

Stoffflussanalyse als Planungsinstrument für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen

Dr. Barbara Zeschmar-Lahl, Oytten

Übersicht

1. STOFFFLUSSANALYSE – EINE KURZE EINFÜHRUNG.....	2
2. ERSATZBRENNSTOFFE	3
3. ANWENDUNG DER STOFFFLUSSANALYSE IN DER ABFALLWIRTSCHAFT	4
4. CHARAKTERISIERUNG VON RESTABFALL	6
5. STOFFFLUSSANALYSE BEI DER AUFBEREITUNG VON RESTABFALL ZU ERSATZBRENNSTOFFEN	8
5.1. Erzeugung einer heizwertreichen Leichtfraktion in der Mechanischen Abfallaufbereitungsanlage Wien (BZL GmbH)	8
5.2. Optimierung der Ersatzbrennstoffherzeugung (TU Dresden)	10
5.3. Schwermetallentfrachtung von heizwertreichen Abfällen und Abfallfraktionen (INFA GmbH)	12
5.4. Stoffflussanalyse als Instrument zum Nachweis einer Schadstoffanreicherung in der Ersatzbrennstoffaufbereitung	13
6. STOFFFLUSSANALYSE FÜR DEN EINSATZ VON ERSATZBRENNSTOFFEN AM BEISPIEL VON KRAFTWERKEN	13
6.1. Emissionsgrenzwerte für Mitverbrennungsanlagen nach 17. BImSchV	13
6.2. Betrachtung der festen Rückstände von Kraftwerken	15
6.2.1. Schwermetall-Transfer in die festen Rückstände der Rauchgasreinigung	15
6.2.2. Verwertbarkeit von Flugstäuben / DIN EN 450	18
6.2.3. Schadstoffanreicherung im Erzeugnis?	19
6.3. Stoffflussanalyse als Planungsinstrument für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerken	20
7. FAZIT.....	21
8. LITERATUR	22

1. Stoffflussanalyse – eine kurze Einführung

Die Stoffflussanalyse wurde von Baccini und Brunner [1] zur Bilanzierung von Güter- und Stoffflüssen eingeführt und u.a. von Rechberger [2] weiterentwickelt. Sie kann je nach Wahl des untersuchten Systems und dessen Systemgrenzen auf eine Anlage, einen Betrieb, eine Stadt oder ein Land angewendet werden. Das Prinzip ist immer das gleiche. Das untersuchte System oder der Prozess wird in der Regel als *black box* betrachtet. Ein definierter Input eines Stoffes wird in das System eingebracht und verlässt dieses verteilt auf einen oder mehrere Outputströme. Innerhalb des Systems oder Prozesses können sich auch Lager bilden. Ohne Lagerbildung müssen Input und Output jedes Stoffes identische Werte ergeben.

Die Einträge in und Austräge aus einem zu betrachtenden System werden quantitativ erfasst, beispielsweise als Fracht eines Stoffes X in Masse je Zeiteinheit [kg/h] oder je Volumeneinheit [mg/m³]. Im einfachsten Fall finden sowohl der Eintrag als auch der Austrag nur über einen Pfad statt. In der Praxis sind die Fälle in der Regel komplexer, hier sind mehrere Input- und Outputgüter zu betrachten.

Die Verteilung des betrachteten Stoffes auf die verschiedenen Outputgüter wird anhand der Transferkoeffizienten oder auch Transferfaktoren beschrieben. Sie geben wieder, wieviel Prozent des Stoffes aus dem Input in den jeweiligen Outputpfad gelangen. Die Summe aller Transferkoeffizienten muss 1 bzw. 100 % ergeben. Dabei wird davon ausgegangen, dass das System im Gleichgewicht ist und konstante Bedingungen vorliegen.

Die Stoffflussanalyse ist auf die Frage von Wegen und Verbleib der bilanzierten Schadstoffe beschränkt. Andere wichtige Aspekte beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Mitverbrennungsanlagen können mit dieser Methode nicht erfasst werden:

- Technische Probleme: Hier sei verwiesen auf Probleme in Folge des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerken, wie z.B. der niedrigere Ascheerweichungspunkt von im Ersatzbrennstoff enthaltener Biomasse. Dieser kann zu harten Anbackungen führen, die je nach Feuerungstyp technische Probleme z.B. bei der Kesselascheförderung nach sich ziehen können [3]. Auch ein hoher Aluminiumgehalt in Ersatzbrennstoffen kann zu Beschädigungen an Anlagenteilen, z.B. am Multizyklon und dem nachfolgenden Aschetransportsystem führen [4].
- Toxikologische Aspekte: Die Stoffflussanalyse berücksichtigt nur Gesamtgehalte (z.B. Chrom gesamt, Cadmium), aber keine Bindungsformen oder Verbindungen und damit auch nicht die unterschiedliche Toxizität von Stoffen (z.B. Chrom-III oder Chrom-VI, Cadmiumoxid oder Cadmiumchlorid).

2. Ersatzbrennstoffe

Ersatzbrennstoffe werden oft synonym mit den Begriffen „Sekundärbrennstoffe“ oder „Substitutbrennstoffe“, im englischen Sprachgebrauch auch mit RDF – *refuse derived fuels* [5] – oder SRF – *solid recovered fuels* [6] – bezeichnet.

- **Ersatzbrennstoffe**

Der deutsche Gesetzgeber spricht im KrW-/AbfG § 4 Abs. 4 vom Einsatz von Abfällen als **Ersatzbrennstoff**. Nach Pretz [7] beschreibt dieser Begriff lediglich eine aufbereitete hochkalorische Fraktion, die durch einfache aufbereitungstechnische Maßnahmen in ihrem Heizwert angereichert wird

- **Sekundärbrennstoffe**

Sekundärbrennstoffe sind nach Pretz [7] weiter aufbereitete hochkalorische Abfälle. Die 1999 gegründete Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe – BGS – grenzt ihre Sekundärbrennstoffe von den Ersatzbrennstoffen ab, da erstere nach Einschätzung der Gütegemeinschaft nur eine Teilmenge der Ersatzbrennstoffe erfassen. Die BGS-Sekundärbrennstoffe werden *„einerseits aus heizwertreichen Abfällen und andererseits aus heizwertreichen Fraktionen gemischt erfasster Abfälle aus Haushalten, Gewerbe und Industrie hergestellt. Bei den Ausgangsmaterialien handelt es sich also ausnahmslos um nicht besonders überwachungsbedürftige Abfälle“*, so die BGS [8]. Seit Sommer 2001 kann gütegesicherten Sekundärbrennstoffen das RAL-Gütezeichen RAL-GZ 724 verliehen werden.

Nach der Entscheidung der Kommission zur Festlegung von Leitlinien für die Überwachung und Berichterstattung betreffend Treibhausgasemissionen [9, Tabelle 4] sind feste **sekundäre Brennstoffe** – *secondary fuels* – Braunkohlenbrikett und Steinkohlenbriketts, nicht aber aus Abfällen oder Abfallfraktionen erzeugte Brennstoffe. Diese sind mit dem Begriff „Abfallbrennstoffe“ – *fossil waste fuels* – belegt [9, S. 22].

- **Substitutbrennstoffe**

Nach Landesumweltamt NRW [10] stellt Substitutbrennstoff aus Siedlungsabfällen (SBS) *„eine Fortentwicklung der BRAM-Herstellung dar. Durch gezielte Entnahme von einzelnen Fraktionen aus dem Gemisch von Hausmüll, etc. und durch ergänzende Verfahrensschritte der Schadstoffreduzierung wird ein Ersatzbrennstoff mit definierten Qualitätsmerkmalen erzeugt. Um die Einhaltung der definierten Brennstoffeigenschaften sicherzustellen, ist bei diesen Verfahren ein umfangreiches Qualitätssicherungskonzept erforderlich.“* **Substitutbrennstoff** SBS® ist ein eingetragenes Markenzeichen der Trienekens AG (jetzt RWE Umwelt AG).

Um Verwirrungen zu vermeiden, soll daher im Folgenden der Begriff verwendet werden, der als einziger auch im KrW-/AbfG steht: **Ersatzbrennstoff**.

3. Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft

Die Stoffflussanalyse (SFA) ist bislang für verschiedene abfallwirtschaftliche Fragestellungen angewandt worden. Dies waren zum Einen spezielle übergeordnete abfallwirtschaftliche Fragestellungen wie

- Projekt ASTRA [11], 1997: Szenarien für die Entsorgung brennbarer Abfälle in Österreich im Hinblick auf Umweltverträglichkeit und Ressourcennutzung.
- Projekt PRIZMA [12], 1999: Beurteilung des Einsatzes von Abfallbrennstoffen in Zementdrehrohröfen in stofflicher Hinsicht (Emissionen, Produktqualität, Stoffflüsse) mit dem Ziel, sogenannte Positivlisten zu erstellen.
- Projekt Scheinverwertung [13], 2000: Untersuchung, in welchem Umfang die in definierten Abfällen enthaltenen Schadstoffe über unterschiedliche Prozesse je nach rechtlichen Rahmenbedingungen im System Technosphäre verbleiben oder in Umweltmedien verteilt werden.

