
Materialien

Nr. 42

Kreislaufwirtschaft
und Abfallverwertung
in thermischen Prozessen

9. Aachener Kolloquium
am 5. Dezember 1996
– Tagungsband –

Essen 1997



IMPRESSUM:

UM 35

00006-42

Herausgegeben vom
Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen
Wallneyer Str. 6 • 45133 Essen
Telefon (02 01) 79 95 - 0 • Telefax (0201) 79 95 - 446/447

Redaktion: Dipl.-Ing. Mark-Walter Hartmann

ISSN 0947-5206

Gedruckt auf 100 % Altpapier ohne Chlorbleiche

Informationsdienste: Umweltdaten aus NRW, Fachinformationen des LUA NRW:

- Internet unter <http://www.lua.nrw.de>
- T-Online unter Landesumweltamt NRW#

Bereitschaftsdienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LUA NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon (0201) 714488

Vorwort

Mit dem Inkrafttreten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes sind entscheidende Veränderungen im Bereich der Abfallwirtschaft verbunden. Die Neudefinition des Abfallbegriffes, die Gleichrangigkeit von energetischer und stofflicher Verwertung und die Produktverantwortung stellen mit den Bestimmungen der Technischen Anleitung Siedlungsabfall neue Randbedingungen für die Behandlung von Abfällen in thermischen Prozessen dar. Hieraus ergeben sich neue Zwänge, aber auch neue Möglichkeiten im Umgang mit verschiedensten Abfällen.

Das 9. Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft widmete sich dieser Thematik und spannte einen Bogen von den rechtlichen und administrativen Grundlagen über quantitative und qualitative Betrachtungen bis hin zu technischen Möglichkeiten der Abfallverwertung in thermischen Prozessen. Für alle, die sich mit der Frage befassen, welchen Beitrag thermische Prozesse zur Kreislaufwirtschaft leisten können, bot das 9. Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft ein Forum für Vorträge und Diskussionen mit kompetenten Vertretern aus Forschung und Praxis.

Mein Dank gilt allen Referenten, Organisatoren und Teilnehmern, die zum Gelingen der Veranstaltung beigetragen haben.



Dr. Ing. Harald Irmer
Präsident des
Landesumweltamtes NRW

Essen, im Mai 1997

Vorwort	3
1. Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen aus der Sicht von Überwachungs- und Genehmigungsbehörden <i>J. Hachen, Menden</i>	7
2. Kreislaufwirtschaft auf dem ökologischen Prüfstand – dargestellt am Beispiel der thermischen Abfallbehandlung <i>R. Berghoff, Essen</i>	17
3. Abfallpotentiale zur Verwertung in thermischen Prozessen <i>H.-J. Roos, Viersen und Th. Buer, Aachen</i>	24
4. Qualitätsanforderungen an Abfallbrennstoffe <i>A.I. Urban, Kassel</i>	47
5. Mitverbrennen von Klärschlamm und anderen Abfällen in Kraftwerken <i>V. Hoffmann, Essen</i>	61
6. Rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen in Hochöfen und Kupolöfen <i>H.W. Gudenau und G. Schwanekamp, Aachen</i>	71
7. Schmelzen von Reststoffen und Schlacken zur Inertisierung und gleichzeitigen Wertstoffrückgewinnung <i>U. Meurer, K. Krone und J. Krüger, Aachen</i>	83
8. Verwertung von Altreifen und anderen Abfällen bei der Zementproduktion <i>H.D. Winkler, Essen</i>	95
9. Einsatz von ölhaltigen Sanden und Schlämmen bei der Ziegelherstellung <i>A. Grehl, Hüttisheim-Humlangen</i>	113
10. Abfallverwertung in nicht-oxidativen thermischen Prozessen <i>S. Große-Altmann und J.-D. Herbell, Duisburg</i>	119
11. Produktionsintegrierte Energiegewinnung am Beispiel der Holzverarbeitenden Industrie <i>R. Marutzky, Braunschweig</i>	131

12. Konkurrenz zwischen thermischer Behandlung und thermischer Verwertung – Auswirkungen auf die Entsorgungswirtschaft <i>K. Rambadt, Aachen</i>	147
Rechtliche Grundlagen und Rahmenbedingungen der Abfallverwertung in thermischen Prozessen (Das geplante Referat konnte aus Termingründen nicht gehalten werden.) <i>W. Wendler, Düsseldorf</i>	153
Liste der bisher erschienenen LUA-Materialien	154

1. Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen aus der Sicht von Überwachungs- und Genehmigungsbehörden

J. Hachen, Menden

1 Ein neues Gesetz mit vielen offenen Fragen

Das "Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen", vom 27. September 1994, ist ein Artikelgesetz und ändert mehrere andere Gesetze. Sein Artikel 1 ist das "Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG)", das das bestehende Abfallgesetz (AbfG) von 1986 mit seinem Inkrafttreten am 07. Oktober 1996 abgelöst hat.

Durch das KrW-/AbfG wird das AbfG nicht nur geändert, sondern durchgreifend neu gestaltet. Daneben wird das Gesetz in Bereiche unseres Wirtschaftslebens eingreifen, für die es bisher noch keinerlei Regelungen gab.

Allerdings ist festzustellen, daß der Gesetzgeber seine Vorstellungen teilweise in sehr allgemeine und interpretationsbedürftige Formulierungen oder in Verordnungsermächtigungen, die erst noch auszufüllen sind, gefaßt hat.

Wie bei jedem neuen Gesetz wird auch beim KrW-/AbfG eine teilweise jahrelange Anwendungspraxis in der Verwaltung und die gerichtliche Interpretation die Bedeutung und Auswirkung mancher allgemeiner Formulierungen erst zeigen. Auffällig ist aber, daß im KrW-/AbfG nur sehr wenige konkrete und belastbare Regelungen enthalten sind.

Die Diskussion der letzten Monate vor Inkrafttreten des Gesetzes und in der ersten Zeit danach zeigt jedoch deutlich, daß das Problem "Verwertung oder Beseitigung" bzw. ob ein "Abfall zur Verwertung" oder ein "Abfall zu Beseitigung" vorliegt, die entscheidende neue Fragestellung des KrW-/AbfG ist.

Nach dem AbfG bestand die größte Schwierigkeit darin, zu definieren, was überhaupt Abfall ist, mit der Folge, daß für diese Stoffe belastende und einschränkende Regelungen des AbfG und anderer Gesetze anzuwenden waren. Es war für alle Betroffenen schwierig einzusehen, daß Abfälle nicht stofflich beschrieben werden konnten und daher der Abfallbegriff des AbfG fast ausschließlich von der Einschätzung und dem Willen des Reststoffbesitzers abhängig ist. Nicht nur die Verwaltungsbehörden, sondern insbesondere die Strafgerichte und zuletzt sogar das Bundesverwaltungsgericht hangelten sich in ihren Entscheidungen von Einzelfall zu Einzelfall mit teilweise widersprüchlichen und auch absurden Begründungen.

Diese Rechtsunsicherheit scheint voll auf die Frage Verwertung oder Beseitigung übertragen worden zu sein, was noch beschrieben werden soll. Im Rahmen dieser Frage kommt natürlich auch der Verwertung in thermischen Prozessen eine besondere Bedeutung zu, die insbesondere auch durch die Nachweisverordnung gerade für die Überwachungs- und Genehmigungsbehörden zusätzlich an Relevanz gewonnen hat.

Um das Thema des Referates darzustellen, ist eine Erläuterung der rechtlichen Grundlagen erforderlich.

2 Der Abfallbegriff des KrW-AbfG

Zunächst ist es erforderlich, kurz auf einen wesentlichen Aspekt des neuen Abfallbegriffs hinzuweisen.

Ob ein Stoff nach dem KrW-AbfG als Abfall zu bezeichnen ist, hängt von zwei Voraussetzungen ab (§ 3 Abs. 1):

- a) Der Stoff muß eine bewegliche Sache sein, die im Anhang I des Gesetzes beschrieben ist.
- b) Der Besitzer des Stoffes muß sich seiner tatsächlich entledigen, entledigen wollen oder entledigen müssen.

Wenn beide Voraussetzungen gleichermaßen erfüllt sind, ist dieser Stoffe als Abfall zu bezeichnen.

Zu a)

Der Anhang I benennt insgesamt 16 Abfallgruppen (Q 1 bis Q 16), die Stoffe zu Abfällen werden lassen können. Insbesondere durch die völlig umfassend formulierten Auffanggruppen Q1 oder Q 16 kann man diese allgemein folgendermaßen beschreiben:

Alle Stoffe oder Reststoffe,

- die bei einer Produktion anfallen und nicht das Produkt darstellen oder als Produkt verwendet werden können
- die für ihre Zweckbestimmung nicht mehr verwendbar sind
- die durch ihre Verschmutzung oder Kontamination für den vorgesehenen Verwendungszweck nicht mehr geeignet sind oder
- die nicht verwendet werden dürfen

sind als Abfälle zu bezeichnen, wenn gleichzeitig die zweite Voraussetzung zutrifft.

Von größter Bedeutung ist jedoch, daß diese potentielle Abfalleigenschaft - im Gegensatz zum Abfallbegriff des AbfG - an Hand des vorliegenden Stoffes, nämlich an seinen Inhaltsstoffen und seinen physikalischen Eigenschaften, an der Eignung für seine Zweckbestimmung und an seiner Herkunft **stoffbezogen** definiert.

Auf die zweite Voraussetzung soll im Rahmen dieses Beitrages nicht näher eingegangen werden.

3 Die zwei Abfallarten / Verwertung oder Beseitigung

Die nach Kapitel 2 als Abfall einzuordnenden Stoffe werden nach dem KrW-/AbfG in zwei Abfallarten eingeteilt, nämlich in

- **Abfälle zur Verwertung** oder
- **Abfälle zur Beseitigung**.

Zunächst definiert § 3 Abs. 1 Satz 2 in Form einer Tautologie:

"Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden" und weiter "Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung".

In § 3 Abs. 2 wird dann im Rahmen der Erklärung, was unter Entledigung zu verstehen ist, festgesetzt, daß Entledigung die **Zuführung** des Abfalls zu einer **Verwertung** im Sinne des **Anhangs II B** oder einer **Beseitigung** im Sinne des **Anhangs II A** ist.

In den Anhängen werden dann Beseitigungs- bzw. Verwertungsverfahren aufgeführt.

Bei Betrachtung der aufgeführten Beseitigungsverfahren stellt man fest, daß es sich dabei um alle Arten von Ablagerung oder Einbringung in oder auf dem Boden, Vertiefungen oder bergbaulichen Hohlräumen handelt, unabhängig davon ob eine gezielt eingerichtete Deponie vorliegt.

Ferner gehören zu den Beseitigungsverfahren alle Schritte der biologischen, chemischen oder physikalischen Vorbehandlung sowie der Zwischenlagerung vor einer oben aufgeführten Ablagerung. Erwähnt sei noch, daß mit der Einleitung in Gewässer und Meere und mit der "Verbrennung auf See" Verfahren der Beseitigung zugerechnet werden, die durch den § 2 Abs. 2 Nr. 6 von diesem Gesetz ausgeschlossen oder durch andere Vorschriften verboten sind. Dies beruht auf der Herkunft dieser Anhänge aus dem EU-Bereich und den unterschiedlichen Gesetzen der EU-Mitgliedstaaten. Für dieses Referat ist das Verfahren "D 10 - Verbrennung an Land" des Anhangs II A von Bedeutung.

Zu den Verwertungsverfahren gem. Anhang II B zählen solche Verfahren, bei denen Rohstoffe durch Abfälle substituiert werden, die aus Abfällen die Ausgangsstoffe oder andere Stoffe oder Rohstoffe wiedergewinnen, die die Abfälle wiederverwenden oder die die stofflichen (d.h. chemischen, physikalischen oder biologischen) Eigenschaften der Abfälle nutzen. Zu den physikalischen Eigenschaften gehören auch die thermischen. D.h. die Nutzung des Heizwertes eines Abfalls ist ein Verwertungsverfahren. Im Anhang II B wird das Verfahren "R 9 - Verfahren als Brennstoff oder andere Mittel der Energieerzeugung" aufgeführt.

Zunächst ist also festzuhalten, daß sowohl aus § 3 Abs. 1 ("Abfälle, die verwertet werden") als auch aus § 3 Abs. 2 (Zuführung zur Verwertung oder Beseitigung) und aus den Aufzählungen der "Verfahren" der Anhänge klar hervorgeht, daß die Frage, ob es sich um einen "Abfall zur Verwertung" oder "Abfall zur Beseitigung" handelt, nur an dem **Verfahren zu erkennen** ist, dem der Abfall zugeführt wird. Dagegen ist die **Abfalleigenschaft am Stoff selbst** zu erkennen (s.o.).

Grundsätzlich ist es auch die Entscheidung des Abfallerzeugers oder -besitzers, welche Maßnahme er für seinen Abfall vorsieht, wobei die Verwertung nach den Maßgaben des § 5 Vorrang hat.

Bei den in den Anhängen aufgezählten Beseitigungs- und Verwertungsverfahren stellt man fest, daß hiermit auch technisch identische Verfahren gemeint sein können.

Dies gilt für die oben zitierten Verfahren D 10 und R 9, d.h. für thermische Prozesse.

Es ist also nach weiteren Unterscheidungsmerkmalen zu suchen.

4 Die unterschiedlichen Rechtsfolgen für Abfälle zur Verwertung und Abfälle zur Beseitigung

Die Frage, ob es sich um "Abfälle zur Beseitigung" oder "-zur Verwertung" handelt, wäre nur von geringer Bedeutung, wenn daran nicht unterschiedliche Rechts- und damit auch direkt und indirekt Kostenfolgen geknüpft wären. Diese ergeben sich nicht nur aus dem KrW-/AbfG, sondern auch aus anderen Rechtsvorschriften. Daher sollen die wichtigsten aufgezeigt werden:

- a) Lediglich für Abfälle zur Beseitigung gilt der Vorgang der Inlandsentsorgung.
- b) Andienungs- und Überlassungspflichten an den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger gelten - außer für Haushaltungen - nur für Erzeuger und Besitzer von Abfällen zur Beseitigung. Auch für diese gibt es zusätzliche Einschränkungen (§ 13).
- c) Abfälle zur Beseitigung dürfen nur in dafür zugelassenen Anlagen entsorgt werden. Auch eine Entsorgung in einer nach § 4 BImSchG genehmigten Anlage zulässig.
Die Verwertung von Abfällen ist auch in nicht dafür oder gar nicht zugelassenen Anlagen erlaubt.
- d) Abfälle zur Beseitigung sind immer überwachungsbedürftig. (Die notwendigen Nachweisverfahren regelt die Nachweisordnung.)
Es gibt nicht überwachungsbedürftige Abfälle zur Verwertung, die nur der eingeschränkten Überwachungsvorschrift des § 40 unterliegen.

- e) Zur Beförderung von Abfällen zur Beseitigung ist immer eine Transportgenehmigung erforderlich (§ 49). Erst durch die Transportgenehmigungsverordnung wurde dieses Erfordernis auch auf die "Besonders überwachungsbedürftigen Abfälle zur Verwertung" ausgedehnt.
- f) Bei der Abfallverbringung (Transport über Landesgrenzen) gelten für Abfälle zur Beseitigung weitergehende und umfangreiche Notifizierungsverfahren als für Abfälle zur Verwertung. Insbesondere kann das abgebende Land nur bei Abfällen zur Beseitigung Einwände erheben.
- g) Die Regelungen der Länder für eine Abfallabgabe beziehen sich in der Regel nur auf Abfälle zur Beseitigung.
- h) Einige Verordnungen zum BImSchG enthalten zusätzliche beschwerende Regelungen für Abfälle. Beispiele sind die 4. BImSchV und die 17. BImSchV. Es ist noch nicht absehbar, ob diese Regelungen zukünftig für alle Abfälle oder nur für Abfälle zur Beseitigung gelten.

Diese nicht abschließende Aufzählung macht deutlich, daß die belastenden Vorschriften des KrW-/AbfG und anderer Gesetze sich im wesentlichen auf Abfälle zur Beseitigung beziehen, wohingegen für die Verwertung von Abfällen nur wenige Vorschriften gelten.

Lediglich die bereits im alten Abfallrecht für Abfälle geltende Stoffstromüberwachung vom Erzeuger zum Entsorger durch Nachweise wird auf überwachungsbedürftige und besonders überwachungsbedürftige Abfälle zur Verwertung ausgedehnt.

Nicht nur die Abfallabgabe der Länder, sondern auch die anderen Vorschriften, die nur für Abfälle zur Beseitigung gelten, bedeuten auch zusätzliche Kosten und ggf. auch Zeit.

Da sich der Abfallmarkt insgesamt dahingehend geändert hat, daß nicht mehr ein Mangel, sondern ein Überangebot an Beseitigungsanlagen besteht, können diese bestehenden Anlagen mit den Verwertungsanlagen oder mit der direkten Verwertung nicht mehr konkurrieren.

Für die Anlagenbetreiber von solchen Anlagen, deren Zuordnung zu einem Verwertungs- oder Beseitigungsverfahren nicht eindeutig vorgenommen werden kann (siehe Kapitel 3), besteht daher ein Interesse an der Klärung dieser Frage, natürlich möglichst in Richtung Verwertung.

Daneben vertreten die Betreiber von Beseitigungsanlagen (Deponien oder MVA'en) die Auffassung, daß dann, wenn die stofflichen oder thermischen Eigenschaften des Abfalls dieses für Maßnahmen innerhalb der Anlage zulassen, diese Maßnahmen auch als Verwertung anzusehen sind.

5 Kriterien für die Verwertung und Beseitigung

Die Ausführungen in Kapitel 4 zeigen, welche Auswirkungen die Unterscheidung zwischen Verwertung und Beseitigung haben können.

Als weitere Beurteilungskriterien für eine Abgrenzung sind die §§ 4 Abs. 3, 4 und § 10 Abs. 2 heranzuziehen. In Ihnen werden die stoffliche und energetische Verwertung sowie die Abfallbeseitigung definiert.

Dabei ist gem. § 4 Abs. 3, 4 für die Unterscheidung maßgebend, ob der **Hauptzweck der Maßnahme** in der Nutzung oder Verwertung und nicht in der Beseitigung des Schadstoffpotentials oder die Behandlung von der Ablagerung liegt. Hier verbleibt ein großer Beurteilungsspielraum. Zu fragen ist auch, ob der Begriff "Maßnahme" sich von dem Begriff "Verfahren" unterscheidet. Denkbar ist z.B., daß innerhalb eines Beseitigungsverfahrens (z.B. Deponie) eine Verwertungsmaßnahme (z.B. Deponiestraße aus "Abfällen zur Verwertung") durchgeführt wird.

In den §§ 3 Abs. 3 und 4 sind jeweils auch die Art und Ausmaß der **Verunreinigungen** des einzelnen Abfalls als bestimmend für die stoffliche und energetische Verwertung genannt.

Wie Kapitel 4 zeigt, haben die Länder viele Gründe, u.a. auch die Erhebung der Abfallabgabe, möglichst viele Abfälle den Abfällen zur Beseitigung zuzurechnen. Einige haben daher unter Berufung auf diese Formulierung des Gesetzes unterschiedliche Parameterlisten aufgestellt, ab welcher Schadstoffkonzentration Abfälle als Abfälle zur Beseitigung anzusehen sind. Dies würde dem sonstigen Prinzip des Gesetzes widersprechen, daß der Erzeuger entscheidet, welcher ordnungsgemäßen Entsorgung er den Abfall zuführt, wobei die Verwertung Vorrang hat. Auch würde es dem im Kapitel 3 dargelegten Grundsatz widersprechen, daß die Unterscheidung Verwertung oder Beseitigung nur am Verfahren, dem der Abfall **zugeführt wird**, auszurichten ist. Stoffbezogen kann nur der Abfall identifiziert werden.

Rechtlich auslegbar und der technischen Wirklichkeit angemessener erscheint mir die Deutung, daß die "Verunreinigung" des Abfalls in seiner Bedeutung für das Verwertungsverfahren gesehen werden muß. Abfälle aus denen Buntmetalle wie z.B. Kupfer gewonnen werden, können zum weit überwiegenden Teil aus "Schadstoffen" wie z.B. Schwermetalle und Mineralien und nur zu wenigen Prozenten aus dem gewinnenden Metall bestehen. Dennoch kann dieses ein lukratives Verwertungsverfahren sein, mit dem Hauptzweck, ein Metall zu gewinnen.

6 Verwertung in thermischen Prozessen

Für die Beurteilung, ob es sich bei einem thermischen Prozeß um eine Verwertung oder Beseitigung handelt, sind die § 4 Abs. 4 und § 6 des KrW-/AbfG heranzuziehen.

Der § 4 Abs. 4 sagt zunächst, daß eine energetische Verwertung den Einsatz eines Abfalls als Ersatzbrennstoff darstellt. In jedem thermischen Prozeß können somit grundsätzlich Abfälle eingesetzt werden.

Weiterhin wird festgestellt, daß die thermische Behandlung von Abfällen vom Vorrang der energetischen unberührt bleibt und daß dieses insbesondere für Hausmüll gilt. Somit ist die Hausmüllverbrennungsanlage immer als Beseitigungsanlage (Verfahren D 10) und die Verbrennung von vermischtem Hausmüll als Abfallbeseitigung anzusehen.

Weiterhin formuliert der § 4 Abs. 4:

Für die Abgrenzung (zwischen Verwertung und Beseitigung) ist auf den Hauptzweck der Maßnahme abzustellen. Ausgehend vom einzelnen Abfall, ohne Vermischung mit anderen Stoffen, bestimmen Art und Ausmaß seiner Verunreinigungen sowie die durch seine Behandlung anfallenden weiteren Abfälle und entstehenden Emissionen, ob der Hauptzweck auf die Verwertung oder Behandlung gerichtet ist.

Es ist also in jedem Fall nicht nach dem Verfahren, sondern nach dem Zweck zu fragen, warum dieser Stoff im Einzelfall in einem thermischen Prozeß eingesetzt wird.

Ferner wird aus dieser Formulierung deutlich, daß die Verunreinigungen des Abfalls im Zusammenhang mit der einzelnen Maßnahme und nicht alleine vom Stoff her zu sehen ist. Auch die weiteren Kriterien "entstehende Abfälle" und "Emissionen" sind nicht vom Abfallstoff, sondern vom einzelnen thermischen Prozeß abhängig.

Hier gibt auch der § 6 Abs. 2 eine weitere Interpretationshilfe. Dort heißt es:

Eine energetische Verwertung im Sinne des § 4 Abs. 4 ist nur zulässig, wenn

1. der Heizwert des einzelnen Abfalls, ohne Vermischung mit anderen Stoffen, mindestens 11 000 kJ/kg beträgt,
2. ein Feuerwirkungsgrad von mindestens 75 % erzielt wird,
3. entstehende Wärme selbst genutzt oder an Dritte abgegeben wird und
4. die im Rahmen der Verwertung anfallenden weiteren Abfälle möglichst ohne weitere Behandlung abgelagert werden können.

Zunächst wird deutlich, daß die hier genannten Kriterien Mindestanforderungen darstellen, die nicht unterschritten werden dürfen, wenn eine energetische Verwertung vorliegen soll.

Ferner ist festzustellen, daß lediglich die Anforderung Nr. 1 stoffbezogen, d.h. am Abfall selbst meßbar ist. Die Anforderungen Nr. 2 bis 4 hängen wiederum von dem jeweiligen einzelnen thermischen Prozeß ab.

Die extreme Beurteilungsposition ob der Hauptzweck der Maßnahme des Einsatzes von Abfällen in einem thermischen Prozeß eine Verwertung oder Beseitigung darstellt, lautet somit, daß dann, wenn der Abfall (ausgenommen vermischter Hausmüll) den geforderten Heizwert erreicht und die Anlage die Kriterien der Nr. 2 bis 4 erfüllt, diese Maßnahme eine Verwertung darstellt. Dies würde für alle thermischen Prozesse einschließlich der Müllverbrennungsanlagen gelten.

Zu bemerken ist noch, daß die Nr. 2 auf den Wirkungsgrad der Feueranlage und nicht auf den der gesamten Anlage bezogen ist.

7 Abfallverwertung aus der Sicht der Überwachungsbehörden

Bei der Abfallverwertung kann sich der Überwachungsvorgang der Behörden auf drei bzw. vier Beteiligte, Anlagen oder Vorgänge beziehen.

Zunächst unterliegt der Abfallerzeuger der Überwachung. Ist der Abfallerzeuger eine Anlage nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz sind auch die auf die Vermeidung, Verwertung oder Beseitigung bezogenen Pflichten gem. § 5 BImSchG zu überwachen.

Danach unterliegt nach den §§ 40 ff KrW-/AbfG auch der Entsorgungsvorgang vom Abfallerzeuger zum Entsorger der Überwachung durch die Behörden. Je nach Art des Abfalls sind unterschiedliche oder keine Nachweise zu führen, die der Stoffstromkontrolle der Abfälle dienen. Die Abfallarten sind durch die §§ 3 Abs. 5 und 41 sowie die darauf beruhenden Bestimmungsverordnungen, die unterschiedlichen Nachweise in der Nachweis-Verordnung geregelt.

Zuletzt ist auch noch die Entsorgungsanlage zu überwachen, insbesondere daraufhin, ob die darin stattfindende Entsorgung auch ordnungsgemäß und schadlos durchgeführt wird.

Jeder Abfallerzeuger hat den Vorrang der Verwertung unter den in § 5 KrW-/AbfG aufgezählten Kriterien zu beachten. Ist der Erzeuger eine nach BImSchG genehmigungsbedürftige Anlage, so ergibt sich diese Pflicht auch als Betreiberpflicht nach § 5 Abs. 1 Nr. 3 BImSchG, deren Einhaltung die Voraussetzung für die Genehmigung und den Betrieb einer Anlage ist. Somit hat der Abfallerzeuger möglicherweise zwei Überwachungsbehörden nachzuweisen, daß er diesen Vorrang der Verwertung beachtet hat.

Die Kontrolle des Entsorgungsvorganges vom Erzeuger zum Entsorger geschieht im wesentlichen dadurch, daß nachgewiesen wird, daß die Abfälle eines Erzeugers einer ordnungsgemäßen Entsorgung zugeführt werden. Dies geschieht durch unterschiedliche Nachweise die in der NachwV vorgeschrieben und den Überwachungsbehörden vorzulegen sind.

Bemerkenswert ist hierbei, daß die zuständige Behörde des Abfallentsorgers, die bei der Entsorgung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen eine Bestätigung zu geben hat, daß die Abfälle in der Entsorgungsanlage ordnungsgemäß entsorgt werden können, ausdrücklich nicht mehr zu prüfen hat, ob es sich bei dem Einsatz dieser Stoffe um eine Verwertung oder Beseitigung handelt. Die Behörde hat ausschließlich zu überwachen und bestätigen, daß diese Abfälle als Einsatzstoffe in die Anlage eingebracht werden dürfen.

