 2002 in Betrieb. Ziel der Aufbereitung ist die Erzeugung einer heizwertreichen Fraktion zur thermischen Verwertung in einem Wirbelschichtofen.

2.1.1. Güterbilanz

Die Hauptprozesse der Abfallaufbereitung sind

1. Vorzerkleinerung und Klassierung mit Trommelsieben (50 mm Siebschnitt) in zwei Fraktionen,
2. Abtrennung der Eisen- und Nichteisenmetallschrotte aus dem Siebdurchgang < 50 mm (Schwerfraktion),
3. Klassierung des Siebüberlaufs > 50 mm in zwei Fraktionen,
4. Abfuhr der Grobfraktion > 250 mm zur thermischen Behandlung in MVA,
5. Abtrennung der Eisen- und Nichteisenmetallschrotte aus der Leichtfraktion 50-250 mm.
6. Lagerung der Leichtfraktion, teilweise Verpressen zu Ballen und Umwickeln mit PE-Folie und Draht.

Tab. 3 gibt die Materialbilanz der Abfallaufbereitungsanlage 2003 sowie den Verbleib der erzeugten Fraktionen wieder [25].

Tab. 3: Güterbilanz der Abfallaufbereitungsanlage 2003

	t/a	Anteil	Verbleib
Input: Systemmüll	177.000	100,0 %	
Output, davon:	177.000	100,0%	
• Schwerfraktion (< 50 mm)	88.419	50,0%	Deponie, ab 2004 MVA
• Leichtfraktion (50-250 mm)	75.774	42,8%	energetischen Verwertung in einem Wirbelschichtofen
• Grobfraktion (> 50 mm)	7.080	4,0%	MVA
• Eisenmetallschrotte	5.258	3,0%	stoffliche Verwertung
• Nichteisenmetallschrotte	469	0,3%	stoffliche Verwertung

Die stoffliche und energetische Verwertung sowie die thermische Behandlung (MVA) oder Deponierung liegen außerhalb der räumlichen Systemgrenze. In der Güterbilanz nicht ausgewiesen, weil bilanziell nicht relevant, sind der im Anlageninnern aus der Luft abgeschiedene Staub (< 1 kg/t Input) sowie der Draht und die PE-Folie für die teilweise durchgeführte Umwicklung der zu Ballen gepressten Leichtfraktion. Die Leichtfraktion wird nur übergangsweise – bis zur Inbetriebnahme des Wirbelschichtofens – zu Ballen gepresst, danach werden nur noch Überschußmengen verpresst und zwischengelagert, der Großteil des Materials wird lose in Presscontainern angeliefert. Zudem werden die Drähte (~1 kg/t Leichtfraktion) vor der energetischen Verwertung der Leichtfraktion zu über 95 % entfernt und einer stofflichen Verwertung zugeführt, so dass sie für die Eisenbilanz (28 kg Fe/t Input vs. 50 g Fe/t Leichtfraktion) nicht ins Gewicht fallen.

2.1.2. Stoffbilanz

Die Belastung des Inputmaterials Restabfall wurde anhand von Messungen an der MVA Spittelau bestimmt, vgl. Kapitel 4.1. Die Werte für die Leichtfraktion wurden aus der Bilanzlücke zum Input errechnet bzw. für Chlor anhand von einzelnen Bohrkernproben von Leichtfraktionballen bestimmt. Tab. 4 gibt den berechneten Stofffluss und die Transferfaktoren der Abfallaufbereitungsanlage wieder.

40 % des eingetragenen **Chlors** werden mit der Schwerfraktion ausgetragen, die knapp 50 % des Outputs ausmacht. Dem gegenüber werden rund 37 % des Chlors mit der abgetrennten Grobfraktion ausgeschleust, die aber nur 4 % des Outputs darstellt. D.h. in dieser Fraktion findet eine deutliche Anreicherung von Chlor statt, die vornehmlich auf die hohen PVC-Anteile zurückzuführen ist. Für die Schwerfraktion und die übrigen Outputpfade findet dagegen eine Abreicherung statt.

Mit der Magnetscheidung werden über 90 % des **Eisens** aus dem Inputmaterial abgetrennt. Die 7 %, die mit der Schwerfraktion ausgetragen werden, finden sich in einem Outputstrom wieder, der knapp 50 % des gesamten Outputs ausmacht.

Tab. 4: Stofffluss und Transferfaktoren der Abfallaufbereitungsanlage – Leichtfraktion aus Bilanzlücke zum Input errechnet

		Masse t FS	Cl	Fe	Al	Pb	Cd	Cu	Hg	Zn
IN- PUT	Systemmüll g/t FS	1	4.900 ± 800	28.000 ± 2.000	10.000 ± 1.000	310 ± 50	6,7 ± 0,9	280 ± 30	0,89 ± 0,11	500 ± 70
OUTPUT	Leichtfraktion > 50 mm	0,428	20%	2%	26%	28%	32%	69%	63%	47%
	Grobfraktion > 250 mm	0,04	37%	0%	0%	1%	5%	2%	2%	2%
	Schwerfraktion < 50 mm	0,498	40%	7%	42%	68%	2%	12%	9%	12%
	Fe-Schrott	0,026	0%	92%	1%	2%	59%	14%	25%	19%
	Störstoffe Fe- Schrott: Folien	0,004	1%	0%	0%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%
	NE-Schrott	0,003	0%	0%	30%	0,0%	0,0%	1,4%	0,1%	18,3%
	Staub	0,001	0%	0,02%	0,07%	0,03%	0,01%	0,03%	0,03%	0,04%
	Σ Output	1	97%	100%	100%	99%	98%	98%	99%	99%

Mit der Nichteisenmetallabtrennung werden rein rechnerisch nur 30 % des im Input enthaltenen **Aluminiums** erfasst; dies, obwohl die abgetrennte NE-Schrottfraction mit 100 % Aluminium angesetzt wurde. Ein Großteil des Aluminiums gelangt in die Outputpfade Schwer- und Leichtfraktion. In letzterer wird Aluminium überwiegend in Form von Folien und Verbunden vorliegen. Der Eintrag in die Schwerfraktion ist mengenmäßig aber am bedeutendsten. In welcher Form Aluminium hier vorliegt – ob als zerkleinerte Folien oder zerkleinerte Tuben, Dosen, Drähte, Bänder oder Gebrauchsgegenstände –, wurde bislang nicht untersucht.

Cadmium wird in erheblichem Umfang mit der Eisenfraktion ausgeschleust. Diese Daten sind sehr unsicher, da sie auf einem relativ hohen Anteil an Ni/Cd-Akkus (5 % der Batterien) in der Sortieranalyse der Eisenschrottfraction basieren. Die Hochrechnung für die restliche Cadmiumfracht der Eisenschrottfraction fußt ebenfalls auf unsicheren Werten: Analysen von Rotter [26] zu Metallen im Restabfall ergaben Werte von 3 ± 3 mg Cd/kg TS.

Der Austrag von **Quecksilber** mit der Metallfraktion ist deutlich geringer als der von Cadmium. Die klassischen Quecksilberträger Batterien und Knopfzellen sind aufgrund chemiepolitischer Maßnahmen rückläufig. Quecksilber verbleibt überwiegend in den massenmäßig dominierenden Materialströmen, hier insbesondere Leichtfraktion. Vergleichbares gilt auch für die Elemente Kupfer und Zink. Nach Tab. 4 gelangen diese drei Metalle zu knapp 50 bis 70 % in die Leichtfraktion.

Blei zeigt ein von den anderen Metallen abweichendes Bild: Der Austrag von Blei mit der Metallfraktion ist praktisch zu vernachlässigen. Es verbleibt überwiegend in den massenmäßig dominierenden Materialströmen, hier insbesondere in der Schwerfraktion. Dies deckt sich mit Untersuchungen z.B. von Bidlingmaier und Alt [27], die durch die Absiebung der Fraktion kleiner 40 mm für den Input eines Müllheizkraftwerkes (58 % Hausmüll, 25 % Gewerbeabfall, 17 % Klärschlamm) eine Reduktion des Bleieintrags von knapp 70 % errechneten.

2.2. Senkenfunktion der mechanischen Restabfallbehandlung

Die Wiener Abfallbehandlungs- und Sortieranlage stellt für keinen Stoff eine Senke dar, die ABA fungiert vielmehr als *Drehscheibe* für die Verteilung von Stoffen auf verschiedene Outputgüter. Ob und in welchem Umfang die mit dem Restabfall eingebrachten Stoffe in Zielprozesse, Lager oder Senken verbracht werden, entscheidet sich an der Frage des Verbleibs der Outputgüter, vgl. Tab. 3. Danach gelangen die beiden Metallschrottfractionen in die Verwertung, die Grob- und die Schwerfraktion in die MVA Spittelau (s.u.) und die Leichtfraktion in die energetische Verwertung im Wirbelschichtofen (WSO) 4 des Werkes Simmeringer Haide.

Eine Stoffflussanalyse dieser Anlage für den Einsatz von Leichtfraktion ist geplant, aber noch nicht durchgeführt worden. Die verfahrenstechnische Ausstattung des WSO 4 entspricht im Wesentlichen jener der bestehenden Verbrennungslinien WSO 1 bis 3: Wirbelschichtofen, Abhitzeessel, Elektrofilter, zweistufige nasse Rauchgaswäsche, Aktivkoksanlage. Zusätzlich erhält der WSO 4 noch eine katalytische Entstickungsanlage [28]. Die aus dem Abgas entfernten und in wässriger Lösung vorliegenden Schadstoffe werden in der Abwasserbehandlungsanlage in eine wasserunlösliche Form überführt, ausgefällt und der anfallende Schlamm entwässert. Dieser Filterkuchen wird in einer Untertagedeponie abgelagert. Die abgeschiedenen Schwermetalle werden damit in eine Senke überführt.

Die Elektrofilterasche und der Austrag aus dem Wirbelschichtbett werden als Zuschlagstoff zum Schlackenbeton für den Bau von Randwällen der Deponie Rautenweg in Wien eingesetzt; diese fungiert lediglich als temporäre Senke, vgl. Abschnitt 4.2.1.

3. Senken in der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA)

Mechanisch-biologische Abfallaufbereitungsanlagen arbeiten nach unterschiedlichen Prinzipien. Das Behandlungsziel von Stabilisierungsanlagen besteht darin, den Restabfall so aufzuarbeiten, dass der Deponiebedarf minimiert bzw. auf Null reduziert wird, und eine maximale Menge an heizwertangereicherter Brennstofffraktion entsteht. Deren Wassergehalt wird durch biologische Trocknung auf unter 15 % reduziert. Dagegen war und ist Ziel von Splittinganlagen in erster Linie die Erzeugung einer ablagerungsfähigen Rottefraktion. Seit Inkrafttreten der Abfallablagerversordnung (AbfAbIV) – in Österreich die Deponieverordnung (DVO) – wird in diesen Anlagen mindestens auch eine heizwertreiche Fraktion abgetrennt und einer

energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung zugeführt. Mittlerweile haben sich die Konzepte weiterentwickelt, z.B. Erzeugung mehrerer heizwertreicher Fraktionen für verschiedene Zielprozesse (energetische Verwertung in Kraft- oder Zementwerken, thermische Behandlung in Müllverbrennungsanlagen).