Zum Anderen wurden Stoffflussanalysen auch an zahlreichen abfallwirtschaftliche Anlagen zur Bilanzierung von Input und Output verschiedener Schadstoffe durchgeführt, in Österreich z.B. für

- die Müllverbrennungsanlagen Spittelau/Wien [14, 15] und Wels [16],
- zwei Baurestmassenaufbereitungsanlagen [17],
- die Gmundner Zementwerke [18],
- die mechanisch-biologische Restabfallbehandlungsanlagen in Allerheiligen, Kufstein und Zell am See [19, 20],
- die rein mechanische Restabfall-Splittingsanlage in Wien [21], vgl. Abschnitt 5.1 ab S. 8.

In der **Schweiz** verlangt die Richtlinie des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) „Entsorgung von Abfällen in Zementwerken“ [[22], Punkt 5.1b Abs. 2], dass Zementwerke, die zugelassene Abfälle entsorgen, ... *„mit den nötigen Messungen und **Stoffflussberechnungen** sicherstellen (müssen), dass sowohl die Anforderungen an die Abluftqualität (...) als auch die Anforderungen an die Qualität des Klinkers und des Zementes bezüglich der Schadstoffgehalte eingehalten werden.“* Allerdings dürfen gemäß BUWAL-Richtlinie Siedlungsabfälle und nachträglich aussortierte Anteile von Siedlungsabfällen (z.B. BRAM, d.h. „Brennstoff aus Müll“) sowie andere Abfälle, die bezüglich Herkunft, Materialeigenschaften, chemisch-physikalischem Verhalten und chemischer Zusammensetzung mit Siedlungsabfällen vergleichbar sind, **nicht in Zementwerken** entsorgt werden, sofern sie nicht in der **Positivliste (Anhang I)** aufgeführt sind. Darin sind z.B. Altpapier und Altkarton genannt, aber mit dem Zusatz: *„Ausschließlich **Papier- und Kartonfraktionen aus der Separatsammlung** sowie **industrielle Papierabfälle** ...“* Für Ersatzbrennstoffe sind weiterhin Kunststoffe relevant, aber die Positivliste besagt auch hier eindeutig: *„Saubere, d.h. nicht mit Siedlungsabfällen vermischte **Kunststoffabfälle aus Separatsammlungen** oder einheitliche Fraktionen von Kunststoffen aus Industrie, Gewerbe oder Landwirtschaft ...“*.

Im **Bundesland Nordrhein-Westfalen** wurde im Oktober 2000 die Stoffflussanalyse für die immissionsschutzrechtliche Genehmigung der Mitverbrennung von Abfällen in industriellen Feuerungsanlagen und Zementwerken per Erlass eingeführt [23]. Sie hat sich mittlerweile in verschiedenen Genehmigungsverfahren bewährt [24, 25, 26, 27]. Auf Basis einer Auswertung der mittels SFA durchgeführten Verfahren hat das Umweltministerium von Nordrhein-Westfalen unlängst einen *Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kraft- und Kalkwerken* [28] herausgegeben.

Auch in Österreich ist die Stoffflussanalyse Gegenstand von Genehmigungsverfahren und Genehmigungsbescheiden. Z.B. wurde für den Wirbelschichtkessel zur thermischen Abfallverwertung bei der RVL Reststoffverwertung Lenzing im Bescheid vom 21.11.2001 festgelegt [29]:

„1.7. Es werden folgende Werte als obere Grenze für Schadstoffgehalte im durchschnittlichen Abfallbrennstoff (Brennstoffmischung) festgesetzt:

- | | |
|----------------|---------------|
| f) Chlor | 0,8 g/MJ, |
| g) Schwefel | 1,1 g/MJ, |
| h) Fluor | 0,27 g/MJ und |
| i) Quecksilber | 5 mg/MJ. |

Für die restlichen Stoffe

- Blei,
- Zink,
- Chrom,
- Arsen,
- Cobalt,
- Nickel und
- Cadmium

welche in der Anlage 1, Punkt 5 des LRG-K (BGBl. I Nr. 1998/158) genannt sind, sind die maximal möglichen Konzentrationen im durchschnittlichen Abfallbrennstoff (Brennstoffmischung) **aus den Resultaten der vorliegenden Stoffbilanzen zu berechnen**. Die Berechnungsergebnisse sind spätestens nach 8 Wochen der Behörde zur Prüfung vorzulegen.“

Im September 2003 hat der Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaftsverband **ÖWAV** sein **Regelblatt 514 Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft** herausgegeben. Dieses bietet u.a.

- „eine klare, präzise und einheitliche Methode zur Erstellung von Massenbilanzen für Verfahren und Systeme in der Abfallwirtschaft,
- Fallstudien zur Illustration der Möglichkeiten von Stoffflussanalysen in der Abfallwirtschaft (z.B. Materialbilanz eines Entsorgungsbetriebs, Beurteilung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen)“ [30].

4. Charakterisierung von Restabfall

Restabfall ist ein Vielstoffgemisch aus organischen und anorganischen Verbindungen sowie Organismen. Toxikologisch und/oder ökotoxikologisch relevant sind

- **Organismen und ihre Bestandteile und Stoffwechselprodukte:**
 - Insekten (u.a. Eier, Maden) und ihre Allergene, Amöben, Würmer
 - Mikroorganismen: 10^6 bis 10^{10} Kolonie-bildenden Einheiten pro Gramm (KBE/g): Bakterien, Actinomyceten, Pilze, Viren
 - Endotoxine, Mykotoxine, Proteasen und MVOC (microbial volatile organic compounds)
- **Organisch gebundener Kohlenstoff:** halogenhaltige Stoffe wie FCKW, CKW, Pestizide, PCB, Kunststoffe und ihre Additive; Konservierungs-/Desinfektionsmittel, nicht chlorierte aliphatische und aromatische Lösemittel, Geruchsstoffe, VOC (volatile organic compounds)
- **Schwermetalle** (Gramm/Tonne FS): Zink (~500-1.200), Kupfer (~280-590), Blei (~300), Chrom (~30), Nickel (~12), Cadmium (~7-11), Arsen (~6), Quecksilber (~0,2-2) [15, 16, 31, 32]
- **Elemente:** Chlor, Fluor, Brom, Schwefel, Stickstoff in Form von Salzen oder organisch gebunden

Mikroorganismen und ihre Bestandteile und Stoffwechselprodukte stellen insbesondere für die Beschäftigten in der Sammlung und Verarbeitung von Abfällen ein gesundheitliches Risiko dar. Daher sind für den nicht gezielten Umgang mit diesen biologischen Arbeitsstoffen in Abfallbehandlungsanlagen entsprechende Schutzmaßnahmen in den Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe (TRBA) vorgeschrieben [33, 34, 35].

Die meisten **organischen Stoffe** werden in thermischen Prozessen bei ausreichend hoher Temperatur und Verweildauer vollständig mineralisiert. Insbesondere die im Restabfall enthaltenen Amöben, Würmer, Insekten und andere Organismen sowie Mikroorganismen wie Pilze und deren Sporen, Bakterien, Viren werden vollständig zerstört, der Restabfall wird damit hygienisiert. Unbelebte organische Materie (FCKW, CKW etc.) wird ebenfalls weitestgehend mineralisiert. Bei ihrer Verbrennung 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 oder gasförmig. Als Hauptprodukt der Verbrennung entsteht CO_2 , welches ungehindert ins Reingas gelangt. Weiterhin können im Rohgas Produkte der unvollständigen Verbrennung wie CO, PCDD/F, PAH und andere organische Mikroverunreinigungen auftreten. Diese sind durch Abgasreinigung unter die zulässigen Emissionsgrenzwerte zu senken. Die Anforderungen an Anlagen, die Abfälle oder daraus gewonnene Ersatzbrennstoffe verbrennen oder mitverbrennen, sind durch die Novelle der 17. BImSchV angeglichen worden. Insbesondere gelten die gleichen festen Emissionsgrenzwerte für TOC, Summe

Krebserzeuger einschließlich Benzo(a)pyren und PCDD/F im Reingas (allerdings bei unterschiedlichen Bezugssauerstoffgehalten).

Die **anorganischen Stoffe** wie **Halogene** und **Schwermetalle** können in thermischen Prozessen nicht zerstört werden, sondern werden bestenfalls in weniger schädliche Bindungsformen überführt (z.B. das Chlor in CKW oder PCB in HCl, oder das Fluor in FCKW in HF).

Tab. 1 zeigt einen Vergleich verschiedener Untersuchungen zur Schwermetallbelastung von Restmüll. Die mittels Stoffflussanalyse bestimmten Werte fallen höher aus, u.a. weil sie die Schwermetalle in den Metallträgern (Fe-/NE-Metalle) größtenteils mit erfassen, während diese bei den Messwerten aus Deutschland nicht berücksichtigt sind.