Dies deckt sich letztlich auch mit den Überwachungspflichten der Anlagenüberwachung der Entsorgungsanlage, die sich u.a. nur darauf beziehen, ob der Einsatz der Stoffe in der Anlage zulässig ist und ob Emissionen, Abfälle oder sonstige Auswirkungen, durch diese Stoffe unzulässigerweise beeinflußt werden.

Wir müssen somit feststellen, daß die Entscheidung, ob es sich um eine Verwertung oder Beseitigung von Abfällen, vom Hauptzweck der Maßnahme bei der Entsorgung abhängig ist, die zuständigen Überwachungsbehörden aber daran gehindert sind oder auch keine Verpflichtung haben, diese Frage zu entscheiden.

Der Abfallerzeuger und dessen Überwachungsbehörden sind jedoch - insbesondere durch die in Kapitel 4 aufgezeigten unterschiedlichen Rechts- und Kostenfolgen - von den Angaben der Entsorgungsanlage abhängig.

8 Abfallverwertung aus Sicht der Genehmigungsbehörden

Ob es sich beim Einsatz von Abfällen in einem thermischen Prozeß um Abfallverwertung handelt, ist insbesondere für die Genehmigungsbehörden eines Abfallerzeugers, der eine Anlage nach dem BImSchG betreibt, von Bedeutung. Dieses ist in Kapitel 7 dargelegt und bedarf hier keiner weiteren Erklärung.

Zu betrachten ist jedoch die Sicht der Genehmigungsbehörde der Anlage, in der durch einen thermischen Prozeß, Abfälle entsorgt werden sollen. Alle diese Anlagen sind nach dem BImSchG zu genehmigen, es sei denn, die Anlage wäre unbedeutend. Maßgeblich für die Genehmigung ist die 4. BImSchV. Dort sind die Anlagenarten und das notwendige Genehmigungsverfahren aufgezählt.

Anlagen, in denen Abfälle behandelt werden sollen, sind insbesondere in der Gruppe Nr. 8 aufgezählt. Daneben dürfen Abfälle in jeder Anlage beseitigt werden, die einer Genehmigung nach § 4 BImSchG bedürfen (§ 27 KrW-/AbfG). Die Abfallverwertung ist ohnehin auch außerhalb genehmigter Anlagen zulässig.

Der Anhang der 4. BImSchV wird geändert und auch auf die Anforderungen aus dem KrW-/AbfG abgestellt werden.

Wenn auch in Nr. 8.1 des Anhangs zur 4. BImSchV derzeit Anlagen zur thermischen **Beseitigung** von Abfällen genannt sind, so wird weder bei der Zuordnung einer Anlage in der 4. BImSchV, noch bisher in der Genehmigung dahingehend unter-

schieden, ob der Einsatz eines Abfalles "zur Verwertung" oder "zur Beseitigung" zulässig ist. Zu prüfen ist lediglich, ob der Stoff - unabhängig davon, zu welcher Abfallart er gehört - eingesetzt werden darf. Die Genehmigungsbehörde der Entsorgungsanlage wird somit die Frage des Abfallerzeugers, ob es sich um eine Verwertung oder Beseitigung handelt, üblicherweise nicht beantworten.

Der Genehmigungsinhaber der Entsorgungsanlage selbst kann jedoch durchaus ein Interesse haben, daß ein Abfall als Ersatzbrennstoff in seiner Anlage eingesetzt werden darf u.a. um seine Anlage im Verwertungsmarkt für Abfälle anbieten zu können, da er sie ansonsten ggf. nicht mehr wirtschaftlich betreiben kann. Um hier rechtliche Klarheit zu schaffen, kann ihm daran gelegen sein, auch in dem Genehmigungsbescheid selbst, die Zulässigkeit und die Rahmenbedingungen für die Verwertung von Abfällen zu verankern. Der Genehmigungsinhaber wird dann den im BImSchG vorgesehenen Weg gehen müssen.

9 Schlußbemerkung

Das KrW-/AbfG, seine Verordnungen und auch andere Gesetze knüpfen an die Unterscheidung, ob ein thermischer Prozeß eine Verwertung oder Beseitigung darstellt, die Begriffe "Abfall zur Beseitigung" oder "Abfall zur Verwertung", deren Rechtsfolgen sich jedoch schon beim Abfallerzeuger auswirken. Die Überwachungs- und Genehmigungsbehörden des Abfallerzeugers können jedoch von den zuständigen Behörden des Entsorgers kaum Auskunft erwarten.

Ob der Einsatz eines Abfalls eine Verwertung oder Beseitigung darstellt, ist ohnehin eine schwierige und interpretationsfähige Entscheidung, die jedoch für alle Betroffenen erhebliche Rechtsprobleme und Kosten aufwirft.

Alle zuständigen Behörden können somit einen erheblichen Entscheidungs- aber auch gerichtlichen Klärungsbedarf erwarten.

Anschrift des Verfassers:

LRBD Jürgen Hachen
Bezirksregierung Arnsberg
Seibertzstr. 1
59821 Arnsberg

2. Kreislaufwirtschaft auf dem ökologischen Prüfstand - dargestellt am Beispiel der thermischen Abfallbehandlung

R. Berghoff, Essen

Künftige Entwicklung

Bei steigenden Anforderungen an den Umweltschutz, fortschreitender technischer Entwicklung und einer äußerst angespannten Kostensituation wird es m. E. zu Veränderungen hinsichtlich des Einsatzes der thermischen Verfahren zur Abfallbehandlung kommen, die auf folgendes hinauslaufen:

- anstelle der Verbrennung zunehmend Anwendung alternativer Prozesse, wie Pyrolyse und Vergasung,
- verstärkte Nutzung thermischer Prozesse aus dem Produktions- oder Kraftwerksbereich zur Mitbehandlung von Abfällen (Bild 1).

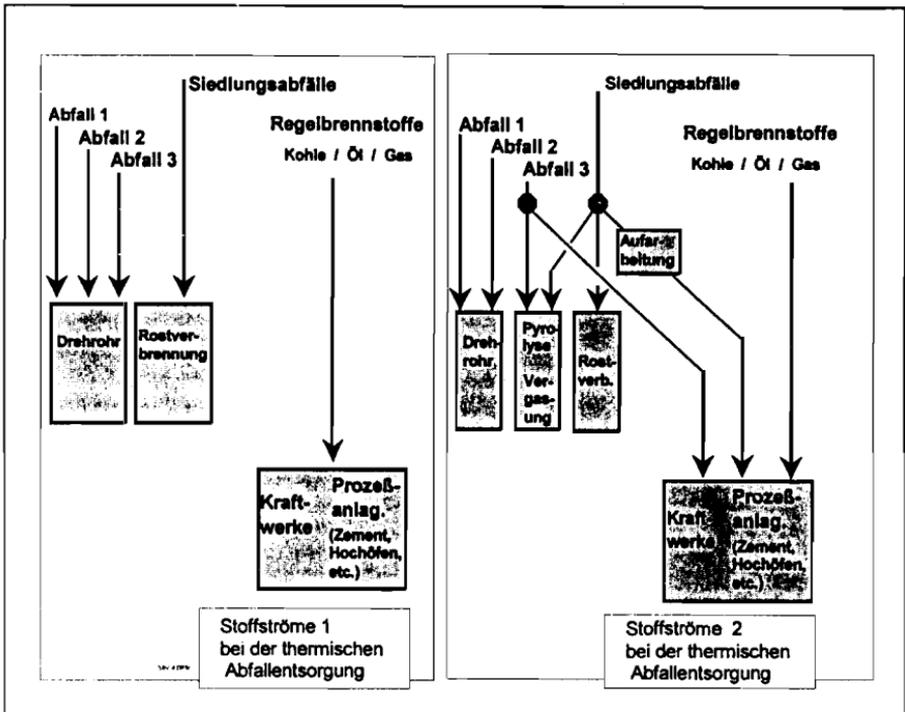


Bild 1: Derzeitige und künftige Wege einer thermischen Abfallbehandlung

Wenn auch die Mitverbrennung von Abfällen in anderen Anlagen schon nach dem alten Abfallgesetz möglich war und vereinzelt auch praktiziert wurde, so werden durch das neue Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz in Verbindung mit dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (§ 5) diese Wege weiter geebnet.

In Erwartung einer Flut von neuen Ideen, Konzepten, Verfahren und Kombinationen, bei denen man sich stets auf eine "Pflicht zur Verwertung" nach dem KrW-/AbfG beruft, ist es jetzt unsere Aufgabe, diese mit strengen Maßstäben zu werten. Denn nicht alle angegangenen neuen Entsorgungswege sind sinnvoll. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit oder mangelnder Akzeptanz werden zunehmend auch Konzepte vorgeschlagen, die nicht nur keine Verbesserung bringen, sondern sich bei näherem Hinsehen sogar von den bisher erreichten Standards des Umweltschutzes wieder entfernen. Das ist aber nicht gewollt.

"Ökologischer Prüfstand"

Nach § 1 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes ist die Kreislaufwirtschaft zu fördern zur

- Schonung der natürlichen Ressourcen, und zur
- Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen.

Während wir für den letzteren Bereich für alle Medien sehr differenzierte Grenzwerte, Richt- und Trendwerte und damit verbunden ein umfassendes System weitgehender Regularien haben und dieses auch immer weiter auf der Basis gesamtökologischer Betrachtungsweisen ausbauen, gab es für den anderen Part, die Nutzung der Ressourcen, d. h. Abbau und Einsatz von

- fossilen Brennstoffen,
- Erzen,
- Mineralien,

bisher keine Beschränkungen. Bodenschätze werden abgebaut, so lange es sich lohnt. Ein Ende - wenn auch langfristig - wäre damit vorprogrammiert. Doch hier muß man differenzieren: Metalle und Mineralien bleiben auch nach einer Nutzung erhalten. Sie können grundsätzlich aus jedem Medium zurückgewonnen werden. Kohle, Öl und Gas dagegen nicht. Für sie gibt es kein Recycling mehr. Denn diese Stoffe stammen überwiegend aus Naturreserven, die sich nicht erneuern. Es sind Rohstoffe, deren freie Energie mit der Umwandlung zu CO₂ endgültig verbraucht wird. Das heißt, daß hier andere, strengere Maßstäbe angesetzt werden müssen; ganz im Sinne eines "Sustainable Development" (= nachhaltige umweltverträgliche Entwicklung). Der Vorrang einer "stofflichen Verwertung" ist endgültig zu den Akten zu legen.

Das alles bedeutet: ein "ökologischer Prüfstand" darf sich nicht nur mit der Umweltverträglichkeit - also mit den Emissionen in Wasser, Boden und Luft und deren Wechselwirkungen - befassen, er muß auch die Erhaltung und damit den

sorgfältigen Umgang mit den Bodenschätzen, hier insbesondere mit den fossilen Brennstoffen, im Blickwinkel haben.

Die Frage, die sich bei den vielen Möglichkeiten einer stofflichen und energetischen Verwertung bzw. einer stofflichen und thermischen Beseitigung stellt, heißt also:

Lenkt das KrW-/AbfG die Abfälle in die richtigen Bahnen?

"Richtig" heißt: minimaler Verbrauch an natürlichen Ressourcen, insbesondere fossiler Energieträger, und höchstmögliche Umweltverträglichkeit unter gesamtökologischen Annahmen.

In Bild 2 sind die wesentlichen Zuordnungskriterien und Randbedingungen für die Einordnung der Abfälle nach dem KrW-/AbfG aufgeführt. Bei näherer Betrachtung zeigt sich, daß das KrW-/AbfG - zumindest bei den thermischen Verfahren - grundsätzlich vom richtigen Ansatz her ausgeht.

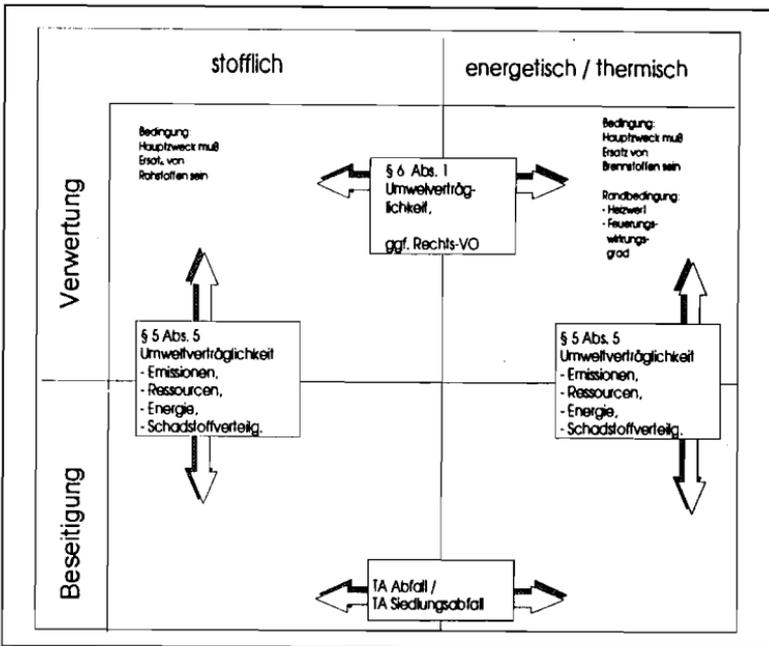


Bild 2: Einordnung der Abfälle nach dem KrW-/AbfG

Wenn für einen Abfall die Voraussetzungen an die stoffliche wie energetische Verwertung gegeben sind, sind nach § 6 Abs. 1 beide Verwertungsarten als gleichrangig anzusehen. Erst wenn eine Verwertungsart sich als besser umweltverträglich erweist, hätte sie den Vorrang. Wenn sich darüber hinaus noch erweisen sollte, daß die Beseitigung umweltverträglicher als beide Verwertungsarten sein sollte, dann hat sie nach § 5 Abs. 5 den Vorrang.

Die Entscheidung richtet sich in jedem Fall nach der Umweltverträglichkeit. Zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit sind nach § 5 Abs. 5 die

- Emissionen,
- die Schonung der natürlichen Ressourcen,
- die einzusetzende oder zu gewinnende Energie,
- eine mögliche Schadstoffverteilung auf die Recyclingprodukte

als Maßstäbe heranzuziehen. Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz richtet mit der Forderung nach Einsparung der natürlichen Ressourcen unseren Blick auch in die Zukunft. Ein Anliegen, daß uns sehr wichtig sein sollte.

Die o. a. Begriffe bedürfen aber der weiteren Konkretisierung. Eine Arbeitsgruppe der LAGA unter Beteiligung des LAI hat sich dieser Aufgabe angenommen und einen (noch nicht abgestimmten) Vorschlag für die Einordnung der Abfälle nach den Kriterien des KrW-/AbfG erarbeitet.

Unabhängig davon ist die Bundesregierung allerdings auch ermächtigt, durch eine Rechtsverordnung die Verwertungsart für bestimmte Abfälle festzulegen.

Dennoch zeigt sich, daß auch Kritik am Gesetz angebracht ist.

Mitverbrennung / thermische Behandlung in eigenen Anlagen

Die Beschränkung der Emissionen bei der Mitverbrennung von Abfällen werden durch die 17. BImSchV geregelt. Wenn ein Abfall in einer Anlage, in der sonst nur ein Regelbrennstoff eingesetzt wird, mitverbrannt werden soll, werden aus den bisher für die Anlage gültigen Emissionsgrenzwerten und denen der Abfallverbrennung (17. BImSchV §§ 4 und 5) über eine Mischrechnung neue Grenzwerte ermittelt. In die Rechnung gehen dabei auch die jeweiligen Abgasvolumenströme von Regelbrennstoff und Abfall ein. Die durch diese Rechnung ermittelten Grenzwerte sollen die Gesamtemissionen so begrenzen, als ob beide Brennstoffe jeweils getrennt in ihren spezifischen Anlagen eingesetzt worden wären. Wird einer der Grenzwerte in der Praxis nicht eingehalten, so muß die vorhandene Abgasreinigung verbessert werden, oder auf die Mitverbrennung ist zu verzichten.

Danach führt eine Mitverbrennung nicht zu einer Erhöhung der Emissionen. Doch gerade das passiert in bestimmten Fällen - auch wenn die Rechnung korrekt durchgeführt und die Grenzwerte eingehalten werden:

- 1) Beim Betrieb der Kraftwerke oder Prozeßfeuerungen werden beim Einsatz der Regelbrennstoffe die Emissionsgrenzwerte fast immer unterschritten, so daß für bestimmte Stoffe, wie z. B. Schwermetalle und Säurebildner, ein gewisser Spielraum zum Auffüllen vorhanden ist. Dieser Spielraum kann nun für schadstoffhaltige Abfälle genutzt werden, wobei die ermittelten Mischgrenzwerte durchaus eingehalten werden. Rechtliche Gründe für eine weitere Nachrüstung zur Abgasreinigung gibt es dann nicht. In diesen Fällen hätten wir effektiv eine Erhöhung der Luftbelastung zu erwarten.

Anders sieht es bei den Schadstoffen aus, die bei den Feuerungsanlagen nicht geregelt sind, so daß man in diesen Fällen von den tatsächlichen Betriebswerten (ohne Abfälle) auszugehen hat. So z. B. bei Quecksilber sowie Dioxinen/Furanen.

Dann bleibt kein Spielraum zum Auffüllen und damit auch keine erhöhten Emissionen. Die Betriebswerte müssen allerdings erst ermittelt werden.

- 2) Bei der Durchführung der Mischrechnung geht man für die Abfälle von den Emissionsgrenzwerten der 17. BImSchV aus. Dabei wird nicht berücksichtigt, daß in der Praxis der Abfallverbrennung, die ja gedanklich als Vergleichsverfahren herangezogen wird, diese Werte meist deutlich unterschritten werden. Dieser Vorteil geht bei einer Mitverbrennung verloren.
- 3) Unvorhergesehene Schwankungen bei den Schadstoffgehalten der Abfälle können zu Grenzwertüberschreitungen führen, die bei diskontinuierlichen Messungen nicht immer erfaßt werden.

Daneben kommt es durch die Mitverbrennung von Abfällen in den meisten Fällen sicherlich dazu, daß sich bestimmte Schadstoffe auch in den festen Rückständen anreichern und so mehr oder minder mit diesen verteilt werden.

In Bild 3 ist der Versuch unternommen, die Vor- und die Nachteile der Mitverbrennung gegenüber einer Verbrennung in eigenen Abfallbehandlungsanlagen (SAV, MVA) gegenüberstellen.

	Mitverbrennung				
	MVA	SAV	Kohlekraftwerk Trocken- feuerung	Schmelz- kammer- feuerung	Zement- drehrohr
feste Rückstände	●● * konzentriert	●●● * konzentriert * geschmolzen	● * verteilt	●● * verteilt * geschmolzen	●● * verteilt * eingebunden
Emissionen über Abgas	●●● * 17. BImSchV	●●● * 17. BImSchV	●● * Mischgrenz- wert	●● * Mischgrenz- wert	●● * Mischgrenz- wert
Nutzung der Energie	● bis ●●●	● bis ●●●	●●●	●●●	●●●

●●● sehr gut
 ●● mittel
 ● mäßig

Bild 3: Bewertung der Mitverbrennung

Es muß aber andererseits überprüft werden, ob diese zusätzlich emittierten Frachten an Schadstoffen nicht durch die Tatsache kompensiert werden können, daß die

Abfälle bei der Mitverbrennung besser genutzt werden. Denn der energetische Wirkungsgrad von Kraftwerken oder Prozeßfeuerungsanlagen ist in der Regel deutlich höher als bei Abfallverbrennungsanlagen. In diesen Fällen erfolgt durch die Mitverbrennung eine Substitution von fossilen Brennstoffen und damit eine Einsparung an Ressourcen und Reduzierung von Emissionen.

Das alles wäre über eine Energiebilanz zu überprüfen. Dabei ist allerdings auch der Energiebetrag in Abzug zu bringen, der ggf. für eine separate Vorbehandlung des Abfalls aufgewendet werden muß, wenn diese eine notwendig Voraussetzung für die Mitverbrennung sein sollte. Dieser Gedanke gilt insbesondere für die vielfältigen Überlegungen hinsichtlich der Erzeugung von Brennstofffraktionen aus Hausmüll.

Da diese komplizierten Prüfungen im einzelnen nicht immer durchzuführen sind, sollte eine Mitverbrennung von Seiten der Genehmigungsbehörde nur dann gestattet werden, wenn die mit zu verbrennenden Abfälle Schadstoffgehalte haben, die im Bereich der Regelbrennstoffe liegen.

So hat die o. a. LAGA/LAI-Arbeitsgruppe solche Grenzwerte speziell für die energetische Verwertung vorgeschlagen. Das ist richtig, sollte aber m. E. auch anlagenbezogen gesehen werden. Es besteht sonst die Gefahr, daß hier allzu schematisch eine Einordnung der einzelnen Stoffe erfolgt, ohne daß auf die jeweils technischen Möglichkeiten der unterschiedlichen Anlagen eingegangen wird. So sollte man sich z. B. auf die Schwermetalle beschränken, da die organischen Inhaltsstoffe in den Anlagen unabhängig vom Gehalt zerstört werden.

Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz ebnet für viele Abfälle den Weg in die sog. Verwertung. Verstärkt wird dieser Trend durch einschlägige Gesetze der Länder (z. B. Andienungspflicht, Abfallizenz, Abfallabgabe). Ausschlaggebend bei der Wahl des Entsorgungsweges sind für den Abfallbesitzer also in erster Linie wirtschaftlichen Aspekte.

Inwieweit es sich bei der Verwertung aber wirklich um die umweltverträglicheren Wege handelt - wie es das Gesetz es schließlich fordert -ist zunächst einmal eine ganz andere Sache. Verwertung muß nicht immer die bessere Entscheidung sein. So hat die thermische Abfallbehandlung mit Abstand die schärfsten Emissionsgrenzwerte, was bekanntlich mit zu den hohen Entsorgungskosten beiträgt. Andererseits soll aber gerade sie von der Verwertung ausgenommen werden, wodurch sie noch einmal künstlich verteuert wird; mit dem Erfolg, daß die Abfälle andere Wege gehen. Diese Wege sind z. T., ich sage ausdrücklich "z. T.", eindeutig weniger umweltverträglich. Aber die Welt ist wieder in Ordnung; die ungeliebte thermische Abfallbehandlung findet nicht statt.

Diese Kopplung von Umweltschutz und wirtschaftlichen Interessen zusammen mit den ungelösten Fragen der Akzeptanz ist bedenklich. Hier ist deutliche Kritik anzusetzen.

Besser wäre es, im Einzelfall oder nach Fallgruppen ausschließlich nach der besseren Umweltverträglichkeit zu entscheiden. Das KrW-/AbfG sieht diese Möglichkeit in den §§ 5 und 6 zwar ausdrücklich vor, aber es ist zu bezweifeln, daß diese Arbeit im einzelnen geleistet werden kann; und die Bemühungen der LAGA-Arbeitsgruppe können nur zu einer sehr unspezifischen Einstufung führen.

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz bietet in bezug auf die thermischen Abfallbehandlungsverfahren und die Mitverbrennung richtige Ansätze. Es steht allerdings zu befürchten, daß mit dem Motor "Wirtschaftlichkeit" die Abfälle auch auf weniger gute Wege gebracht werden.

Anschrift des Verfassers:

RD Dr.-Ing. Rolf Berghoff
Landesumweltamt NRW
Postfach 10 23 63
45023 Essen

3. Abfallpotentiale zur Verwertung in thermischen Prozessen

H.-J. Roos, Viersen
Th. Buer, Aachen

1 Einleitung

Das am 07. Oktober diesen Jahres in Kraft getretene Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) räumt der energetischen Verwertung den gleichen Rang wie der stofflichen Verwertung ein. Die Abgrenzung der energetischen Verwertung von der thermischen Beseitigung knüpfte der Gesetzgeber jedoch sowohl an stoff- und anlagenspezifische als auch an umweltbezogene Kriterien [1,2]. Zu den stoffspezifischen Kriterien zählt, daß

- der Heizwert des Abfalls größer als 11.000 KJ/kg sein muß - es sei denn, es handelt sich um nachwachsende Rohstoffe
- der Nutzen der Verwertung des Abfalls größer ist als die Beseitigung des Schadstoffpotentials
- die entstehenden Reststoffe vorrangig stofflich verwertet bzw. gemäß den Anforderungen der TA Siedlungsabfall abgelagert werden können.

Als anlagenspezifische Kriterien werden aufgeführt, daß

- der Feuerungswirkungsgrad mindestens 75 % betragen muß
- die entstehende Ab- bzw. Prozeßwärme genutzt wird.

Darüber hinaus gestattet das KrW-/AbfG auch eine stoffliche Verwertung in thermischen Prozessen, wobei der Gesetzgeber vorschreibt, daß der Nutzen bei der Verwertung des Abfalls und nicht die Beseitigung des Schadstoffpotentials den Hauptzweck der Maßnahme darstellen muß. Somit ergeben sich prinzipiell folgende Verwertungsmöglichkeiten in thermischen Prozessen:

- energetische Verwertung, z.B.
 - Heizkraftwerk auf Altholzbasis
 - Co-Verbrennung von Klärschlamm im Kohlekraftwerk
- stoffliche Verwertung, z.B.
 - Einsatz von Kiesabbrand bei der Zementproduktion
- kombinierte energetische und stoffliche Verwertung, z.B.
 - Altireifen- oder Klärschlammeinsatz bei der Zementproduktion
 - Nutzung von Kunststoffabfällen bei der Eisenerzeugung

Bei der Frage, welche Abfälle sich für die Verwertung in thermischen Prozessen eignen und welche Mengenpotentiale damit verbunden sind, sollen im nachfolgenden nur die rein energetische und die kombinierte energetisch-stoffliche Verwertung Berücksichtigung finden. Die ausschließlich stoffliche Verwertung in thermischen

Prozessen, wie z.B. der Einsatz von Gießereialtsanden bei der Zementproduktion soll nicht betrachtet werden. Desweiteren sei bereits an dieser Stelle vermerkt, daß die Daten, welche für eine bis ins Detail gehende mengenmäßige Aufschlüsselung einzelner Abfallarten erforderlich sind, nicht vorliegen. Das abgeleitete Mengengerüst erhebt daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit; es gibt vielmehr die Größenordnung der in thermischen Prozessen verwertbaren Abfälle wieder.