3.1. Stoffflussanalyse an einer mechanisch-biologischen Abfallaufbereitungsanlage

1999 erstellte eine Arbeitsgruppe des Instituts für Entsorgungs- und Deponietechnik an der Montanuniversität Leoben eine Stoffflussanalyse für die mechanisch-biologische Restabfallbehandlungsanlage Allerheiligen [29, 30], eine Abfallsplittinganlage. Dort wird zum Einen eine heizwertreiche Fraktion abgetrennt, die allerdings keiner energetischen Verwertung zugeführt, sondern auf der Deponie in einem eigenen Kompartiment für eine etwaige spätere thermische Behandlung vorgehalten wird. Zum Anderen wird – unter Verarbeitung von Klärschlamm – eine Deponiefraktion erzeugt, die nach entsprechender mechanisch-biologischer Behandlung auf der verbandseigenen Deponie abgelagert wird.

3.1.1. Güterbilanz

Die Anlage besteht aus Tiefbunker, Prall-Hammermühle, Überband-Magnetscheider, Misch- und Homogenisierungstrommel inkl. Siebtrommel, Rottemodulen (Intensiv- und Extensivrotte), belüfteten Rotteplatten (Nachrotte) und einer Siebtrommel. Die räumliche Systemgrenze wird durch die Hauptprozesse der MBA bestimmt. Diese sind

1. Zerkleinerung und Magnetscheidung
2. Absiebung einer heizwertreichen Grobfraction > 80 mm
3. Intensivrotte/Extensivrotte (fließender Übergang, keine räumliche Trennung)
4. Nachrotte.

Tab. 5: Güterbilanz der MBA Allerheiligen [29]

	Gut	Masse trocken [t/22 Wo.]	Masse trocken [Σ 12 Chargen/22 Wo.]
INPUT	Restmüll	685,8	89,7 %
	Klärschlamm	78,7	10,3 %
	Zuluft	keine Angabe	keine Angabe
	Wasser	entfällt	entfällt
	Summe Input	764,5	100,0 %
OUTPUT	Eisenmetallschrottfraction	14,5	1,9 %
	Grobfraction > 80 mm	129,2	16,9 %
	Rotteverluste/Abluft	146,0	19,1 %
	Rottegut (Deponiefraction)	474,8	62,1 %
	Summe Output (gerundet)	764,5	100,0 %

Die Abluft aus dem Annahmereich, der Intensivrotte (Halle) und der Nachrotte sowie teilweise aus dem Klärschlamm-Bunker wird über zwei offene Flächenbiofilter gereinigt. Deren Wirksamkeit wird jedoch in der Stoffbilanz nicht berücksichtigt, daher befinden sie sich außerhalb der Systemgrenzen. Gleiches gilt für den Tiefbunker, den Klärschlamm-Bunker und die Deponie für die Outputgüter. Innerhalb der Systemgrenze befindet sich ein Lager für Wasser in Form des Perkolats, welches wieder zur Bewässerung in der Intensivrotte eingesetzt wird. Da Wasserverluste über die Rotteprozesse auftreten, muss dieses Lager permanent durch Frischwasser ergänzt werden. Alle anderen Stoffe, die das System betreten, verlassen es auch wieder. Tab. 5 zeigt die Güterbilanz der MBA Allerheiligen. Für andere MBAs ergeben sich je nach Aufbereitungstechnik davon abweichende Güterströme.

3.1.2. Stoffbilanz

Tab. 6 gibt die Bilanz der MBA Allerheiligen für die Schwermetalle Cadmium, Blei und Zink sowie die organischen Summenparameter Glühverlust, TOC und PAK wieder. Der Eintrag über Zuluft und Wasser wird mit jeweils Null angesetzt.

Tab. 6: Stoffbilanzen der MBA Allerheiligen (A) [29]

Parameter	Cadmium	Blei	Zink	Glühv.	TOC	PAK
Inputmenge gesamt	0,926 kg	47,9 kg	206 kg	430 t	255 t	1,96 kg
• Eintrag über Restabfall	96 %	95 %	90 %	87 %	88 %	93 %
• Eintrag über Klärschlamm	4 %	5 %	10 %	13 %	12 %	7 %
Output über/in						
• Eisenmetallschrott	1 %	4 %	9 %	0 %	0 %	0 %
• Grobfraction > 80 mm	24 %	12 %	13 %	24 %	24 %	6 %
• Rotteverluste	0 %	0 %	0 %	36 %	34 %	83 %
• Σ Rottegut	75 %	84 %	78 %	40 %	42 %	11 %
• <i>Fraktion 24 bis 80 mm</i>	37 %	38 %	36 %	19 %	22 %	<4 %
• <i>Fraktion 12 bis 23 mm</i>	26 %	28 %	26 %	14 %	14 %	<6 %
• <i>Fraktion 0 bis 12 mm</i>	12 %	18 %	16 %	7 %	6 %	<2 %
Summe Output	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

Die höchsten Austräge von 36 bis 38 % für Cadmium, Blei und Zink wurden für das abgeseibte Rottegut mit der Korngröße 24 bis 80 mm, gefolgt von der Fraktion 12 bis 24 mm ermittelt. Weniger als jeweils zehn Prozent der im Input enthaltenen drei Metalle werden mit der Eisenmetallschrottfraction ausgetragen. Allerdings wurde diese Fraktion nicht analysiert, sondern die Werte anhand von Literaturangaben geschätzt. Die Verluste an Schwermetallen über den Abluftpfad in der Intensiv-, Extensiv- und Nachrotte wurden ebenfalls nicht analytisch bestimmt, sondern mit Null angesetzt.

Die Bilanzierung der organischen Stoffe fußt auf Analysen des Inputs und der Outputpfade Rottegut und Grobfraktion. Für die Eisenmetallschrottfraction wird der organische Anteil gleich Null gesetzt, die Differenz aus Summe Output zum Input wird der Fraktion Rotteverlust zugerechnet. Die organischen Stoffe, erfasst als Glühverlust und TOC, gelangen zu rund 40 % ins Rottegut, zu 24 % in die Grobfraktion und werden im Mittel zu 35 % als Rotteverlust über die Abluft in die Umwelt freigesetzt. Die schwer abbaubaren PAK weisen ein anderes Verhalten auf: sie gelangen nur zu 11 % ins Rottegut und zu 6 % in die Grobfraktion. Der weitaus größte Teil von 83 % wird mit dem Rotteverlust ausgetragen. Der Effekt der Abluftreinigung durch die Biofilter liegt außerhalb der Systemgrenze.

3.2. Senkenfunktion der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung

3.2.1. Eisenmetallschrott

Der Anteil an Cadmium, Blei und Zink, der mit dem Schrott in das Recycling gelangt, ist für alle drei Metalle mit weniger als 10 % sehr gering. Im Stahlwerk wird dieser Schrott wieder in den Produktionskreislauf eingespeist. Eine Verbringung der Schwermetalle in Senken findet nicht statt.

3.2.2. Grobfraktion

Die heizwertreiche Grobfraktion wird keiner energetischen Verwertung zugeführt, sondern auf der Deponie für eine etwaige spätere thermische Behandlung zwischengelagert. Sollte diese Zwischenlagerung zu einer Endlagerung werden, z.B. weil keine Verbrennungskapazitäten vorhanden oder die vorhandenen zu teuer sind, gelten die zum Rottegut in Abschnitt 3.2.3 gemachten Ausführungen sinngemäß. Bei Verbringung dieser Fraktion in eine Mono- oder Mitverbrennungsanlage gelten die Ausführungen unter 4.2 und 5.

3.2.3. Rottegut

Das Rottegut wird auf der Deponie eingebaut. Damit sind die enthaltenen Stoffe aber nicht in eine letzte Senke verbracht. Zwar liegt die Atmungsaktivität AT_4 mit im gewichteten Mittel $2,2 \text{ mg O}_2/\text{g TS}$ unter dem Grenzwert der AbfAbIV von $5 \text{ mg O}_2/\text{g TS}$, doch finden auch bei diesen Gehalten an organischer Substanz noch biologische Abbauprozesse statt. Ein Teil des Kohlenstoffs wird damit in die temporäre Senke Atmosphäre verbracht, der Rest dient der Bildung von Humus in der temporären Senke Boden.

Im Rahmen der biologischen Abbauprozesse können bestimmte Schwermetalle (z.B. Zinn, Arsen, Selen, Quecksilber, Thallium und Blei) durch mikrobielle Biomethylierung in metallorganische Verbindungen mit höherer Toxizität und höherer Flüchtigkeit umgewandelt und damit wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Bei obertägiger Ablagerung besteht zudem das Risiko einer Auslaugung von Schwermetallen durch Niederschlags- und Sickerwasser sowie einer aerogenen Verfrachtung durch Staub.

3.2.4. Rotteverlust

Die Daten für den Rotteverlust wurden nicht analytisch bestimmt, sondern als Bilanzlücke der Summe der übrigen Pfade zum Input bestimmt [29]. Im Jahr 1999 hat aber das österreichische Umweltbundesamt Abluftemissionsmessungen an dieser Anlage durchgeführt [31]. Danach bewegte sich der TOC im Rohgas der Intensivrotte (vor Biofilter) im Bereich von 190 bis 210 mg/m³, was bei einem mittleren Abluftvolumen von 6.700 m³/t einer TOC-Emission von 1,3 kg/t Input entsprach. Den höchsten Anteil am TOC hatten dabei 2-Butanon, Limonen und Aceton. Ebenfalls wurden auch verschiedene schwer abbaubare organische Verbindungen in der MBA-Rohabluft gemessen, darunter mehrere PAK (Σ = 200-300 mg/t Input), Chlorbenzole und Phthalate (Σ = jeweils mehrere mg/t Input). In der Rohabluft konnten sogar Schwermetalle nachgewiesen werden, vor allem Quecksilber ($\sim 0,5 \mu\text{g Hg/m}^3$ entsprechend $\sim 4 \text{ mg Hg/t Input}$) und Nickel ($\sim 0,2 \mu\text{g Ni/m}^3$ entsprechend $\sim 1,8 \text{ mg Ni/t Input}$). Erste orientierende Messungen hinter dem Biofilter ergaben nachweisbare Konzentrationen an verschiedenen Terpenen, Aromaten, Ketonen, Alkanen und Chlorbenzolen. PAK wurden nicht analysiert.

Die Untersuchungen des Umweltbundesamtes zeigen, dass schwer abbaubare organische Verbindungen wie Chlorbenzole weder in der Rotte noch im Biofilter ausreichend abgebaut oder gar vollständig mineralisiert werden. Auf Kompostanlagen und bei MBAs einfacher Bauart wird als einzige Abluftreinigungstechnik oftmals nur ein Biofilter, zumeist in Form eines offenen Flächenbiofilters, eingesetzt. Im Biofilter entstehen teilweise sehr reaktive Abbauprodukte wie Terpene oder auch – bei hohen Stickstoffgehalten in der Rohluft – klimarelevantes Lachgas (N₂O) [32]. Bei einem Vielstoffgemisch, wie es im Rohgas z.B. von MBAs vorherrscht, liegt der Wirkungsgrad von Biofiltern für NMVOC bezogen auf organischen Kohlenstoff lediglich bei 40 – 70 % sowie für Methan bei nahe 0 % [33]. Gute Abreinigungswerte werden für wasserlösliche und gut abbaubare Substanzen aus dem Spektrum der MVOC festgestellt, z.B. Aceton, Acetaldehyd, und Ethanol. Auch anderen Autoren bestätigen die gute Abbauleistung von Biofiltern für bestimmte MVOC [34]. Schlecht wasserlösliche Stoffe, z.B. Toluol, Xylol und Limonen, werden nur mäßig bis gering abgereinigt.