Tab. 1: Schwermetallbelastung von Restabfall

mg/kg FS	SFA: Morf et al. 2001 MVA Spittelau (A) [15]	SFA: Morf et al. 1997 MVA Wels (A) [16]	Ø Messwerte D [36] (Einzelanalysen, ohne Fe-/NE-Metalle)
Arsen	-	-	5,9
Blei	310	398	35,8
Cadmium	6,7	10,7	2,8
Chrom	-	-	29,0
Kupfer	280	588	169
Nickel	-	-	11,9
Quecksilber	0,9	1,9	0,2
Zink	500	1.204	279

Für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Mitverbrennungsanlagen ist von Bedeutung,

- wie hoch die Belastung von Restabfall mit Schwermetallen und insbesondere Chlor ist,
- in welchem Umfang diese Stoffe im Rahmen einer Aufbereitung von Restabfall zu Ersatzbrennstoffen abgetrennt werden können,
- wie sich die mit dem Ersatzbrennstoff in eine Verwertungsanlage eingebrachte Fracht an Salzen (Chlor!) und Schwermetallen auf die verschiedenen Outputgüter (Reingas, feste Rückstände, ggf. Abwasser, Produkt) verteilt, und
- ob und wie ein gegenüber Regelbrennstoffeinsatz erhöhter Eintrag dieser Stoffe die Emissionen und die Qualität der erzeugten Produkte oder anfallenden Reststoffe verändert.

Für diese quantitativen Abschätzungen ist die Stoffflussanalyse das geeignete Instrument. Die anschließende Bewertung der Resultate ist nicht Gegenstand der SFA, sie muss sich z.B. auf gesetzliche und untergesetzliche Anforderungen (Normen etc.) beziehen.

5. Stoffflussanalyse bei der Aufbereitung von Restabfall zu Ersatzbrennstoffen

5.1. Erzeugung einer heizwertreichen Leichtfraktion in der Mechanischen Abfallaufbereitungsanlage Wien (BZL GmbH)

Im Sommer und Herbst 2002 hat die Autorin eine Stoffflussanalyse an der Mechanischen Aufbereitungsanlage für Restabfall und Sperrmüll in Wien im Auftrag des Betreibers durchgeführt [21, 37]. Ziel der Aufbereitung mit der derzeit installierten Technik ist die Erzeugung einer heizwertreichen Fraktion zur thermischen Verwertung in einem Wirbelschichtofen (WSO4). Diese SFA zeigt die Verteilung der Schadstoffe auf die einzelnen Outputpfade und erlaubt Aussagen über Möglichkeiten zur Steuerung der Schadstoffflüsse durch Aufbereitungstechniken. Dabei wurde die Belastung der Leichtfraktion zur thermischen Verwertung aus den bekannten bzw. errechneten und abgeschätzten Daten des Input [15] sowie den einzelnen Daten zu den übrigen Outputfraktionen errechnet. Tab. 2 zeigt die geschätzten Massenströme für Chlor, Metalle und Schwermetalle an der Mechanischen Abfallaufbereitungsanlage.

Tab. 2: Geschätzte Massenströme der Elemente an der Mechanischen Abfallaufbereitungsanlage Wien, bezogen auf 1 t Input (FS)

Fraktion	Input	Leicht- fraktion	Grob- fraktion	Schwer- fraktion	Eisenschrott		NE- Schrott	Staub
					Metall- schrott	Stör- stoffe		
Kilogramm pro t Input (FS)								
Chlor	4,90	0,96 ¹⁾	1,83	1,94	0,00	0,03	0,00	0,00 ²⁾
Eisen	28,0	0,43	0,00	1,94	25,74	0,00	0,00	0,01
Aluminium	9,7	2,57	0,00	4,09	0,13	0,00	2,90	0,01
Gramm pro t Input (FS)								
Blei	310	85,6	2,6	210,5	7,0	0,2	0,1	0,1
Cadmium	6,70	2,1	0,3	0,2	3,9	0,0	0,0	0,0
Kupfer	280	192,6	4,5	34,7	38,5	0,5	4,0	0,1
Quecksilber	0,89	0,6	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0
Zink	500	235,4	11,8	58,9	93,6	1,4	91,3	0,2

1) auf der Basis von Messungen eines externen Instituts

2) Wert fehlt, dürfte aber wegen des geringen Massenanteils des Staubes keine merkliche Veränderung bewirken.

Die Transferfaktoren und die Massenströme der bilanzierten Stoffe zeigen folgendes elementspezifisches Verhalten in der Abfallaufbereitungsanlage:

- **Chlor**

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 Schadstoffanreicherung statt, die vornehmlich auf die hohen PVC-Anteile zurückzuführen ist. Für die Schwerfraktion und die übrigen Outputpfade findet dagegen eine Schadstoffabreicherung statt.

- **Eisen**

Erwartungsgemäß werden über 90 % des Eisens mit der Magnetscheidung 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.

- **Aluminium**

Mit der Nichteisenmetallabtrennung werden rein rechnerisch nur 30 % des im Input enthaltenen Aluminiums erfasst; dies, obwohl die abgetrennte Nichteisenmetallschrottfraction 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**

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 des Cadmiumgehaltes von Metallen im Restabfall von Rotter [41] ergaben Werte von 3 ± 3 mg Cd/kg TS.

- **Blei**

Blei zeigt ein von den anderen Metallen abweichendes Bild: Der Austrag von Blei mit der Metallfraktion ist praktisch zu vernachlässigen. Blei verbleibt überwiegend in den massenmäßig dominierenden Materialströmen, hier insbesondere in der Schwerfraktion. Dies deckt sich mit Untersuchungen z.B. von Bidlingmaier und Alt [38], 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.

- **Quecksilber**

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. So gelangen diese drei Metalle zu knapp 50 bis 70 % in die Leichtfraktion.

Die grob abgeschätzten Daten zur Chlor- und Schwermetallbelastung der Leichtfraktion werden derzeit anhand von Stoffflussanalysen mittels Verbrennungsversuchen an der MVA Spittelau und am WSO4 überprüft [39].

Das Ergebnis der Stoffflussanalyse an der Mechanischen Abfallaufbereitungsanlage Wien lässt sich wie folgt zusammenfassen [36].

„Die Stoffflussanalyse an einer mechanischen Abfallaufbereitungsanlage hat gezeigt, dass Schwermetalle auf verschiedene Güter wie PVC (Chlor, Cadmium) und Outputströme wie heizwertreiche Leichtfraktion (Cadmium, Quecksilber, Kupfer und Zink) oder Schwerfraktion (Blei) verteilt werden. Mit einfachen mechanischen Techniken der Abfallaufbereitung wie Zerkleinern, Sieben, Magnetscheidung und Wirbelstromabscheidung ist es nicht möglich, diese Stoffe selektiv abzutrennen und in einzelnen Stoffströmen zu konzentrieren. Diese einfachen Techniken diskriminieren nach mechanisch-physikalischen und nicht nach chemischen Eigenschaften. Nur in Einzelfällen wie der Batterieausschleusung durch die Metallabscheidung findet eine Überschneidung dieser Eigenschaften statt, so dass damit ein gezielter Schadstoffaustrag vorgenommen werden kann. Aber auch dieser ist, wie das Beispiel Cadmium zeigt, nicht vollständig.“

5.2. Optimierung der Ersatzbrennstoffherzeugung (TU Dresden)

Rotter [40, 41] von der TU Dresden bediente sich der Stoffflussanalyse, um festzustellen, mit welchen rein mechanischen Aufbereitungstechniken aus Restabfall überwiegend städtischer Herkunft nach herkömmlicher Aufbereitung – aber **ohne** die sonst übliche **Zerkleinerung** – ein Ersatzbrennstoff erzeugt werden kann, bei dem für Chlor, Cadmium, Blei und Zink eine größtmögliche Abreicherung bei optimaler Ausbeute an Menge und Heizwert zu erzielen war. Jeder Versuch wurde mit einer Abfallmenge von etwa 5 bis 8 t aus einem Pressfahrzeug durchgeführt. Neben Chlor und den Schwermetallen Cadmium, Blei und Zink wurde auch Quecksilber untersucht, aber nicht bilanziert. Tab. 3 fasst die Resultate zusammen.

Die Ergebnisse waren uneinheitlich:

- Für **Chlor** war die Entfrachtung aufgrund der breiteren Frachtverteilung in den einzelnen Restabfallfraktionen weniger effektiv als für die Schwermetalle.
- Für **Cadmium** und **Blei** war ein Austrag mit der Eisenmetallschrottfraction, insbesondere über Batterien, Elektronikschrott und sonstige Verbundgegenständen zu beobachten.
- Die Feinfraktion stellte eine **Bleisenke** dar, wegen des geringen Massenanteils erwies sich die Stoffkonzentrierungseffizienz aber als gering.

Tab. 3: Verteilung von Chlor und Schwermetallen auf mechanisch aufbereiteten, nicht zerkleinerten Restabfall – Ergebnisse der acht Aufbereitungsversuche von Restabfall; MW = Mittelwert; SD = Standardabweichung, absolut (eigene Berechnung anhand der Daten in [41, Anhang, Tabelle D-3])

	Ausbeute feucht		Chlor		Blei		Cadmium		Zink	
	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD	MW	SD
Konz. Input (mg/kg FS)			6.000	1.000	174	18	7	1	1.339	130
Grobgut	3%	3%	9%	7%	15%	10%	24%	14%	9%	6%
Feinfraktion kleiner 30 mm	40%	11%	16%	7%	<u>34%</u>	10%	5%	2%	24%	9%
Eisenfraktion größer 30 mm	6%	1%	8%	3%	8%	4%	21%	11%	14%	3%
Brennstoff- fraktion ^①	34%	14%	<u>42%</u>	18%	<u>27%</u>	11%	<u>31%</u>	15%	<u>30%</u>	13%
Schwerfrak- tion/Rest	23%	6%	<u>34%</u>	6%	22%	6%	<u>27%</u>	8%	<u>29%</u>	4%

① einschließlich 30 bis 100 mm + Getränkeverpackungen + Nichteisenmetalle größer 100 bei Aufbereitung D

Von den untersuchten acht Aufbereitungstechniken entsprach der ballistische Separator den Anforderungen am ehesten, da insbesondere mit der Schwerfraktion erhebliche Mengen an Blei und Cadmium ausgetragen werden konnten. Weiter wurde die Grobgutabscheidung generell als wesentliche Möglichkeit zur Schadstoffentfrachtung angesehen.