2 Qualitative Auswahl von Abfällen zur Verwertung in thermischen Prozessen

Die Frage, welche Abfälle grundsätzlich für die Verwertung in thermischen Prozessen geeignet sind, bedarf einer differenzierten Antwort. Wird eine ausschließlich rohstoffliche Verwertung angestrebt, so sind es die spezifischen Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung des Prozeßinputs, die über die Einsatzfähigkeit eines bestimmten Abfalls in einem Verwertungsprozeß entscheiden. Soll ein Abfall hingegen einer energetischen oder einer kombinierten energetisch-stofflichen Verwertung zugeführt werden, so ist es der in Wärme umsetzbare Energieinhalt, dem die Schlüsselfunktion hinsichtlich der Verwertbarkeit zukommt. Energetisch nutzbar sind in diesem Sinne alle **brennbaren, natürlichen und künstlichen organischen Stoffe**. Hierzu zählen u. a. Materialien wie Holz, Pappe, Papier, Leder, Gummi, Kunststoffe, natürliche und synthetische Öle, Fette und Wachse, Textilien, Lösungsmittel, Nahrungsmittelbestandteile und Klärschlamm. Des weiteren können auch **anorganische Kohlenstoffmodifikationen** (z. B. Ruß, Graphit oder Aktivkohle) als Energieträger eingesetzt werden. Diese Stoffe finden sich als Abfall bzw. Abfallbestandteil sowohl im **Haus-, Sperr und Gewerbemüll** als auch in einer Vielzahl von **produktionsspezifischen Abfällen**. Die Tabelle 2a enthält für den Bereich der Produktionsabfälle eine Auswahl von Abfalluntergruppen (gemäß LAGA-Abfallartenkatalog), in denen jeweils einzelne Abfallarten, die für eine energetische Verwertung in Frage kommen, zusammengefaßt sind. Sie vermittelt einen Eindruck von der Vielfalt an Materialien, die hier zur Diskussion stehen.

Im Hinblick auf die im KrW-/AbfG festgelegte Mindestenergiedichte von 11 MJ/kg ist es von besonderem Interesse, ob die für eine energetische Nutzung grundsätzlich geeigneten Abfälle auch die vom Gesetzgeber auferlegte Verwertungshürde übersteigen. Eine abfallartenspezifische Auswertung von mehr als 250 Heizwertanalysen läßt, wie aus Bild 1 ersichtlich ist, den Schluß zu, daß dies für die holz-, papier-, kohle- und mineralölstämmigen Abfälle in der Regel der Fall sein dürfte. Lediglich etwa 6 % der untersuchten Abfälle liegen unterhalb der Heizwertgrenze. Durch einen weitergehenden Wasserentzug bzw. eine Trocknung ließe sich dieser Anteil noch weiter senken (Bild 2). Andererseits ist erkennbar, daß selbst innerhalb einer einzigen Abfallart die ermittelten Heizwerte sehr stark streuen. Dieses Bild ändert sich auch nicht, wenn der Wasser- (Bild 2) und Ascheanteil (ohne Abb.) rechnerisch eliminiert wird. Die auf die wasser- und aschefreie Substanz bezogenen Heizwerte ($H_{u,waf}$) der Kunststoffabfallgruppe variieren, ähnlich wie die Werte der Abfälle aus der Papierproduktion, zwischen 10 und 45 MJ/kg.

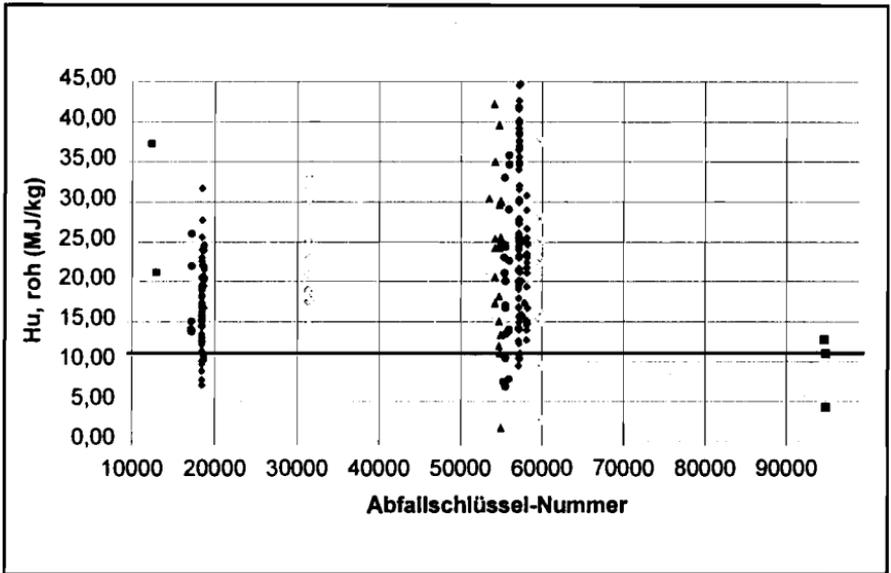


Bild 1: Heizwerte grundsätzlich energetisch nutzbarer Abfälle im Originalzustand ($H_{u,roh}$)

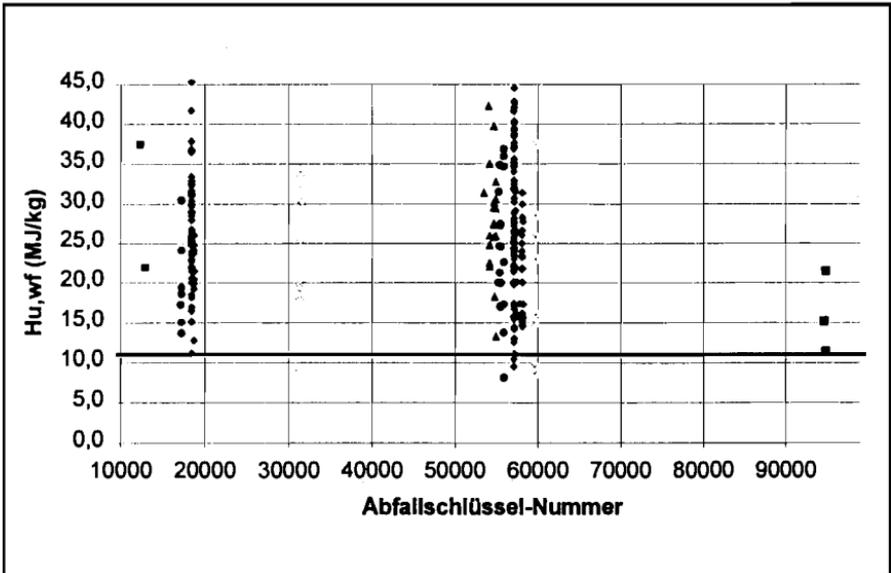


Bild 2: Heizwerte grundsätzlich energetisch nutzbarer Abfälle im getrockneten Zustand ($H_{u,wasserfrei}$)

Theoretisch müßten die Papierabfälle Werte von etwa 20 MJ/kg und die Kunststoffabfälle von etwa 40 MJ/kg aufweisen. Dies verdeutlicht, daß es sich auch bei produktionsspezifischen Abfällen in den seltensten Fällen um "Reinsubstanzen", sondern vielmehr um Stoffgemische handelt. Aufgrund dieser Heterogenität ist die Übertragung der vorgestellten Daten auf den Einzelfall nicht zulässig.

Insgesamt zeigt sich, daß die Abfallarten, welche zu einem bedeutenden Anteil natürliche oder künstliche organische Materialien enthalten, nicht nur prinzipiell einer energetischen Nutzung zuführbar sind, sondern zu einem weit überwiegenden Teil offensichtlich auch das im KrW-/AbfG verankerte Verwertungskriterium ($H_u > 11$ MJ/kg) erfüllen. Die in den Bildern 1 und 2 vertretenen Abfälle stimmen im wesentlichen mit den in Tabelle 2a/b aufgeführten Abfalluntergruppen überein. Für die nachfolgende quantitative Betrachtung der produktionsspezifischen Abfälle werden diese Abfalluntergruppen daher als qualitatives Auswahlkriterium herangezogen.

Haus-, Sperr- und Gewerbemüll enthalten nach wie vor zu einem nicht unerheblichen Anteil brennbare Stoffe, welche über entsprechende Aufbereitungsschritte zu heizwertreichen Fraktionen gebündelt werden können. Sie müssen bei einer Abschätzung des thermisch verwertbaren Abfallpotentials daher ebenso berücksichtigt werden wie die Klärschlämme. Letztgenannte erreichen zwar auch nach einer Trocknung oftmals nicht den für die Verwertung geforderten Heizwert von 11 MJ/kg, fallen aber aus dieser Regelung heraus, sofern man Klärschlämme als nachwachsende Rohstoffe auffaßt. Weiterhin eignen sich auch bestimmte DSD-Fraktionen zur Verwertung in thermischen Prozessen, so daß für das aufzustellende Mengengerüst folgende abfallspezifische Gliederung gewählt wurde:

- Brennbare Abfälle aus der Produktion
- Klärschlämme
- Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle
- Hausmüll
- Sperrmüll
- Baustellenabfälle
- Reststoffe aus dem Verpackungsbereich (DSD)
- Altreifen (aus statistischen Gründen separat aufgeführt)

3 Mengengerüst

3.1 Datenbasis

Aufzeichnungen über Aufkommen und Verbleib von Abfällen werden von verschiedenen Institutionen - angefangen beim Abfallerzeuger über Entsorgungs- und Beseitigungsbetriebe, Behörden, entsorgungspflichtige Körperschaften bis hin zu Branchenverbänden - durchgeführt. Die Datenerhebung und -auswertung erfolgt dabei in der Regel zweckgebunden, so daß es aufgrund unterschiedlicher Randbedingungen bei der Datenermittlung immer wieder zu quantitativ stark voneinander abweichenden Angaben hinsichtlich der Entstehung und Entsorgung von Abfällen

kommt. Im Hinblick auf die vorliegende Problemstellung ergab sich die Frage, welche Datengrundlage für diese Aufgabe am geeignetsten ist. Bei der Sichtung möglicher Datenquellen kristallisierte sich heraus, daß für eine möglichst umfassende Beantwortung der Frage nach den Abfallpotentialen zur thermischen Verwertung einerseits die amtliche Abfallstatistik eine wesentliche Grundlage bildet, andererseits aber auch andere Quellen heranzuziehen sind, um die systematisch bedingten Unzulänglichkeiten der amtlichen Abfallstatistik auszugleichen.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die bei der Aufstellung des in Abschnitt 3.2 dargestellten Mengengerüsts benutzten Datenquellen. Zum näheren Verständnis sei hierzu folgendes angemerkt:

Die amtliche Abfallstatistik gliedert sich in die voneinander unabhängigen Bereiche "Öffentliche Abfallbeseitigung" und "Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern". Die Daten für diese Statistiken wurden bisher im dreijährlichen Turnus, zuletzt 1993 erhoben. Zum Berichtskreis der öffentlichen Abfallbeseitigung zählen die entsorgungspflichtigen Körperschaften (Kreise und kreisfreie Städte) oder von ihnen beauftragte Dritte. Dabei werden insbesondere Daten über das Einsammeln, den Transport, die Behandlung, Verwertung und Beseitigung von Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen und von Sperrmüll erhoben.

Tabelle 1: Übersicht über die zur Aufstellung des Mengengerüsts benutzten Datenquellen

Abfall	Datenquelle
Brennbare Abfälle aus der Produktion	Statistik der Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern 1993
Klärschlämme, Hausmüll, Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle Sperrmüll Baustellenabfälle	Statistik der Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern 1993, Statistik der öffentlichen Abfallbeseitigung 1993 Umweltgutachten 1996 Jahresbericht des Umweltbundesamtes 1994 Aktuelle Fachliteratur
Reststoffe aus dem Verpackungsbereich	Umweltgutachten 1996 DSD-Jahresbericht 1995
Altreifen	Aktuelle Fachliteratur

Die Statistik der "Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern" erfaßt Art, Menge, Verwertung und Beseitigung von Abfällen, welche in Betrieben dieser Wirtschaftsbereiche anfallen. Bei der Datenerhebung werden allerdings nur Betriebe mit mehr als 20 Beschäftigten berücksichtigt. Durch diese Einschränkung des Berichtskreises kommt es zur Mindererfassung bestimmter Abfallarten. Beispielhaft seien in diesem Zusammenhang die Holzabfälle genannt. Während die offizielle Abfallstatistik [3] für das Produzierende Gewerbe ein Auf-

kommen von rund 7,6 Mio. Mg ausweist, gehen hier Schätzungen [4] von einem Gesamtaufkommen von über 21 Mio. Mg aus. In beträchtlicher Größenordnung liegen auch die amtlichen Angaben über Bauabfälle (143 Mio. Mg/a) und die Schätzungen von Fachleuten (285 Mio. Mg/a [5]) auseinander.

3.2 Mengenpotentiale

Gemäß amtlicher Abfallstatistik betrug das Abfallaufkommen in Deutschland im Jahr 1993 annähernd 340 Mio. Mg (Bild 3). Davon entfielen 42 % auf Bauabfälle, 20 % auf Bergematerial, 23 % auf Abfälle aus der Produktion, 13 % auf Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Sperrmüll sowie 2 % auf Klärschlämme (Trockensubstanz). Von diesen eignen sich für eine energetische Verwertung unter dem Vorbehalt der weiteren Eingrenzung lediglich die drei letztgenannten Gruppen (Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Sperrmüll / Produktionsabfälle / Klärschlämme) mit einem Anteil von zusammen etwa 38 %.

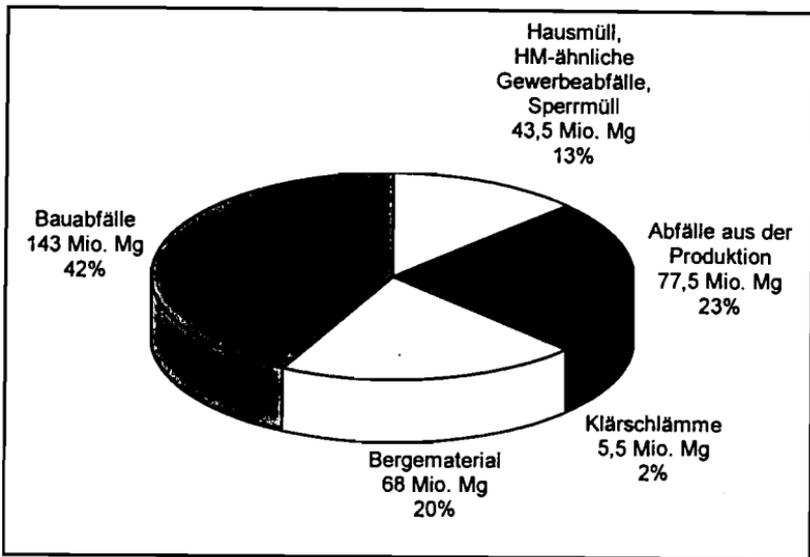


Bild 3: Abfallaufkommen in Deutschland im Jahr 1993 gemäß amtlicher Abfallstatistik [3]

• Produktionsabfälle

Zur Ermittlung der in thermischen Prozessen verwertbaren *Produktionsabfälle* wurde die Statistik der Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern herangezogen. Hier standen die entsprechenden Daten aus dem Jahr 1993 auf der Ebene der *Abfalluntergruppen* zur Verfügung. Eine Datenauswertung auf der Ebene einzelner *Abfallarten* wäre zwar mit einem höheren Informationsgehalt und infolgedessen mit einer geringeren statistischen Unschärfe verbunden gewesen,

konnte jedoch nicht durchgeführt werden, da die entsprechenden Zahlen seitens des Statistischen Bundesamtes nicht bereitstellbar waren. Die Auswahl der zu betrachtenden Abfälle erfolgte, wie bereits erwähnt, anhand der in Abschnitt 2 genannten Kriterien.

Die Tabelle 2b gibt eine Übersicht über das Aufkommen, die außer- und innerbetriebliche Beseitigung sowie die Verwertung ("an weiterverarbeitende Betriebe oder den Altstoffhandel abgegeben") der betreffenden Abfälle. Danach betrug im Jahr 1993 das aufkommenseitige Potential energetisch verwertbarer Produktionsabfälle rund 19 Mio. Mg. Davon wurden 11,9 Mio. Mg (62 %) einer Verwertung zugeführt, 3,3 Mio. Mg (17 %) in betriebseigenen Anlagen verbrannt, 134.000 Mg (1 %) in betriebseigenen Anlagen deponiert und 3,75 Mio. Mg (20 %) außerbetrieblich beseitigt.

Bei der außerbetrieblichen Beseitigung wird in der Abfallstatistik nicht näher nach der Beseitigungsart differenziert. Aus diesem Grund mußte eine Abschätzung der außerbetrieblich verbrannten Abfälle vorgenommen werden. Die hierzu erforderliche Zuordnung der einzelnen Abfalluntergruppen erfolgte anhand der zugehörigen Abfallarten und den gemäß TA Abfall [6] vorgesehenen primären Entsorgungswegen.

Vorwiegend bei den besonders überwachungsbedürftigen Abfällen (in Tabelle 2a und 2b mit Raster unterlegte Abfallgruppen) ist davon auszugehen, daß diese in der Regel verbrannt wurden. Die nicht besonders überwachungsbedürftigen Abfälle dürften im Rahmen der außerbetrieblichen Beseitigung aus Kostengründen hauptsächlich deponiert worden sein. In der Summe führt die Abschätzung zu dem Ergebnis, daß von den 3,75 Mio. Mg außerbetrieblich beseitigten Produktionsabfällen mit hoher Wahrscheinlichkeit rund 1,6 Mio. Mg (42 %) der Verbrennung zugeführt wurden. Zusammen mit den in betriebseigenen Anlagen verbrannten Abfällen errechnet sich für die zugrundegelegten Abfalluntergruppen der Anteil der thermisch entsorgten Produktionsabfälle damit zu 25 %, entsprechend ca. 4,9 Mio Mg/a.

Betrachtet man die einzelnen Abfalluntergruppen, so nehmen aufkommenseitig die Abfälle aus der Holzbe- und -verarbeitung mit 6,2 Mio. Mg/a die mengenbedeutendste Position ein, gefolgt von Abfällen aus der Verarbeitung pflanzlicher und tierischer Fette (2,3 Mio. Mg), Papier- und Pappeabfällen (1,85 Mio. Mg), Holzabfällen aus der Anwendung (1,38 Mio. Mg) sowie Konzentraten (1,1 Mio. Mg), hinter denen sich im wesentlichen Sulfitablauge aus der Zellstoffgewinnung und -verarbeitung verbirgt. Die Holzabfälle werden zu etwa zwei Dritteln verwertet und zu einem Fünftel in betriebseigenen Anlagen verbrannt. Dennoch verbleiben hiervon rund 850.000 Mg/a, die außerbetrieblich zu beseitigen sind und damit zukünftig vorzugsweise zur energetischen Verwertung zur Verfügung stehen dürften. Die Abfälle aus der Verarbeitung pflanzlicher und tierischer Fette werden, ebenso wie die Papier- und Pappeabfälle, zu weit über 90 % verwertet, die Konzentrate inner- und außerbetrieblich verbrannt.

Tabelle 2a: Energetisch verwertbare Produktionsabfälle in der Gliederung der Abfallgruppen gemäß LAGA-Abfallartenkatalog 1990

Abfallgruppen-Nr.	Bezeichnung
121	Abfälle aus der Produktion pflanzlicher und tierischer Öle
123	Abfälle aus der Produktion pflanzlicher und tierischer Fette und Wachse
125	Emulsionen und Gemische mit pflanzlichen und tierischen Fettprodukten
127	Schlämme aus der Produktion pflanzlicher und tierischer Fette
141	Abfälle von Häuten und Fellen
144	Abfälle aus Gerbereien
147	Lederabfälle
171	Holzabfälle aus der Be- und Verarbeitung
172	Holzabfälle aus der Anwendung
181	Abfälle aus Zelluloseherstellung
184	Abfälle aus Zelluloseverarbeitung
187	Papier- und Pappeabfälle
522	Organische Säuren
527	Konzentrate
531	Abfälle von Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmitteln
535	Abfälle von pharmazeutischen Erzeugnissen
541	Mineralöle und synthetische Öle
542	Fette und Wachse aus Mineralöl
544	Emulsionen und Gemische von Mineralölprodukten
547	Mineralölschlämme
548	Rückstände aus Mineralölraffination
549	Abfälle aus der Erdölverarbeitung und Kohleveredlung
552	Halogenierte organische Lösemittel und Lösemittelgemische
553	Organische Lösemittel und andere organische Flüssigkeiten, nicht halogeniert
554	Lösemittelhaltige Schlämme und Betriebsmittel
555	Anstrichmittel
559	Klebstoffe, Kitten, nicht ausgehärtete Harze
571	Sonstige ausgehärtete Kunststoffabfälle
572	Nicht ausgehärtete Kunststoffabfälle, -Formmassen und -Komponenten
573	Kunststoffschlämme und -emulsionen
575	Feste Gummiabfälle (einschl. Altreifen)
578	Shredderrückstände
581	Abfälle aus der Textilherstellung und -verarbeitung
582	Textilien, verunreinigt
593	Laborabfälle und Chemikalienreste
594	Detergentien- und Waschmittelabfälle
596	Vorgemischte Abfälle für Abfallentsorgungsanlagen
597	Destillationsrückstände
599	Sonstige Abfälle aus Umwandlungs- und Syntheseprozessen
971	Krankenhauspezifische Abfälle

mit Raster unterlegte Abfalluntergruppen ⇒ besonders überwachungsbedürftig

Tabelle 2b: Aufkommen und Beseitigung energetisch verwertbarer Produktionsabfälle gemäß amtlicher Abfallstatistik im Jahr 1993 [3]

Abfallgruppen- Nr.	Abfallmengen					Heizwert Hu.roh (GJ/Mg)
	insgesamt	zur außerbetrieb- lichen Beseitigung abgegeben	in eigenen Anlagen		an weiter- verarbeitende Betriebe oder Altstoffhandel abgegeben	
			deponiert	verbrannt		
	1.000 Mg					
121	28	3	0	2	23	25
123	116	9	1	0	106	25
125	2.313	106	0	0	2.206	20
127	4	3	0	0	1	20
141	102	1	0	0	101	10
144	16	13	0	0	3	10
147	28	7	0	0	21	12
171	6.220	223	4	1.496	4.497	15
172	1.376	627	21	71	656	15
181	951	137	15	203	595	15
184	608	401	9	25	173	15
187	1.852	121	5	13	1.712	18
522	5	0	0	1	3	20
527	1.078	145	3	842	88	35
531	15	4	0	11	0	30
535	20	10	0	8	3	30
541	560	191	0	54	316	40
542	117	94	1	3	20	35
544	441	298	1	2	140	35
547	338	218	8	31	80	30
548	57	5	1	20	31	30
549	394	77	16	6	295	30
552	132	49	0	56	28	20
553	396	59	0	175	162	20
554	15	12	0	3	1	20
555	223	183	2	13	25	20
559	25	17	0	2	6	20
571	733	280	22	17	414	30
572	35	15	2	6	13	30
573	116	99	2	10	5	20
575	263	47	14	86	116	20
578	25	24	0	0	0	17
581	176	105	1	3	67	22
582	14	7	1	1	5	22
593	12	5	0	5	2	15
594	17	10	0	2	5	15
596	2	0	0	2	0	20
597	154	27	3	114	11	35
599	67	56	2	3	7	20
971	70	62	0	2	6	12
Σ	19.114	3.750	134	3.288	11.943	

mit Raster unterlegte Abfalluntergruppen ⇒ besonders überwachungsbedürftig

Unter der Annahme, daß zunächst einmal die bisher deponierten Abfälle einer energetischen Verwertung zuzuführen sind, ergibt sich für den Bereich der Produktionsabfälle ein Potential von etwa **2,3 Mio. Mg/a**. Dieses setzt sich im wesentlichen aus Abfällen der Holzindustrie, der Zelluloseherstellung und -verarbeitung, der Textilherstellung und -verarbeitung sowie aus Kunststoff- und Papierabfällen zusammen.

Zur Abschätzung des Energiepotentials, welches bei einer thermischen Nutzung der Abfälle freisetzbare ist, sind in der letzten Spalte der Tabelle 2b den jeweiligen Abfallgruppen Heizwerte zugeordnet. Diese Heizwerte wurden aus den in Bild 1 dargestellten Werten unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen abgeleitet. Als gewichteter Mittelwert (massebezogen) errechnet sich daraus für die Gesamtheit der betrachteten Produktionsabfälle ein Heizwert von 20 MJ/kg.

• **Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle**

Gemäß amtlicher Abfallstatistik wurden im Jahr 1993 7,84 Mio. Mg hausmüllähnliche Gewerbeabfälle an öffentliche Abfallbeseitigungsanlagen angeliefert. Darüber hinaus wurden von Seiten des Produzierenden Gewerbes 1,43 Mio. Mg zur Verwertung abgegeben und 100.000 Mg innerbetrieblich verbrannt oder deponiert. Damit errechnet sich das Gesamtaufkommen an separat erfaßtem hausmüllähnlichen Gewerbeabfall zu rund 9,37 Mio. Mg/a. Wie Untersuchungen gezeigt haben, könnten davon etwa 50 % einer energetischen Verwertung zugeführt werden. Je nach Stoffzusammensetzung variiert der Heizwert dieser Fraktion im Mittel zwischen 20 und 25 MJ/kg.

• **Hausmüll**

Das Aufkommen an Hausmüll ("Restabfall") betrug in Deutschland im Jahr 1993 rund 25 Mio. Mg. Dies entspricht einem einwohnerspezifischen Wert von ca. 300 kg/E*a. Mittelfristig ist mit einem Rückgang dieser Menge auf etwa 200 kg/E*a [7], ggf. auch darunter [8] zu rechnen. Von den genannten Mengen wurden 68,6 % deponiert, 27 % verbrannt und 4,4 % anderweitig (Kompostierung, Sortierung, Verwertung) entsorgt. Durch gezielte Aufbereitung lassen sich in Abhängigkeit der gewählten Aufbereitungstechnik und der Abfalleigenschaften aus dem Restmüll heizwertreiche Materialien in der Größenordnung von ca. 20 % bis 60 % [9] entnehmen und einer thermischen Verwertung zuführen. Der Heizwert des separierten Stoffgemisches variiert - abhängig von den v.g. Parametern - im Mittel zwischen 11(⇒ 60 % Materialauslese) und 18 MJ/kg (⇒ 20 % Materialauslese).

• **Sperrmüll**

Für Sperrmüll weist die Abfallstatistik 1993 ein Aufkommen von 3,82 Mio Mg aus. Mehr als 80 % davon wurden deponiert, der Rest wurde verbrannt bzw. in geringem Umfang auch verwertet. Ähnlich wie bei den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen hat sich auch beim Sperrmüll gezeigt, daß etwa die Hälfte dieser Abfälle energetisch verwertet werden könnte. Der mittlere Heizwert der entsprechenden Fraktion bewegt sich ebenfalls zwischen 20 und 25 MJ/kg.