MBA-Abluft ist – ähnlich wie MVA-Abgas – ein Vielstoffgemisch. Ein Vergleich der Zuordnung von Substanzen in der MVA-Abluft [35] zu den Klassen Carcinogene, I, II oder III der deutschen TA Luft (vor *Novellierung 2002*) mit den Emissionen der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung (Reinluft MBA Kufstein [36, 37]) hat ergeben, dass es bezüglich der Aufklärungsquote der Einzelstoffe für die MBA – ein nicht thermisches Verfahren – eine größere Unsicherheit gab als für die MVA (bezogen auf die Beispieluntersuchungen). Weiter zeigte sich, dass es bei der relativen Zuordnung auf Klassen nach TA Luft keine qualitativen Unterschied gab, in dem Sinn, dass der TOC aus der MVA eine geringere oder eine höhere toxikologische Relevanz aufwies [38].

Hinzu kommt bei biologischen Verfahren das Problem von Bioaerosolen im Roh-, aber auch teilweise in der gereinigten Abluft. So können Biofilter auch als Sekundäremissionsquelle fungieren und dazu führen, dass die Bioaerosolkonzentrationen in der Reinluft gegenüber der Rohluft teilweise sogar noch ansteigen [39], insbesondere wenn das Material schon älter bzw. der Filter schon längere Zeit in Betrieb ist [40].

Für MBAs sind nur wenige Bioaerosolmessungen publiziert. Da während der Einsammlung und des Transportes von Restabfall und Bioabfall kaum Unterschiede hinsichtlich der Bioaerosolexposition der Beschäftigten bestehen [41, 42], dürfte die Problematik der Bioaerosolmission und -immission bei MBAs der bei Kompostanlagen vergleichbar sein, jeweils in Abhängigkeit von Anlagentechnik und Immissionsschutzstandard. Daher soll auch auf Messungen an Kompostanlagen zurückgegriffen werden. Besonders hohe Bioaerosolkonzentrationen (10^4 bis 10^7 KBE/m³, Gesamtkeime bzw. Schimmelpilze) treten hier etwa bei der Anlieferung, beim Mühlen/Shreddern, in der Rottehalle sowie insbesondere beim Umsetzen des Rottematerials und bei der Sortierung und Feinaufbereitung des Rottegutes auf. Hohe Konzentrationen wurden auch bei bestimmten Arbeiten im Außenbereich (Störstoffauslese), im Innenbereich bei der Handsortierung und in den Fahrzeugkabinen der Radlader festgestellt, letzteres auch, wenn diese mit Lüftungstechnischen Einrichtungen ausgestattet waren.

Auf der mittlerweile nicht mehr in Betrieb befindlichen MBA Nienburg wurden Hausmüll, hausmüllähnlicher Gewerbeabfall, produktionsspezifische Abfällen und Klärschlämme nach mechanischer Aufbereitung als Abfallgemisch auf so genannten Doppelstockmieten nach dem Kaminzug-Verfahren offen gerottet. Die Abluft der mechanischen Stufe wurde nicht gefasst und behandelt, sondern über die Hallenauslässe ins Freie abgegeben. Im Anlieferungsbereich wurden Bioaerosolkonzentrationen (Pilze und Bakterien) im Bereich von 10^5 bis 10^6 KBE/m³ gemessen [43].

Nach derzeitigem Kenntnisstand kann weder für Mikroorganismen noch für organische Schadstoffe die Rotte mit nachgeschaltetem einfachen Biofilter als vollständige letzte Senke angesehen werden. Abbaubare organische Stoffe werden nur anteilig zu CO₂ mineralisiert, ein Teil wird unverändert oder als Metabolit in Form niedermolekularer Verbindungen emittiert. Für Mikroorganismen ist ebenfalls nur von einer anteiligen Zerstörung auszugehen. In der Abluft der Rotte und auch hinter Biofilter sind neben lebens- und vermehrungsfähigen Mikroorganismen auch Produkte des unvollständigen Abbaus abgestorbener Mikroorganismen wie Endotoxine, β -D-Glucane und niedermolekulare organische Verbindungen feststellbar. Die mit der Rotteabluft freigesetzten flüchtigen oder partikelgetragenen Schwermetalle sowie die nicht oder nur wenig abbaubaren organischen Stoffe gelangen ebenfalls nicht in eine letzte Senke, sondern in die große temporäre Senke Atmosphäre oder Boden (Staubdeposition).

Moderne MBAs, die die Anforderungen der 30. BImSchV und der AbfAbfV erfüllen, sind eingehaust und weisen überwiegend gekapselte Aggregate auf. Die Anlagenabschnitte sind segmentiert und werden zwangsbelüftet, die Abluft der Intensivrotte wird gefasst und in der Regel thermisch, die Abluft der übrigen Anlagenbereiche mindestens über Biofilter gereinigt. Bei einer offenen oder überdachten Nachrotte ist allerdings mit dem Auftreten von Bioaerosolen zu rechnen. Bislang liegen hierzu keine Messungen vor.

Die Emissionsminderung mittels eines optimierten Biofilters kann als Stand der Technik für MBAs lediglich im Hinblick auf die Reduzierung der Geruchsstoffkonzentrationen in den gefassten Emissionen angesehen werden [9]. Dies gilt nicht für andere abluftseitige Emissionen wie Bioaerosole und ausgewählte organische Schadstoffe. Biowäscher-Biofilter-Kombinationen sollen bei optimierter Betriebsweise die Emission ausgewählter (nicht: *aller* relevanten) Bioaerosole mindern können [44]. Bei entsprechender Einstellung des Wäschers kann zudem die in den Biofilter eingebrachte Stickstofffracht gesenkt und damit das Risiko einer Lachgasbildung minimiert werden.

Für die Emissionsminderung *aller* Bioaerosole – Pilze, Bakterien, Endotoxine usw. –, aerosolgetragener oder gasförmig freigesetzter organischer Schadstoffe (VOC, MVOC usw.) sowie klimarelevanter Gase wie Methan und Lachgas (N₂O) sind thermische Verfahren, insbesondere die thermisch-regenerative Oxidation (RTO) mit ggf. vorgeschaltetem sauren Wäscher zur Vermeidung der Lachgasbildung [23, 44] als Stand der Technik anzusehen. Mit diesen Verfahren werden die Bioaerosole zerstört, die organischen Stoffe mineralisiert und als CO₂ ins Lager Atmosphäre verbracht. Anorganische Stoffe werden ebenfalls anteilig in die temporäre Senke Atmosphäre, anteilig aber auch über die Entsorgung des Rückstandes aus dem Wäscher in eine letzte Senke (Deponie) oder einen Zielprozess (Produktion von Düngemitteln aus Ammonium) verbracht.

4. Senken in der Abfallverbrennung

Müllverbrennungsanlagen müssen die Anforderungen der 17. BImSchV sowie der Abwasserverordnung, Anhang 33 – Wäsche von Abgasen aus der Verbrennung von Abfällen, einhalten. Diese beinhalten u.a. Grenzwerte für die Emissionen über den Gas- und den Wasserpfad und die Schlacke (Begrenzung des organisch gebundenen Kohlenstoffs) sowie Anforderungen an die Behandlung der bei der Verbrennung und Mitverbrennung entstehenden Sekundärabfälle. Schlacken, Rostaschen, Filter- und Kesselstäube sowie Reaktionsprodukte und sonstige Abfälle der Abgasbehandlung sind zu vermeiden, zu verwerten oder, soweit die Verwertung technisch nicht möglich oder unzumutbar ist, zu beseitigen.

4.1. Stoffflussanalyse an einer Müllverbrennungsanlage

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt der TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft (IWA), der Fernwärme Wien GmbH (FWW) und den Magistratsabteilungen 22 (Umwelt) und 48 (Abfallwirtschaft) wird auf der Wiener Müllverbrennungsanlage Spittelau während einer Dauer von fünf Jahren (Januar 2000 bis September 2004) der Gehalt ausgewählter Elemente im Müll anhand der Schadstoffbelastung einzelner Verbrennungsprodukte routinemäßig bestimmt [45].

4.1.1. Güterbilanz

Die räumliche Systemgrenze wird durch die Hauptprozesse der MVA Spittelau bestimmt:

1. Ofen, bestehend aus Einfülltrichter, Rost, Kessel und Entschlackung inklusive Schlackenausstrag,
2. Überband-Elektromagneten zur Abtrennung von Eisenschrott aus der Schlacke,
3. Staubabscheidung, bestehend aus einem Elektrofilter und dem Filteraustragssystem,
4. weitergehende Rauchgasreinigung, bestehend aus einer dreistufigen Abgaswäsche (saurer Wäscher, neutraler Wäscher, Venturiwäscher) und SCR,
5. zweistufige Abwasserreinigung mit Ableitung des gereinigten Abwassers in den Vorfluter (Donaukanal) und Austrag des entwässerten Rückstands (Filterkuchen).

Tab. 7 zeigt die Güterbilanz der MVA Spittelau. Für andere MVAs ergeben sich andere Güterbilanzen, z.B. bei wenn Schlacke und Gipsschlamm getrennt anfallen.

Tab. 7: Güterbilanz der MVA Spittelau [1], gerundete Werte

	Gut	Masse feucht [t/48 h]	Masse trocken [t/48 h]	Masse feucht [kg]	Masse trocken [kg]
INPUT	Restabfall	1.900	1.300	1.000	1.000
	Zuluft	8.700	8.600	4.579	6.615
	Natronlauge	6,1	6,0	3,2	4,6
	Kalk	9,0	9,0	4,7	6,9
	Wasser	1.200	-	632	0,0
	Summe Input (gerundet)	12.000	9.900	6.316	7.615
OUTPUT	Schlacke/Gipsschlamm	440	370	232	285
	Schrott (aus der Schlacke)	53	53	28	41
	Elektrofilterasche	46	46	24	35
	Abwasser, gereinigt	670	-	353	0
	Filterkuchen	2,7	1,8	1,4	1,4
	Reingas	11.000	9.400	5.789	7.231
	Summe Output (gerundet)	12.000	9.900	6.316	7.615

In keinem der Prozesse innerhalb der Systemgrenze der MVA Spittelau befindet sich ein Lager, d.h. alle Stoffe, die in das System eingebracht werden, werden auch wieder ausgetragen. Die Inputgüter sind Restabfall, Zuluft, Natronlauge und Kalk für die Rauchgasreinigung sowie Frischwasser zur Kühlung der Schlacke und zur nassen Rauchgasreinigung. An Outputgütern fallen Schlacke, Schrott, Elektrofilterasche (= Elektrofilterstaub), Abwasser, Filterkuchen und Reingas an. Der Gipsschlamm wird aus verfahrenstechnischen Gründen im Prozess der Schlacke zugeführt. Das Schlacke/Gipsschlamm-Gemisch wird außerhalb der Systemgrenze der MVA Spittelau ein weiteres Mal entschlottet. Die dabei abgetrennten Mengen an Eisen und ggf. anderen Metallen sind in der Stoffbilanz der MVA Spittelau in Tab. 8 nicht berücksichtigt.