Bei allen Verfahren, so Rotter [41], wird die begrenzte Möglichkeit der gezielten Steuerung von Schwermetallströmen und Separierung von Schadstoffen deutlich. Zwar sind einige Verfahren in der Lage, Schwermetalle im Brennstoffprodukt selektiv abzureichern. Jedoch wurden die theoretisch berechneten Schwermetallkonzentrationen bei optimaler Aufbereitung von keinem Verfahren erreicht.

Rotter kommt zu dem Schluß, dass auch mit optimierten Aufbereitungsverfahren die Konzentrationsleistung mechanischer Prozesse begrenzt ist:

„Die wesentliche Steuerung von Schwermetallflüssen wird durch die nachfolgende Verwertung von Ersatzbrennstoffen geleistet. Aufgrund des Einflusses der Abfallwirtschaft auf die Schwermetallflüsse in der Umwelt sollten hochkalorische Abfälle daher nur in Prozessen verwertet werden, die in einer definierten Stoffsenke Schwermetalle aufkonzentrieren und so die Verteilung in die Umwelt verhindern.“ [41, S. 103].

5.3. Schwermetallentfrachtung von heizwertreichen Abfällen und Abfallfraktionen (INFA GmbH)

Flamme vom Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH INFA, Ahlen, hat in einer Ersatzbrennstoffproduktionsanlage Versuche mit drei heizwertreichen Abfallarten durchgeführt [42, 43]. Ziel war eine Ersatzbrennstoffaufbereitung mit gezielter Abreicherung der Schwermetalle. Zur Ermittlung der An- und Abreicherungsfaktoren setzte Flamme die Stoffflussanalyse ein. Bei den Abfallarten handelte es sich um Spuckstoffe, Gemischte Verpackungen sowie eine grob aufbereitete (inkl. Metallabscheidung [36]) heizwertreiche Fraktion aus Siedlungsabfällen. Die Aufbereitungsschritte umfassten Aufgabe, Vorzerkleinerung, Windsichtung und Abtrennung einer Schwerfraktion, Nachzerkleinerung, optional NIR-Abtrennung Chlorhaltiger Kunststoffe, Eisenmetallabscheidung I (Fe I), Eisenmetallabscheidung II (Fe II), Nichteisenmetallabscheidung (NE), Pelletierung und Verladung.

Die Inputgüter und die einzelnen Outputgüter wurden bilanziert, analysiert und daraus die Transferfaktoren ermittelt. Des Weiteren wurden massenbezogene An- und Abreicherungsfaktoren für die erzeugten Outputströme ermittelt.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- In der Chlorhaltigen Kunststofffraktion (PVC) reichert sich **Cadmium** an. Als Ursache kommen Cd-haltige Stabilisatoren in Frage. Eine Abtrennung dieser Fraktion führt zur Cadmiumabreicherung im Ersatzbrennstoff. Gleiches gilt, wenn auch nicht in diesem Umfang, für Kupfer, welches u.a. aus den PVC-ummantelten Kabeln stammen dürfte.
- **Quecksilber** reichert sich überwiegend in den Schwerstoffen, gefolgt von Kunststoffen und Fe-Metallen II an. Es ist darauf hinzuweisen, dass zur groben Vorbehandlung auch eine Metallabtrennung zählte, bei der Quecksilberträger wie Batterien bereits ausgeschleust worden sein dürften.
- Lediglich **Antimon** reichert sich nach dieser Untersuchung im Ersatzbrennstoff an. Es wird u.a. als Katalysator und Glanzmittel bei der Kunststoffherzeugung (z.B. PET) sowie als Flammschutzmittel für Kunststoffe (Antimontrioxid) eingesetzt.

Da ein Großteil potenzieller Schwermetallträger (Metalle, Feinfraktion, Elektro- und Elektronikschrott) bereits vor dem dargestellten Aufbereitungsversuch abgetrennt worden sein dürfte, können die von Flamme [42] berechneten Transferfaktoren und Ab-/Anreicherungsfaktoren für Schwermetalle nicht für die Betrachtung der Aufbereitung und Schadstoffentfrachtung von unaufbereiteten Restabfall herangezogen werden. Flamme sieht jedoch für die Aufbereitung der untersuchten Abfallarten Optimierungspotenziale [42, S. 166]:

„Für den überwiegenden Anteil der Schwermetalle ist ein hohes Abreicherungspotenzial im Sekundärbrennstoff festzustellen. Es lassen sich durch die Aufbereitung überwiegend Stoffe reduzieren, die in Metallen, Elektroschrott und langlebigen Kunststoffen enthalten sind. Die Höhe der An-/Abreicherungsfaktoren ist abhängig von der Zusammensetzung des Inputmaterials, seiner Schadstoffbelastung sowie der eingesetzten Aufbereitungstechnik.“

5.4. Stoffflussanalyse als Instrument zum Nachweis einer Schadstoffanreicherung in der Ersatzbrennstoffaufbereitung

Die dargestellten Beispiele für die Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen aus Restabfall oder daraus erzeugter hochkalorischer Fraktion sowie Gewerbeabfällen zeigt, dass die Stoffflussanalyse ein geeignetes Instrument ist, um den Erfolg einer Schadstoffentfrachtung des erzeugten Ersatzbrennstoffes festzustellen. Da Ersatzbrennstoff eine schwierig zu beprobende und zu analysierende Matrix ist, kann bei Kenntnis des Inputs über die Bilanzierung der übrigen Outputpfade der Verbleib der Schadstoffe modelliert und so eine ggf. erreichte Anreicherung im Ersatzbrennstoff indirekt nachgewiesen werden.

6. Stoffflussanalyse für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen am Beispiel von Kraftwerken

6.1. Emissionsgrenzwerte für Mitverbrennungsanlagen nach 17. BImSchV

Mehrere Stoffflussanalysen zum Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerken haben bestätigt, dass insbesondere Quecksilber ein sensibles Element für die Mitverbrennung ist, da es in der Regel überwiegend (> 50 %) ins Reingas gelangt. Tab. 4 zeigt exemplarisch die gesamte Bandbreite des Transfers von Halogenen und Schwermetallen ins Reingas **moderner** Kohlekraftwerke bei Einsatz von Regelbrennstoffen.

Unter der Annahme konstanter Transferfaktoren wird hiernach auch im Falle der Mitverbrennung im Kraftwerk, unabhängig von der jeweiligen Kraftwerkstechnik – Wirbelschicht, Staubfeuerung, Schmelzkammerfeuerung, Rostfeuerung – der weitaus größte Teil der Schadstoffe, ausgenommen Quecksilber, in die festen Rückstände verlagert.

Quecksilber ist in der derzeit geltenden Fassung der 13. BImSchV kein begrenzter oder überwachungspflichtiger Emissionsparameter, wird es aber zukünftig werden. Der Novellierungsentwurf der 13. BImSchV vom Mai 2003 [44] sieht eine Begrenzung der Emissionskonzentration für Quecksilber, Summe Cadmium und Thallium, Summe zehn Schwermetalle, Summe Krebserzeuger in gleicher Höhe wie für Mono- und Mitverbrennungsanlagen vor. Für Quecksilber bedeutet dies einen Tagesmittelwert von 0,03 mg/Nm³ und ein Halbstundenmittelwert von 0,05 mg/Nm³ bei einem Bezugssauerstoffgehalt von 6 % O₂.

Tab. 4: Transferfaktoren ins Reingas und in die festen Verbrennungsrückstände für moderne Kraftwerke in Österreich, den Niederlanden und Deutschland [45]

Parameter	Transferfaktor Reingas					
	Staub- feuerung, Steinkohle	Staub- feuerung, Braunkohle	Schmelz- kammer- feuerung	Schmelz- kammer- feuerung	Staub- und Rostfeue- rung, Steinkohle	rechneri- scher Mittelwert
Chlor	0,5%	0,2%	-	-	0,21%	0,30%
Fluor	0,4%	0,01%	-	-	0,22%	0,20%
Antimon	0,3%	0,5%	-	-	0,28%	0,40%
Arsen	4,0%	0,2%	0,0001%	0,0003%	0,20%	0,90%
Blei	0,03%	0,3%	0,00002%	0,0004%	0,02%	0,07%
Cadmium	0,3%	0,02%	0,001%	0,0004%	0,36%	0,14%
Chrom	0,01%	0,02%	0,00004%	0,0001%	0,06%	0,02%
Kobalt	0,03%	0,07%	-	-	0,11%	0,07%
Kupfer	0,05%	0,4%	-	-	0,06%	0,20%
Mangan	0,01%	0,08%	-	-	-	0,05%
Nickel	0,04%	2,0%	0,00002%	0,0001%	0,16%	0,40%
Quecksilber	83,0%	62,0%	-	50,0%	20,0%	54,0%
Thallium	0,4%	2,0%	0,0004%	0,0003%	-	0,60%
Vanadium	0,1%	0,02%	0,00002%	0,0001%	0,05%	0,03%
Zinn	0,06%	0,3%	-	-	0,79%	0,40%

Typische Quecksilbergehalte von Steinkohlen werden in der Literatur mit 0,3 mg Hg/kg TS (und einem Hu_{TS} von 30.000) [46] oder 0,2 bis 1,2 mg/kg TS (Hu_{roh} von ca. 25.000 MJ/Mg) [28, hier Tab. 7-18] angegeben. Tab. 5 zeigt eine Bilanzierung des Reingases je nach Brennstoff- und Feuerungsart für Modellanlagen in NRW.