Tabelle 3: Aufkommen und Entsorgung potentiell energetisch verwertbarer Abfälle in Deutschland

	Aufkommen	Verbrennung	Deponierung	Verwertung/ Sonstige	Heizwert
	1.000 Mg				(GJ/Mg)
Brennbare Abfälle aus der Produktion (ohne Klärschlämme und Siedlungsabfälle) [3]	19.114	4.869	2.303	11.942	20
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (soweit gesondert angeliefert) [3], davon ca. 50 % energetisch verwertbar	Σ 9.370	1.238	6.347	1.785	
	4.685	620	3.175	890	23
Hausmüll [3], davon ca. 20 % energetisch verwertbar (nach [10])	Σ 24.728	6.682	16.957	1.089	
	4.945	1.336	3.391	218	18
Sperrmüll (soweit gesondert angeliefert) [3], davon ca. 50 % energetisch verwertbar	Σ 3.818	522	3.159	137	
	1.909	261	1.580	69	23
Baustellenabfälle [3], davon ca. 25 % energetisch verwertbar (abgeschätzt nach [11])	Σ 6.157	91	5.157	909	
	1.539	23	1.289	227	18
Reststoffe aus dem Verpackungsbereich (DSD) [12]					
- Mischkunststofffraktion	400			¹⁾ 400	30
- Sortierreste	350	350			25
Klärschlämme (TS) [3,13]	5.476	971	3.478	1.027	10
Altreifen [14,15]	600	200	²⁾ 200	³⁾ 200	28
Summe	39.018	8.280	15.766	14.973	

1) rohstoffliche Verwertung

2) Deponierung und unkontrollierter Verbleib

3) stoffliche Verwertung einschl. Export

• Baustellenabfälle

Baustellenabfälle stellen ein sehr heterogenes Stoffgemisch dar, bestehend aus mineralischen Abfällen (Bauschutt, Glas), Metallen, Holz, Verpackungsmaterialien (Pappe, Papier, Kunststoffe), Metall- und Kunststoffemballagen, Folien, Kabel, Isoliermaterialien und schließlich auch Sonderabfälle. Die Zusammensetzung im Einzelfall unterliegt großen Schwankungsbereichen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, daß der brennbare Anteil durchschnittlich bei etwa 25 % [11] liegt. Das statistisch erfaßte Aufkommen betrug im Jahr 1993 annähernd 6,2 Mio. Mg, so daß für die energetische Verwertung 1,54 Mio. Mg mit einem Heizwert von etwa 18 MJ/kg in Ansatz gebracht werden können.

• DSD-Abfälle

Durch das DSD wurden 1995 insgesamt 5,35 Mio. Mg Verpackungsabfälle erfaßt. Darunter befanden sich 731.385 Mg Kunststoffabfälle und 421.526 Mg Verbundverpackungen [12]. Für eine Verwertung in thermischen Prozessen, die zukünftig voraussichtlich sowohl rohstofflich als auch energetisch erfolgen kann, stehen ca. 400.000 Mg/a der Sortierfraktion Mischkunststoffe (H_U ca. 30 MJ/kg) als auch rund 350.000 Mg/a Sortierreste (H_U ca. 25 MJ/kg) aus dem Bereich der Kunststoffe und Verbundverpackungen potentiell zur Verfügung.

• Klärschlämme, Altreifen

Auf diese Abfälle wird in Abschnitt 4 näher eingegangen.

Die Tabelle 3 beinhaltet eine Zusammenstellung der Mengenpotentiale der oben diskutierten Abfälle. Neben dem Aufkommen sind darin auch die Daten zur Verwertung, Verbrennung und Deponierung sowie der jeweilige Heizwert aufgeführt. In der Summe beziffert sich das aufkommenseitige Potential an Abfällen, welche sich zur energetischen und/oder stofflichen **Verwertung** in thermischen Prozessen eignen, auf rund 39 Mio. Mg/a. Davon wurden bisher 8,3 Mio. Mg verbrannt, 15,6 Mio. Mg deponiert und 15,1 Mio. Mg verwertet bzw. anderweitig entsorgt (z.B. Export).

Fast die Hälfte des Aufkommens entfällt mit über 19 Mio. Mg/a auf die brennbaren Abfälle aus der Produktion. Die nächsten Plätze werden von den Klärschlämmen, dem Hausmüll und den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen mit einem Anfall von jeweils 4,5 bis 5,5 Mio. Mg/a eingenommen. Stuft man die bisher deponierten Abfälle als primär zur Verfügung stehendes Potential ein, welches in thermischen Prozessen verwertbar ist, so relativiert sich die Dominanz der Produktionsabfälle und es wird deutlich, daß hier Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Sperrmüll und Klärschlämme von nicht unerheblicher Bedeutung sind.

Analog zu den Abfallmengen sind in Tabelle 4 die damit verbundenen Energiepotentiale aufgeführt. Insgesamt beinhalten die 39 Mio. Mg Abfall ein Energieäquivalent von etwa 740.000 Terajoule (TJ), resp. 25,24 Mio. Mg SKE (Steinkohleeinheiten). Dies sind etwa 5,3 % des jährlichen Primärenergieverbrauchs in Deutschland (1994: 14.036 Petajoule [16]). Bezüglich des jährlichen Braunkohlebedarfs (1.861 PJ [16]) beträgt das Potential immerhin rund 40 %.

Tabelle 4: Energiepotentiale thermisch verwertbarer Abfälle in Deutschland

	Aufkommen	Verbrennung	Deponierung	Verwertung/ Sonstige
	TJ			
Brennbare Abfälle aus der Produktion (ohne Klär-schlämme und Siedlungs- abfälle)	382.280	97.380	46.060	238.840
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, (energetisch verwertbarer Anteil)	107.755	14.260	73.025	20.470
Hausmüll, (energetisch verwertbarer Anteil)	89.010	24.048	61.038	3.924
Sperrmüll (energetisch verwertbarer Anteil)	43.907	6.003	36.329	1.576
Baustellenabfälle (energetisch verwertbarer Anteil)	27.7047	410	23.207	4.091
Reststoffe aus dem Verpackungsbereich (DSD)				
- Mischkunststoffraktion	12.000			1)12.000
- Sortierreste	8.750	8.750		
Klärschlämme (TS)	54.760	9.710	34.780	10.270
Altreifen	16.800	5.600	5.600	5.600
Summe (TJ)	742.969	157.411	288.788	296.770
Summe (Mg SKE)	25.271.037	5.354.099	9.822.721	10.094.218

1) rohstoffliche Verwertung

Von diesem Reservoir wurden bisher 21,2 % (157 PJ) verbrannt und damit zumindest teilweise energetisch genutzt. Weitere 40,4 % (300 PJ), von denen etwa vier Fünftel dem Bereich der Produktionsabfälle entstammen, wurden zur Weiterverarbeitung bzw. an den Altstoffhandel abgegeben, während 38,4 % (285 PJ) des diskutierten Energiepotentials auf Deponien abgelagert wurden. Dieser deponierte Anteil ist als vorrangiges Substitutionspotential zu betrachten. Bei konsequenter Nutzung könnten dadurch beispielsweise 15 % des jährlichen Braunkohleverbrauchs in Deutschland ersetzt werden.

3.3 Verwertungskapazitäten

Außer der Frage, in welchen thermischen Prozessen Abfälle verwertet werden können, stellt sich gleichermaßen die Frage nach den für solche Zwecke vorhandenen Anlagenpotentialen. Bisherige Erfahrungen mit der energetischen bzw. energetisch-stofflichen Verwertung von Abfällen in thermischen Prozessen liegen insbesondere aus den Bereichen der Zementindustrie, der Eisen- und Stahlindustrie, der Kohlekraftwerke, der Hydrierung und Vergasung sowie einiger spezieller Branchen wie beispielsweise der Ziegelproduktion, der Asphaltherstellung und der Papierindustrie vor. Die Tabelle 5, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat, enthält eine Zusammenstellung entsprechender Anlagenpotentiale sowie ausgelasteter und theoretisch verfügbarer Kapazitäten, jeweils angegeben als Energieäquivalente. Hierzu ist folgendes anzumerken:

• Zementindustrie

Der Brennstoffbedarf der deutschen Zementindustrie beträgt etwa 103 PJ/a. Er wird derzeit zu etwa 48,6 % aus Steinkohle, zu 31,5 % aus Braunkohle, zu 5,8 % aus Heizöl, zu 3,7 % aus Petrolkoks und sonstigen festen Brennstoffen, zu 0,3 % aus Erdgas und zu 10,1 % aus Sekundärbrennstoffen, insbesondere Altöl und Altreifen, gedeckt [17]. Unter der Annahme eines maximalen Anteils von 70 % an Sekundärbrennstoffen errechnet sich eine theoretisch noch freie Anlagenkapazität von 61,6 PJ/a. Das Abfallspektrum, welches in den Drehrohröfen der Zementindustrie eingesetzt werden kann, ist relativ groß. Es umfaßt sowohl feste als auch flüssige Abfälle, von den in Tabelle 5 einige beispielhaft aufgeführt sind.

• Eisen- und Stahlindustrie

Bei der Roheisenerzeugung im Hochofen werden je Mg Roheisen etwa 200 kg Kohlenstaub oder eine äquivalente Menge an Öl benötigt, die über sogenannte Bläshormen in den unteren Teil des Hochofens eingetragen werden [18]. Bei einer jährlichen Rohstahlerzeugung von rund 30 Mio. Mg entspricht dies einem Energiebedarf von 168 PJ/a. Von diesen können nach bisherigen Erfahrungen maximal etwa 30 % durch Abfallbrennstoffe, vorzugsweise DSD-Kunststoffe und evtl. auch Schredderleichtgut ersetzt werden. Unter Berücksichtigung der bereits für den Einsatz von 140.000 Mg Kunststoffen vergebenen Kapazitäten und der Voraussetzung, daß sämtliche deutschen Hochofenanlagen sich dementsprechend umrüsten ließen, verbleibt ein noch freies Anlagenpotential von 46,2 PJ.

• Braunkohlekraftwerke

Der Braunkohleeinsatz in deutschen Kraftwerken lag 1994 bei einem Energieäquivalent von 815,6 PJ/a [3]. Unter der Annahme einer 25 %igen Substitution durch Abfallbrennstoffe errechnet sich eine Verwertungskapazität von annähernd 204 PJ/a. Hierbei handelt es sich zunächst jedoch um einen theoretischen Wert, da bisher lediglich Klärschlamm als Regelbrennstoffersatz in Kohlekraftwerken eingesetzt wurde. Das maximale Substitutionspotential beträgt selbst bei 100 %iger Verbrennung aller Klärschlämme lediglich 54,8 PJ/a - bezogen auf den getrockneten Zustand. Inwieweit andere Abfälle sich zum Einsatz in Braunkohlekraftwerken eignen und welche Umrüstungsmaßnahmen ggfs. damit verbunden sind, müßte in Pilotversuchen geklärt werden.

Tabelle 5: Anlagenpotentiale und Kapazitäten zur Verwertung von Abfällen in thermischen Prozessen

	Vorhandenes Anlagenpotential (TJ/a)	Substitutionsanteil	Verwertungspotential (TJ/a)	ausgelastete Kapazitäten (TJ/a)	theoretisch freie Kapazitäten (TJ/a)	Abfälle zur Erzeugung eines geeigneten Ersatzbrennstoffes bzw. Einsatzmaterials
Zementindustrie	102.900	70%	72.030	10.400	61.630	Rückstände aus der Zelluloseherstellung und -verarbeitung, Papier- und Pappeabfälle, ausgehärtete Kunststoffabfälle, Textilabfälle, Altreifen, Altöl Klärschlamm, energiereiche Fraktionen des Haus-, Gewerbe- und Sperrmülls
Eisen- und Stahlindustrie	168.000	30%	50.400	4.200	46.200	Kunststoffe, Schredderleichtgut
Braunkohlekraftwerke	815.600	25%	203.900	200	203.700	Klärschlamm, sonstige Abfälle?
Hydrierungsanlagen	3.000	100%	3.000	3.000	0	Kunststoffe
Vergasungsanlagen	6.600	100%	6.600	2.100	4.500	Kunststoffe Klärschlamm Schredderleichtgut verunreinigte Textilien Altholz
Papierindustrie	11.040	100%	11.040	11.040	0	Spuckstoffe, Schlämme aus der Papierherstellung, Rinden, Holzabfälle
Summe	1.107.140		346.970	30.940	316.030	

Entscheidend in dieser Frage wird jedoch sein, ob die Kraftwerksbetreiber grundsätzlich dazu bereit sind, ihre Anlagen für weitere Abfälle zu öffnen.

- **Hydrierungsanlagen, Vergasungsanlagen, Verwertungsanlagen in der Papierindustrie**

Hierbei handelt es sich um Anlagen, die eigens zum Zweck der thermischen Abfallverwertung errichtet wurden. Der Substitutionsanteil in Tabelle 5 ist daher mit 100 % angegeben. Die Angaben über das Anlagenpotential zur Abfallvergasung (ca. 6,6 PJ/a) beziehen sich auf den geplanten Ausbauzustand des Sekundärrohstoffverwertungszentrums "Schwarze Pumpe" im Jahr 1998. Die derzeitigen Kapazitäten betragen 2,1 PJ/a [19].

Die Papierindustrie verfügte 1994 über Verwertungskapazitäten von etwa 11 PJ/a [20], welche auch heute voll ausgelastet sein dürften. Ähnlich wie hier existieren auch in anderen Industriezweigen, z. B. in der Holzver- und -bearbeitung, Anlagen zur thermischen Verwertung produktionsspezifischer Abfälle, die für eine Aufnahme größerer Abfallmengen aus anderen Bereichen aus genehmigungsrechtlichen, technischen und Kapazitätsgründen nicht in Frage kommen. Sie bleiben an dieser Stelle daher unberücksichtigt.

- **Fazit zur Kapazitätsauswertung**

Die in Deutschland theoretisch maximal zur Verfügung stehenden freien Anlagenkapazitäten, welche für eine Aufnahme energetisch verwertbarer Abfälle in Frage kommen, betragen etwa 300 bis 320 PJ/a. Sie liegen damit in der gleichen Größenordnung wie das bisher auf Deponien abgelagerte Energiepotential (ca. 289 PJ/a). Zum Vergleich sei hier die derzeit verfügbare Kapazität von Hausmüll- und Sonderabfallverbrennungsanlagen aufgeführt: Sie beträgt für Hausmüll rund 11 Mio. Mg/a, für Sondermüll 1,1 Mio. Mg/a. Dies entspricht einem Energieäquivalent von ca. 100 PJ/a.

Es bleibt jedoch anzumerken, daß aufgrund der bisherigen Erfahrungen eine kurz- und mittelfristige Erschließung der v.g. industriellen Kapazitäten lediglich bei der Zement- und Roheisenproduktion realistisch erscheint. Unter günstigen Umständen mag in gewissem Umfang auch eine Steigerung der Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken möglich sein. Summa summarum bedeutet dies, daß zur thermischen Verwertung bisher abgelagerter Abfälle im industriellen Bereich Kapazitäten von etwa 120 bis 130 PJ/a zur Verfügung stehen könnten.

4 Betrachtung einzelner Abfälle

In Ergänzung zu der vorangegangenen, eher global ausgerichteten Betrachtung der Mengenpotentiale und der Abschätzung der Verwertungskapazitäten soll nachfolgend anhand von zwei Beispielen detaillierter auf die derzeitige Entsorgungssituation und auf weitere Randbedingungen der thermischen Verwertung eingegangen werden.

4.1 Klärschlamm

In der Bundesrepublik Deutschland fallen nach der amtlichen Abfallstatistik [3] jährlich ca. 5,5 Mio. Mg Trockensubstanz an Klärschlämmen an (vgl. Tabelle 6). Das Aufkommen aus der kommunalen Abwasserreinigung beträgt hiervon 3,2 Mio Mg TS, ca. 2,25 Mio. Mg TS stammen aus der industriellen und gewerblichen Abwasserreinigung. Nur etwa 20 % der Gesamtklärschlamm-trockenmasse wird in der Landwirtschaft bzw. landbaulich verwertet, wobei dieser Entsorgungsweg gerade für schwachbelastete Schlämme zu bevorzugen ist.

Tabelle 6: Klärschlammaufkommen, Entsorgungswege und Energieinhalte

	Landwirtschaft / Landbau	Deponie	Verbrennung	Gesamt
kommunale Klärschlämme				
• Menge [1000 Mg/a]	872	2.042	317	3.231
• Anteil	27 %	63 %	10 %	100 %
• Energie [PJ]	8,7	20,4	3,2	32,3
Industrielle u. gewerbliche Klärschlämme				
• Menge [1000 Mg/a]	155	1.436	654	2.245
• Anteil [%]	7 %	64 %	29 %	100 %
• Energie [PJ]	1,6	14,4	6,5	22,5
Gesamt				
• Menge [1000 Mg/a]	1.027	3.478	971	5.476
• Anteil [%]	19 %	64 %	18 %	100 %
• Energie [PJ]	10,3	34,8	9,7	54,8

Die Hauptentsorgungsschiene des Klärschlammes stellt derzeit mit einem Anteil von 2/3 die Deponierung dar. Im Hinblick auf das Krw-/AbfG und die TA Siedlungsabfall wird zukünftig eine starke Umverteilung der heutigen Entsorgungswege stattfinden. Die 1993 in Kraft getretene TA Siedlungsabfall bedingt spätestens ab dem Jahr 2005 eine thermische Vorbehandlung der Klärschlämme vor einer Deponierung.

Untersuchungen des Umweltbundesamtes [21] beziffern die in Verbrennungsanlagen untergebrachten kommunalen Klärschlämme auf 317.000 Mg TS/a. Zusammen mit den thermisch beseitigten Klärschlämmen aus Industrie und Gewerbe (654.000 Mg TS/a) ergibt sich eine Menge von z.Z. 971.000 Mg TS, die verbrannt wird.

Eine Abschätzung, wieviel Klärschlämme zukünftig thermisch vorbehandelt bzw. energetisch genutzt werden, ist derzeit schwierig. Zwar kann unter Berücksichtigung gesteigerter Anforderungen an Indirekteinleiter davon ausgegangen werden, daß sich die Qualität der Klärschlämme im Hinblick auf die Schadstoffgehalte zukünftig noch weiter verbessern wird. Es wird sich, insbesondere unter Berücksichtigung der Kosten für eine thermische Entsorgung, zeigen, inwieweit durch die höhere Qualität eine stärkere Akzeptanz des Klärschlammes für eine Verwertung in der Landwirtschaft möglich ist. Ferner werden die Verwertungskapazitäten, die heute im Rahmen der Renaturierung devastierter Flächen in den fünf neuen Ländern zur Verfügung stehen, im Laufe der nächsten Jahre deutlich abnehmen. Unter diesen Randbedingungen sind gerade in den letzten Jahren neue Möglichkeiten der energetischen Nutzung bzw. thermischen Entsorgung von Klärschlämmen untersucht worden; die wesentlichen Verfahren zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Übersicht über energetische/thermische Klärschlammbehandlungsverfahren [22]

Monoverbrennung	Kombiverbrennung	Sonstige Verfahren
<ul style="list-style-type: none"> • Etagenofen • Etagenwirbler • Wirbelschicht • Drehrohrofen • Schmelzzyklon 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbrennung mit Hausmüll in MVA's • Einsatz in der Zement-/Asphaltindustrie • Verbrennung in Kohlekraftwerken <ul style="list-style-type: none"> - Schmelzkammerfeuerung (Steinkohle) - Kohlenstaubfeuerung (Stein- o. Braunkohle) 	<ul style="list-style-type: none"> • Pyrolyse • Schwel-Brenn-Verfahren • Thermosteact • Vergasungsverfahren • Schmelzverfahren

Ob die Substitution von Primärenergieträgern durch den Einsatz von Klärschlamm eine Verwertung oder eine Beseitigung lt. Krw-/AbfG ist, steht noch offen. Die in Bild 5 dargestellten Heizwerte von Klärschlamm in Abhängigkeit der Restfeuchte verdeutlichen, daß ohne eine vorherige Trocknung die (Mit-)Verbrennung von Klärschlämmen keine energetische Verwertung nach dem 11 MJ/kg-Maßstab ist. Sofern die Trocknung aber nicht mit Abwärme oder alternativen Energien (solarthermische Trocknung) durchgeführt wird, ist der Energiegewinn bei der energetischen Verwertung von Klärschlämmen in der Gesamtbilanz nahezu null.

Im Hinblick auf die Co-Verbrennung von Klärschlämmen in Kraftwerken, die gerade in den letzten Jahren verstärkt untersucht wurde, müssen bei der Abschätzung der tatsächlichen Entsorgungskapazitäten neben den verfahrenstechnischen Anforderungen auf der Brennstoffseite insbesondere die Rauchgasreinigungsanforderungen und die Verwertungswege der Verbrennungsrückstände sowie der Nebenprodukte der Rauchgasreinigung betrachtet werden. Prinzipiell stellt die Mitverbrennung von

Klärschlamm in Braunkohlekraftwerken wegen ihrer stofflich ähnlichen Eigenschaften mit Braunkohle eine sinnvolle Verfahrenstechnik dar. Jedoch entstehen durch die Co-Verbrennung in Kraftwerken deutlich höhere Aschemengen [23], die zusätzlich zu deponieren oder zu verwerten sind.

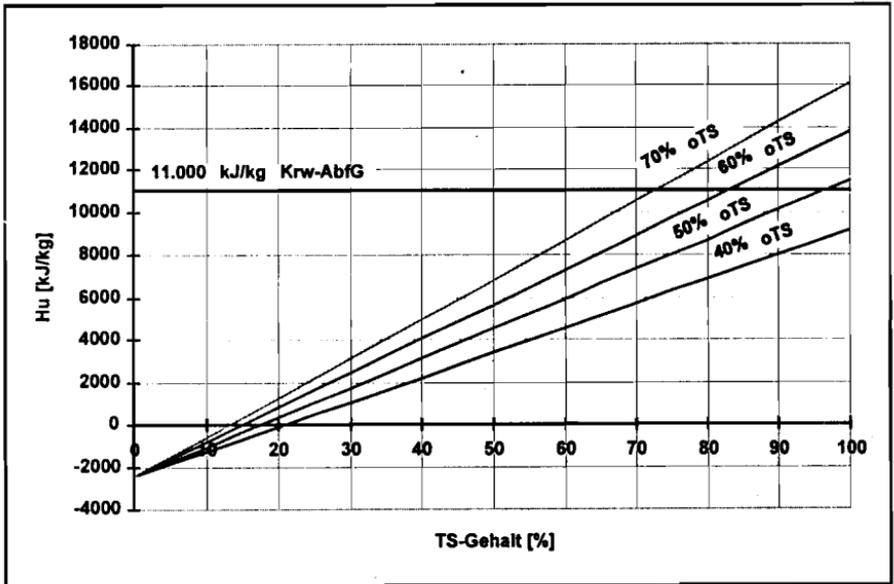


Bild 5: Heizwerte von kommunalen Klärschlämmen [24]

4.2 Altreifen

In Deutschland fallen jährlich etwa 600.000 Mg Altreifen an. Diese setzen sich zu ca. 63 % aus PKW-Reifen, zu 6 % aus Leicht-LKW-Reifen, zu 20 % aus LKW- und zu 11 % aus Groß- bzw. Vollgummireifen zusammen. Hauptanfallstellen sind der Reifenfachhandel (60 %), Autohäuser (28 %), Tankstellen (8 %) und Großmärkte (4 %) [15]. Aus dieser Struktur erklärt sich auch die Notwendigkeit, die Altreifen bei der Aufstellung des Mengengerüsts (vgl. Abschnitt 3.2) separat zu betrachten: In den v.g. Branchen überwiegen Betriebe mit weniger als 20 Beschäftigten, die aus der Abfallstatistik herausfallen. Dies hat zur Folge, daß Altreifen in der amtlichen Abfallstatistik nur zu etwa einem Viertel erfaßt werden.

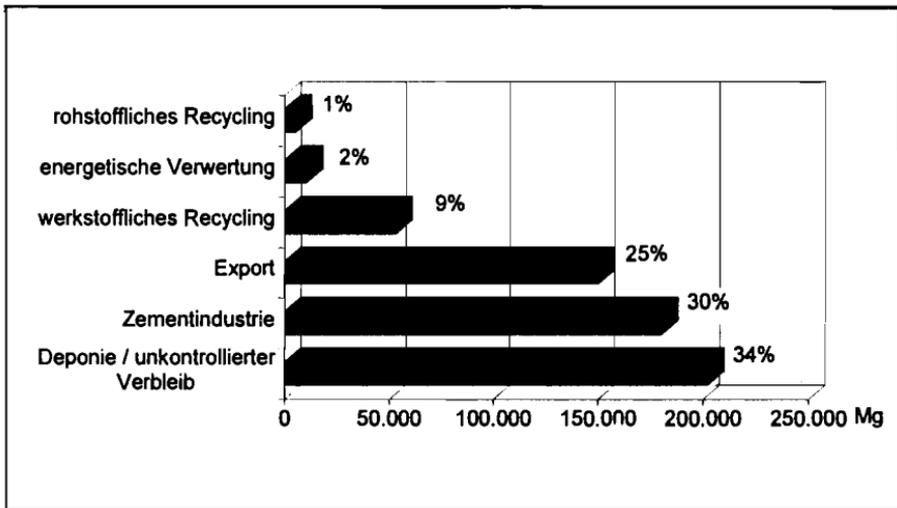


Bild 4: Verbleib der jährlich in Deutschland anfallenden Altreifen [14,15]

Aufgrund ihres relativ hohen Heizwertes von annähernd 30 MJ/kg sowie ihrer im Vergleich zu anderen Abfällen homogenen und definierten Zusammensetzung ist die Verwendung von Altreifen als Ersatzbrennstoff bereits seit Jahren gängige Praxis. Derzeit werden jährlich etwa 180.000 Mg Altreifen (30 %) in der deutschen Zementindustrie als Energieträger eingesetzt, weitere 2 % werden in Feuerungsanlagen zur Wärme- und Stromerzeugung verbrannt. Ein Viertel aller Altreifen wird exportiert, 9 % werden werkstofflich und weniger als 1 % rohstofflich verwertet. Das noch verbleibende Drittel, entsprechend 200.000 Mg/a, wird deponiert bzw. unkontrolliert entsorgt. Dieser Anteil mit einem Energieäquivalent von 5.600 TJ (\approx 300.000 Mg Braunkohle) bietet sich für eine energetische Verwertung an.