4.1.2. Stoffbilanz

Tab. 8 zeigt, wie sich die mit dem Restabfall eingebrachten Schadstoffe auf die verschiedenen Outputgüter der MVA Spittelau verteilen.

Tab. 8: Mittlere Transferkoeffizienten für ausgewählte Parameter an der MVA Spittelau bei Einsatz von Restabfall [45]

Outputgut / Stoff	C	Cl	Hg	Cd	Cu	Pb	Zn
Reingas	0,98945	7,5E-4	0,0395	7,5E-4	0	7,5E-4	1,7E-4
Elektrofilterasche	0,001	0,199	0,368	0,8972	0,06	0,27884	0,56882
<i>Wäscher Abwasser</i>	<i>7,5E-4</i>	<i>0,68925</i>	<i>0,5005</i>	<i>0,00405</i>	<i>0</i>	<i>0,00101</i>	<i>0,00101</i>
gereinigtes Abwasser	5,0E-5	0,68875	0,0005	5,0E-5	0	1,0E-5	1,0E-5
Filterkuchen	0,0005	0,0005	0,5	0,004	0	0,001	0,001
Schlacke/Gipsschlamm	0,009	0,111	0,092	0,098	0,94	0,72	0,43
Schrott 1)	0	0	0	0	0	0	0

1) angesetzt mit 100 % Eisen

Danach gelangt Kohlenstoff zu ~99 % ins Reingas, Chlor zu ~70 % ins Abwasser, Quecksilber zu 50 % in den Filterkuchen und zu knapp 40 % in den Elektrofilterstaub, Cadmium zu 90 % in die Elektrofilterasche, Kupfer und Blei überwiegend in die Schlacke und Zink zu etwa gleichen Teilen in den Elektrofilterstaub und in die Schlacke. Für Schrott wurde angenommen, dass er zu 100 % aus Eisen besteht [46], was allerdings nicht der Realität entspricht, vgl. Abschnitt 4.2.2. Detaillierte Angaben zu den Metallgehalten der Outputgüter der MVA Spittelau und der anderen thermischen Behandlungsanlagen in Wien sind von Thomé-Kozmiensky et al. [47] publiziert.

4.2. Senkenfunktion der Abfallverbrennung

Im Folgenden wird die Senkenfunktion der Outputgüter der MVA Spittelau und für andere Konzepte der Müllverbrennung diskutiert.

4.2.1. Schlacke/Gipsschlamm

In der MVA Spittelau fallen Schlacke und REA-Gipsschlamm als Gemisch an. MV-Schlacke (Rostschlacke und Kesselasche) kann aufgrund ihrer Herkunft insbesondere hohe Gehalte an Schwermetallen sowie an leicht löslichen Salzen enthalten. Wie Tab. 8 zeigt, gelangt Kupfer zu 94 % und Blei zu 72 % in die Schlacke, gefolgt von Zink mit 43 % und Cadmium mit 10 %. Messwerte zur Dioxinbelastung des Gemisches liegen nicht vor.

Bis Ende 2003 wurde das Schlacke/Gips-Gemisch der MVA Spittelau gemeinsam mit den Schlacken und Aschen der MVA Flötzersteig und Werk Simmeringer Haide und zusammen mit den Elektrofilteraschen der beiden MVAs in der Schlackenaufbereitung der ABA zu einem Deponiebaustoff aufbereitet. Das Schlacke/Gipsschlamm-Gemisch wurde gesiebt, ein weiteres Mal mittels Magnetscheider entschrottet und anschließend mit den Filteraschen, Wasser und Zement versetzt. Der so erzeugte Schlacke-Filterasche-Beton wurde als Baustoff für die Randwälle der Deponie Rautenweg eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens ist von Thomé-Kozmiensky et al. [47] publiziert.

Der offene Einbau des Schlacke-Filterasche-Betons auf der Deponie stellt keine Verbringung der vor allem in der Filterasche enthaltenen Schadstoffe in eine letzte, sondern lediglich in eine temporäre Senke dar. So ist eine langfristige Auslaugung insbesondere der Schwermetalle durch Niederschläge zu erwarten, vgl. Abschnitt 4.2.3.1. Dies ist letztlich nur eine Frage der äußeren Einflüsse (saure Niederschläge, UV-Strahlung, Rissbildung durch Hydratationswärme, Alterung, Erosion, Setzungen etc.) und auch der eingesetzten Analytik (DEV S4 oder „härtere“ Elutionsbedingungen, vgl. [48]). Zudem ist insbesondere für oberirdische Bauwerke wie Deponien keine Bestandsgarantie für mehrere Hundert, geschweige denn ein oder mehrere tausend Jahre zu erwarten. Lediglich im Fall, dass die belasteten Rückstände der Abgasreinigung unter Tage deponiert werden, ist das Freisetzungspotenzial für Schwermetalle und Dioxine minimiert und sind die Schadstoffe in eine letzte Senke verbracht [19]. Aus diesem Grund wird seit dem 1.1.2004 die hoch belastete Elektrofilterasche der beiden Wiener Müllverbrennungsanlagen in der Untertagedeponie Heilbronn abgelagert.

Bei den rund 60 deutschen Müllverbrennungsanlagen wird die Schlacke in der Regel über ein Wasserbad, den Nassentschlacker, ausgetragen. In einigen Anlagen wurde dieser Austrag zu einer einfachen Schlackenwäsche weiterentwickelt. Rund 90 % der MV-Schlacken werden aufbereitet, üblicherweise durch Abtrennung des Überkorns, und, ggf. nach Alterung, verwertet. Vor dem Einsatz einer MV-Schlacke ist deren Eignung für die Verwertung nachzuweisen. Die LAGA hat in ihrer TR LAGA 20 (Stand 11/1997, wird derzeit überarbeitet) Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen Zuordnungswerte (= Z-Werte) für Einbauklassen festgesetzt [49]. Der Einsatz von Schlacke in wasserwirtschaftlich sensiblen Bereichen ist untersagt. Der Einbau darf nur unter wasserdichten

Deckschichten erfolgen (Asphalt, Beton, Verbundpflaster). Die Qualitätsanforderungen werden in Form von Anforderungen an Schlacke selbst (Restgehalt an organisch gebundenem Kohlenstoff u.ä.), Auslaugbeständigkeit (Eluatgrenzwerte) und Dokumentations- und Kontrollanweisungen geregelt. Ein unkontrollierter Einsatz von MV-Schlacke ist nicht zulässig.

Die ökologische Beurteilung der Verwertung von MV-Schlacken orientiert sich wesentlich an deren Auslaugverhalten. Unbehandelte Schlacke setzt über einen längeren Zeitraum organische Verbindungen (TOC), Salze wie Sulfate und Chloride sowie Schwermetalle frei. Eine kontrollierte Alterung, insbesondere verbunden mit intensiver Durchlüftung und regelmäßiger Bewässerung, führt zu einer deutlichen Reduzierung der TOC-Gehalte in der Schlacke und insbesondere im Eluat. Schlacke verfügt über einen so genannten Carbonatpuffer. Dessen Kapazität wird bei Kontakt mit saurem Niederschlagswasser, z.B. wenn die Schlacke nicht unter einer wasserdichten Decke eingebaut wurde, angegriffen. Ein Aufzehren der Pufferkapazität von MV-Schlacken durch sauren Regen wird allerdings erst in größeren Zeiträumen (Jahrhunderte, Jahrtausende) erwartet [50, 51].

Aufbereitete Schlacke *kann* folglich eine Senke für Schwermetalle darstellen. Allerdings ist fraglich, ob der Einbau unter Deckschichten z.B. im Straßenbau die Anforderungen an eine letzte Senke – *ein Ort in der Hydro-, Pedo-, Litho- oder Atmosphäre definiert, in dem die Aufenthaltszeit eines Stoffes mehr als 10.000 Jahre beträgt* – in jedem Fall erfüllt. Aufgrund der steigenden Verkehrsbelastung ist zukünftig sogar mit einem höheren Aufkommen an Straßenaufbruch und -neubau zu rechnen. In wieweit dann die seinerzeit als Tragschicht verwendeten Schlacken nicht doch wieder freigelegt oder umgebaut werden, ist offen.

Vor diesem Hintergrund ist fraglich, ob eine Alterung und Laugung von MV-Schlacken ausreicht, um die Anforderung einer letzten Senke für Schwermetalle zu erfüllen. Hier sind vielmehr weitergehende Behandlungstechniken gefragt, die die Schlacke inertisieren und die enthaltenen Schadstoffe dauerhaft einbinden, z.B. durch Schmelzen oder Verglasung [47]. Solcherart behandeltes Material könnte die Schadstoffe für geologische Zeiträume fest einbinden und damit die Funktion einer *letzten Senke* übernehmen, auch bei einer obertägigen Ablagerung auf Inertstoffdeponien. Derartige Verfahren werden derzeit allerdings vorrangig mit dem Ziel eingesetzt, eine Verwertbarkeit der Behandlungsprodukte als Massenbaustoff zu erreichen. Dies hat aber eine erneute Verteilung der Schadstoffe in der Umwelt und im Lager Baustoffe/Infrastruktur und keine Konzentration und Verbringung in letzte Senken zur Folge. Das Ziel, Schadstoffe zu konzentrieren und sie in letzte Senken zu überführen, kann nur durch Ablagerung auf einer gesicherten Deponie unter Tage oder ggf. durch Verwendung als Bergversatz im Tagebau erreicht werden.

4.2.2. Metallfraktion

Die im Wiener Restabfall enthaltenen Metallprodukte werden nicht vor, sondern nach der Verbrennung als Metallschrott abgetrennt, einmal in der MVA Spittelau selbst und ein weiteres Mal in der Schlackenaufbereitungsanlage vor Erzeugung des Schlacke-Filterasche-Betons für die Randwallbildung auf der Deponie Rautenweg, vgl. Abschnitt 4.2.1.

Der Metallschrott aus MV-Schlacken besteht aus Eisen- und Nichteisenmetallen. Die Komponenten dieser Gruppe sind Weißblech (z.B. Dosenschrott), Aluminium und seine Legierungen, Kupfer, Messing, und Produkte wie Ölfilter, Wasserhähne etc.. In wieweit die in Eisen- und Nichteisenmetallprodukten enthaltenen Schwermetalle im Verbrennungsprozess der MVA in die Gasphase übergehen und anschließend in andere Outputgütern verlagert werden, ist nicht bekannt. Die hohen Temperaturen während der Verbrennung können zum kompletten oder partiellen Aufschmelzen und auch zur Oxidation der metallischen Komponenten führen. So arbeitet z.B. die Wiener Demercurisationsanlage für Quecksilber-haltige Batterien nach dem Prinzip des Ausdampfens von Quecksilber und Cadmium bei Temperaturen im Drehrohrofen von 650 bis 700°C und einer Verweilzeit von 100 Minuten [52].