Tab. 5: Bilanzierung der Quecksilbergehalte des Reingases [mg/m^3] bei Kraftwerken mit Regelbrennstoff Steinkohle/Petrolkoks (90:10) bzw. mit Braunkohle (mittlere und hohe Quecksilbergehalte) [28, hier Tab. 7-23 und 7-25]

Brennstoff	Steinkohle			Braunkohle			
	Schmelz- kammer mg/m^3	Trocken- feuerung mg/m^3	Rost- feuerung mg/m^3	Trocken- feuerung mg/m^3	Rost- feuerung mg/m^3	Wirbel- schicht- feuerung mg/m^3	Wirbel- schicht- feuerung HOK* mg/m^3
Hg mittel	0,0060	0,0031	0,0059	0,00097	0,00239	0,00287	0,00032
Hg hoch	0,0358	0,0186	0,0350	0,0175	0,0428	0,051	0,00568

* Wirbelschichtfeuerungen mit Herdofenkoks-Flugstromverfahren

Danach dürften die meisten Kraftwerke ausgenommen beim Einsatz stark Quecksilberhaltiger Kohlen mit der Einhaltung des zukünftigen Tagesmittelwertes der 13. BImSchV keine Probleme haben.

Durch den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Mitverbrennungsanlagen ist die Ausgangslage verändert. In der Regel führt dieser Einsatz zu einer Steigerung des Quecksilbereintrags mit der Folge einer höheren Quecksilberbeladung der Abgasreinigung.

Die 17. BImSchV begrenzt die Emission an Quecksilber und anderen Schwermetallen im Abgaskamin der Mitverbrennungsanlage. Welcher Anteil dabei aus dem Regelbrennstoff und welcher Anteil aus dem Ersatzbrennstoff stammt, ist – im Gegensatz zur virtuellen Teilstrombetrachtung des nordrhein-westfälischen Erlasses [23] – nicht vorgegeben, es gelten allein die festen Emissionsgrenzwerte des Anhangs II der 17. BImSchV.

Bei Verwendung „belasteter“ Kohlen und gleichzeitiger Ausschöpfung eines maximalen Quecksilbergehaltes im Ersatzbrennstoff besteht das Risiko, dass Emissionskonzentrationen an Quecksilber im Abgas eines Kraftwerkes oberhalb der zulässigen Werte auftreten können, sofern die Abgasreinigung des Kraftwerks nicht dem erhöhten Quecksilberinput angepasst wird, z.B. durch die Zugabe von Herdofenkoks. Dies hat aber nicht nur eine Veränderung der Transferfaktoren zur Folge, sondern auch veränderte Massenbilanzen, z.B. auch ein erhöhtes Reststoffaufkommen.

Die Stoffflussanalyse ist ein geeignetes Instrument, um die Emissionskonzentrationen im gesamten Abgas einer Mitverbrennungsanlage bei Einsatz von Ersatzbrennstoffen zu berechnen. Hieraus lassen sich sowohl Schlußfolgerungen für die Begrenzung der Gehalte an Quecksilber und anderen Metallen im Input – Regelbrennstoffe wie Ersatzbrennstoffe – als auch die Erfordernis weitergehender Abgasreinigungsmaßnahmen ableiten. Ein „Auf-füllen“ bis zur zulässigen Obergrenze im Reingas ist aus ökologischer Sicht aber nicht akzeptabel.

6.2. Betrachtung der festen Rückstände von Kraftwerken

6.2.1. Schwermetall-Transfer in die festen Rückstände der Rauchgasreinigung

Im Folgenden wird das Beispiel einer Holzverbrennungsanlage dargestellt. Wie bei anderen Kraftwerkstypen findet eine Anreicherung der Schwermetalle im Wesentlichen im Flugstaub, in der Asche und der Schlacke statt. Diese festen Abfälle sind prinzipiell für die Verwertung geeignet. 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.

Die Verschiebung der Belastung an Schwermetallen von Flugstäuben einer Holzverbrennungsanlage mit steigendem Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Abhängigkeit von deren Schadstoffbelastung wurde mittels Stoffflussanalyse berechnet.

Für die Modellrechnung wurden folgende Randbedingungen angesetzt:

- energiespezifisches Abgasvolumen = 0,345 m³/MJ
- Transferfaktoren nach [26], keine Veränderung durch Einsatz von Ersatzbrennstoff
- feste Rückstände im Regelbetrieb: 45,32 kg/t, davon 55 % Flugstaub und 45 % Asche; keine Änderung bei Einsatz von Ersatzbrennstoff, da bereits der Regelbrennstoff einen hohen Ascheanteil aufweist
- Energieaustauschverhältnis von Regelbrennstoff zu Ersatzbrennstoff gleich 1
- Regelbrennstoff: Analysedaten von etwa 170 Brennstoffproben der betrachteten Holzverbrennungsanlage, Brennstoffe nach Qualitätskontrolle; Heizwert: 15.000 MJ/t, hier nur Medianwerte
- Ersatzbrennstoff: Heizwertreiche Fraktionen aus Siedlungsabfällen, hier: Daten aus niedersächsischen MBAs [47], sowohl Minimum-, als auch Median- und 90-Perzentilwerte; Heizwert jeweils 12.800 MJ/t
- Anteil an Feuerungswärmeleistung: 100 / 0 = nur Einsatz von Regelbrennstoff, 90 / 10 bzw. 80 / 20 = Regelbrennstoff trägt zu 90 % bzw. zu 80 % und Ersatzbrennstoff zu 10 % bzw. 20 % zur Feuerungswärmeleistung der Anlage bei.

Tab. 6 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnung.

Selbst bei Verwendung der **Minimumwerte** an Schwermetallen in aufbereiteten heizwertreichen Fraktionen aus Siedlungsabfällen steigen die Konzentrationen der Elemente Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Nickel und Zinn im Staub im Vergleich zum Einsatz von 100 % Regelbrennstoff teilweise deutlich an. Besonders deutlich ist die Zunahme für Kobalt, dessen Konzentration im Regelbrennstoff (Median) unterhalb der Nachweisgrenze liegt.

Bei Verwendung der **Medianwerte** der Schwermetallgehalte im Ersatzbrennstoff nimmt die Menge der Elemente, für die ein Anstieg der Konzentration in der Flugasche festzustellen ist, um Antimon, Blei und Vanadium zu. Besonders deutlich ist die Zunahme für die Elemente Antimon, Kobalt und Vanadium, deren Konzentration im Regelbrennstoff im Median unterhalb der Nachweisgrenze liegt. So genügt bereits ein Anteil von 10 % des Ersatzbrennstoffes an der Feuerungswärmeleistung, damit sich die Konzentrationen an Kupfer verachtfacht und für Nickel und Zinn im Staub mehr als verdoppelt.

Für die **90-Perzentilwerte** (identisch mit Maximalgehalten) ist für alle hier betrachteten Schwermetalle mit Ausnahme des leicht flüchtigen Quecksilbers eine Konzentrationserhöhung im Flugstaub festzustellen. Hier genügt bereits ein Anteil von 10 % des Ersatzbrennstoffes an der Feuerungswärmeleistung, damit sich die Konzentrationen an Kupfer verneun-, an Zinn versech- und an Nickel vervierfachen.