Hierzu kommt einerseits ein gesteigerter Einsatz in der Zementindustrie in Frage, andererseits die Verbrennung in Heizkraftwerken. Derartige Überlegungen sind bereits relativ weit gediehen. Zur Zeit befindet sich in Berlin ein Altreifen-Heizkraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 37 MW in der Planung [15]. Bei einem Brennstoffbedarf von 30.000 Mg Altreifen/a kann das bisher ungenutzte Potential somit immerhin um 15 % gesenkt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In Deutschland fallen jährlich etwa 39 Mio. Mg Produktions- und Siedlungsabfälle an, die nach den Maßstäben des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes in thermischen Prozessen energetisch bzw. energetisch-stofflich verwertet werden können. Davon wurden bisher 8,3 Mio. Mg verbrannt, 15,6 Mio. Mg deponiert und 15,1 Mio. Mg verwertet bzw. anderweitig entsorgt. Etwa die Hälfte des hier betrachteten

Gesamtaufkommens und vier Fünftel der verwerteten Mengen entstammen dem Produzierenden Gewerbe. Insgesamt beinhalten die 39 Mio. Mg Abfall ein Energieäquivalent von etwa 740 Petajoule (PJ). Dies sind etwa 5,3 % des jährlichen Primärenergieverbrauchs in Deutschland. Als vorrangiges Substitutionspotential für Regelbrennstoffe ist der bisher deponierte Anteil einzustufen.

Im Hinblick auf potentielle Verwertungsanlagen bestehen bedeutsame Kapazitäten in der Zementindustrie, der Eisen- und Stahlindustrie sowie im Kraftwerksbereich, wobei letztgenannter bei einem angenommenen Substitutbrennstoffanteil von 25 % mit 204 PJ/a etwa zwei Drittel des theoretisch maximalen Anlagenpotentials stellt. Wollte man von den **energetisch verwertbaren Abfällen** lediglich diejenigen, die bisher deponiert wurden und ein Energiepotential von ca. 289 PJ/a repräsentieren, in vorhandenen thermischen Prozessen unterbringen, so würde dies erhebliche Anstrengungen erfordern und wäre ohne eine Öffnung der Kohlekraftwerke nicht darstellbar. Diese ist nach derzeitiger Kenntnislage jedoch bestenfalls für den Klärschlamm denkbar, so daß realistischerweise von noch freien Anlagenkapazitäten in der Zement- sowie der Eisen- und Stahlindustrie von ca. 100 PJ/a ausgegangen werden kann. Dies entspricht in etwa der Kapazität der derzeit in Deutschland betriebenen Haus- und Sondermüllverbrennungsanlagen.

Wenngleich mit einer weiteren Abnahme der Abfallmengen in den nächsten Jahren gerechnet wird, kündigt sich hier dennoch ein erhebliches Defizit an Verwertungsanlagen für die betrachteten Abfälle an, die spätestens ab dem Jahr 2005 nicht mehr in der bisherigen Form deponiert werden dürfen. Vor diesem Hintergrund erfährt die derzeitige Diskussion um die Überkapazitäten bei der Abfallverbrennung eine gewisse Relativierung.

Literatur

- [1] **N.N.** Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG) vom 27. September 1994, BGBl I S. 2705. in: Abfallgesetz, Beck-Texte im dtv, dtv 5569, 2. Auflage, München 1994
- [2] **Joschek, H.-J., et al.** Verbrennung von Abfällen. AbfallwirtschaftsJournal 7 (1995), Nr. 11
- [3] **N.N.** Statistisches Jahrbuch der Bundesrepublik Deutschland 1996. Hrsg.: Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Verlag Metzler Poeschel, Stuttgart 1996
- [4] **Tippkötter, R.** Energetische Rest- und Altholzverwertung durch Hochtemperaturvergasung. AbfallwirtschaftsJournal 8 (1996), Nr. 6, S. 24 ff.

- [5] **Kohler, G.** Recyclingpraxis. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage, Hrsg. K.O. Tiltmann, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1994
- [6] **N.N.** Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Abfall), Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/ physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen vom 12. März 1991 (GMBI. S. 139, ber. S. 469), in: Abfallgesetz, Beck-Texte im dtv, dtv 5569, 2. Auflage, München 1994
- [7] **N.N.** Bericht zur restriktiven Bedarfsprüfung für die Siedlungsabfallentsorgung. Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 1996
- [8] **Heilmann, A. Wagner, A.** Zukünftige Restabfallzusammensetzung Abfallvermeidung und -verwertung. in: Bilitewski, B., Faulstich, M., Urban, A. (Hrsg.): Thermische Restabfallbehandlung. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1996
- [9] **Tietz, H.-P. Felsen, H.-J. Thierry, A.** BRAM-Einsatz in der Zementindustrie. EntsorgungsPraxis 14 (1996), Nr. 11 1996, S. 22 - 25
- [10] **Bilitewski, B. Niestroj, J.** Zukünftige Heizwerte und Schadstoffgehalte von Restmüll. Abfallwirtschaftsjournal 6 (1994), Nr. 9, S. 586 ff.
- [11] **N.N.** Kreislaufwirtschaft in der Praxis, Nr.4, Baurestoffe. Hrsg.:ENTSORGA GmbH, Köln 1996
- [12] **N.N.** DSD-Geschäftsbericht 1995. Hrsg.:Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland Gesellschaft für Abfallvermeidung und Sekundärrohstoffgewinnung mbH, Köln 1996
- [13] **N.N.** Öffentliche Abfallbeseitigung 1993. Fachserie 19, Reihe 1.1, Hrsg.: Statistisches Bundesamt Wiesbaden, Verlag Metzler Poeschel, Stuttgart 1996
- [14] **Ziehn, G.** Altreifenverbrennung in der Diskussion. Forum Anneliese 1/94, Hrsg.: Anneliese Zementwerke AG, Ennigerloh 1994
- [15] **Schmidt-Burr, P.** Innovative Kreislaufwirtschaft für Altreifen am Projektbeispiel Berliner Reifenwerk. in: VDI Berichte 1288, S. 107 ff., VDI Verlag, Düsseldorf 1996
- [16] **Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen** Umweltgutachten 1996 Zur Umsetzung einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart 1996

- [17] **N.N.** Energieeinsatz in der Zementindustrie rationell - Präzisierung der Selbstverpflichtungserklärung der Zementindustrie zur Verminderung der energiebedingten CO₂-Emissionen. Hrsg. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf 1996
- [18] **Lahl, U.** Der Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen - ein Rückblick. Müll und Abfall 27 (1995), Heft 5, S. 309 - 313
- [19] **Buttger, B.
Seifert, W.** Verwertung von Altkunststoffen durch Vergasungstechnik im Verwertungszentrum Schwarze Pumpe. in: VDI Berichte 1288, S. 139 ff., VDI Verlag, Düsseldorf 1996
- [20] **Chryssos, G.
Singer, H.
Murr, J.** Reststoffsituation in der deutschen Papierindustrie. Papiertechnische Stiftung (PTS), Wasser-, Abwasser- und Reststoff-Forschungsstelle der PTS, München 1996
- [21] **N.N.** UBA-Jahresbericht 1994. Hrsg.: Umweltbundesamt, Berlin 1995
- [22] **Teller, M.
et al.** Klärschlammverwertung und -behandlung AbfallwirtschaftsJournal 6 (1994), Nr. 10
- [23] **Bierbaum, K.
Lambertz, J.
Thomas, G.** Klärschlamm-Mitverbrennung in einem braunkohlegefeuerten Industriekraftwerk, Verfahrenstechnik der Abwasser- und Schlammbehandlung, 3. GVC-Kongreß Würzburg, 1996
- [24] **Urban, A.
Friedel, M.** Anforderungen an die Trocknung hinsichtlich einer therm. Verwertung. Thermische Klärschlammbehandlung - Planung, Technologie und Erfahrungen, Wasser - Abwasser - Abfall, Nr. 13, GH Kassel

Die Verfasser danken der Abteilung "Thermische Verwertung" der Trienekens GmbH für die freundliche Unterstützung bei der Datenbeschaffung.

Anschriften der Verfasser:

Dr.-Ing. H.-J. Roos
Trienekens GmbH
Greefsalle 1-5
41747 Viersen

Dipl.-Ing. Th. Buer
Institut für Siedlungswasserwirtschaft
der RWTH Aachen
52056 Aachen

4. Qualitätsanforderungen an Abfallbrennstoffe

A. I. Urban, Kassel

1 Änderung der Sichtweise

Die Abfallverbrennung als das bislang wichtigste Verfahren zur thermischen Behandlung von Abfällen hat eine mehr als hundertjährige Tradition. Die Überschrift meines Beitrages weist auf eine Entwicklung hin, die nicht der bisherigen Auffassung über die Müllverbrennung entspricht: "Müllverbrennung wird mit allen Abfällen fertig. Anforderungen an die zu verbrennenden Stoffe zu stellen ist sinnlos, weil bei Realisierung mit überflüssigem Zusatzaufwand für Trennung oder Vorbehandlung verbunden!"

Qualitätsanforderungen an Abfallbrennstoffe stellen insofern einen neuen Gesichtspunkt dar. Die Beschäftigung mit der Frage nach der Qualität der Abfallbrennstoffe ist im Zuge der gestiegenen Anforderungen an die Abfallverbrennungsanlagen in den letzten Jahren allgemein und im Zuge der jüngeren gesetzlichen Vorschriften (Kreislaufwirtschaftsgesetz, TASI, 17. BImSchV) sinnvoll geworden, zumal infolge dieser Vorschriften nicht mehr nur ein Verfahren für den Einsatz von Abfallbrennstoffen infrage kommt.

2 Wovon hängen Qualitätsanforderungen ab?

Abfallbrennstoffe müssen sich prinzipiell den Anforderungen stellen, die für fossile Brennstoffe gültig sind. Hinzu kommen Anforderungen, die sich aus einem im Vergleich zu fossilen Brennstoffen unkonventionellen Einsatz ergeben, insbesondere die Co-Nutzung mit fossilen Brennstoffen oder anderen Einsatzstoffen sowie den Einsatz der Abfallbrennstoffe in ursprünglich nicht für sie ausgelegte und entsprechend ausgestattete Anlagen.

Abfallstoffe werden in thermischen Verfahren nicht nur eingesetzt, um ihren Energieinhalt zu verwerten. In einigen Anwendungsfällen wird der anorganische Abfallanteil als Rohstoff-Substitut genutzt. Insofern ergeben sich Anforderungen, die vom Produkt des thermischen Behandlungsprozesses bedingt sind, für den Abfallbrennstoff, insbesondere die Zusammensetzung seines anorganischen Anteils.

Schließlich können Abfälle als Einsatzmaterial aufbereitet werden damit sie sich für das thermische Verfahren (besser) eignen. Dabei sind dem Aufbereitungsprozeß jedoch physikalisch und mehr noch ökonomisch (rentabler Aufwand!) Grenzen gesetzt.

Die im folgenden Abschnitt erläuterten Abfallbrennstoffeigenschaften als Qualitätsgrößen entstammen folglich vier Anforderungsbereichen und sind abhängig von den Materialien und von den Verfahren:

- > Brennstoff-Substitut
- > Rohstoff-Substitut
- > Aufbereitungsverfahren
- > Thermisches Behandlungsverfahren

Genauer betrachtet ergeben sich Anforderungen an die Abfallbrennstoffe infolge der gesamten Prozezkette, wie sie simplifiziert im Bild "Prozezkette für den Einsatz von Abfallbrennstoffen" wiedergegeben wurde.

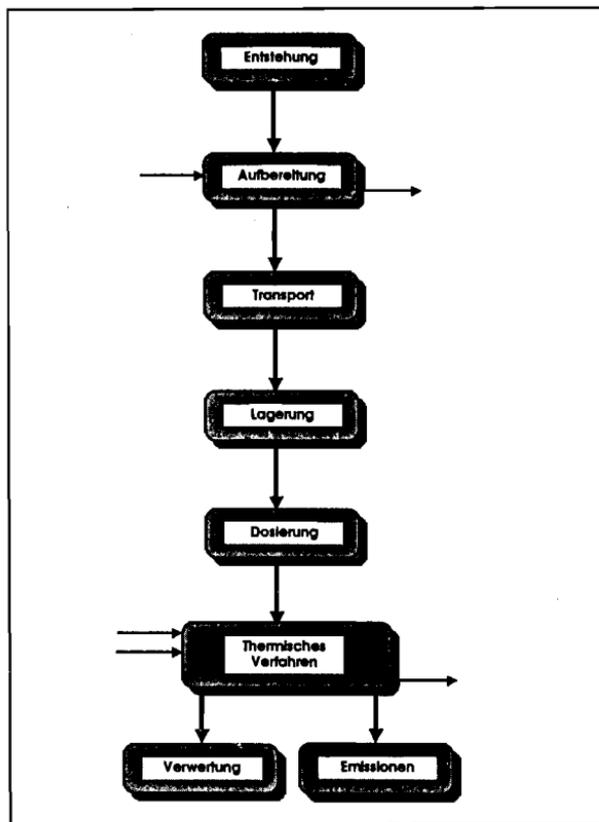


Bild 1: Prozezkette für den Einsatz von Abfallbrennstoffen

Bezüglich einer ökonomischen Nutzung ist eine Gesamtbetrachtung erforderlich. Geringere Anforderungen bei einer Verfahrensstufe der Prozezkette können zu Einsparungen für diese Stufe aber gleichzeitig zu überproportional hohen Kostenbelastungen auf einer anderen Stufe der Prozezkette führen. Notwendig sind deshalb eine Gesamtbetrachtung und eine Gesamtoptimierung! Diese aber sind möglich, da es zum einen in jeder der aufgeführten Stufen Verfahrensalternativen gibt und da zum anderen jede dieser Verfahrensalternativen je nach Zielsetzung und nach Eingabegut selber modifizierbar und optimierbar ist.

Daß eine derartige Veränderung der Abfallbrennstoff-Qualitäten nicht nur theoretisch möglich ist, sondern längst gängige Praxis, wird anhand einiger exemplarischer Beispiele für Prozeßstufen und ihre Auswirkungen in der Tabelle "Beispiele für Qualitätsveränderungen von Abfallbrennstoffen" deutlich. Für die Auswirkungen der verschiedenen Recycling-Bemühungen und Aufbereitungsverfahren im Haushaltsabfallsektor liegen umfangreiche Untersuchungen vor (siehe z.B.: Beeke 1991).

Tabelle 1: Beispiele für Qualitätsveränderungen von Abfallbrennstoffen

Prozeßstufe	Verfahren	Wirkung für Abfallbrennstoff	Beispiele
Entstehung	Getrennte Sammlung - Bringsystem	Restmüll-Mengenminderung, Änderung Zusammensetzung	Glas-, Papler-, Kleidercontainer
Entstehung	Getrennte Sammlung - Holsystem	Restmüll-Mengenminderung, Änderung Zusammensetzung	Duales System, Biomülltonne
Entstehung	Verbot	Senkung Schadstoffgehalt	Hg-Gehalt Batterien
Aufbereitung	Anlage	Abtrennung von Wertstoffen, Änderung Zusammensetzung	Aufbereitungsanlagen für Gewerbeabfälle und Hausmüll; Aufbereitungsanlagen im Dualen System
Aufbereitung	Mühle, Schere	Sperrmüllzerkleinerung	Aufbereitungsanlage in MVAs
Aufbereitung	Trockner	Abtrennung Ballaststoff Wasser; Heizwertsteigerung	Klärschlamm-trocknung
Aufbereitung	Vorabsiebung	Abtrennung Ballaststoff Staub; Rohstaubminderung	Aufbereitungsanlagen für Gewerbeabfälle und Hausmüll
Aufbereitung	Vorabsiebung	Abtrennung Ballaststoff Asche	
Transport	Presse, Rotortrommel	Homogenisierung	Müllsammelfahrzeug
Lagerung	Müllbunkerung	Homogenisierung	Bunker in MVA oder SMVA
Lagerung/ Dosierung	Müllbunkerung	Einmischen von Klärschlämmen	Cofeuerung von Klärschlämmen in MVA
Dosierung	Beschickung/Kran	Homogenisierung	MVA

Charakteristisch für die gegenwärtige Situation ist, daß nicht mehr lineare "Einbahnstraßen"-Lösungen zur Diskussion stehen, sondern daß Kombinationen dieser vier o.g. Strukturelemente - jeweils mit nicht "punktförmigen" Anforderungen sondern mit Anforderungsbereichen, da Toleranzen und Anpassungsmöglichkeiten existieren - für die verschiedenen im vorangegangenen Beitrag benannten Abfallströme zu betrachten sind.

Es soll deutlich darauf hingewiesen werden, daß die Abkehr von dem Gedanken, für jeden Stoff gäbe es nur ein geeignetes Verfahren, nur eine geeignete Anlage, eine wirtschaftlich und ökologisch zu nutzende Chance darstellt: eine Kreislaufwirtschaft erfordert die vielfältige Verknüpfung gleicher und verschiedener Stoffströme mit einer Vielzahl sich ergänzender Strukturelemente, d.h. Verfahren! Volkswirtschaftlich gesehen ergibt sich dadurch eine wünschenswert stabile und gleichzeitig flexible Struktur, die - nicht monopolistisch dominiert - kostengünstige und ökologisch vorteilhafte Lösungen ermöglicht.

2.1 Welche Abfallstoffe kommen in Frage?

Da in einem vorangegangenen Beitrag die Abfallpotentiale zur Verwertung in thermischen Prozessen erläutert werden (Roos 1996), soll an dieser Stelle mit der Tabelle "potentielle Abfallbrennstoffe" nur eine Übersicht und ein Eindruck, welche Vielzahl unterschiedlichster Einsatzstoffe für eine thermische Behandlung in Frage kommt, vermittelt werden.

Tabelle 2: Potentielle Abfallbrennstoffe

Abfallbrennstoff	Konsistenz	Primärziel	Sekundärnutzen
Altholz	fest	Energienutzung	
Altöle	flüssig	Energienutzung	
Altreifen	fest	Energienutzung	
Bauholz	fest	Energienutzung	
Elektronikschrott-Aufbereitungsreste	fest	Rohstoffsubstitut	Energienutzung
industrielle hochkalorische Schlämme	pastös	Entsorgung	Energienutzung
Klärschlämme feucht oder getrocknet	flüssig-fest	Entsorgung	Energienutzung/ Rohstoffsubstitut
Kunststoffreste aus Aufbereitungsanlagen	fest	Energienutzung	Rohstoffsubstitut
Landwirtschaftliche Rückstände	fest	Energienutzung	
neu: Rücklauf-Materialien	fest	Rohstoffsubstitut	
Produktionsrückstände (z.B. kaschiertes Altpapier)	fest	Energienutzung	Energienutzung
Restmüll	fest	Entsorgung	Energienutzung
Rückbaumaterial aus Deponien	fest	Energienutzung	
Schlacken und Stäube für Schmelzen oder zum weitergehenden Inertisieren	fest	Rohstoffsubstitut	
Sortierreste aus BMA	fest	Entsorgung	Energienutzung
Sortierreste aus Dualem System	fest	Energienutzung	
Sortierreste aus Kompostierung	fest	Entsorgung	Energienutzung
Überschüsse aus Altpapier-Sammlungen	fest	Energienutzung	

Pauschalierend werden in dieser Tabelle neben der Konsistenz auch Primärziele und Sekundärnutzen für diese Abfallbrennstoffe unterstellt; hierbei kann es in einigen Fällen durchaus zu einer anderen Wichtung kommen.

2.2 Welche Zielsetzung wird mit den thermischen Verfahren verfolgt?

Wenn von Qualitätsanforderungen für Abfallbrennstoffe die Rede ist, steht der energetische Nutzen der in den Abfallstoffen chemisch gebundenen und im Verbrennungsprozeß freigesetzten Energie im Vordergrund.

Neben Verbrennungsprozessen sollen aber auch andere thermische Verfahren angesprochen werden. Die Beschränkung auf eine Nutzung der kalorischen Energie als alleinige Zielsetzung ist unzulässig, da in vielen Fällen der Einsatz von Abfallbrennstoffen erst dadurch sinnvoll wird, daß durchaus unterschiedliche Zielsetzungen - in einigen Fällen gleichzeitig - zum Tragen kommen. Solche Ziele können sein:

- + Energienutzung und Brennstoffsubstitution
- + Inertisierung durch Zerstörung organischer Substanzen oder durch Einschmelzen von Schadstoffen
- + Mengenreduktion und Entsorgung von Abfällen und dadurch Vermeidung von Entsorgungskosten und Abgaben
- + Produktion verwertbarer anorganischer bzw. mineralischer Rückstände zur Rohstoffsubstitution mit und ohne vorherige Energienutzung

Inwieweit diese Zielsetzungen zum Tragen kommen, hängt von den tatsächlich verfügbaren Abfallbrennstoffen sowie von den verfügbaren Anlagenkapazitäten (unter Beachtung von Auslastung und langfristigen Verträgen, Konkurrenzsituation mit herkömmlichen und alternativen Einsatzstoffen, rechtliche Genehmigungssituation etc.) ab.

2.3 Welche thermischen Verfahren kommen in Frage?

Die ursprünglich eng begrenzte Fragestellung, ob ein Abfallstoff in einer MVA oder in einer SMVA zu entsorgen sei, wurde aufgeweitet und auf ein qualitativ höheres Niveau gehoben. Ein Abfallstoff kann infolge der gesetzlichen Neuerungen als Brennstoff- oder als Rohstoffsubstitut angesehen werden, das es unter Beachtung vernünftiger ökologischer Limitationen ökonomisch zu nutzen gilt.

Eine vereinfachte Übersicht der generell infrage kommenden thermischen Verfahren wird in der Tabelle "Thermische Verfahren für einen (partiellen) Einsatz von Abfallbrennstoffen" gegeben.

Tabelle 3: Thermische Verfahren für einen (partiellen) Einsatz von Abfallbrennstoffen

Entsorgungsanlagen	Kraftwerksanlagen	Produktionsanlagen
Müllverbrennungsanlagen - Rostfeuerungsanlage - Wirbelschichtfeuerungsanlage - Kombinationsverfahren	Steinkohlekraftwerk	Asphalt-Mischanlagen
Sonderabfallverbrennungsanlagen	Braunkohlekraftwerk	Hochofenprozeß
Krankenhausabfallverbrennungsanlagen		Kupolofen
Industriemüll-Klein-Verbrennungsanlagen		Ziegelei
Klärschlamm-Mono-verbrennungsanlagen		Hydrieranlagen
Schlacke- und Flugstaub-schmelzanlagen		Zement-Drehrohr

Entsprechend ihrer ursprünglichen Aufgabenstellung unterscheiden sich die aufgelisteten thermischen Verfahren erheblich, insbesondere hinsichtlich ihrer Fähigkeit, abfalltypische Schadstoffe ökologisch und ökonomisch vertretbar zurückzuhalten. Die bis heute diesbezüglich bestausgerüsteten Anlagen sind MVAs und SMVAs, die den Anforderungen der 17. BImSchV entsprechen.

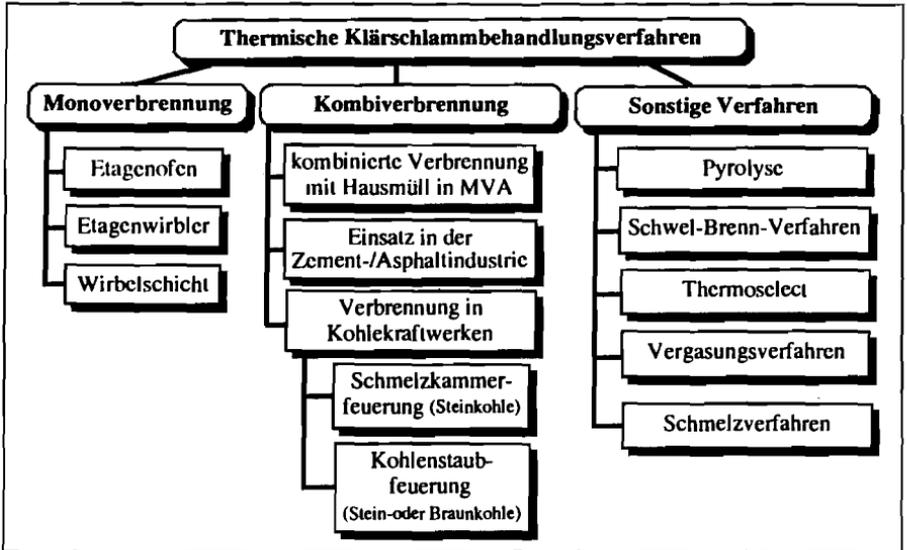


Bild 2: Übersicht über Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung

Die Vielzahl der möglichen Verfahren wird exemplarisch für den Abfallbrennstoff Klärschlamm anhand des Bildes "Übersicht über Verfahren zur thermischen Klärschlammbehandlung" (Urban 1994) noch deutlicher.

3. Welche Qualitätsanforderungen sind üblich oder nützlich?

3.1 Welche Qualitätsanforderungen sind für Brennstoffe üblich?

Brennstoffe werden als Wertstoffe gehandelt. In DIN-, ISO- und ASTM-Vorschriften sind deshalb Qualitätsgrößen definiert. Die Verfahren, wie diese Größen zu bestimmen sind, werden ebenfalls in diesen Vorschriften verbindlich vorgeschrieben.

Verallgemeinert ausgedrückt soll ein Brennstoff einen möglichst hohen Energieinhalt besitzen. Er sollte ohne betriebstechnische Probleme, z.B. durch Anlagerungen, und ohne die Emission von relevanten Schadstoffmengen thermisch verwertet werden können und vorher möglichst problemlos gelagert, transportiert und dosiert werden können. Schließlich sollen nur kleine Abfallmengen, möglichst verwertbare, den thermischen Prozeß verlassen.