Untersuchungen zur Schwermetallbelastung von MV-Schrotten nach thermischer Behandlung liegen nicht vor. Als Richtlinie kann hier nach LAGA [53] sowie Pretz und Meier-Kortwig [54] die Anforderung der europäischen Stahlschrottsortenliste dienen, die für die Kategorie *Geshredderter Schrott aus der Müllverbrennung* einen Fe-Schrott-Gehalt von mindestens 92 Gew.-%. fordert. Zudem darf der Schrott einen Teil zinnbeschichteter Stahldosen enthalten, muss aber frei sein von zu hohen Mengen an sichtbarem Kupfer, Zinn, Blei (und Legierung) sowie von Schutt, um die angestrebten Analysenwerte (Cu 0,5 %, Sn 0,07 %) zu erreichen [55]. Es ist davon auszugehen, dass auch der thermisch behandelte Metallschrott aus der Schlacke noch beachtliche Mengen an Schwermetallen, z.B. in Form nicht aufgeplatzter und geschmolzener Batterien enthält.

Die im Rahmen der Schlackenaufbereitung abgetrennten Metalle einschließlich der begleitenden Schwermetalle werden als Sekundärrohstoffe Zielprozessen zugeführt, in denen sie Primärmaterial ersetzen. Dabei werden die Schwermetalle in den Produktions- und Stoffkreislauf zurückgeführt und gelangen damit zurück in das Lager an Produkten, Bauwerken und Infrastruktur. Sie sind aber *nicht in eine Senke* verbracht. Lediglich (Untertage-)Deponien für die Ablagerung der Abgasreinigungsrückstände von Metallhütten können als letzte Senke für Schwermetalle gelten.

4.2.3. Rückstände aus der Abgasreinigung

Bei der mehrstufigen Abgasreinigung der MVA Spittelau fallen verschiedene Rückstände an, deren Verbleib und Senkenfunktion im Folgenden betrachtet wird.

4.2.3.1. Filterstaub (Filterasche)

Filterstäube enthalten einen hohen Anteil an Feinstaubpartikeln, Schwermetallen, wasserlöslichen Salzen (Sulfat, Chlorid) und toxischen organischen Verbindungen. Der Transferkoeffizient Filterstaub beträgt für Cadmium an der MVA Spittelau beinahe 90 %, für Zink immerhin noch 57 % und für Quecksilber knapp 37 %. Messungen zur Dioxinbelastung liegen nicht vor, an anderen Anlagen wurden bis 10 µg I-TE/kg Filterasche gemessen [56]. Wegen ihres hohen Schadstoffgehaltes und des Risikos der Wiederverfügbarkeit wird die Elektrofilterasche der beiden Wiener MVAs seit dem 1.1.2004 in der Untertagedeponie Heilbronn abgelagert, die enthaltenen Schadstoffe sind damit in eine letzte Senke verbracht.

In Deutschland werden Filterstäube aus der Müllverbrennung auf Sonderabfall- oder Untertagedeponien abgelagert oder als Versatzmaterial im Bergbau verwertet. Hohlräume im Salz- und Steinkohlenbergbau zur Aufnahme der Stäube über einen längeren Zeitraum sind vorhanden. Im Gegensatz zu den im Salzbergbau vorhandenen *trockenen* Hohlräumen ist das Vorhandensein von Grubenwasser im Steinkohlenbergbau kritisch zu sehen [56]. Daher wird bei der Auswahl der Einbaubereiche darauf geachtet, dass die Kriterien für den vollständigen Einschluß erfüllt werden, um sicherzustellen, dass eine Gefährdung von Grundwasser durch Schadstoffelution in Grubenwasser auf Dauer ausgeschlossen werden kann.

An der Universität Münster wurden verschiedene Untersuchungen zur Verfestigung von Filterstäuben mit Hilfe verschiedener Bindemittel auf Zementbasis (Hochofenzement, Alinitzement, Portlandzement) und Additive (Wirbelschichtasche aus der Steinkohlenfeuerung, Braunkohlenflugaschen) durchgeführt. Ziel war, die Schadstoffe durch chemische und mineralogische Prozesse so einzubinden, dass ihre Immobilisierung über einen geologischen Zeitraum gewährleistet und eine Deponierung auf Hausmülldeponien der Klasse I bzw. II möglich ist. Allerdings konnte hiermit keine endgültige Senkenfunktion erreicht werden [57]: *Ein längerer Kontakt mit sauren Wässern zerstört teils das Mikrogefüge, teils die Speicherminerale und setzt bis zu 20 % der Schwermetalle und bis zu 80 % der leicht löslichen Verbindungen wieder frei. Bei einer Deponierung ist daher der Zutritt von stärker sauren Wässern auszuschließen. Dieses Verhalten erklärt sich schon dadurch, daß gängiger Zementstein bei $\text{pH} < 4$ zunehmender Korrosion unterliegt.*

Technisch möglich ist auch eine Inertisierung und damit feste Einbindung der Schwermetalle und Salze in die Matrix durch Schmelzen oder Verglasen bei Temperaturen von 1.200°C. Wenn derartige Verfahren mit dem Ziel eingesetzt werden, eine Verwertbarkeit der Behandlungsprodukte als Massenbaustoff zu erreichen, ist damit eine Verteilung der Schadstoffe und keine Konzentration und Verbringung in letzte Senken verbunden. Bei den Schmelzverfahren für Rückstände ist zudem das Problem des Schadstoffeintrags aus der Feuerfestauskleidung des Schmelzofens in den Prozess zu berücksichtigen. Untersuchungen von Zeltner und Lich-

tensteiger [58, 59] zum HSR-Verfahren (Hochtemperatur-Schmelz-Redox-Verfahren) zeigen etwa, dass mehr Chrom aus dem Ofenmaterial als aus dem zu behandelnden Reststoff in den Prozess gelangen kann, welches zudem überwiegend in die Silikat- und nicht in die Metallschmelze gelangt. Vom Verbleib der Granulate aus der Silikatschmelze hängt letztlich ab, ob dieses Verfahren für Chrom einem Ansteuern einer letzten Senke entspricht oder eine erneute Verteilung in der Umwelt nach sich ziehen kann. Für eine ökologische Bewertung ist zudem der mit diesen Verfahren verbundene Aufwand an Energie zu bilanzieren.

Auf der anderen Seite gibt es Überlegungen, Filterstäube so nachzubehandeln, dass die eingebundenen Schwermetalle wie Cadmium wieder verfügbar und stofflich verwertet werden können. Immerhin könnte nach Brunner dadurch z.B. ein Fünftel des jährlichen Imports an Cadmium nach Österreich gewonnen werden [22]: *Hier könnte man die provokante Frage stellen, ob es nicht möglicherweise ökonomisch und ökologisch vorteilhaft wäre, viele heute getrennt behandelte Abfälle wie Hausmüll, Elektronikschrott, Problemstoffe, Batterien, Kfz-Shredderrückstände usw. über eine gemeinsame Sammelschiene in thermischen Anlagen zu konzentrieren, und durch metallurgische Prozesse neben der Energie auch die Metalle wieder zu gewinnen und einem neuen industriellen Kreislauf zu zuführen.*

Ein Beispiel für die Rückgewinnung von ausgewählten Schwermetallen aus Reststoffen der MVA ist die Schweizer Kehrichtverbrennungsanlage (KVA) Emmenspitz [60]. In dieser Anlage werden die Flugstäube in einem Säurebad extrahiert; der Hydroxidschlamm der nachgeschalteten Abwasserreinigung gelangt zum Zink-Recycling in eine Zinkhütte. So werden 33 % der eingebrachten Jahresfracht im Input von 540 t Zink (= 178 t Zn) und 73 % der Jahresfracht von 3,06 t Cadmium (= 2,23 t Cd) einer erneuten Verwendung in Produkten zugeführt.

4.2.3.2. REA-Gips

An der MVA Spittelau wird der Gipsschlamm aus verfahrenstechnischen Gründen im Prozess der Schlacke zugeführt. Bei anderen MVAs fällt der Gips aus der Rauchgasentschwefelung getrennt an. REA-Gips ist teilweise erheblich mit Schwermetallen belastet, die sogar durch destilliertes Wasser wieder ausgelaugt werden können. REA-Gipse werden derzeit als Bergversatz eingesetzt, aber auch stofflich z.B. in der Gips- und Baustoffindustrie (Zement, Beton) verwertet. Über die massenmäßige Aufteilung auf diese Verfahren liegen keine Informationen vor. Vor allem in Steinkohlezechen werden REA-Gipse aus MVAs, Kraftwerken und Klärschlammverbrennungsanlagen als Baustoff zum Bogenausbau, als Streckenbegleitdamm, zur Schachtverfüllung oder als Abschlussbauwerk eingesetzt. Voraussetzung für den Einsatz der Zemente ist eine Zulassung z.B. durch das Landesoberbergamt NRW, wobei u.a. auch die Einhaltung der Grenzwerte der Gesundheits-Bergverordnung nachgewiesen werden muss [61].

REA-Gips aus MVAs weisen eine deutlich höhere Schwermetallbelastung auf als REA-Gipse von Kraftwerken. Letztere werden in großem Umfang im Baubereich verwertet. Der Einsatz von REA-Gipsen aus der Müllverbrennung im Baubereich würde den Schwermetalleintrag in der Anthroposphäre deutlich erhöhen. Aufgrund des hohen Schadstoffpotenzials und ihrer Wiederverfügbarkeit bei Wasserkontakt bedeutet lediglich die untertägige Deponierung eine letzte Senke für die mit dem REA-Gips abgeschiedenen Schwermetalle und auch Salze.

4.2.3.3. Abwasser/Filterkuchen

Die meisten der deutschen MVAs werden abwasserfrei betrieben. Im Falle des Betriebs einer nassen Rauchgaswäsche wie an der MVA Spittelau fällt Abwasser an, welches gereinigt werden muss. Schwermetalle und restliche organische Schadstoffe gelangen dabei überwiegend in den festen Rückstand der Abwasserreinigung, den Filterkuchen, vgl. Tab. 8. Dieser wird unter Tage deponiert, die enthaltenen Schwermetalle sind damit in eine letzte Senke verbracht. Das gereinigte Abwasser weist vor allem eine Belastung mit Chlorid und anderen Salzen auf. Es wird in den Vorfluter Donaukanal eingeleitet. Nach Brunner [22] können Vorfluter, die bereits eine Vorbelastung mit Salz aufweisen und in ein Salzwasser münden, als Senke für Chlorid genutzt werden.

4.2.4. Reingas

Die Transferkoeffizienten in Tab. 8 für Kohlenstoff zeigen, dass dieser in der MVA Spittelau zu beinahe 99 % ins Reingas übergeht. Die im Restabfall enthaltenen Mikroorganismen und die meisten der organischen Stoffe werden vollständig mineralisiert und der Restabfall wird damit hygienisiert. Dabei fallen neben CO_2 weitere Oxidationsprodukte (z.B. NO_x , SO_2) und Elemente in verschiedenen Bindungsformen an, z.B. Halogene in Form ihrer Säuren (HCl, HF) oder Schwermetalle in Form von Salzen (CdO , CdCl_2) oder gasförmig (Hg). Weiterhin können im Rohgas Produkte der unvollständigen Verbrennung wie CO, PCDD/F, PAH und andere organische Mikroverunreinigungen auftreten. Die mehrstufige Abgasreinigung dient dazu, den Durchbruch dieser Stoffe – ausgenommen CO_2 – ins Reingas zu minimieren.