Tab. 6: Verschiebung der Belastung des Flugstaubs einer Holzverbrennungsanlage mit steigendem Einsatz von Ersatzbrennstoffen – aufbereitete heizwertreiche Fraktionen aus Siedlungsabfällen, nach IBA [47], $H_u = 12.800 \text{ MJ/t}$ – Minimum-, Median, 90-Perzentilwerte des Datenkollektivs ($n = 22$), in mg/kg

Anteil Regelbrennstoff / Anteil Ersatzbrennstoff an Feuerungswärmeleistung							
	Regel- brennstoff	Minimum				Median	
mg/kg	100 / 0	90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40	90 / 10	80 / 20
Antimon	0	0	0	0	0	19	38
Arsen	21	21	21	21	21	21	21
Blei	809	778	747	716	686	884	958
Cadmium	11	12	14	16	18	14	17
Chrom	523	605	688	770	852	927	1.332
Kobalt	0	4	9	13	17	6	12
Kupfer	267	317	366	416	466	2.048	3.829
Mangan	4.953	4.756	4.560	4.363	4.166	4.724	4.494
Nickel	58	73	87	102	116	126	194
Quecksilber	5	5	5	5	6	5	5
Vanadium	0	0	0	0	0	7	14
Zinn	33	131	228	326	423	81	128
	Median		90-Perzentil				
mg/kg	70 / 30	60 / 40	90 / 10	80 / 20	70 / 30	60 / 40	
Antimon	58	77	21	42	62	83	
Arsen	21	21	24	27	29	32	
Blei	1.033	1.107	983	1.157	1.331	1.505	
Cadmium	20	23	19	27	35	43	
Chrom	1.736	2.141	1.451	2.378	3.306	4.234	
Kobalt	19	25	13	25	38	50	
Kupfer	5.610	7.390	2.403	4.540	6.677	8.813	
Mangan	4.265	4.036	5.228	5.504	5.779	6.055	
Nickel	261	329	236	413	591	769	
Quecksilber	5	5	5	5	5	6	
Vanadium	22	29	14	28	43	57	
Zinn	176	223	200	366	533	700	

6.2.2. Verwertbarkeit von Flugstäuben / DIN EN 450

Kraftwerksstäube (Flugaschen, insbesondere von Steinkohlekraftwerken) werden als hydraulischer Zuschlagstoff für Spezialzemente und als Zuschlagstoff in der Betonherstellung eingesetzt. Die Anforderungen an Flugaschen aus Kohlekraftwerken, die für die Betonherstellung eingesetzt werden dürfen, sind im Detail in der DIN EN 450 *Flugaschen für Beton* [48, 49], in der Richtlinie des Ausschusses für Stahlbeton *Verwendung von Flugaschen nach DIN EN 450* [50] sowie Entwurf der DIN EN 197-1 *Zement – Teil 1* [51] geregelt. Nach DIN EN 450 muss Flugasche folgende Anforderungen an die Unschädlichkeit erfüllen: Glühverlust $\leq 5,0 \%$, Sulfatgehalt (SO_3) $\leq 4,0 \%$, Chloridgehalt $\leq 0,1 \%$, Freies Calciumoxid: $\leq 1,0 \%$ ohne oder $> 1,0 \%$ und $\leq 2,5 \%$ mit Prüfung auf Raumbeständigkeit.

Weiterhin dürfen Flugaschen aus Kraftwerken bei der Betonherstellung nach DIN EN 450 nur verwertet werden, wenn die Energieerzeugung **ohne Abfalleinsatz** erfolgt ist. Zugelassen für die Mitverbrennung sind lediglich die in Tab. 7 erschöpfend wiedergegebenen schadstoffarmen Abfälle in dort angegebener maximaler Menge. Anforderungen hinsichtlich des Schadstoffgehaltes werden nicht gestellt.

Tab. 7: Art und maximale Menge an Ersatzbrennstoff für zur Betonverwertung geeignete Flugasche nach DIN EN 450 [49]

Material	Maximaler Anteil des Abfallstoffes (auf Trockenmasse bezogen) im Verhältnis zu Kohle
Vegetables Material wie Holzchips, Stroh, Olivenschalen und andere pflanzliche Fasern	20 %
Holz (green wood) und angebaute Biomasse	8 %
Knochenmehl	2 %
Kommunaler Klärschlamm	3 %
Papierschlamm	5 %
Petrolkoks	10 %
Aschefreie flüssige und gasförmige Brennstoffe	20 % (auf Heizwert bezogen) ¹⁾

1) „maximum percentage by calorific value of the co-combustion material related to coal“

Sollte die Positivliste der DIN EN 450 nicht in naher Zukunft um Ersatzbrennstoffe z.B. aus Restabfall erweitert werden, könnte die Abnahme der anfallenden Flugstäube durch Verwerter gefährdet sein oder nur zu ungünstigeren Konditionen realisiert werden. Hier sind auch die Regelungen der jeweiligen Abnahmeverträge relevant. So kann der Einsatz von Ersatzbrennstoffen zu einer Überschreitung der seitens des Abnehmers ggf. im Flugstaub begrenzten Schwermetallgehalte führen.

6.2.3. Schadstoffanreicherung im Erzeugnis?

Angesichts des bei Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen erhöhten Schwermetalleintrags ins Kraftwerk stellt sich auch die Frage nach der **abfallrechtlichen Zulässigkeit** der Verwertung der anfallenden Flugstäube. Nach § 5 Abs. 5 KrW-/AbfG entfällt der Vorrang der Verwertung, wenn die Beseitigung die umweltverträglichere Lösung darstellt. Dabei sind insbesondere zu berücksichtigen:

- „... die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, Abfällen zur Verwertung oder daraus gewonnenen Erzeugnissen.“

Der VDZ gibt Spannweiten für Schwermetalle in Steinkohleflugaschen und Höchstwerte im Zusatzstoff bei Betonzuschlag an [52, Tafel 5 und 7], allerdings ohne Angabe, ob die Daten zu Steinkohleflugaschen auch solche aus der Abfallmitverbrennung beinhalten. Da die Kraftwerkswirtschaft bislang zurückhaltend beim Abfalleinsatz agiert, ist davon auszugehen, dass diese Flugaschen ohne Abfalleinsatz erzeugt wurden. Leider fehlen auch Angaben zur Ableitung der Höchstwerte im Zusatzstoff Steinkohleflugasche. Tab. 8 zeigt Spannweiten für Schwermetalle in Steinkohleflugaschen und Höchstwerte im Zusatzstoff bei Betonzuschlag nach VDZ.

Tab. 8: Spannweiten für Schwermetalle in Steinkohleflugaschen und Höchstwerte im Zusatzstoff bei Betonzuschlag sowie im Beton

mg/kg	Spannweite Schwermetalle in Steinkohleflugasche		VDZ [52]:		VDZ [52]: Höchstwert im Zusatzstoff bei Betonzuschlag	VDZ [52]: Beton
	Schießl und Hohberg [53], VGB [54]	VDZ [52]				
Antimon	< 0,5 - 37	-			-	-
Arsen	0,6 - 321	-			-	-
Blei	23 - 817	58 - 800			800	100
Cadmium	0,2 - 7	0,2 - 4			4	3
Chrom	29 - 360	71 - 330			330	100
Kobalt	36 - 125	-			-	-
Kupfer	38 - 613	-			-	-
Nickel	46 - 301	92 - 250			300	50
Quecksilber	< 0,5 - 0,7	0,04 - 2,4			1	0,2
Thallium	0,7 - 4	0,7 - 5,1			4	2
Zink	47 - 1.483	67 - 910			910	200

Ein Vergleich der Höchstwerte im Betonzuschlag mit den Gehalten im Flugstaub einer Holzverbrennungsanlage bei Einsatz des Regelbrennstoffes (170 Brennstoffproben, vgl. Tab. 6, Spalte Regelbrennstoff) ergibt, dass bereits der Regelbrennstoff zu Schwermetallgehalten im Flugstaub führt, die teilweise (Quecksilber, Cadmium, Chrom; ganz knapp: Blei) oberhalb

der Höchstgrenze des VDZ für die Betonerzeugung [52] liegen. Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus MBAs würde bis auf Blei (nur Minimumbelastung) die Schwermetallbelastung des Flugstaubes weiter erhöhen. Eine **Anreicherung im Erzeugnis** ist in jedem Fall anzunehmen, wenn die Schwermetallgehalte oberhalb der von der abnehmenden Verwerterindustrie festgelegten Höchstgehalte liegt.

6.3. Stoffflussanalyse als Planungsinstrument für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerken

Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerken ist emissionsseitig für Schwermetalle auf dem Niveau der Abfallverbrennung (bei unterschiedlichen Bezugssauerstoffgehalten) reglementiert. Da die 17. BImSchV keine virtuelle Teilstrombetrachtung kennt, sondern die Emission von Quecksilber und anderen Parametern im gesamten Abgas begrenzt, kommt der Frage des gesamten Eintrags an Schadstoffen eine neue Bedeutung zu, vgl. Abschnitt 6.1. Die Schwermetallgehalte in Regelbrennstoffen und in Ersatzbrennstoffen sind nunmehr kommunizierende Röhren – geht die Belastung des Einen nach oben, muss die Belastung des Anderen entsprechend heruntergefahren werden, um im Abgaskamin nicht den Emissionsgrenzwert für die Summe aller Abgasteilströme zu überschreiten. So kann es zu der paradoxen Situation kommen, dass ein Kraftwerk, um Ersatzbrennstoffe mitverbrennen zu können, nur noch „saubere“, Quecksilber arme Kohle einsetzen kann. Die ökonomischen Implikationen dieses Szenarios sollen an dieser Stelle nicht vertieft werden. Es soll nur darauf verwiesen werden, dass die Stoffflussanalyse hier ein geeignetes Instrument darstellt, um diese Interdependenzen auf nachvollziehbare Zahlen zur „tolerierbaren“ Schadstoffbelastung der einzelnen Inputmaterialien herunterzubrechen. Allerdings ist ein „Auffüllen“ der durch saubere Regelbrennstoffe verbliebenen Spielräume aus ökologischer Sicht nicht akzeptabel.

Nach 17. BImSchV § 7 besteht des Weiteren eine Verwertungspflicht für Reststoffe aus Mitverbrennungsanlagen. Ob durch den Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus gemischten Siedlungsabfällen oder anderen heizwertreichen Abfällen die Verwertbarkeit von Kraftwerksflugaschen gefährdet ist, lässt sich ebenfalls mit dem Instrument der Stoffflussanalyse abschätzen, vgl. Abschnitt 6.2.