Tabelle 4: Qualitätsgrößen für Brennstoffe

Qualitätsgröße	Bedeutung	erwünschte Tendenz
Heizwert	Maß für die chemisch gebundene, technisch relativ einfach freisetzbare Energie	möglichst groß
Kohlenstoffgehalt	Brennstoffkomponente	möglichst groß
Wasserstoffgehalt	Brennstoffkomponente	möglichst groß
Gehalt an Flüchtigem	Zündung und Brennverhalten	nicht zu hoher und nicht zu geringer Anteil
Wassergehalt	Ballaststoff	möglichst gering
Aschegehalt	Ballaststoff	möglichst gering
Korngrößenverteilung	Homogenität	möglichst gleichmäßig
Korngrößenverteilung	Dosierbarkeit	je nach Verfahren grobstückig bis pulverförmig
Staubgehalt	Betriebsprobleme	möglichst gering
Schwefelgehalt	Ausgangselement für Luftschadstoff	möglichst gering
Stickstoffgehalt	Ausgangselement für Luftschadstoff	möglichst gering
Chlorgehalt	Ausgangselement für Luftschadstoff	möglichst gering
Ascheschmelzverhalten, Ascheschmelztemperatur	Betriebsprobleme, Anlagerungen	möglichst gering für trocken arbeitende Verfahren, möglichst groß für Schmelz-Verfahren

Tabelle 5: Klärschlamm im Vergleich zu Haushaltsabfall und anderen festen Brennstoffen

Brennstoff	mittlere Elementaranalyse					Wassergehalt	Brennbares	Aschegehalt	Heizwert
	Kohlenstoff	Wasserstoff	Sauerstoff	Stickstoff	Schwefel	Ma. %	Ma. %	Ma. %	
Holz (lufttrocken)	50	6	44	0,0	0,0	12-25	74-88	0,2-0,8	15.070
Torf (lufttrocken)	59	6	33	1,5	0,5	20-35	56-79	0,4-9,0	14.650
Braunkohle (weich)	68	5	25	1,0	1,0	40-60	34-58	2,0-6,0	8.370
Gasflammkohle	84	5	9	1,0	1,0	1-10	77-96	3,0-13	27.210
EBkohle	90	4	4	1,5	1,0	1-10	77-96	3,0-13	31.810
Haushaltsabfall (naß)	55	7	36	0,7	1,0	25-35	39-49	26-33	8.200
Klärschlamm TS = 90%	52	8	33	6	1	10	45	45	10.100
Klärschlamm TS = 30%	52	8	33	6	1	70	15	15	1.700

In der Tabelle "Qualitätsgrößen für Brennstoffe" sind wichtige Qualitätsgrößen, ihre Bedeutung für den thermischen Prozeß und erwünschte Wertetendenzen aufgelistet. Die meisten dieser Größen werden im Rahmen der Immediat- und der SCHON-Analyse routinemäßig erfaßt. Beispielhafte Werte bzw. Wertebereiche für einige dieser Qualitätsgrößen sind in der Tabelle "Klärschlamm im Vergleich zu Haushaltsabfall und anderen festen Brennstoffen" (Urban 1994) gegenübergestellt. Dabei fallen sowohl Ähnlichkeiten bei der Zusammensetzung (Elementaranalyse) als auch krasse Unterschiede insbesondere bei den Ballaststoffanteilen und bei den Heizwerten ins Auge.

3.2 Welche Qualitätsanforderungen verlangt der Anlagenbauer?

Aus Sicht der Anlagenbauer stellen Qualitätsanforderungen keine Vorbedingung sondern eine Herausforderung für Planung und Auslegung eines thermischen Verfahrens dar. Grundsätzlich kann die Anlagentechnik thermischen Verfahren in weiten Bereichen unterschiedlichsten Qualitäten der Einsatzstoffe und unterschiedlichsten Zielsetzungen angepaßt werden. Begrenzt wird diese Anpassungsfähigkeit nur durch den Aufwand und die daraus resultierenden Kosten. Diese sind - wie oben bereits erwähnt - für den Gesamtprozeß zu optimieren.

Dabei muß stets geprüft werden, ob Aufrüstungen des thermischen Verfahrens und der nachfolgenden Rauchgasreinigung nicht dadurch umgangen werden können, daß ökonomisch preiswerte Aufbereitungsschritte vorgeschaltet werden. Grundsätzlich können in diesen Aufbereitungsschritten Ballast- oder Schadstoffe abgetrennt werden, oder es kann eine Konditionierung des Eingabegutes bezüglich seiner Stückigkeit und spezifischen Oberfläche (Zerkleinerung), seiner Homogenität (Mischung) und seines Heizwertes (Abtrennung heizwertreicher Wertstoffe, Trocknung) vorgenommen werden. In diesem Zusammenhang kann sich als preiswerteste und wirksamste "Aufbereitungsmaßnahme" die getrennte Sammlung erweisen, wenn hierdurch eine unkontrollierte Vermischung unterbunden wird.

Für eine zielstrebige, passende Auslegung sollten neben den klassischen Brennstoffkenngrößen, aus denen sich Auslegungswerte wie spezifischer Verbrennungsluftbedarf, spezifische Rauchgasvolumina, (maximale) Verbrennungstemperaturen, etc. ableiten und berechnen lassen, eine ganze Reihe weiterer Größen bekannt sein. Einige sind in der Tabelle "Eigenschaften von Abfall-Brennstoffen (mit Beispielwerten für Hausmüll und Kohle)" (nach: Urban 1978, Ruhrkohle 1984, Gumz 1962) aufgeführt. Im Fall der Abfallbrennstoffe ist der Kenntnisstand häufig unzulänglich, so daß vielfach mit Schätzungen und Annahmen oder indirekt abgeleiteten experimentellen Untersuchungswerten gearbeitet werden muß.

Tabelle 6: Eigenschaften von Abfall-Brennstoffen (mit Beispielen für Hausmüll und Kohle)

Eigenschaftsgröße	Einheit	Beispiel Hausmüll	Beispiel Kohle
Homogenität	Gewichtsanteile verschiedener Stoffgruppen, Breite und Form der Korngrößenverteilung	nicht allgemeingültig quantifizierbar	
Korngrößenverteilung	%/mm	siehe Bild-Beispiel	Sortenbezeichnung kennzeichnet jeweilige Kornung
spezifische Oberfläche	m ² /kg; m ² /m ³	nicht allgemeingültig quantifizierbar	30-500 m ² /m ³
Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	nicht bestimmt	0,08 - 1,16
Zündtemperatur	°C	400	BK: 100; SK: 200-400
Reaktionsfähigkeit <small>Reakt.geschw.konstante</small>	cm ³ /(g·s)	nicht bestimmt	0,1 - 0,6
Lagerfähigkeit <small>feuchtgehalt < 15 Gew.-%!</small>	Gew.-%	25 - 30	1 - 4
spezifisches Gewicht	kg/m ³		1.250 - 1.350
Schuttgewicht	kg/m ³	150-350	500 - 850
Strömungswiderstand in der Schüttung	mbar/100 mm	2 (Orientierungswert)	f(w, V ₁ , ε, x, ...)
Heizwert der brennbaren Fraktion	kJ/kg	7.500-12.000	33.000 - 35.500
Zusammensetzung Brennbares, Asche, Wasser	Gew.-%	(siehe Bild: "Kärschlamm im Vergleich ...)	
Gehalt an Flüchtigem	Gew.-%	nicht bestimmt	8 - 38
Schmelzpunkt der Asche (Halbkugelpunkt)	°C	1.100 - 1.200	1.280 - 1.480
Viskosität	cSt	entfällt bei Feststoffen	entfällt bei Feststoffen

Darüber hinaus ist natürlich aufgrund der bisherigen Praxis qualitativ durchaus bekannt, welche Aggregate für unterschiedliche Eingangsmaterialien oder für unterschiedliche Zielsetzungen mehr oder weniger gut geeignet sind. Als Beispiel sei auf die Tabelle "Eignung von verschiedenen Verbrennungsanlagen für Rückstände" verwiesen.

Tabelle 7: Eignung von verschiedenen Verbrennungsanlagen für Rückstände

Rückstandsart	Verbrennungsanlage				
	Rost-ofen	Etagen-ofen	Wirbel-schicht	Dreh-rohr	Brenn-kammer
Fest	2	3	3	1	5
Müll, grobstückig	5	5	2	1	3
niedriger Schmelzpunkt	2	1	1	1	5
körnig	2	1	1	1	5
organisch mit viel Asche	2	5	5	1	5
Pastös					
Hochviskos organisch (Teer)	5	5	2	1	3
wässrige organ. Schlämme	5	2	1	1	5
Flüssig					
organisch	5	5	2	2	1
halogen-organisch	5	5	2	2	1
wässrig mit viel organ. Material	5	5	2	2	1
Gase	5	5	2	2	1
1 = sehr gut geeignet		3 = nach Vorbehandlung geeignet			
2 = geeignet		5 = nicht verwendbar			

Daß nicht nur zwischen verschiedenen Aggregaten als Alternativlösung gewählt werden kann, sondern daß durchaus nach Festlegung auf eine Lösung noch Flexibilität gegeben ist, kann am Beispiel des Feuerleistungsdiagrammes einer Müllverbrennungsanlage veranschaulicht werden: längerfristige Änderungen der Heizwerte des Eingabematerials zwischen 7.000 kJ/kg und 12.000 kJ/kg können durch Veränderungen der Brennstoff-Durchsatzmengen oder der abgenommenen Wärmemengen ausgeglichen werden.

Generell ist für den Anlagenbauer bzw. für dessen Auslegung eine möglichst stetige, gleichmäßige Zufuhr der Abfallbrennstoffe mit konstanter Zusammensetzung und hoher Homogenität vorteilhaft. Ausgleichsmaßnahmen für kurzzeitige starke Schwankungen können nur unvollkommen und nach den bisherigen Erfahrungen mit Abfallbrennstoffen nur mit hohem Aufwand realisiert werden. Sie erfordern komplexe Regelungssysteme, an denen auch heute noch intensiv weiterentwickelt wird.

Zwischen den Anforderungen durch den Anlagenbauer und den Anforderungen durch den Anlagenbetreiber besteht eine enge Kopplung. Was der Anlagenplaner nicht berücksichtigt hat, erschwert dem Betreiber später den störungsfreien, flexiblen Betrieb. Als Konsequenz konnte bei Müllverbrennungsanlagen wiederholt beobachtet werden, daß eine scheinbar günstige Neu-Investition später erheblich höhere Betriebskosten und einen erhöhten Bedarf für nachträgliche Investitionen zur Folge hatte.

3.3 Welche Qualitätsanforderungen verlangt der Anlagenbetreiber?

Anlagenbetreiber thermischer Verfahren sind, soweit es bislang zu beobachten war, zurückhaltend bis ablehnend, wenn es um die Aufnahme bis dahin unüblicher Einsatzstoffe geht. Zu einem Gutteil ist diese Zurückhaltung damit zu rechtfertigen, daß der Einsatz von unüblichen Einsatzstoffen immer auch die Gefahr von Überraschungen und kurz wie langfristig wirksamen unliebsamen Auswirkungen in sich birgt: Korrosionen, erhöhter Verschleiß, Ablagerungen oder Anbackungen, sonstige unerwartete Veränderungen beim Betrieb. Dazu kommt die Sorge um das Image insbesondere von Produktionsanlagen, die nun fürchten, als Müllanlagen diskreditiert zu werden. Schließlich wirken zusätzlich zu beachtende Rechtsvorschriften und Überwachungsmaßnahmen verunsichernd und abschreckend.

Andererseits werden die ökonomischen Vorteile durch die Substitution von Brennstoffen und Rohstoffen und durch lockende Annahmgebühren immer klarer wahrgenommen. Wer den sicheren und bequemen Weg des Althergebrachten wählt, beraubt sich der zukunftssträchtigen Chancen in neuen Geschäftsbereichen. So kam es zu dem o.g. neuen Trend: eine deutlich größer werdende Vielzahl von Abfallbrennstoffen - erfordert die Anpassung von Anlagen und Betriebsweisen.

Um den möglichen Einsatz der Abfallbrennstoffe klären und gegebenenfalls die Anlagen und ihre Betriebsweisen anpassen zu können, werden eine Reihe weiterer Qualitäts- und Kenngrößen der Abfallbrennstoffe benötigt. Vor dem Einsatz in dem thermischen Verfahren ist abzuklären, welcher Anpassungsaufwand erforderlich ist, um den betreffenden Abfallbrennstoff:

- zu transportieren (Dichte, Schüttgewicht, Hygroskopie, Staubbildung, mechanische Stabilität etc.), ihn
- zu lagern (Schüttvolumen, Hygroskopie, biologische Stabilität, Gefahr der Selbstentzündung, Entmischungseigenschaften etc.) oder ihn
- zu dosieren (Korngrößenverteilung, Viskosität, Neigung zu Brückenbildung und Verstopfungen, Neigung zu Verklebungen aufgrund mangelnder thermischer Stabilität etc.) oder
- bei Co-Feuerungen mit dem herkömmlichen Brennstoff zu vermischen.

Gegebenenfalls sind Modifikationen des Abfallbrennstoffes durch eine geeignete Aufbereitungsstufe zu prüfen, um sich abzeichnende gravierende Probleme bei der thermischen Prozeßstufe zu umgehen.

Schließlich muß im Rahmen von Betriebsversuchen ermittelt werden, welche Auswirkungen der Einsatz des Abfallbrennstoffes im Vergleich zum Normalbetrieb hat, ob oben genannte Betriebsschwierigkeiten auftreten und welche Begrenzungen und Randbedingungen gelten, um die erkennbaren Schwierigkeiten zu meistern. Gleichmaßen ist zu prüfen, ob aus ökologischer Sicht, z.B. hinsichtlich der Schadstoffentstehung, Schadstoffzersetzung und Schadstoffabscheidung ausreichende Wirkungsgrade erreicht werden. Der Aufwand, der für die Durchführung derartiger Vorversuche und Meß- und Analysenprogramme erforderlich ist, sollte nicht unterschätzt werden.

Für den Anlagenbetreiber spielen eine Reihe weiterer Qualitätsanforderungen für Abfallbrennstoffe eine Rolle, die für fossile Brennstoffe aufgrund eines international entwickelten Marktes selbstverständlich erfüllt zu sein scheinen. Für den Einsatz von Abfallbrennstoffen dagegen dürfen diese Anforderungen durchaus nicht als selbstverständlich angesehen werden:

- zuverlässige Zugänglichkeit
- stets ausreichende Mengen
- gleichbleibende Qualität
- kontinuierliche Lieferungen oder
- bedarfsweise sporadische Belieferung
- zu stabilen, kalkulierbaren Preisen.

Diese oben genannten Kriterien sind zum Teil miteinander verknüpft und können sich gegenseitig auch ausschließen: bei großflächiger Entstehung von Abfallbrennstoffen sind große, sichere Liefermengen nur durch ein entsprechend großes Einzugsgebiet mit erheblichen Transportaufwendungen realisierbar - diese können den Preis erheblich und ungünstig beeinflussen. Auch die Entscheidung zwischen einer zentralen und mehreren dezentralen thermischen Verwertungsanlagen ist mit wesentlichen Kostendifferenzen verbunden - aufgrund der unterschiedlichen Transportleistungen und infolge der Degression für die durchsatzspezifischen Behandlungskosten bei Vergrößerung der Anlagenkapazität.

4 Fazit und Ausblick

Ein Selektionsprogramm, in das nur die Kenndaten der unterschiedlichsten Abfallstoffe eingelesen werden müssen, um daraus alle Informationen ableiten zu können - in welches thermische Verfahren dieser Abfallbrennstoff ökologisch und ökonomisch am zweckmäßigsten einzugeben, welche Aufbereitungsstufen und welche Anpassungen des thermischen Verfahrens optimiert durchzuführen sind - gibt es bislang nicht. Ein geeignetes Programm wird es auch mittelfristig nicht geben, da hierzu keine ausreichend vollständigen und abgesicherten Datenbasen für die Vielzahl der in Frage kommenden Abfallbrennstoffe und thermischen Verfahren vorliegen oder mit vertretbarem Aufwand beschaffbar sind.

Zahlenmäßig eindeutig und allgemeingültig bestimmbare Qualitätsanforderungen gibt es wegen der Vielzahl der Variablen nicht; verfügbar sind nur sehr wenige, kaum publizierte Erfahrungswerte, Wertebereiche oder Relativaussagen.

In dem Bild "Kenntnisse über Brennstoffeigenschaften" ist qualitativ dargestellt, wie groß im üblichen Fall die Diskrepanz zwischen der Zahl der erwünschten, tatsächlich aber nicht ermittelten und gemessenen und somit nicht verfügbaren Eigenschaftsgrößen einerseits, und der Zahl der quantifizierten Eigenschaftsgrößen und schließlich der Zahl der quantifizierten und zudem auch veränderbaren Eigenschaftsgrößen andererseits ist. Nur mit Hilfe der letztgenannten Gruppe ist eine zielgerichtete, systematische Optimierung des Einsatzes von Abfallbrennstoffen in thermischen Verfahren möglich.

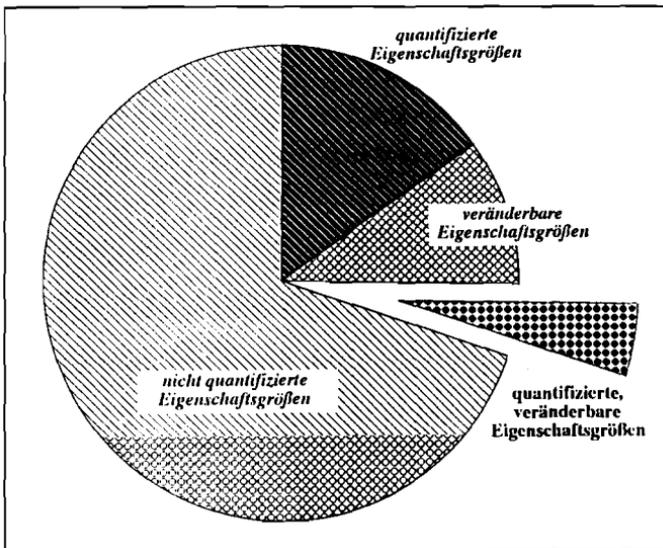


Bild 3: Kenntnisse über Brennstoffeigenschaften

Erst seit wenigen Jahren sind Überlegungen in nennenswertem Umfang angestellt worden, mehr Abfallfraktionen in eine Vielzahl dafür mehr oder weniger geeignete thermische Verfahren als Eingangsstoff zuzugeben.

Heute müssen wir feststellen, daß noch viel zu wenig über die Qualität dieser Einsatzstoffe und über exakt definierte und begründete Anforderungen von Seiten der Anlagen und von Seiten der Anlagenbetreiber bekannt ist. Insbesondere Abwägungen, ob und bis zu welchem Maß Aufbereitungen der Einsatzstoffe oder die Anpassung des thermischen Verfahrens ökologisch und ökonomisch den lohnenderen Ansatz darstellen, können nur mit Hilfe einer sorgfältigen Einzelfallprüfung durchgeführt werden.

Die für solche Abwägungen notwendigen Untersuchungen und Analysen sind aufwendig und teuer. Daher wird häufig versucht, in dieser Phase eines Entscheidungsprozesses zu sparen. Dadurch verliert man leider gleichzeitig den Ansatz für Optimierungen während der eigentlichen Betriebsphase des thermischen Verfahrens. Für Optimierungen sind Untersuchungen und Analysen eine grundlegende Voraussetzung. Heute sind sie noch wichtiger, da im Zuge der Kreislaufwirtschaft Optimierungen nicht nur innerhalb von Anlagen und Verfahren anstehen, sondern auch Optimierungen im Wirtschaftssystem beim Entscheid, welche Mengen nach welchen Aufbereitungsschritten in welche thermischen Verfahren einzubringen sind.

Literatur

- [1] **Beeke, H.** Auswirkungen von Recyclingmaßnahmen auf Schadstoff-, Energie- und Massenströme bei der Hausmüllentsorgung Diplomarbeit, FH Köln, 107 S., 1991
- [2] **Gumz, W.** Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik Springer-Verlag Berlin/ Göttingen/ Heidelberg; 3. Auflage, 749 S., 1962
- [3] **Roos, H.-J.
Buer, Th.** Abfallpotentiale zur Verwertung in Thermischen Prozessen 9. Aachener Kolloquium Abfallwirtschaft 12/1996
- [4] **N.N.** Ruhrkohle GmbH (Hrsg.) Ruhrkohlen Handbuch - Anhaltzahlen, Erfahrungswerte und praktische Hinweise für industrielle Verbraucher Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1984, 404 S.
- [5] **Urban, A** Abfall als Brennstoff - Charakterisierung und Möglichkeiten des Einsatzes in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.) Thermische Behandlung von Haushaltsabfällen, Abfallwirtschaft an der TU Berlin, 1978, 31-55 S.

- [6] **Urban A.
Friedel, M.** Anforderungen an die Trocknung hinsichtlich einer thermischen Verwertung in: Wolf, P. (Hrsg.), Urban, A. (Hrsg.): Thermische Klärschlammbehandlung - Planung, Technologie und Erfahrungen, Kassel 1994, 284-318 S.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Arnd I. Urban
Universität Gesamthochschule Kassel
Fachgebiet Abfalltechnik
Fachgebiet 14
34109 Kassel

5. Mitverbrennen von Klärschlamm und anderen Abfällen in Kraftwerken

V. Hoffmann, Essen

1 Einführung

Die Entsorgung von Abfällen wird seit dem 7. Oktober 1996 durch das Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz (KrW-/AbfG) geregelt. Der Begriff der Entsorgung umfaßt dabei sowohl die (stoffliche oder energetische) Verwertung als auch die Beseitigung. Eine technisch interessante und wirtschaftlich oft günstige Möglichkeit der energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung von Abfällen ist die Mitverbrennung in einem Kraftwerk, z.B. bei der Entsorgung von Klärschlamm. Neben ökologischen Aspekten, die von Art und Menge des eingesetzten Abfalls abhängig sind und jeweils einer genauen Untersuchung bedürfen, spielt dabei auch die Anwendung der gesetzlichen Bestimmungen eine erhebliche Rolle, die nach vorliegenden Erfahrungen teilweise immer noch erhebliche Schwierigkeiten bereitet.

Im folgenden sollen daher die wesentlichen gesetzlichen Regelungen, die bei der Mitverbrennung von Abfällen in Kraftwerken zu beachten sind und in der Praxis häufig zu Problemen führen, erläutert werden. Weiterhin werden einige wichtige Aspekte bei der ökologischen Bewertung am Beispiel der Mitverbrennung von Klärschlamm betrachtet.

2 Allgemeine rechtliche Grundlagen

Kraftwerke sind genehmigungsbedürftige Anlagen und besitzen in der Regel eine Genehmigung nach der Nr. 1.1 des Anhangs zur 4. BImSchV. Hinsichtlich der Maßnahmen zur Luftreinhaltung gelten die Anforderungen der Großfeuerungsanlagen-Verordnung (13. BImSchV). Für übliche, mit fossilen Brennstoffen gefeuerte Kraftwerke sind dort im wesentlichen Begrenzungen für staubförmige Emissionen und gasförmige anorganische Stoffe (CO, NO_x, SO₂, Halogenverbindungen) enthalten. Für die Stickstoffoxide gelten außerdem die weitergehenden Beschlüsse der Umweltministerkonferenz vom 5.4.1984. Als Beispiel sind für ein mit Steinkohle betriebenes Kraftwerk mit Schmelzkammerfeuerung und einer Feuerungswärmeleistung über 300 MW die Grenzwerte in Tabelle 1 dargestellt.

Für die Verbrennung von Abfällen gelten die Anforderungen der 17. BImSchV, die deutlich schärfer sind als die der Großfeuerungsanlagen-Verordnung. Außerdem ist die Anzahl der Stoffe, für die Emissionsgrenzwerte festgelegt sind, deutlich größer als in der 13. BImSchV, insbesondere sind auch Schwermetalle und Dioxine/Furane begrenzt (Tabelle 2).

Wesentliche Bedeutung kommt weiterhin den "Zweifelsfragen bei der Auslegung und Anwendung der 17. BImSchV" zu. Dieser Fragen- und Antwortkatalog wurde vom Länderausschuß für Immissionsschutz (LAI) im Interesse einer bundeseinheitlichen Handhabung der 17. BImSchV erstellt.

3 Mischwertrechnung

Besondere Bedeutung bei der Mitverbrennung von Abfällen kommt dem § 5 (3) der 17. BImSchV zu, in dem geregelt wird, welche Grenzwerte sich ergeben, wenn Regelbrennstoffe und feste oder flüssige Abfälle gemeinsam in einer Anlage eingesetzt werden:

Die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV, bezogen auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.%, gelten nur für den Teil des Abgasstromes, der bei der Verbrennung des höchstzulässigen Anteils der Abfälle und des für die Verbrennung von Abfällen zusätzlich benötigten Brennstoffs entsteht. Für den übrigen Teil des Abgasstromes gelten die hierfür verbindlichen Emissionsgrenzwerte und Emissionsbegrenzungen. Fehlen derartige Festlegungen, sind die tatsächlichen Emissionen beim Betrieb ohne Einsatz von Abfällen zugrunde zu legen.

Es ist also eine Mischwertrechnung auf Basis der Abgasvolumina durchzuführen; eine Ausnahme bilden laut § 5 (3) Feuerungsanlagen nach Nr. 1.1 - 1.3 und Abfallverbrennungsanlagen nach Nr. 8.1 der 4. BImSchV, bei denen einige Grenzwerte der 17. BImSchV ohne Mischwertrechnung gelten, wenn der Anteil des Abfalls an der Feuerungswärmeleistung 25 % übersteigt. In Tabelle 3 sind diese Bestimmungen zur Mischwertrechnung zusammengestellt.

Prinzip der Mischwertrechnung ist die - von der Praxis meist abweichende - Annahme, daß der Abfall auch bei Mitverbrennung unter den in der 17. BImSchV vorgeschriebenen Bedingungen erfolgt, also bei einer Mindesttemperatur von 850 bzw. 1200 °C, einem Mindestsauerstoffgehalt im Brennraum von 6 Vol.% und einer auf 11 Vol.% Sauerstoff bezogenen Abgasmenge.

Ermittlung der Abgasvolumina

Da sich die Emissionsgrenzwerte auf das trockene Abgas beim jeweiligen Bezugssauerstoffgehalt beziehen, sind auch die Abgasvolumina im trockenen Zustand beim jeweiligen Bezugssauerstoffgehalt maßgebend.

Das spezifische Abgasvolumen beim Bezugssauerstoffgehalt [m^3/MJ] für Regelbrennstoffe ist bekannt, bzw. es läßt sich aus der Brennstoffzusammensetzung über eine Verbrennungsrechnung leicht ermitteln (Tabelle 4). Für die Abfälle ist dazu ebenfalls eine Verbrennungsrechnung durchzuführen, für die die Kenntnis der Abfallzusammensetzung Voraussetzung ist. Mit den Anteilen von Brennstoff und Abfall

an der Feuerungswärmeleistung (FWL) lassen sich die jeweiligen anteiligen Abgas-
mengen leicht ermitteln.

Bei Abfällen, die nicht den erforderlichen Heizwert aufweisen, um ohne zusätzlichen
Brennstoff die nach 17. BImSchV erforderlichen Verbrennungsbedingungen (850
oder 1200 °C bei mindestens 6 Vol.% Sauerstoff) erreichen zu können, muß die
durch den zusätzlichen Brennstoff erzeugte Abgasmenge dem Abgasanteil des Ab-
falls zugerechnet werden. Für diese Betrachtung, die z.B. bei der Mitverbrennung
von mechanisch entwässertem Klärschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von
20 - 30 % und einem Heizwert unter ca. 4000 kJ/kg relevant werden kann, ist zumin-
dest eine überschlägige Energiebilanz notwendig.