4.2.4.1. CO_2

Das bei der Verbrennung gebildete CO_2 gelangt in die Atmosphäre; diese stellt für CO_2 ein Lager dar, welches sich idealerweise im Gleichgewicht befinden würde (Eintrag = Austrag). Durch die Verbrennung von fossilen Kohlenstoffträgern im Bereich Energieerzeugung und Verkehr, aber auch von Restabfall, wird aber mehr CO_2 in die Atmosphäre abgegeben als ihr wieder entnommen wird. Die Atmosphäre wird dadurch zu einer nicht gewollten Senke für Kohlenstoff mit den bekannten negativen Folgeerscheinungen wie Treibhauseffekt und Klimawandel. Auf der anderen Seite werden durch die Verbrennung und energetische Nutzung der regenerativen Kohlenstoffträger im Restabfall (z.B. Holz) fossile Rohstoffe ersetzt.

Aufforstungen (mehr als 50 Jahre kein Wald), Wiederaufforstungen oder Rodungen zwecks Einbindung von CO₂ in Biomasse gelten nach Art 3.3 des Kyoto-Protokoll als Kohlenstoff-Senke, ebenso Waldwirtschaft, Ackerbau, Grünlandbewirtschaftung und Wiederbegrünung nach Art 3.4. Sollte jedoch infolge eines veränderten Klimas oder veränderter Landnutzung die Speicherkapazität von Wald oder Boden sinken, würde ein Teil des gespeicherten Kohlenstoffs wieder in die Atmosphäre gelangen und diese Systeme wieder zu Kohlenstoffquellen werden.

Eine echte letzte Senke bestünde in einer Form der Deponierung, die das *überschüssige* CO₂ sehr langfristig bindet und keinen negativen Einfluss auf bestehende Ökosysteme hat. Diskutiert werden z.B. die Verpressung von CO₂ in Erdöl-/Erdgas-Lagerstätten, Salzstöcken und Kohleflözen oder die Versenkung von CO₂ im Ozean. Diese angedachten Verfahren zur Überführung von CO₂ in eine Senke wären aber mit einem erheblichen Aufwand an Energie verbunden, die ihrerseits größtenteils unter Einsatz fossiler Quellen und Freisetzung klimarelevanten CO₂s bereitgestellt werden würde. Die Verbringung von CO₂ aus der Verbrennung in letzte Senken ist auf absehbare Zeit nicht zu erwarten.

4.2.4.2. Saure Schadgase

Der Gehalt des Reingases an sauren Schadgasen wird durch die mehrstufige Abgasreinigung der MVA Spittelau deutlich gesenkt. Weniger als 1 % des im Restabfall enthaltenen Chlors oder Fluors (vgl. Tab. 8) gelangen in die Atmosphäre. Schwefel wurde nicht bestimmt. Nach Untersuchungen an anderen Anlagen führen nasse Rauchgasreinigungsverfahren zu Transferkoeffizienten für Schwefel ins Reingas von 2,5 bis 6,5 % [62]. Die Säurebildner werden mit dem Regen aus der Luft ausgewaschen und gelangen letztlich in den Boden oder ins Meer, die damit eine letzte Senke für diese Salze darstellen. Aufgrund der negativen Effekte des von ihnen verursachten sauren Regens – die Rechberger'schen *Transportbänder* [21] – ist die Freisetzung saurer Schadgase über das Abgas zu minimieren. Dies gilt allerdings für alle Verbrennungsprozesse einschließlich des Verkehrs; siehe auch die Forderung nach schwefelarmen Treibstoffen.

4.2.4.3. Schwermetalle

Mit Ausnahme von Quecksilber gelangen weniger als 0,1 % der mit dem Restabfall eingebrachten Schwermetalle in das Reingas der MVA Spittelau und damit in die Atmosphäre, vgl. Tab. 8. Die mit dem Reingas freigesetzten Schwermetalle binden zumeist sehr schnell an Partikel, mit denen sie als Staub sedimentieren. Die Metalle werden damit nicht in eine letzte Senke überführt, sondern befinden sich in der großen *temporären Senke* Umwelt, wo sie zu einer Erhöhung der Hintergrundbelastung des Bodens und der Sedimente führen. Je nach Depositionsfläche können sie den Stoffkreislauf wieder betreten, z.B. über den Pfad Boden → Pflanze → Nahrungsmittel oder Laub → Kompostierung → Acker.

4.2.4.4. Organische Mikroverunreinigungen

Die Freisetzung organischer Mikroverunreinigungen aus MVAs war in der Vergangenheit Gegenstand mehrerer Untersuchungen. So konnten zahlreiche organische Mikroverunreinigungen in der Abluft von Müllverbrennungsanlagen nachgewiesen werden, z.B. von Jay und Stieglitz an der MVA Mainz im Jahr 1995 [35]. Diese Messungen stammen aus der Zeit, als die in Deutschland geplante Verschärfung der Abgasreinigungsvorschriften für MVAs noch nicht umgesetzt waren. Heute weist diese MVA durch erfolgte Nachrüstung eine um knapp den Faktor 10 reduzierte Gesamtemission an organischen Stoffen auf. Die Emissionen der MVA vor erfolgter Nachrüstung der Abgasreinigung sind vergleichbar mit der Situation für die mechanisch-biologische Restabfallbehandlung, die seit Frühjahr 2003 ebenfalls schärferen Vorschriften für die Abluftreinigung einzuhalten haben. Sofern organische Mikroverunreinigungen bei der Verbrennung neu gebildet werden oder der Austrag dieser Stoffe den Eintrag mit dem Restabfall überwiegt, stellt die Müllverbrennung eine Quelle für diese Stoffe dar. Sofern der Eintrag dieser Stoffe aber den Austrag überwiegt, stellt die Müllverbrennung eine anteilige letzte Senke dar. Zur Klärung dieser Frage wird im Folgenden der Stofffluss an Polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen (*Dioxine*, PCDD/F) an der MVA Spittelau bilanziert.

Dioxinanalysen des Wiener Systemmülls liegen nicht vor. Nach älteren Untersuchungen [63] weist Restabfall eine Dioxinbelastung von rund 50 bis 200 µg ITE/kg auf. Bei Ausschöpfung des Emissionsgrenzwertes der 17. BImSchV von 0,1 ng ITE/Nm³ wird maximal 1 % des Gehaltes an PCDD/F im Restabfall über den Abgaspfad emittiert. Die MVA Spittelau weist eine mittlere Dioxinkonzentration im Reingas von 0,025 ng/m³ auf [64]. Moderne MVAs erreichen allerdings Werte, die deutlich unter dem Grenzwert von 0,1 ng ITE/Nm³ liegen [20].

Tab. 9: Grob abgeschätzte Dioxinbilanz der MVA Spittelau

	Güter	Bemerkungen	µg I-TE/t Abfall
Input	Restabfall	Daten aus [63]	50 - 200
Output	Schlacke/Gips-Gemisch ¹⁾	232 kg/t * 5-1.000 ng I-TE /kg	1,16 - 232
	Elektrofilterasche	24 kg/t * 0,01-10 µg I-TE /kg TS [56]	0,24 - 240
	Abwasser	353 kg/t * < NWG	0
	Filterkuchen	1,4 kg/t * 0,01-10 µg I-TE /kg [56]	0,014 - 14
	Gereinigtes Abgas	5.800 m ³ /t * 0,025 ng I-TE/m ³ [64]	0,145
	Summe Output		1,6 - 468

1) Annahme basierend auf Daten von [56] und einem Anteil von maximal 10 % Gips am Gemisch; Analysedaten sind nicht publiziert.

Tab. 9 zeigt eine grob abgeschätzte Dioxinbilanz der MVA Spittelau. Der Einfachheit halber wurde die Güterbilanz für 1 t Restmüll FS verwendet, die Daten für die PCDD/F-Gehalte in

den Outputgütern aber mit TS bzw. Gehalt trocken (Abgas) berechnet. Da keine Analysendaten für die festen Rückstände vorlagen, wurde mit den in der Literatur verfügbaren Spannbreiten gerechnet. Der Dioxinaustrag mit der Schrottfraction wurde gleich Null gesetzt.

Nach Tab. 9 führt die Müllverbrennung in der MVA Spittelau je nach Qualität und Verbleib der Reststoffe zu einer Verringerung oder Erhöhung der Umweltbelastung mit PCDD/F. Die dominierenden Frachträger für PCDD/F innerhalb der MVA Spittelau sind, wie Tab. 9 zeigt, das Schlacke/Gips-Gemisch, die Elektrofilterasche und der Filterkuchen. Die beiden letztgenannten Outputgüter werden in die deutsche Untertagedeponie Heilbronn und die Dioxine und anderen abgeschiedenen Schadstoffe damit in eine letzte Senke verbracht.

Das Schlacke/Gips-Gemisch wird mit Filteraschen aus der Klärschlammverbrennung (WSO 1 bis 3) vermischt, mit Zement verfestigt und als Schlacke-Filterasche-Beton auf der Deponie Rautenweg verbaut. Im worst case – bei Vorliegen der in der Literatur beschriebenen Maximalgehalte an PCDD/F in REA-Gipsen (bis 10 µg I-TE/kg TS [56]) – können durch diese Art der Reststoffverbringung ungefähr so viel Dioxine auf die Deponie verbracht werden wie bei direkter Ablagerung des unbehandelten Restabfalls. Im best case beträgt der Eintrag auf die Deponie weniger als 1 % des Dioxingehaltes des Restabfalls.

Dieses ist eine reine Massenbetrachtung. Zu klären ist auch die Frage der Verfügbarkeit der Schadstoffe. So ist davon auszugehen, dass PCDD/F und die anderen persistenten organischen Mikroverunreinigungen aufgrund der Verfestigung mit Zement (und anschließender Abdeckung mit Boden und Begrünung) weniger gut freisetzbar sind als bei unvorbehandelt abgelagertem Restabfall. Eine Senkenfunktion für PCDD/F im Sinne einer dauerhaften Ausschleusung aus dem Stoffkreislauf wird aber in keinem der beiden Fälle erreicht.

Für andere Müllverbrennungsanlagen lassen sich vergleichbare Dioxinbilanzen aufstellen. Entscheidend ist jeweils zum Einen die Frage, wie die de novo-Synthese von Dioxinen verhindert wird, z.B. durch Verbrennungsführung oder Abgas-Quenche, und zum Andere, wie die Reststoffe, die eine hohe Dioxinbelastung aufweisen, weiter behandelt bzw. wohin sie verbracht werden. So können etwa die Stäube in der Hagenmaiertrommel unter Luftabschluß auf über 400° erhitzt werden, wobei die anhaftenden Dioxine und Furane zerstört werden (realisiert z.B. im MHKW Bonn). Werden die Rückstände z.B. in gesicherte Deponien (möglichst unter Tage) verbracht, ist das Freisetzungspotenzial für Schwermetalle und Dioxine minimiert, die Schadstoffe sind in eine letzte Senke verbracht.

5. Senken beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen

Mechanische oder mechanisch-biologische Restabfallbehandlungsanlagen erzeugen mindestens eine hochkalorische Fraktion für den Einsatz in Mono- oder Mitverbrennungsanlagen. Die Möglichkeiten der Schadstoffentfrachtung durch mechanische oder mechanisch-

biologische Aufbereitung von Restabfällen sind eher gering, wenn auch Entwicklungspotenziale bestehen [65]. Oftmals weisen Ersatzbrennstoffe aus Siedlungsabfällen eine höhere Belastung mit Chlor und Schwermetallen auf als die Regelbrennstoffe von Zementwerken und Kraftwerken.