Unter Verwendung der anlagenspezifischen Daten sowie einer eindeutigen Charakterisierung des einzusetzenden Ersatzbrennstoffes lässt sich in erster Näherung berechnen, mit welchen Outputgütern und in welchen Konzentrationen die eingebrachten höheren Frachten an Schwermetallen die Anlage wieder verlassen. Daraus lässt sich ableiten, welcher zusätzliche Aufwand an Abgasreinigung erforderlich ist, um die Grenzwerte der 17. BImSchV für Mono- oder Mitverbrennungsanlagen im Reingas einzuhalten. Dieser Aufwand führt **zwangsläufig** zu einem Transfer der Schwermetalle (und Halogene) in die festen Rückstände der Anlage. Ggf. wird dadurch das Aufkommen an Reststoffen erhöht, was im Widerspruch zum Gebot der Reststoffminimierung nach 17. BImSchV § 7 steht.

7. Fazit

Die Stoffflussanalyse kann hinsichtlich eines geplanten Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in Mitverbrennungsanlagen bei Kenntnis der Transferfaktoren ins Reingas verschiedene Beiträge leisten:

- Berechnung zur Verteilung der Schwermetalle in den einzelnen Outputgütern einer Aufbereitungstechnik und Nachweis einer möglichen Abreicherung von Schadstoffen im Ersatzbrennstoff, wie von Rotter [40, 41], Flamme [42, 43] und Zeschmar-Lahl [21, 36] durchgeführt.
- Berechnung der zu erwartenden Stoffkonzentration im virtuellen, auf den Ersatzbrennstoff zurückzuführenden Abgasteilstrom im Abgas einer Mitverbrennungsanlage; dies war z.B. die Grundlage für den SFA-Erlass in Nordrhein-Westfalen [23].
- Berechnung der zu erwartenden Stoffkonzentration im Abgas einer Mitverbrennungsanlage, resultierend aus dem Einsatz von Regelbrennstoff und von Ersatzbrennstoffen, entsprechend ihrem jeweiligen Anteil an der Feuerungswärmeleistung; dies ist relevant für die Frage der Einhaltung der festen Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV für Mitverbrennungsanlagen.
- Ableitung von gerade noch „verkraftbaren“ Schwermetallgehalten im Input, um die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV für Mitverbrennungsanlagen mit der bereits installierten Abgasreinigungstechnik einhalten zu können; diese Modellierungen für die Schadstofftoleranzwerte wurde z.B. im Genehmigungsbescheid für die Wirbelschichtverbrennung Lenzing [29] oder im Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zementwerken, Kalkwerken und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen gewählt [28]. Ein derartiges „Auffüllen“ von Spielräumen, die sich aus der Verwendung „sauberer“ Regelbrennstoffe ergeben, ist allerdings aus ökologischen Gründen nicht akzeptabel.
- Ableitung von Inputkonzentrationen z.B. an Chlor, die nicht zu einer Überschreitung der Toleranzwerte der Werkstoffe der Kohlekessel führen [4].
- Berechnung der Auswirkungen der Mitverbrennung von Abfällen oder Ersatzbrennstoffen auf die festen Rückstände oder Produkte der Mitverbrennungsanlagen; diese Anwendung wurde im Mitverbrennungsleitfaden für NRW [28] und im Projekt PRIZMA [12] gewählt.
- Ableitung von maximalen Schadstoffkonzentrationen – hier Schwermetalle – im Ersatzbrennstoff, die zu keiner Anreicherung von Schadstoffen [36] oder zur Einhaltung von vorgegebenen Richtwerten im Erzeugnis führen [22].

Die SFA erlaubt für verschiedene Fragestellungen die Prognose der Verteilung von Schadstoffen bei Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Mitverbrennungsanlagen. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass sich aufgrund der gegenüber Regelbrennstoffen veränderten Matrix und des abweichenden Schadstoffgehaltes möglicherweise auch die Transferfaktoren für einzelne Elemente ändern können [55].

Hier sollen beispielhaft genannt sein:

- Ein erhöhter Ascheeintrag kann die Leistungsfähigkeit der Staubfilter reduzieren mit der Folge erhöhter Staub- und Quecksilberkonzentrationen im Reingas.
- Das Abscheideverhalten von Quecksilber verändert sich in Abhängigkeit vom Angebot an Bindungspartnern wie Halogene (Cl, F, Br) und Schwefel und deren Erscheinungsformen [46].
- Ein sehr hoher Chloridgehalt im Ersatzbrennstoff kann für einzelne Schwermetalle die Transferfaktoren in den Dampfraum erhöhen [56].
- Bei hohen Bromeinträgen (z.B. flammgeschützte Kunststoffe) und niedrigem Schwefelgehalt besteht – dies zeigen Untersuchungen aus der Verbrennung von Kunststoffabfällen – das Risiko der Bildung von Br₂ [57]. Dies erfordert z.B. die Zugabe eines Reduktionsmittels, um eine ausreichende Abreinigung zu erreichen; diese Maßnahme wird auch Auswirkungen auf andere Abgasinhaltsstoffe haben.
- Verbrennungsversuche mit Kunststoffabfällen zeigen des Weiteren, dass erhöhte Chlor- und Bromeinträge im Brennstoff die Verflüchtigung zahlreicher Schwermetalle aus dem Gutbett in die Flugaschen begünstigen. Ein Emissionsproblem wird dadurch nicht gesehen, sofern für eine gute Entstaubung gesorgt wird [57].
- Ein erhöhter Eintrag von Katalysatorgiften (z.B. Arsen oder Thallium) kann zu veränderten Abgaskonzentrationen (z.B. NO_x) führen.

Aus den genannten Gründen sind die bei Einsatz von Regelbrennstoffen ermittelten Transferfaktoren durch Messungen beim Einsatz des Ersatzbrennstoffes zu überprüfen.

8. Literatur

- [1] Baccini P., Brunner P.H.: Metabolism of the Anthroposphere. Springer-Verlag, Heidelberg, 1991
- [2] Rechberger H.: Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Stoffbilanzen in der Abfallwirtschaft. Wiener Mitteilungen Wasser * Abwasser * Gewässer Band 158, Wien 1999
- [3] Straus T., Krobath P., Thomé-Kozmiensky K.J.: Wirbelschichtofen zur Verbrennung von Klärschlamm und Ersatzbrennstoff. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1, 401 – 442, 2004
- [4] Thomé-Kozmiensky K.J.: Abfallbehandlung mit Verbrennung und mit mechanisch-biologischen Verfahren. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 1, 3 – 72, 2004
- [5] EU-Kommission, Generaldirektion Umwelt: Refuse Derived Fuels, Current practice and perspectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3), Report No.: CO 5087-4, July 2003
<http://europa.eu.int/comm/environment/waste/studies/rdf.pdf>
- [6] CEN TC 343 „Solid recovered fuels“

- [7] Pretz T.: Abfallverwertung durch die Stahlindustrie. VDI Wissensforum „Ersatzreduktionsmittel und Reststoffe in der Metallurgie“. http://www.ifa.rwth-aachen.de/ifa/download/pretz/vdi_wissensforum_abfallverwertung_durch_die_stahlindustrie.pdf
- [8] Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V., BGS-Sprecher Wilhelm Terhorst, zitiert in: RAL-Gütezeichen 724 für Sekundärbrennstoffe. Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V. schließt Anerkennungsverfahren erfolgreich ab. Pressemitteilung, Köln, 5. Juli 2001.
- [9] Entscheidung der Kommission vom 29/01/2004 zur Festlegung von Leitlinien für Überwachung und Berichterstattung betreffend Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. K(2004) 130 endg. http://europa.eu.int/comm/environment/climat/pdf/c2004_130_de.pdf
- [10] LUA NRW: Entsorgungsanlagen in NRW, hier Kap. 5.7 Ersatzbrennstoffaufbereitung http://www.lua.nrw.de/abfall/entsber/bericht/kap5/kap5_7.html
- [11] Fehringer R., Rechberger H., Pesonen H.-L., Brunner P.H.: Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich (ASTRA), im Auftrag der ARGE Thermik, Wien, November 1997
- [12] Fehringer R., Rechberger H., Brunner P.H.: Positivlisten für Reststoffe in der Zementindustrie: Methoden und Ansätze (PRIZMA). Endbericht, im Auftrag der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie. Wien, Dezember 1999
- [13] Lahl U., Zeschmar-Lahl, B., Weiler, C.: Studie zu den abfallwirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der im Arbeitsentwurf einer Abfallverwaltungsvorschrift (AbfallVwV) vertretenen Rechtspositionen. Studie im Auftrag des UVM Baden-Württemberg. August 2000. http://www.bzl.info/files/pdf/DPU_BZL-16.08.2000.pdf
- [14] Schachermayer E., Bauer G., Ritter E., Brunner P.H.: Messung der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage. Bundesministerium für Umwelt, Wien: Monographien, Bd. 56, 1995
- [15] 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
- [16] Morf L., Ritter E., Brunner P.H.: Güter- und Stoffbilanz der MVA Wels, ÖWAV-Bericht, 1997, TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, A-1040 Wien
- [17] Schachermayer E., Lahner T., Brunner P.H.: Stoffflussanalyse und Vergleich zweier Aufbereitungstechniken für Baurestmassen. UBA Wien, Monographien Band 99, Wien 1998
- [18] Gerger W., Kritzinger F.: Berechnung der Transferkoeffizienten für Stoffe aus Brennstoffen für die Klinkererzeugung der Gmundner Zementwerke. Technischer Bericht, Dion Nr. 1/99 der TU Wien, zit. in Fehringer R., Rechberger H., Brunner H.P. (PRIZMA), 1999
- [19] Harant M.: Stoffflussanalyse bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung vor der Deponierung. Dissertation am Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben, Februar 1999