Bezugssauerstoffgehalt und Mischgrenzwerte

Den Bezugssauerstoffgehalt für die Mitverbrennung erhält man durch Mischungs-
rechnung für den Abgasanteil des Regelbrennstoffs (beim jeweiligen Bezugssauer-
stoffgehalt) und dem Abgasanteil aus Abfall bei 11 Vol.% Sauerstoff.

In gleicher Weise erfolgt die Berechnung der Mischgrenzwerte für die einzelnen luft-
verunreinigenden Stoffe, die sich auf den oben errechneten Bezugssauerstoffgehalt
beziehen. Bei Kraftwerken, für die in der Regel keine Grenzwerte für organische
Stoffe (Gesamtkohlenstoff), Schwermetalle und Dioxine/Furane festgelegt sind, ist
als Emissionswert für das Abgas aus Brennstoff auf die tatsächlichen Emissionen
beim Betrieb ohne Einsatz von Abfällen zurückzugreifen. Dazu sind Emissionsmes-
sungen erforderlich, sofern nicht Literaturdaten über vergleichbare Anlagen heran-
gezogen werden können.

Tages- und Halbstundenmittelwerte

Für kontinuierlich zu messende Abgaskomponenten sind Tages- und Halbstun-
denmittelwerte als Mischgrenzwerte zu bilden. Unter Berücksichtigung der anteiligen
Abgasströme sollten hierbei ermittelt werden:

- Tagesmittelwerte auf der Basis der Emissionsgrenzwerte der 13. BImSchV und
der Tagesmittelwerte der 17. BImSchV für die Komponenten Staub, Kohlenmon-
oxid, Stickstoffoxide, Schwefeloxide und Halogenverbindungen,
- Halbstundenmittelwerte auf der Basis der 1,2-fachen Emissionsgrenzwerte der
13. BImSchV und der Halbstundenmittelwert der 17. BImSchV für die Komponen-
ten Staub, Stickstoffoxide, Schwefeloxide und Halogenverbindungen.

Für Kohlenmonoxid sind in der 17. BImSchV Stundenmittelwerte und Werte, die bei
mindestens 90 % aller innerhalb von 24 Stunden vorgenommenen Messungen nicht
überschritten werden dürfen, festgelegt. Zur Bildung eines entsprechenden Misch-
grenzwertes müssen diese Werte für den Betrieb ohne Abfallmitverbrennung zu-
nächst ermittelt werden. Ersatzweise wird vom LAI für Kohlenmonoxid ein Halbstun-

den-Mischgrenzwert vorgeschlagen, der sich aus dem 1,2-fachen Emissionsgrenzwert der 13. BImSchV und dem Tagesmittelwert der 17. BImSchV ergibt.

Eine beispielhafte Mischwertrechnung ist für den Fall der Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Kraftwerk mit Schmelzkammerfeuerung in Tabelle 5 zusammengestellt.

4 Ökologische Aspekte

Zusammensetzung und Heizwert von Klärschlamm

Zur Beurteilung der Umweltrelevanz einer Mitverbrennung von Abfällen in einem Kraftwerk ist es erforderlich, die Zusammensetzung dieser Abfälle zu betrachten und mit der von Steinkohle zu vergleichen. Die wesentlichen Daten für Klärschlamm als Beispiel sind in Tabelle 6 zusammengestellt, wobei in der Praxis jeweils im Einzelfall zu prüfen ist, ob die angegebenen Bandbreiten zutreffend sind.

Der Heizwert von Klärschlamm ist in getrocknetem Zustand (Wassergehalt unter 10 %) etwa halb so hoch wie der von Vollwert-Steinkohle. Bei einem Heizwert von über 11 MJ/kg kann er nach KrW-/AbfG energetisch verwertet werden; wird entwässertes Schlamm mit Heizwerten unter 11 MJ/kg eingesetzt, handelt es sich um eine Abfallbeseitigung. Betrachtet man Trocknung und Verbrennung gemeinsam und unabhängig davon, ob die Trocknung im Kraftwerk oder bereits an der Kläranlage stattfindet, liefert die Verbrennung des Klärschlammes in etwa die Energie, die für die Trocknung erforderlich ist, so daß eine nennenswerte Energieeinsparung bzw. Einsparung fossiler Energieträger durch die Klärschlammverbrennung nicht zu verzeichnen ist, es sei denn, die Trocknung erfolgt solarthermisch oder mit sonst nicht genutzter Abwärme.

Emissionen

Bei der Betrachtung der Emissionen ist zu bedenken, daß in Kraftwerken ein bestimmter Anteil der Feuerungswärmeleistung durch Klärschlamm ersetzt wird, dessen Heizwert maximal halb so hoch ist wie der der Kohle, so daß mindestens die doppelte Menge pro MW eingesetzt werden muß. Dementsprechend erhöhen sich auch die Emissionskonzentrationen im Abgas. Die Verhältnisse sollen am folgenden Beispiel erläutert werden, daß auf den Angaben der Tabelle 5 beruht:

In einem Kraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 500 MW (davon 50 MW durch Klärschlamm) werden ca. 62,3 t/h Steinkohle ($H_U = 26$ MJ/kg) und 14 t/h Klärschlamm ($H_U = 13$ MJ/kg) verfeuert. Bei reinem Steinkohlebetrieb werden 69,2 t/h eingesetzt. Die entstehenden Schwefeldioxidmengen betragen bei gleichem Schwefelgehalt von 2% in der Trockensubstanz von Kohle und Klärschlamm und ohne Berücksichtigung von Schwefeleinbindung in der Asche

- ca. 2,49 t/h SO_2 aus Kohle und 0,56 t/h SO_2 aus Klärschlamm bei Mischbetrieb,
- ca. 2,77 t/h SO_2 bei reinem Kohlebetrieb.

Es ergibt sich also eine um ca. 0,28 t/h (ca. 10 %) höhere SO₂-Menge bei Mischbetrieb, die in der Rauchgasentschwefelungsanlage abgeschieden werden muß. Für Chlorwasserstoff ergibt sich eine entsprechende Erhöhung von ca. 18 kg/h bei gleichem Chlorgehalt von 0,25 % in Kohle und Klärschlamm.

Da die vorhandenen Anlagen zur Rauchgasreinigung in der Lage sind, die geforderten Grenzwerte bei Kohlebetrieb deutlich zu unterschreiten, können sie die erhöhten Rohgaskonzentrationen, die sich bei Mischbetrieb ergeben, in der Regel ohne größere Probleme bewältigen.

Auch für Staub ergeben sich in der Regel keine Probleme. Zwar erhöht sich der Staubgehalt im Rohgas aufgrund des hohen Aschegehaltes des Klärschlammes unter Umständen erheblich, die effizienten Staubabscheider (Elektrofilter und Wäscher) in Kraftwerken lassen aber keine Überschreitung von Grenzwerten erwarten. Bei reinem Kohlebetrieb wird der Grenzwert der 13. BImSchV von 50 mg/m³ häufig um den Faktor 5 - 10 unterschritten.

Bei den Schwermetallen können ähnliche Betrachtungen zu den mit den Einsatzstoffen eingetragenen Mengen angestellt werden. Teilweise liegen bereits im Klärschlamm deutlich höhere Konzentrationen vor als in der Kohle; im folgenden sollen beispielhaft die Elemente Chrom (Cr), Blei (Pb) und Quecksilber (Hg) herausgegriffen werden. Chrom verbleibt bei der hier zugrundegelegten Schmelzkammerfeuerung wie die anderen schwerflüchtigen Elemente weitgehend in dem Schmelzkammergranulat (> 95 %); der Rest wird in der Rauchgasreinigung fast vollständig als Staubinhaltsstoff abgeschieden. Auch Blei wird überwiegend (ca. 75 %) im Schmelzgranulat eingebunden sowie in der Rauchgasreinigung effektiv abgeschieden. Für das leichtflüchtige Quecksilber ist bekannt, daß größenordnungsmäßig 50 % der eingetragenen Menge mit dem Abgas emittiert wird. Aufgrund des gegenüber Kohle höheren Hg-Gehaltes des Klärschlammes ist somit insbesondere für diese Komponente mit einer Emissionserhöhung zu rechnen, die ohne zusätzliche Minderungsmaßnahme zur Überschreitung des durch Mischrechnung festgelegten Grenzwertes führen kann.

Für die feuerungsbedingten Schadstoffe Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid und organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff) ist nach vorliegenden Untersuchungsergebnissen in der Regel nicht mit einer nennenswerten Änderung der Emissionen durch die Klärschlammverbrennung zu rechnen. Gleiches gilt auch für Dioxine/Furane, deren Bildung (De-novo-Synthese) u.a. durch das sowohl in Kohle als auch im Klärschlamm vorhandene hohe Verhältnis von Schwefel zu Chlor unterdrückt wird. Die im Klärschlamm enthaltenen Dioxin- und Furankonzentrationen werden unter den guten Verbrennungsbedingungen in Kraftwerken zuverlässig zerstört.

Insgesamt ist festzustellen, daß bei Mitverbrennung von Klärschlamm aufgrund der effektiven Abgasreinigung in der Regel nur bei den Komponenten mit einer Überschreitung der Mischgrenzwerte zu rechnen ist, deren Emissionswerte für reinen Kohlebetrieb durch Messung festgestellt werden müssen, weil Grenzwerte in der 13. BImSchV fehlen. Dies gilt insbesondere für das leichtflüchtige Quecksilber, das nicht

in ausreichendem Maße abgeschieden wird. Hier sind ggf. weitere Minderungsmaßnahmen oder eine Begrenzung der Konzentration im Klärschlamm erforderlich.

Feste Rückstände

Bei der Mitverbrennung von Abfällen in Kraftwerken ist von wesentlicher Bedeutung, daß die Verwertbarkeit der festen Rückstände (z.B. als Betonzuschlagstoff oder Dränmaterial im Straßenbau, Gips) nicht beeinträchtigt wird. Bei Klärschlamm ist ein zu beachtender Faktor der hohe Aschegehalt. Im oben dargestellten Beispiel ergibt sich eine Erhöhung des Ascheanfalls (in diesem Fall hauptsächlich als Schmelzkammergranulat) von größenordnungsmäßig 100 % bei einem Aschegehalt der Kohle von 10 % und des Klärschlammes von 50 % in der Trockensubstanz. Die Kapazitäten der Austragsorgane und sonstigen Einrichtungen für das Asche-Handling sind diesen Verhältnissen anzupassen.

Nach bisher vorliegenden Erkenntnissen ändert sich die Qualität der festen Rückstände durch die Mitverbrennung nicht wesentlich, so daß die Verwertbarkeit nicht eingeschränkt wird. Dies ist u.a. auf die ähnliche Zusammensetzung von Kohle- und Klärschlamm-Asche hinsichtlich der Hauptkomponenten wie Silizium, Aluminium, Eisen, Calcium und Magnesium zurückzuführen. Hinsichtlich der Schwermetalle ist festzustellen, daß die Gehalte im Klärschlamm meist in der gleichen Größenordnung wie die der Kohle liegen, wenn man die Gehalte auf die Asche bezieht, in der die meisten Schwermetalle überwiegend verbleiben. Somit treten in den Aschen und Schmelzkammergranulaten im allgemeinen kaum höhere Schwermetallgehalte bei Mitverbrennung auf, bei Trockenfeuerungen können sich aber durchaus Verschiebungen bei den Konzentrationen in den einzelnen Teilströmen Brennraum-Asche, Kessel- und Filterasche ergeben. Zur weiteren Schwermetallreduzierung ist es daher sinnvoll, den Schwermetalleintrag in den Klärschlamm zu verringern, beispielsweise durch Maßnahmen im Bereich der industriellen Indirekteinleiter, wie es z.B. von der Stadt Düsseldorf versucht wird.

Für leichter flüchtige Elemente wie Quecksilber, Selen und Arsen, die in größerem Maße ins Abgas übergehen, ist die Untersuchung der Gipsqualität von Bedeutung. Nach vorliegenden Informationen werden auch hier keine Anreicherungen beobachtet, die eine Einschränkung der Verwertbarkeit des Gipses zur Folge haben.

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte eines Kraftwerkes über 300 MW_{th} mit Schmelzkammerfeuerung

Komponente	Grenzwert [mg/m ³]	
	Bezugssauerstoffgehalt	5 Vol.%
Kohlenmonoxid	250	
Schwefeldioxid	400	
Stickstoffoxide	200	
Chlorwasserstoff	100	
Fluorwasserstoff	15	
Staub	50	

Tabelle 2: Grenzwerte der 17. BImSchV Bezugssauerstoffgehalt: 11 Vol.%

Komponente	Tagesmittelwert [mg/m ³]	Halbstunden- mittelwert [mg/m ³]	Mittelwert über Probenahmezeit [mg/m ³]
Gesamtstaub	10	30	
organische Stoffe (Gesamtkohlenstoff)	10	20	
Chlorwasserstoff	10	60	
Fluorwasserstoff	1	4	
Schwefeldioxid	50	0,2 g/m ³	
Stickstoffoxid (NO ₂)	0,2 g/m ³	0,4 g/m ³	
Σ Cd, Tl			0,05
Hg			0,05
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn			0,5
Dioxine/Furane			0,1 ng/m ³

Tabelle 3: Bestimmungen zur Mischwertrechnung nach der 17. BImSchV

Anteil des Abfalls an der Feuerungswärmeleistung	Emissionen	Anlagen nach Nr. 1.1 - 1.3 und 8.1	Sonstige Anlagen
bis 25 %	alle Stoffe nach § 4/§ 5	Mischwert- rechnung	Mischwert- rechnung
über 25 %	Dioxine/Furane Schwermetalle Kohlenmonoxid	Mischwert- rechnung	Mischwert- rechnung
	sonstige Stoffe nach § 5	Grenzwerte der 17. BImSchV	Mischwert- rechnung

Tabelle 4: Spezifisches Abgasvolumen von Regelbrennstoffen

Brennstoffart	Mindest- luftbedarf m ³ i.N.tr./MJ	spezifisches Abgasvolumen (trocken) in m ³ i.N.tr./MJ					
		0% O ₂	3% O ₂	5% O ₂	6% O ₂	7% O ₂	15% O ₂
Erdgas/Heizöl EL	0,265	0,243	0,284				0,851
Steinkohle/Braunkohle (H _u > 15 MJ/kg)	0,263	0,256		0,336	0,358	0,384	
Braunkohle (H _u < 15 MJ/kg)	0,288	0,280		0,368	0,392	0,420	

Tabelle 5: Beispiel einer Mischwertrechnung nach 13./17. BImSchV

Mitverbrennung von Klärschlamm in einem Steinkohlekraftwerk mit Schmelzkammerfeuerung

Feuerungswärmeleistung des Kraftwerks:	50 MW
Klärschlamm:	
- Menge mit 95 % TS	14 t/h
- Heizwert bei 95 % TS:	13 MJ/kg
- spez. Abgasvolumen:	0,250 m ³ /MJ bei 0 % O ₂ 0,525 m ³ /MJ bei 11 % O ₂
Anteil des KS an der FWL:	ca. 50 MW = 10 %
spez. Abgasmenge bei KS-Verbrennung:	0,9 x 0,336 m ³ /MJ + 0,1 x 0,525 m ³ /MJ = 0,355 m ³ /M
Anteil des Abgases aus Kohle:	ca. 85 %
Anteil des Abgases aus Klärschlamm:	ca. 15 %
Bezugssauerstoffgehalt:	0,85 x 5 % + 0,15 x 11 % = 5,9 %

Komponente	Grenzwerte 13. BImSchV <i>Meßwerte (fiktiv)</i> mg/m ³ bei 5 % O ₂	Grenzwerte 17. BImSchV mg/m ³ bei 11 % O ₂	Mischgrenzwerte 13./17. BImSchV mg/m ³ bei 5,9 % O ₂
Tagesmittelwerte			
Staub	50	10	44
CO	250	50	220
NO _x	200	200	200
SO ₂	400	50	350
HCl	100	10	87
HF	5	1	4,4
Gesamt-C	5	10	6
Schwermetalle:			
Σ Cd, Ti	0,02	0,05	0,025
Hg	0,01	0,05	0,016
Σ Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	0,2	0,5	0,25
PCDD/PCDF	0,01 ng TE/m ³	0,1 ng TE/m ³	0,02 ng TE/m ³

Tabelle 6: Zusammensetzung/Heizwert von Steinkohle und Klärschlamm

	Steinkohle		Klärschlamm	
	min.	max.	min.	max.
Heizwert [MJ/kg]	25	32	1	14
Zusammensetzung	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %
Wasser	3	10	3	80
	Gew. % (wf)	Gew. % (wf)	Gew. % (wf)	Gew. % (wf)
Asche	3	15	35	60
C	70	85	20	35
H	3	5	2	4,5
N	1	5	2	4
O	2	8	10	20
S	0,5	2	0,1	2
Cl	0,05	0,4	0,05	0,25
	mg/kg (wf)	mg/kg (wf)	mg/kg (wf)	mg/kg (wf)
Sb	0,5	2	3	15
As	2	50	1	20
Pb	20	80	20	650
Cd	0,5	10	0,1	11
Cr	5	40	1	400
Co	5	40	8	35
Cu	5	60	10	1400
Mn	5	250	300	1800
Ni	15	100	5	100
Hg	0,1	1	0,05	6,5
Se	1	6	0,1	8
Tl	0,1	2	0,1	5
V	10	200	10	150
Zn	10	200	10	3000
	ng/kg (wf)		ng/kg (wf)	
PCDD/PCDF	k. A.		bis 100	

Literatur

- [1] **N.N.** 13. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungsanlagen - 13. BImSchV) vom 22.6.1983, BGBl. S. 719, 1983
- [2] **N.N.** 17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Abfallverbrennungsanlagen - 17. BImSchV) vom 23.11.1990, BGBl. S. 2545, 1990
- [3] **Hansmann, G.
Mittmann, H.
Lindert, M.
Görtz, W.** Mitverbrennung von Klärschlamm im Kraftwerk, BWK/TÜ/Umwelt-Special, Oktober 1994
- [4] **Tauber, C.
Klemm, J.
Schönrok, M.** Mitverbrennung kommunaler Klärschlämme in Steinkohlekraftwerken, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Heft 11, 1995
- [5] **Gerhardt, T.
Rebmann, M.
Spliethoff, H.
Hein, K.R.G.** Untersuchungen zur Mitverbrennung von kommunalen Klärschlämmen in Kohlenstaubfeuerungen, VGB Kraftwerkstechnik, Heft 5, 1996

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. V. Hoffmann
Landesumweltamt
Nordrhein-Westfalen
Postfach 10 23 63
45023 Essen

6. Rohstoffliche Verwertung von Kunststoffabfällen in Hochöfen und Kupolöfen

H. W. Gudenau, G. Schwaneckamp, Aachen

1 Einleitung

In Deutschland liegt das kommunale Abfallaufkommen an Hausmüll, hausmüllähnlichem Gewerbeabfall und Sperrmüll bei etwa 36 Mio. t/a. Laut Mengenstromnachweis von 1994 betrug die Menge an Verkaufsverpackungen nach der Verpackungsverordnung etwa 6,96 Mio t (19,3 Gew.-%) und speziell an Kunststoffverpackungen etwa 889.500 t. Davon müssen laut Verpackungsverordnung 64 % einer stofflichen Verwertung zugeführt werden [1].

Ein Hauptproblem bei der heute üblichen, vorwiegend auf die Metallverwertung ausgerichteten Verwertungspraxis von Altfahrzeugen ist das hohe Aufkommen nicht verwertbarer Reste: rund 250 kg pro PKW Restgemisch aus Glas, Kunststoff, Textilien etc., die sogenannte Shredderleichtfraktion. Hier fehlen derzeit wirtschaftlich vertretbare Entsorgungs- und Verwertungsstrukturen. Zur Zeit wird mit einem jährlichen Aufkommen von ca. 500.000 t Shredderleichtfraktion gerechnet [2].

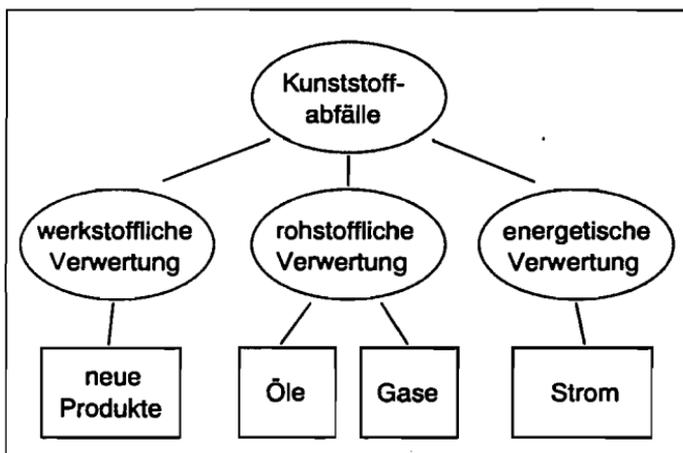


Bild 1: Verwertungsmöglichkeiten von Kunststoffabfällen

Zur Verwertung der oben erwähnten Abfälle haben sich verschiedene Verwertungsverfahren etabliert, die in Bild 1 dargestellt sind. Generell ist zwischen der werkstofflichen, der rohstofflichen und der energetischen Verwertung zu unterscheiden. Während die werkstoffliche Verwertung auf das Umschmelzen in neue Produkte abzielt, werden bei der rohstofflichen Verwertung vornehmlich Öle bzw. Gase produziert. Die

energetische Verwertung nutzt den Energiegehalt der Abfälle z. B. zur Dampferzeugung bzw. zur Verstromung.

Das Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen wurde 1993 vom Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalens mit dem Forschungsvorhaben „Untersuchungen zum Einsatz von geschredderten Kunststoffabfällen als Reduktionsmittel und/oder Energieträger in Schmelzaggregaten der Eisenhüttenindustrie“ beauftragt. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, Anlagenbetreibern, aufbauend auf Laborversuchen, die am Institut für Eisenhüttenkunde durchgeführt wurden, diesen Verwertungsweg zu eröffnen und im Pilotmaßstab zu erproben. Die Forschungsaktivitäten richteten sich hauptsächlich auf den Einsatz der Kunststofffraktion aus dem Dualen System Deutschland (DSD) und der Shredderleichtfraktion (SLF) aus der Altautoverwertung. Im Rahmen dieses Vortrages sollen die Möglichkeiten der rohstofflichen Verwertung im Hochofen und Kupolofen erörtert werden [3].

Der Hochofen

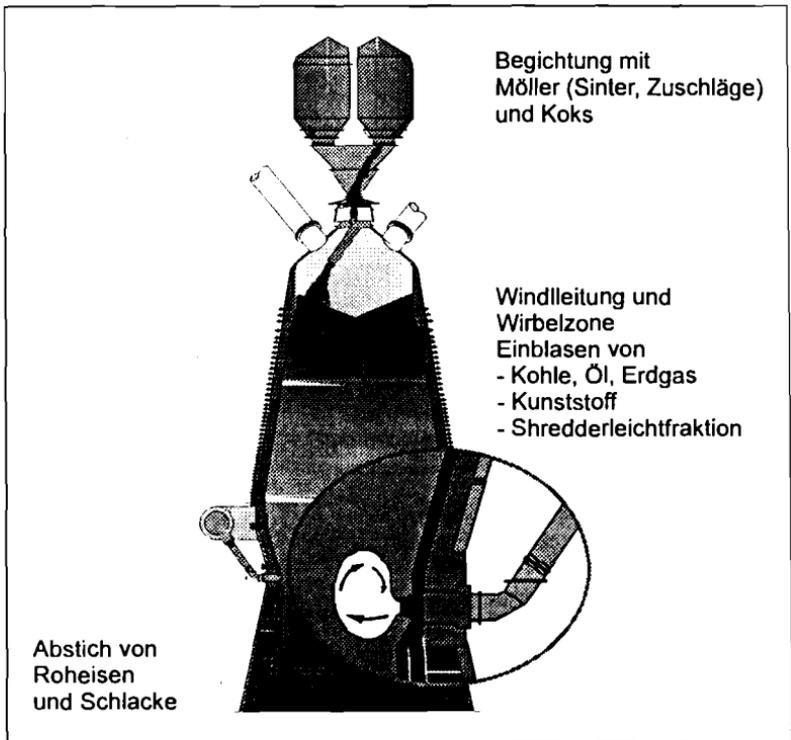


Bild 2: Schematischer Aufbau eines Hochofens

Bild 2 zeigt den schematischen Aufbau eines Hochofens. Möller, bestehend aus Eisenerz (Sinter, Pellets oder Stückerze) und Schlackebildnern, und Koks werden abwechselnd von oben aufgegeben. Eisen und Schlacke werden im unteren Teil des Hochofens abgestochen. Der Wind wird im unteren Bereich des Hochofens durch sogenannte Blasformen in die Wirbelzone eingeblasen. Die meisten Hochofen in Europa arbeiten zusätzlich mit einer Anlage zum Einblasen von Reduktionsmittel in Form von Kohle, Schweröl oder Erdgas in die Wirbelzone. Das Reduktionsmittel wird in der Wirbelzone zu CO und H₂ umgesetzt und reduziert das Eisenerz in der kohäsiven Zone. Die Wirbelzone ist in Bild 2 durch die Lupe hervorgehoben. Zur Simulation der Vorgänge bei der Umsetzung des Reduktionsmittels in der Düsenspitze, der Blasform und im vorderen Teil der Wirbelzone wurde am Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen eine Einblasanlage entwickelt, mit deren Hilfe auf die Qualität des Reduktionsmittels durch die gewonnenen Parameter Umsetzungsgrad und theoretisch mögliche Einblasrate geschlossen werden kann.

2 Die Laboranlage

In Bild 3 ist der schematische Aufbau der Laboranlage mit den entsprechenden Bereichen in der Wirbelzone dargestellt.

Die Anlage besteht aus einem Hochdruck- und einem Niederdruckteil. Der Niederdruckteil ist der Teil zwischen den Magnetventilen M1 und M2; er besteht aus dem Vorwärmofen (simuliert den Winderhitzer bzw. die Windleitung) und dem Induktionsofen (simuliert die Wirbelzone). Das Gas im Hochdruckteil dient zum Transport der zu untersuchenden Proben durch den Reaktionsraum (Induktionsofen) beim gleichzeitigen Öffnen der beiden Magnetventile (Einblaslanze). Die Reaktionsgase werden im Gassammelbehälter aufgefangen und auf CO, CO₂, H₂, CH₄ und O₂ analysiert. Mit Hilfe der eingestellten Drücke und Temperaturen sowie der gemessenen Gaszusammensetzung kann der sog. Umsetzungsgrad des Reduktionsmittels berechnet werden. Der Umsetzungsgrad ist das Verhältnis der Menge an Kohlenstoff, die zu CO oder zu CO₂ reagiert ist, zum Gesamtkohlenstoff. Zur Variation des O/C-Verhältnisses während der Verbrennung werden pro Meßreihe verschiedene Probenmassen eingeblasen.