Zementwerke verfügen in der Regel nur über zwei Outputgüter: die gereinigte Abluft und das Produkt, d.h. den Klinker oder den daraus erzeugten Zement. Der hoch belastete Ofenstaub wird zumeist nicht als Abfall entsorgt, sondern dem Klinker in der Zementmühle zugeschlagen. Da sich im Zementofen kein Lager bildet, verteilen sich also alle mit den Roh- und Brennstoffen eingebrachten Schwermetalle auf die beiden genannten Outputpfade.

Die Zementindustrie betont, dass die rohstoffbedingten Emissionen die brennstoffbedingten Emissionen in der Regel deutlich überwiegen [66]. Dieses gilt gleichermaßen für die Schwermetallbelastung der Rückstände. Wegen des Gesetzes der Erhaltung der Masse führt der Einsatz von Ersatzbrennstoffen, die eine höhere Schwermetallbelastung als die Regelbrennstoffe aufweisen, zu einer erhöhten Schwermetallbelastung des Klinkers oder Zements, insbesondere wenn der hoch belastete Ofenstaub dem Klinker in der Zementmühle zugesetzt und nicht als Abfall beseitigt wird. Die Verwendung belasteter Ersatzbrennstoffe (und auch Zuschlagstoffe, s.u.) stellt keine Verbringung von Schwermetallen in letzte Senken, sondern in das große Lager Infrastruktur/Bauwerke dar. Schwermetalle erfüllen in diesen Bauprodukten keinen Zweck, sie werden lediglich in der Bausubstanz weiter verteilt und werden in nicht allzu ferner Zukunft die Verwertbarkeit dieser Materialien deutlich verschlechtern. Zudem besteht das Risiko der langfristigen Wiederverfügbarkeit durch Auslaugung [48].

Bei Kraftwerken findet – unabhängig vom Feuerungstyp – eine Verlagerung der Schwermetalle aus dem Brennstoff in die festen Rückstände statt. Ist die Schwermetallbelastung der Ersatzbrennstoffe höher als die der Regelbrennstoffe, hat dies eine Erhöhung der Schwermetallgehalte der festen Rückstände zur Folge. Die Flugstäube sowie Aschen und Schlacken von Kraftwerken gelangen entweder in den Tagebau zur Rekultivierung oder werden als Zuschlagstoff bei der Erzeugung von Spezialzementen eingesetzt. Flugaschen aus Kraftwerken dürfen bei der Betonherstellung nach DIN EN 450 allerdings nur verwertet werden, wenn die Energieerzeugung ohne Abfalleinsatz erfolgt ist.

Derzeit deckt die deutsche Zementindustrie ihren Bedarf an Sulfatträgern, mit denen die Verarbeitungseigenschaften der Zemente gesteuert werden, zu ~30 % durch REA-Gips [66]. Die Transferfaktoren für Schwermetalle aus dem Input in den REA-Gips von Kraftwerken (Schmelzkammer- oder Trockenfeuerung) betragen z.B. für Quecksilber 8 bis 42 %, für Cadmium 5 bis 8 % und für Blei 1 bis 6 % [67]. Bei Erhöhung der Belastung des Brennstoffs mit Schwermetallen nehmen auch die Schwermetallgehalte des REA-Gipses und bei dessen Einsatz als Sulfatträger in der Zementerzeugung auch die Belastung des Zementes weiter zu.

Der Einsatz von höher belasteten Reststoffen aus Kraftwerken bei der Herstellung von Zement oder Beton stellt keine Verbringung in letzte Senken, sondern in das große Lager Bau-substanz/Infrastruktur dar. Lediglich der Einsatz im Tagebau zur Rekultivierung kommt dem Anspruch einer Verbringung in eine letzte Senke nahe.

6. Schlußfolgerungen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Stoffflussanalysen an drei verschiedenen Anlagen zur Behandlung oder Aufbereitung von Restabfall dargestellt. Der Input in zwei der drei Anlagen – mechanische Aufbereitung und MVA – ist identisch, der in die MBA dürfte hinsichtlich der Schadstoffbelastung nicht wesentlich davon abweichen. Lediglich die betrachtete MVA entspricht dem Stand der Technik; für die anderen Anlagen wurden aber Entwicklungspotenziale berücksichtigt, so dass aus einem groben Vergleich der Anlagen bzw. der von ihnen repräsentierten Prozesse Aussagen zur Senkenfunktion abgeleitet werden können.

Die originäre Aufgabe der Abfallbeseitigung, die Minimierung des im Restabfall vorhandenen Potenzials an für Mensch oder Umwelt gefährlichen Organismen und Stoffen, wird von den betrachteten Prozessen unterschiedlich gut erfüllt. Die thermischen Verfahren – hier die Müllverbrennung, die Verbrennung von Ersatzbrennstoffen und die thermische Behandlung von Rotteabgasen – führen zu einer Zerstörung von Mikroorganismen und damit zu einer Hygienisierung des Abfalls oder der behandelten Teilfraktion. Legt man die Vitalfunktion von lebenden Organismen als Maßstab an, dann stellen diese Verfahren und mit Abstrichen die Rotteverfahren eine Senke dar.

Für organische Verbindungen stellen diese Verfahren Senken in dem Sinne dar, dass die ursprüngliche Stoffeigenschaft verloren geht, Bindungen zerstört oder aber die Stoffe mineralisiert werden. Sofern organische Stoffe bei der Behandlung gebildet werden (mikrobieller Metabolismus) oder der Austrag dieser Stoffe den Eintrag mit dem Restabfall überwiegt (de novo-Synthese), stellt der Behandlungsprozess eine *Quelle für diese Stoffe* dar. Sofern der Eintrag dieser Stoffe aber den Austrag überwiegt, stellt der Behandlungsprozess für diese Stoffe eine anteilige Senke und zugleich eine Quelle für die beim Abbau gebildeten neuen Stoffe dar. Es gilt das Gesetz von der Erhaltung der Masse – die Bindungsformen ändern sich, aber die Elemente bleiben erhalten. Die Senke des einen Stoffes ist zugleich die Quelle eines neuen Stoffes oder mehrerer neuen Stoffe.

Auch anorganische Stoffe werden bei der thermischen oder biologischen Behandlung in andere Bindungsformen überführt. In sofern stellen alle drei betrachteten Verfahren keine Senken, sondern *Systeme zur Umwandlung, Konzentrierung und Verteilung von Stoffen aus dem Input auf verschiedene Outputgüter* dar. Konzentriert in den Outputgütern können die Stoffe dann in Zielprozesse, Lager, temporäre oder letzte Senken überführt werden

Die Konzentrierung von Schadstoffen wie Schwermetallen in den Outputgütern jedweder Abfallbehandlungstechnologie ist kein Wert an sich. Entscheidend für die Erfüllung der beiden großen Aufgaben der Abfallwirtschaft – Minimierung des Gefahrenpotenzials für Mensch und Umwelt sowie Ressourceneffizienz – ist die Frage, in welchem Umfang und mit welchem Aufwand Stoffe in diesen Gütern konzentriert werden, und ob sie danach in die geeigneten Zielprozesse oder Senken verbracht oder großräumig und nicht mehr rückholbar in dem großen Lager Umwelt verteilt werden.

Für die Stoffflussanalyse war das methodische Problem der Anwendung auf Organismen und organische Verbindungen im Abfall zu lösen. Dieses konnte durch eine Weiterentwicklung des Senken-Begriffes erreicht werden. Diese Problematik verdient es, in Zukunft vertieft betrachtet zu werden, z.B. im Hinblick auf Struktureffekte wie Bildung und Abbau von Bindungstypen, etwa Ringstrukturen oder Kohlenstoff-Halogen-Verbindungen (C-Cl, C-F).

7. Quellenverzeichnis

Die angegebenen Internetadressen waren im August 2004 gültig.

- 1 ÖWAV-Regelblatt 514 – Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft. Wien, September 2003
- 2 Brunner P.H., Rechberger H.: Practical Handbook of Material Flow Analysis. Advanced Methods in Resource & Waste Management Volume: 1, Lewis Publishers, CRC Press LLC, Florida, 2003
- 3 Jäger E., Zeschmar-Lahl B., Rüdén H.: Hygienische Risiken von Arbeitsplätzen in der Abfallwirtschaft. Müllhandbuch, Kz. 5065, Lfg. 5/96, 1996
- 4 Seidl H.P.: Mikrobiologie des Abfalls. In: Mücke W (Hrsg.): Keimbelastung in der Abfallwirtschaft. Tagung 26.4.1995, München, Institut für Toxikologie und Umwelthygiene, TU München, S. 5-30, 1995
- 5 Fischer G., Müller T., Schwalbe R., Ostrowski R., Dott W.: Exposure to airborne fungi, MVOC and Mykotoxins in biowaste-handling facilities. Int. J. Hyg. Environ. Health 203, 97-104, 2000
- 6 Linsel G. (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin): Bioaerosole – Entstehung und biologische Wirkungen. <http://www.baua.de/info/fachzeit/bioaerosol.pdf>
- 7 Böhm R., Martens W., Philipp W.: Hygienische Relevanz von Keimemissionen bei Sammlung und Behandlung von Bioabfällen. In: Wiemer K., Kern M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung II, 311-344, 1998
- 8 Bartels P., Kruse H.: Kompostierung. Messung und toxikologische Bewertung flüchtiger organischer Substanzen (VOC) in der Abluft von Kompostieranlagen. Schriftenreihe des Instituts für Experimentelle Toxikologie, Universitätsklinikum Kiel, 2002
- 9 Zeschmar-Lahl B.: Bioaerosole und biologische Abfallbehandlungsanlagen – Ursachen, Risiken, Minderungsmaßnahmen. Fachtagung Mechanisch-biologische Abfallbehandlung – Herstellung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen. Berlin, 26./27.10.2004; siehe www.vivis.de
- 10 TRBA 210 – Abfallsortieranlagen: Schutzmaßnahmen. BArbBl. 6/99, S. 77-81, 1. Änderung BArbBl. 8/01, S. 79, 2001; http://www.baua.de/prax/abas/trba_210.pdf
- 11 TRBA 211 – Biologische Abfallbehandlungsanlagen: Schutzmaßnahmen. BArbBl. 8/01, S. 83-89, mit Änderungen und Ergänzungen: BArbBl. 10/02, S. 84-85, 2002; http://www.baua.de/prax/abas/trba_211.pdf