- [20] 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
- [21] Zeschmar-Lahl B.: Stoffflussanalyse an einer mechanischen Aufbereitungsanlage - Eintrag und Verbleib von Chlor und Metallen. Fachtagung Mechanisch-biologische Abfallbehandlung, Berlin, 2./3.12.2003. In: Thomé-Kozmiensky K. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3, 231 - 259, TK-Verlag, 2003
- [22] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: Richtlinie Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. April 1998. http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/abfall/zementwerkrichtlinie_d.pdf
- [23] Friedrich H., Lahl U., Zeschmar-Lahl B.: Die Stoffflussanalyse (SFA) als neues Instrument der abfallrechtlichen Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Entsorgungsmaßnahmen in immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Anlagen. Müll und Abfall 2, 83 – 94, 2001
- [24] Lahl U., Zeschmar-Lahl B.: Emissionsprognose für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen im geplanten Heizwerk Mindener Industriehafen. Studie erstellt im Auftrag von ENERGOS ASA, 13.03.2000
- [25] Flamme S., Walter G. (beide INFA GmbH, Ahlen), Zeschmar-Lahl B., Lahl U. (beide BZL GmbH, Oyten): Wissenschaftliche Beratung bei der Genehmigung der ConTherm-Anlage der VEW AG, im Auftrag des MURL (jetzt MUNLV) NRW und der VEW Energie AG/Edelhoff Umweltservice GmbH & Co. KG, März, 2000
- [26] Lahl U., Zeschmar-Lahl B.: Abschlußbericht Stoffflussanalyse für einen Antrag nach BImSchG – BE 80-1 – Ausbaustufe II, neues Kraftwerk. Auftraggeber: PFLEIDERER Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG. Oyten, den 30.03.2001
- [27] Zeschmar-Lahl B.: Stoffflussanalyse für einen Antrag nach BImSchG – Gemeinschaftskraftwerk Weser. Auftraggeber: Gemeinschaftskraftwerk Weser GmbH (GKW), Veltheim, Oyten, den 15.05.2002
- [28] Prognos AG, Berlin: Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kraft- und Kalkwerken. Hrsg.: MUNLV NRW, September 2003
- [29] Land Oberösterreich, Umweltrechtsabteilung, Aktenzeichen: UR-304081/1170 - 2001 - Kü/Za: RVL GmbH, Lenzing; Errichtung eines Wirbelschichtkessels zur thermischen Abfallverwertung im Betriebsgelände der Lenzing AG – Genehmigung nach § 29 AWG, Bescheid vom 21. November 2001
- [30] ÖWAV-Regelblatt 514 – Die Anwendung der Stoffflussanalyse in der Abfallwirtschaft. Wien, September 2003
- [31] El Dawi K.I., Stegmann R., Mast P.-G.: Vergleich der Müllzusammensetzung von Abfallbehandlungsanlagen. Bestimmung der Schadstoffe (Schwermetalle) in Hausmüll und hausmüllähnlichen Abfällen. TU Hamburg-Harburg, Mai 1997; Werte für Frischmüll ohne Problemabfälle; umgerechnet mit 30 % Feuchte; Analysenwerte berücksichtigen nicht die Metallfraktion

- [32] Landeshauptstadt Düsseldorf, Düsseldorfer Abfallwirtschafts- und Stadtreinigungsbetrieb AWISTA: Tabellarische Auswertung der Meßwerte (1996/97) hinsichtlich der Schadstoffbelastung von Hausmüll / Restmüll (und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen). Faxmitteilung vom 26.01.1998
- [33] TRBA 210 - Abfallsortieranlagen: Schutzmaßnahmen. BArbBl. 6/99, S. 77-81, 1. Änderung BArbBl. 8/01, S. 79
- [34] TRBA 211 - Biologische Abfallbehandlungsanlagen: Schutzmaßnahmen. BArbBl. 8/01, S. 83-89, mit Änderungen und Ergänzungen: BArbBl. 10/02, S. 84-85
- [35] TRBA 212 - Thermische Abfallbehandlung: Schutzmaßnahmen. BArbBl. 10-2003, S. 39-44
- [36] 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
- [37] Zeschmar-Lahl B.: Integration der Abfallaufbereitungsanlage der MA 48 in das Wiener Abfallwirtschaftskonzept. Leistungsteil 2: Stoffflussanalyse für die Wiener Abfallaufbereitungsanlage. Auftraggeber: Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 48. Oytel, 31.01.2003
- [38] 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
- [39] Forschungsprojekt „Analyse der Leichtfraktion anhand von Verbrennungsversuchen (ALV)“ an der TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, (IWA), Univ. Prof. Dr. Paul H. Brunner
- [40] Rotter S., Kost T., Bilitewski B.: Verteilung und Steuerung von Stoffflüssen durch mechanische Aufbereitung von Haushaltsabfällen am Beispiel von Chlor und Schwermetallen. Müll und Abfall 9, 512 – 518, 2001
- [41] Rotter S.: Potenzial und Verteilung von Schwermetallen in Haushaltsabfällen und Steuerungsmöglichkeiten durch Aufbereitung. TU Dresden, Schriftenreihe "Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten", Bd. 27, 2002
- [42] Flamme S.: Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Bd. 5, 2002
- [43] Flamme S., INFA Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH, Ahlen (D): Schwermetallentfrachtung für Sekundärbrennstoffe. VDI-Wissensforum, Seminar 431801: Quecksilber – Emissionen, Meß- und Minderungstechniken. Düsseldorf, 26.-27.09.2002
- [44] BMU: Entwurf: 13. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen – 13. BImSchV), Stand: Mai 2003 http://www.bmu.de/files/immission_dreizehn.pdf

- [45] Lahl U., Zeschmar-Lahl B. (beide BZL GmbH, Oyten), Weiler M. (DPU GmbH, Essen): Beurteilung der Umweltverträglichkeit von thermischen Entsorgungsmaßnahmen. Studie im Auftrag des MURL NRW, 1999; und darauf aufbauend: MUNLV NRW: Arbeitshilfe „Stoffflussanalyse bei abfallrechtlichen Beurteilungsfragen“, Oktober 2000
- [46] Hocquel M., Spliethoff H., Hein K.R.G., Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD), Universität Stuttgart: Verhalten von Quecksilberemissionen bei der Mitverbrennung von Klärschlämmen in Kohlestaubfeuerungen unter besonderer Berücksichtigung des gasförmigen Anteils.
<http://bwplus.fzk.de/berichte/ZBer/99/ZBer398002.pdf>
- [47] Untersuchungen von Ketelsen K. et al. (IBA Hannover): 22 Proben von 3 niedersächsischen Splitting-MBAs (RABA Bassum, MBA Wiefels/Friesland, MBA Lüneburg), unveröffentlicht, März, 2000
- [48] EN 450:1995. Fly Ash for Concrete. Definitions, requirements and quality control. Deutsche Ausgabe: DIN EN 450, Ausgabe:1995-01 Flugasche für Beton - Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung; Deutsche Fassung EN 450
- [49] Draft prEN 450-1, Entwurf 2001; online: http://www.interverband.com/umq/774/prEN450-1_12_2001.pdf
- [50] DAfStb-Richtlinie Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau, Ausgabe September 1996
- [51] DIN EN 197-1: Zement Teil 1. Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Deutsche Fassung EN 197-1:2000, Februar 2001
- [52] VDZ: Beton. Umweltverträglichkeit von Zement und Beton. Informationsschrift, 1996
- [53] Schießl P., Hohberg I.: Umweltverträglichkeit von zementgebundenen Baustoffen – Untersuchungen zum Auslaugverhalten. Abschlußbericht. Forschungsbericht – Institut für Bauforschung – ibac – der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, F 414, 1995, IRB-Verlag, T 2695
- [54] Zusammenstellung nach Informationen der Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. (VGB), unveröffentlicht, 09.94; Lit. 165 in: Hohberg I., Müller Ch., Schießl P., Volland G.: Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe – Sachstandsbericht. SchrR des DASTB Nr. 458, 1996
- [55] Reil E.H., Angerer T., Prochaska M.: Einsatz von Ersatzbrennstoffen in einer Müllverbrennungsanlage – Versuch zur Überprüfung der Transferkoeffizienten auf Plausibilität an der MVA Spittelau. In: Thomé-Kozmiensky K. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3, 321 - 340, TK-Verlag, 2003
- [56] Rentz O., Martel Ch.: Analyse der Schwermetallstoffströme in Steinkohlefeuerungen unter besonderer Berücksichtigung des Betriebszustandes der Anlage. FZKA-BWPLUS-Bericht Nr. 6, 8/98
- [57] Vehlows J., Bergfeldt B., Hunsinger H., Jay K., Seifert H., Mark F. E., Tange L., Drohmann D., Fisch H.: Kunststoffe in der Abfallverbrennung. In: Thomé-Kozmiensky K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung 427 – 446, 2003