- 12 TRBA 212 – Thermische Abfallbehandlung: Schutzmaßnahmen. BArbBl. 10-2003, S. 39-44, 2003;
<http://www.baua.de/prax/abas/trba212.pdf>
- 13 Ausschuß für Biologische Arbeitsstoffe (ABAS): Beschluss 606: Biologische Arbeitsstoffe mit sensibilisierender Wirkung. BArbBl. 3/03, S. 66-68, 2003; <http://www.baua.de/prax/abas/besch606.pdf>
- 14 TRGS 907 – Verzeichnis sensibilisierender Stoffe. Oktober 2002;
http://www.baua.de/prax/ags/trgs_907.pdf
- 15 Rat von Sachverständigen für Umweltfragen: Umweltgutachten 2004. Umweltpolitische Handlungsfähigkeit sichern. Mai 2004; http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/umweltg/UG_2004_If.pdf
- 16 NICNAS (National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme), Sydney (AU):
http://www.nicnas.gov.au/publications/pdf/Alert_1_PFOS.pdf
- 17 OECD: Hazard assessment of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and its salts.
ENV/JM/RD(2002)17/FINAL. 21-Nov-2002. <http://www.oecd.org/dataoecd/23/18/2382880.pdf>
- 18 Kuch B., Schneider C., Metzger J.C.: Monitoring der Desinfektionsmittel Triclosan, Triclocarban und Hexachlorophen in Fließgewässern, Sedimenten, Klärschlamm, Zu- und Abläufen von Kläranlagen. Forschungsbericht FZKA-BWPLUS, 2003; Förderkennzeichen BWB 21009
- 19 Zeschmar-Lahl B.: Die Senkenfunktion der Müllverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1, 119-144, 2004
- 20 Zeschmar-Lahl B.: Stoffflussanalyse als Instrument zur Optimierung der Abfallbehandlung. In: Kossina I. (Hrsg.): Abfallwirtschaft für Wien, 399-429, 2004
- 21 Rechberger H.: Über die Verbrennung zur letzten Senke. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1, 107 – 117, 2004
- 22 Brunner P.H.: Die Müllverbrennung – unverzichtbarer Bestandteil einer nachhaltigen Abfallwirtschaft.
<http://www.tirol.gv.at/themen/umwelt/abfall/downloads/argumentationshilfe-mva-fuer-oesterreich.pdf>
- 23 Doedens H. et al. (ISAH) und Kahn R. et al. (HAASE ENERGIETECHNIK AG): Erprobung einer nicht-katalytischen thermischen Oxidation zur Behandlung von Abluft aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. BMBF-Verbundvorhaben, Teilvorhaben 1: Verfahrenstechnische Überprüfung der Anlagenkonzeption, Förderkennzeichen: 0330240, Teilvorhaben 2: Untersuchungen zur Führung des Abluftmanagements, Förderkennzeichen: 03361257. Download: http://www.haase-energietechnik.de/de/Products_and_Services/Gas_Engineering/VocsiBox/BMBF-Abschlussbericht_2.pdf
- 24 AssTech, Swiss Re Group: Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC). Newsletter 3.03,
http://www.asstech.com/de/downloads/newsletter03_PFC.pdf
- 25 Zeschmar-Lahl B.: Stoffflussanalyse an einer mechanischen Aufbereitungsanlage – Eintrag und Verbleib von Chlor und Metallen. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3, 231-259, 2003
- 26 Rotter S.: Potenzial und Verteilung von Schwermetallen in Haushaltsabfällen und Steuerungsmöglichkeiten durch Aufbereitung. TU Dresden, Schriftenreihe „Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten“, Bd. 27, 2002
- 27 Bidlingmaier W., Alt M.: Die Beeinflussung von Schwermetallemissionen aus Müllheizkraftwerken durch Vorsortierung des Inputmaterials. In: Thomé-Kozmiensky K.J. (Hrsg.): Müllverbrennung und Umwelt, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin, 535-569, 1985
- 28 Holarek M., Lischke G.: Wirbelschichtofen zur Verbrennung von Klärschlamm und Ersatzbrennstoff. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung, S. 245-286, 2003
- 29 Harant M.: Stoffflussanalyse bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung vor der Deponierung. Dissertation am Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben, 02/1999
- 30 Harant M., Nelles M., Hofer M., Lorber K.E., Raninger B.: Stoffflussanalyse bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung. Schriftenreihe Abfall – Umwelt, Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben, 1999

- 31 Umweltbundesamt (A): Abluftemissionen der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. Anlage Allerheiligen. BE-139, Wien, Januar 1999
- 32 Cuhls C.: Schadstoffbilanzierung und Emissionsminderung bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. Dissertation, Universität Hannover, FB Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1999
- 33 Doedens, H.; Cuhls, C.: Bewertung der Emissionen aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen im Hinblick auf die neue BImSchV. In: Wiemer K., Kern M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung IV, 607-629, 2000
- 34 Kennes C., Thalasso F.: Waste-gas biotreatment technology. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 72(4), 303-319, 1998
- 35 Jay K., Stieglitz L.: Identification and quantification of volatile organic components in emissions of waste incineration plants. *Chemosphere* Vol 30, No. 7, 1249-1260, 1995
- 36 Hanus-Illnar A.: Abluftemissionen der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. Pilotanlage Kufstein. UBA-Berichte BE-126, Wien, Mai 1999.
- 37 Angerer T.: Abluftreinigung bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA). UBA-Berichte BE-156, Wien, November 1999
- 38 Häusler G., Lahl U., Zeschmar-Lahl B.: Emissionsvergleich MBA/MVA. Datensammlung. UBA Wien, IB 613, Juni 2000
- 39 Eckrich C., Jager E., Rüden H., Jager J.: Keimkonzentrationen aus der Sicht der Immunologie. In: Mücke W. (Hrsg.): Keimbelastung in der Abfallwirtschaft. Tagung 26.4.1995, München, Institut für Toxikologie und Umwelthygiene, TU München, 51-75, 1995
- 40 Vissienon T., Huwe C., Kliche R.: Zur Emission von Pilzsporen aus Biofiltern von Kompostieranlagen. *Forum Städte-Hygiene* 47, 5/6, 199-203, 1996
- 41 Neumann H.-D., Mathys W., Raulf-Heimsoth M., Becker G., Balfanz J.: Gefährdung von Beschäftigten bei der Abfallsammlung und -abfuhr durch Keimexpositionen. BAuA-Fb 920, 2001
- 42 Weiler, S.; Trepkau, H. D.; Hellendoorn, J.; Senkpiel, K.; Görs, S.; Schauer, M.; Bünger, J.; Kessel, R.: Luftkeimbelastung, Sensibilisierungsstatus und arbeitsmedizinisch-pneumologische Befunde bei Fahrern von Müllfahrzeugen. *Symposium Medical* 11, 13-14, 2000
- 43 Doering K.: Verlängerung der Nutzungsdauer von Altdeponien durch einfache mechanisch-biologische Behandlung am Beispiel der Zentraldeponie Nienburg. Manuskript, 1996, zit. in: Zeschmar-Lahl B., Lahl U.: Mechanisch-biologische Restabfallbehandlungsanlagen. Hrsg.: Thüringer Umweltministerium, Erfurt, 148 S., 1996
- 44 Kummer, V., R. Haumacher, W. Philipp, Böhm R.: Untersuchungen zum Abscheideverhalten von Abluftreinigungsanlagen im Hinblick auf Bioaerosole. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 9, 368 ff., 2003
- 45 Morf L., Ritter E., Brunner P.H., TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft: Online-Messung der Stoffbilanz auf der MVA Spittelau. Phase B – Messjahr 2001, im Auftrag der MA 22 und 48 der Stadt Wien und der Fernwärme Wien GmbH
- 46 Schachermayer E., Bauer G., Ritter E., Brunner P.H.: Messung der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage. Bundesministerium für Umwelt, Wien: Monographien, Bd. 56, 1995, hier Fußnote 19
- 47 Thomé-Kozmiensky K. J., Löschau M., Kley G., Köcher P, Thiel S.: Entsorgung von Sekundärabfällen aus der Abfallverbrennung. In: Kossina I. (Hrsg.): Abfallwirtschaft für Wien. 497-742, 2004
- 48 Zeschmar-Lahl B.: Schadstoffanreicherung im Erzeugnis aufgrund des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken und Feuerungsanlagen – erforderliche Reglementierungen aus der Sicht des technischen Umweltschutzes. Dissertation, TU Berlin, Juli 2003
- 49 LAGA: Stoffliche Verwertung von Abfällen in und auf Böden. Stand 6. November 1997. Müllhandbuch, Kz. 6541, Lfg. 2/99; identisch mit TR LAGA 20 Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen – Technische Regeln – LAGA – Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, Stand: 6. November 1997. Erich Schmidt Verlag Berlin, 1998,

- 50 Lahl U.: Verwertung von MVA-Schlacken - durch Optimierung konventioneller Aufbereitung (II). Müll und Abfall 9, 619-633, 1992
- 51 Huber H., Jaros M., Lechner P.: Emissionsverhalten von MVA-Schlacke nach künstlicher Alterung. BO-KU Wien, Endbericht, Dezember 1996 https://www.wien.gv.at/ma22/pool/doc/alterung_schlacke.pdf
- 52 Thomé E.: Demercurisationsanlage für das Recycling von Batterien. In: Kossina I. (Hrsg.): Abfallwirtschaft für Wien, 459-495, 2004
- 53 LAGA: Merkblatt der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall für die Entsorgung von Abfällen aus Verbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle. GABl. Nr. 1/1995 S. 66 http://www.gaa.baden-wuerttemberg.de/Vorschriften/Abfr/6_3.pdf
- 54 Pretz Th., Meier-Kortwig J.: Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung. http://www.ifa.rwth-aachen.de/lfa/download/VuV/SFB525/V06_SFB525.pdf
- 55 Europäische Stahlschrottsortenliste. <http://www.hera-herne.de/pdf/Eisenschrott.pdf>
- 56 Leclair T., Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik, Bereich: Umwelttechnik, Universität Duisburg-Essen, Fakultät 5 - Abteilung Maschinenbau: Behandlung und Verwertung von HVM-Rückständen. http://www.uni-duisburg.de/FB7/FG15/documents/hmv_rueckstaende.html
- 57 Schmitt-Rieggraf C.: Verfestigung von Rückständen aus der Rauchgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen mittels verschiedener Additiva und Bindemittel. <http://www.uni-muenster.de/Mineralogie/Personen/conny/UMWELT.HTM>
- 58 Lichtensteiger T.: Produkte der thermischen Abfallbehandlung als mineralische Zusatzstoffe in Zement und Beton. Müll und Abfall 2, 80 – 84, 1997
- 59 Zeltner C., Lichtensteiger T.: Thermal waste treatment and resource management – a petrological approach to control the genesis of materials in smelting processes. Environ. Eng. Policy 3, 75 – 86, 2002
- 60 Frey R., Brunner M. (Von Roll Umwelttechnik AG, Zürich): Rückgewinnung von Schwermetallen aus Flugaschen der Müllverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1, 667-680, 2004
- 61 Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (VersatzV), Begründung http://www.bund-nrw.de/files/bergversatz_begruendung.pdf
- 62 Achternbosch M., Richers U.: Stoffstromanalysen zur abwasserfreien und abwassererzeugenden Verfahrenskonzeption von „nassen“ Rauchgasreinigungssystemen. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 5773, 1996 <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA5773.pdf>
- 63 Wilken M., Zeschmar-Lahl B.: Schadstoffe in festen Abfällen. Müllhandbuch, Kz. 1752, Lfg. 7/94; TE sind dort TE nach BGA; Unterschied zu I-TE nur marginal, daher Daten 1 : 1 übernommen
- 64 Hartl H., Angerer T.: Erfahrungen mit SCR-Anlagen nach der Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1, 443-477, 2004; abgeschätzt anhand von Bild 10
- 65 Flamme S.: Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Bd. 5, 2002
- 66 VDZ: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2002 <http://www.vdz-online.de/downloads/umwelt/umw02.pdf>
- 67 Prognos AG, Berlin: Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kraft- und Kalkwerken. Hrsg.: MUNLV NRW, September 2003