Aus dem gewonnenen Umsetzungsgrad ist es möglich, die theoretisch mögliche Einblasrate bei einem Umsetzungsgrad von 70 % zu berechnen. Dieser Umsetzungsgrad von 70 % wurde gewählt, da ab diesem Wert von einem störungsfreien Hochofenbetrieb ausgegangen werden kann [4, 5].

Zunächst wurde reines Polyethylen in der Einblasanlage eingesetzt, um grundsätzliche Erfahrungen mit der Aufbereitung und dem Einblasen von Kunststoffen zu sammeln. In weiteren Schritten wurde dann SMC (eine duromere Formmasse), die Kunststofffraktion aus dem Dualen System und Shredderleichtfraktion auf das Umsetzungsverhalten untersucht. In Bild 4 ist beispielhaft die theoretisch mögliche Einblasrate von verschiedenen DSD/Kohle-Mischungen dargestellt.

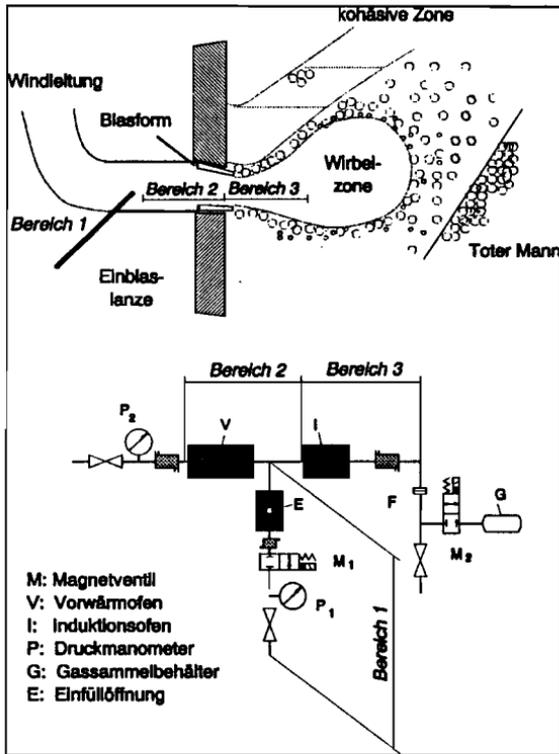


Bild 3: Schematische Darstellung der Wurzelzone und der Laboranlage

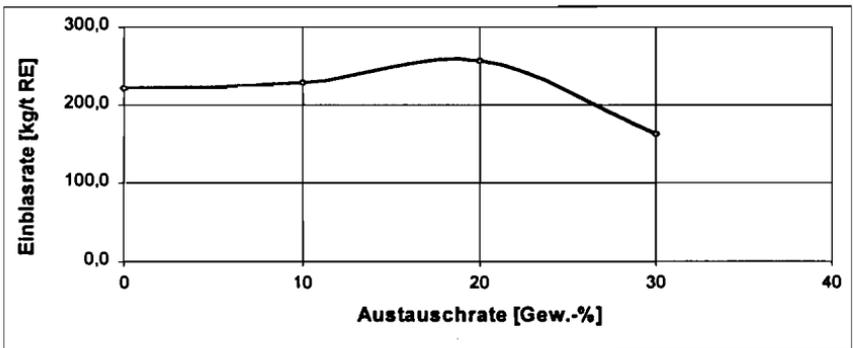


Bild 4: Theoretisch mögliche Einblasrate verschiedener DSD/Kohle-Mischungen

Die DSD-Fraktion unterstützt nach diesen Laborversuchen zunächst die Umsetzung der Mischung. Bei einem hohem Anteil der DSD-Fraktion an der Mischung sinkt der Umsetzungsgrad wieder ab; dieses drückt sich im Verlauf der Einblasrate durch das Maximum bei einer 20 %-igen Kohle/Kunststoff-Mischung aus. Die Ursache hierfür kann der Anteil der flüchtigen Bestandteile der Kohle/Kunststoff-Mischung sein. Bei einer Zunahme des Anteils an flüchtigen Bestandteilen nimmt der Umsetzungsgrad zu. Bei einer weiteren Zunahme an flüchtigen Bestandteilen wird jedoch ein zu großer Teil der eingebrachten Energie zur Dissoziation der Polymerketten verbraucht, wodurch der Umsetzungsgrad sinkt [6, 7].

Der Einsatz von Kunststoffabfällen aus dem DSD wird zur Zeit von einigen Hochofenbetreibern mit Erfolg durchgeführt. Neben der verfahrenstechnischen Machbarkeit konnte gezeigt werden, daß eine Dioxinbildung, die wegen des relativ hohen Eintrags an Chlor befürchtet wurde, aufgrund der hohen Temperaturen im unteren und den reduzierenden Bedingungen im oberen Teil des Hochofens nicht erfolgte [8].

Bei den Laborversuchen mit Shredderleichtfraktion verschlechterte sich der Umsetzungsgrad mit zunehmendem Anteil an Shredderleichtfraktion stetig; zusätzlich stieg der Anteil an inertem Material bei reiner SLF im Gegensatz zu reiner Kohle auf den vierfachen Wert an. Die Berechnungsgrundlage der theoretisch möglichen Einblasrate kann hier wegen des stark abfallenden Kohlenstoffgehaltes der Mischung nicht gehalten werden. Es ist jedoch davon auszugehen, daß die mögliche Einblasrate mit zunehmendem Anteil an SLF wesentlich verringert wird. Ein weiterer begrenzender Faktor beim Einsatz in den Hochofen ist der in der Shredderleichtfraktion enthaltene Kupferanteil, da er nahezu vollständig im Roheisen gelöst und nur mit aufwendigen Verfahren wieder entfernt werden kann. Zusätzlich ist mit verstärkter Ansatzbildung (Anbackungen an der Ofenwand) bei erhöhtem Eintrag an Kreislaufstoffen wie Zink und Alkalien zu rechnen. Durch den Eintrag der Inertstoffe wird bei größeren Einblasmengen die Basizität der Schlacke durch den hohen Glasanteil niedriger (die Schlacke wird saurer), wodurch das Entschwefelungsvermögen abnimmt; dieses muß durch erhöhten Einsatz an Zuschlägen (z. B. Kalkstein) ausgeglichen werden. Bei großtechnischer Anwendung scheint es sinnvoll, die Shredderleichtfraktion weiter aufzubereiten; so könnte z. B. durch den vorherigen Ausbau der Glasscheiben der Inertstoffanteil abgesenkt werden, wodurch auch der Heizwert angehoben wird. Metalle wie z. B. Kupfer oder Zink sollten weitestgehend entfernt werden.

Auch die Shredderleichtfraktion wird von einigen Betreibern z. Zt. in großtechnischen Versuchen in den Hochofen eingeblasen [8, 9, 10, 11].

3 Der Kupolofen

Auch beim Kupolofen handelt es sich um Schmelzaggregat, das nach dem Schachtofenprinzip arbeitet. Im Gegensatz zum Hochofen wird im Kupolofen jedoch nicht Eisenerz reduziert, sondern Stahlschrott eingeschmolzen. Daher beträgt der spezifische Brennstoffbedarf beim Kupolofen nur ca. 125 kg/t GE (GE=Guß Eisen) und ist damit etwa um einen Faktor vier niedriger als im Hochofen: 500 kg/t

RE(RE=Roheisen). Die Beschickung erfolgt über die nach oben offene Gicht und besteht aus Stahlschrott, Kreislaufmaterial aus der Gießerei, Siliziumträgern sowie Zuschlägen (z. B. Kalkstein). Auch in den Kupolofen werden seit geraumer Zeit verschiedene Stäube sowie Kohlenstoffträger mit dem Wind eingeblasen. So wurden vom Institut für Eisenhüttenkunde z. B. Versuche mit Filterstaub, Grobstaub und Kohlenstäuben durchgeführt [6, 12, 13].

Bei dem verwendeten Kupolofen handelt es sich um einen Heißwindkupolofen mit einer Schmelzleistung von ca. 22 t/h. Bild 5 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Ofens mit Nebenaggregaten. Das Ofengas wird am Ofenkopf durch einen dort eingestellten Unterdruck abgesaugt. Eine Dioxinbildung beim Einsatz von chlorhaltigen Kunststoffabfällen ist wegen der durch den Unterdruck angesaugten Falschluff und der dadurch herrschenden oxidierenden Atmosphäre nicht auszuschließen. Das Ofengas wird zusammen mit der durch den Unterdruck angesaugten Falschluff in der Nachbrennkammer überstöchiometrisch verbrannt; das ausgebrannte Abgas gelangt in einen Rekuperator, wird dort auf eine Temperatur von 170 °C gekühlt, gelangt in die beiden Tuchfilter und verläßt den Kamin mit einem Reststaubgehalt von < 30 mg/Nm³.

Um die Eignung von Kunststoffen als Aufkohlungsmittel und/oder Energieträger im Kupolofen zu untersuchen, wurde ein zweistufiges Vorhaben in die Wege geleitet. Innerhalb der ersten Stufe wurden Versuche mit einem chlorfreien Material durchgeführt, um prinzipielle Aussagen über das Förderverhalten, die Aufkohlungseigenschaften und über das Verhalten von Kunststoff als Energieträger im Kupolofen zu erhalten. Bei dem Material handelt es sich um reines Polymethylmethacrylat (PMMA). In der zweiten Stufe wurde Shredderleichtfraktion unter meßtechnischer Begleitung bzgl. der PCDD/F-Emissionen in den Kupolofen eingeblasen.

Das Material wird mit der im Bild 5 dargestellten Einblasanlage in das Koksbett des Heißwindkupolofens eingeblasen. Mit Hilfe der Förderschnecken können verschiedene Arten und Mengen von feinkörnigen Materialien aus ihren Silos bzw. Bunkern in einen Mischer gefördert werden. Das ausgewählte Rezept wird durch die Förderschnecken nacheinander in den Mischer transportiert. Überkorn wird durch ein Sieb herausgefiltert. Am Mischer ist eine Wiegeeinrichtung angebracht, die das aktuelle Gewicht während des Füllvorgangs anzeigt. Ist die eingestellte Menge der betreffenden Sorte im Mischer, wird der Förderprozeß automatisch beendet. Da das Einblasen in den Kupolofen kontinuierlich erfolgen soll, der Mischer jedoch diskontinuierlich arbeitet, wird dem Mischer ein Einblasgefäß nachgeschaltet, das die Materialmischung an die kontinuierlich arbeitende Förderschnecke weitergibt. Mischer und Einblasgefäß arbeiten nach dem Schleusenprinzip. Die Materialmischung gelangt über eine weitere Förderschnecke in den Drehverteiler, der das Gemisch auf die Druckluftleitungen zu den sechs Düsen des Kupolofens verteilt. Die gewünschte Einblasmenge pro Zeit läßt sich über die Drehzahl des Schneckenmotors regeln. Die eingestellte Drehzahl und das Füllgewicht des Einblasgefäßes können über den Prozeßleitnehmer im Kupolofenleitstand überwacht werden.

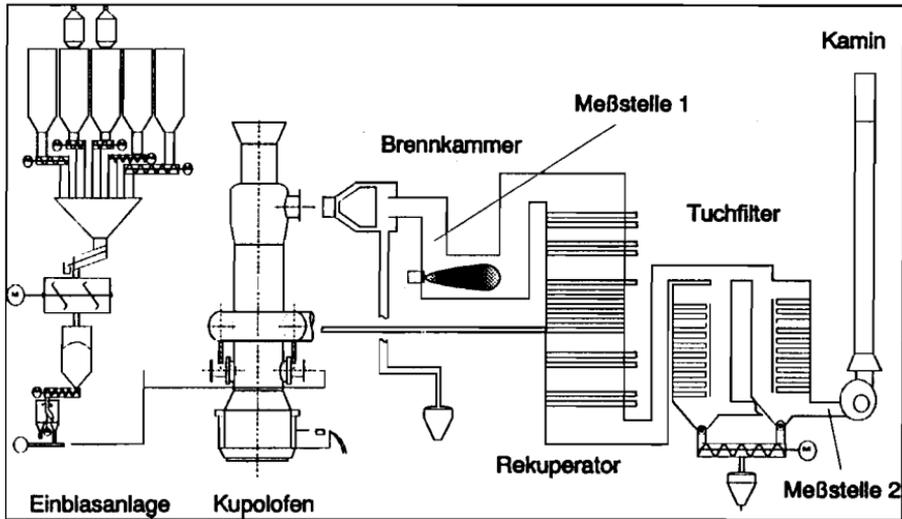


Bild 5: Schematische Darstellung eines Kupulofens samt Nebenaggregaten

Insgesamt wurden ca. 2,5 t PMMA in reiner Form oder als Mischung mit Filterstaub eingeblasen. Zu Beginn des Einblasens wurden in ca. 5 min.-Abständen Proben des Rinneneisens gezogen und mit Hilfe eines Spektrometers unter anderem auf den Kohlenstoff- und den Siliziumgehalt, analysiert. Während der gesamten Einblaszeit konnte bei dieser Versuchsreihe keine unterstützende Wirkung auf das Aufkohlungsverhalten des Gußeisens festgestellt werden. Bild 6 zeigt den Verlauf der Verbrennungsluftmenge beim Einblasen von PMMA.

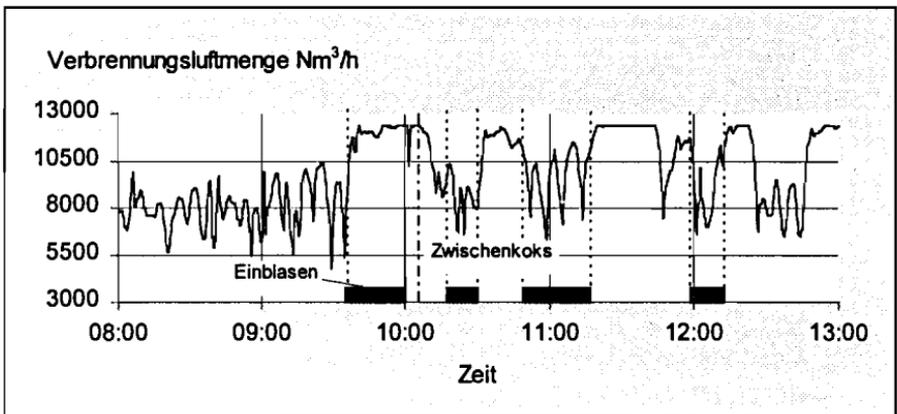


Bild 6: Verlauf der Verbrennungsluftmenge beim Einblasen von PMMA [7]

Mit einer Zeitverzögerung von 20-30 min. nach Einblasbeginn steigt die Verbrennungsluftmenge von 8.000-9.000 Nm³/h auf einen Wert von 12.000 Nm³/h an; nach Einblasende spielt sich die Abnahme dieses Wertes mit der gleichen Zeitverzögerung ab. Durch das Einblasen von PMMA wurde demnach ein energiereicheres Gas erzeugt, das in einer nachgeschalteten Brennkammer z. B. zur Vorwärmung des Windes, zu Heizzwecken aber auch bei einer entsprechenden Anlagenperipherie zur Stromerzeugung genutzt werden kann [7].

In der zweiten Versuchsreihe wurden an zwei Versuchstagen ca. 1,8 t Shredderleichtfraktion in das Koksbett eingeblasen. An beiden Tagen wurde rund 6 h mit einer Einblasrate von 150 kg/h zur Ermittlung der Dioxin/Furan-Emissionen eingeblasen. Die Meßstellen im Roh- und Reingas sind in Bild 5 gekennzeichnet. Die meßtechnische Begleitung wurde vom Landesumweltamt NRW durchgeführt. Die Aufbereitung des Materials erfolgte nach einem neuartigen Verfahren, das von der Thyssen Henschel GmbH zusammen der Metall Rohstoffe Thüringen GmbH (MRT) entwickelt wurde. Die Bilder 7 und 8 stellen das Verfahren im Detail dar [14].

Die SLF wird auf ein Sieb mit einer Maschenweite von 10 mm aufgegeben (vergl. Bild 7); Überkorn wird in einer Stabrohmühle zerkleinert und durchläuft einen Windsichter, der die Schwerteile (Metall) vom Leichtgut trennt. Das Leichtgut wird erneut auf das Sieb geführt. Die Fraktion < 10 mm gelangt über einen weiteren Windsichter (Abtrennung von kleineren Metall- und Inerteilen) in einen Bunker. Die Zwischenlagerung im Bunker ist notwendig, da der nachfolgende Prozeß diskontinuierlich abläuft.

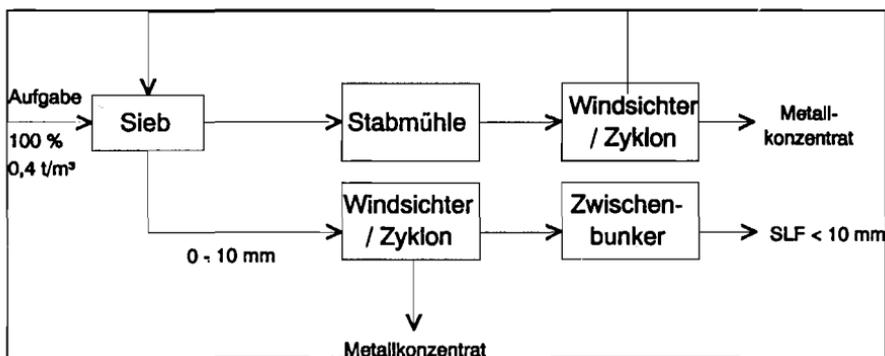


Bild 7: Aufbereitung der SLF - Zerkleinern und Klassieren

Bild 8 zeigt die Verfahrensschritte Agglomeration, Siebung und Trennung. Vom Bunker wird das Material zyklisch auch unter Zugabe von Kunststoffteilchen (DSD-Folie) in einen Heizmischer aufgegeben und dort verfahrensabhängig auf 130 - 160 °C erhitzt. Die enthaltenden Kunststoffe schmelzen, und es entsteht ein Agglomerat, das im nachfolgenden Kühlmischer abgekühlt wird. Entscheidend bei diesem Prozeß ist das Verhalten der Metalle: während alle anderen Materialien in das Agglomerat

eingebunden werden, bleiben die Metalle weitgehend ungebunden und können abgetrennt werden.

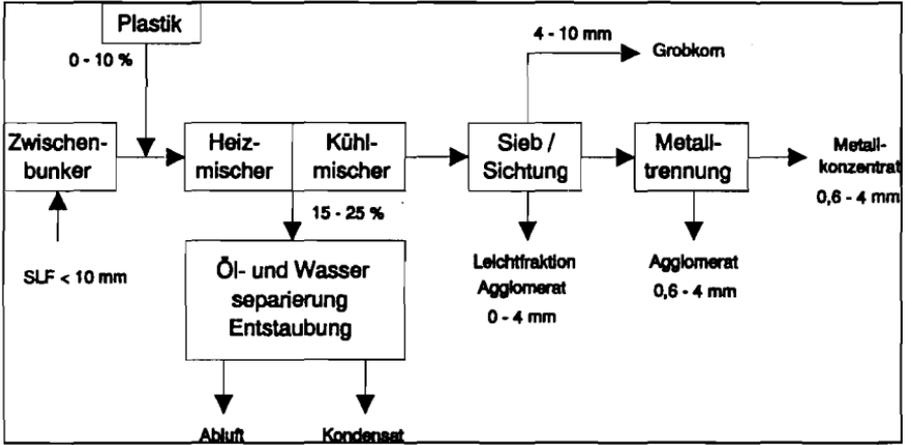


Bild 8: Aufbereitung der SLF - Agglomeration und Metalltrennung

Während der beiden Versuchstage konnten keine gravierenden Auswirkungen auf das Aufkohlungsverhaltens des Gußeisen gemessen werden. Beim Kupfergehalt im Gußeisen ließ sich keine negative Beeinflussung durch die eingeblasenen Mengen feststellen.

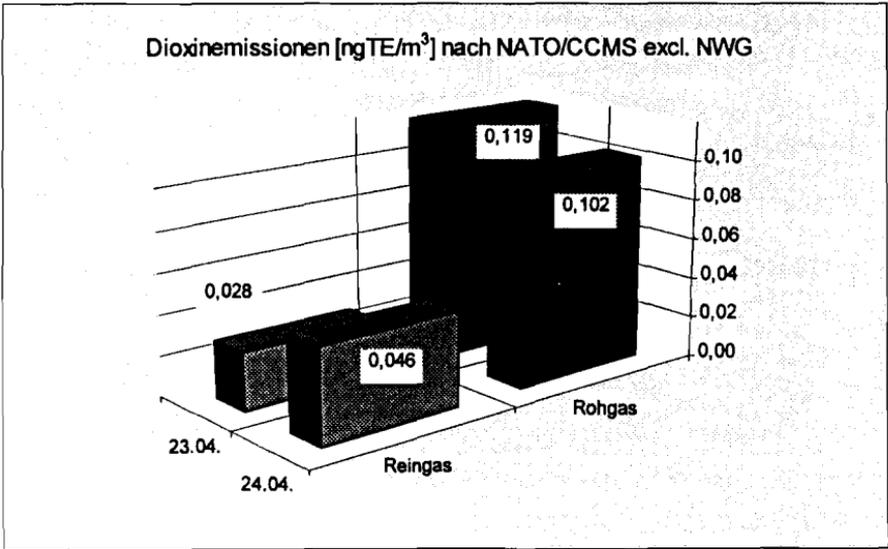


Bild 9: Dioxinmissionen beim Einsatz von SLF im Roh- und Reingas

Die Dioxinmissionen lagen im Reingas unterhalb von $0,1 \text{ ngTE/m}^3$, dem Grenzwert für Müllverbrennungsanlagen nach der 17. BilSchV. Wegen der oxidierenden Atmosphäre am Ofenkopf, die eine verstärkte Dioxinmissionen erwarten läßt, wurden im Rohgas weitaus höhere Dioxingehalte ermittelt, die sich im Bereich von $0,1 \text{ ngTE/m}^3$ befinden. Ein großer Teil der Dioxine konnte demnach in der nachgeschalteten Brennkammer bzw. im Tuchfilter mit dem Filterstaub abgeschieden werden [7].

4 Zusammenfassung

Eine Verwertung geshreddeter Kunststoffabfälle im Hochofen und Kupolofen ist grundsätzlich möglich. In der Laboranlage konnte nachgewiesen werden, daß durch das Einblasen von Kunststoff/Kohle-Mischungen in den Hochofen die Einblasrate durch eine Verbesserung des Umsetzungsgrades erhöht und dadurch noch mehr Koks substituiert werden kann. Die Auswirkungen auf den Prozeß, insbesondere beim Einsatz großer Mengen Shredderleichtfraktion, müssen weiter untersucht werden. Bei erhöhtem Eintrag an Kreislaufstoffen und Asche ist mit einer Erhöhung des Koksverbrauches zu rechnen; ein Einfluß auf die Roheisenqualität ist nicht auszuschließen. Im Kupolofen kann bei einer abgestimmten Prozeßauslegung ein Teil des Kokses durch das Einblasen von Kunststoffabfällen ersetzt werden. Zusätzlich wird ein energiereiches Gichtgas erzeugt, das in einer Nachbrennkammer genutzt werden kann. Weiterhin ermöglicht der Einsatz von kohlenstoffhaltigen Abfällen im Kupolofen eine dezentrale Verwertung ohne aufwendige Aufbereitung und große Transportwege. Die Messungen bzgl. der Dioxin- und Schwermetallemissionen zeigten bei den verwendeten Einblasraten keine Veränderungen gegenüber dem „Nur-Koks-Betrieb“. Im Rohgas lagen die Dioxinmissionen in der Größenordnung $0,1 \text{ ngTE/Nm}^3$. Mit Hilfe der Gasaufbereitung konnte an beiden Versuchstagen mehr als die Hälfte der Dioxine und Furane zerstört bzw. abgeschieden werden.

Literatur

- [1] N. N. "Kunststoff-Recycling, Themensammlung rund um das Recycling", Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling mbH (DKR)
- [2] N.N. "Wie geht das? - Altautoverwertung", Hrsg.: Bundesverband für Sekundärrohstoffe und Entsorgung
- [3] Gudenau, H. W. "Untersuchungen zum Einsatz von geshredderten Kunststoffreststoffen als Reduktionsmittel und/oder Energieträger in Schmelzaggagaten der Stahlindustrie", Antrag auf Forschungsförderung an das MURL NRW vom 01.07.1993
- [4] Rudack, M. "Einblasen von Kohle mit Zuschlagstoffen in den Hochofen", Dissertation, RWTH Aachen, 1994

- [5] **Joksch; M.
Langner; K.
Peters, M.
Rudack, M.** "Optimisation of coal injection by flow and process related improvements of the injection lances", 123. general meetings of the blast furnace committee, VDEh 10.03.1993, Düsseldorf
- [6] **Gudenau; H. W.
Rachner, J.
Rudack, M.
Schwanekamp, G.** "Recycling von Kunststoffreststoffen im Hochofen und Kupolofen", Vortrag bei den 5. Aachener Umwelttagen am 9. und 10. November 1995
- [7] **Schwanekamp, G.** "Einsatz von geshredderten Kunststoffreststoffen im Hochofen und Kupolofen", Dissertation, RWTH Aachen, demnächst
- [8] **Janz, J.** "Kunststoffverwertung im Hochofen - Ein Beitrag zum ökologischen und ökonomischen Recycling von Altkunststoffen", DGMK-Fachbereichstagung: Energetische und stoffliche Nutzung von Abfällen und nachwachsenden Rohstoffen, 22.-24.04. 1996 in Velen/Westfalen
- [9] **Gudenau; H. W.
Hunger, J.
Krüger; W.
Kiesler; R.
Rudack, M.** "Entwicklungsergebnisse zum Verbrennungsverhalten von festen Zusatzbrennstoffen in Versuchsanlagen der Eisenhütteninstitute Aachen und Freiberg", XLIII. Berg- und Hüttenmännischer Tag, Bergakademie Freiberg, Kolloquium am 3.07.1992
- [10] **Hunger, J.** "Einsatz von Brenn- und Reststoffen über die Windformen des Hochofens", Dissertation, TU-Freiberg, demnächst
- [11] **Letzel, D.** "Kinetik der Verbrennung von Kohlenstäuben und von Reststoffen beim Einblasen über die Windformen des Hochofens", Dissertation, TU-Freiberg, demnächst
- [12] **Buchwalder, J.
Feist; W.
Hunger; J.
Janke; D.
Kalinowski, W.
Krüger; W.
Letzel; D.
Osing, D.** "Verwertung ölhaltiger Walzunderschlämme und der Shredderleichtfraktion von Altautos in Hochöfen", Vortrag zum Seminar „Recycling in der Stahlindustrie“ der United Nations Commission for Europe, Düsseldorf (Germany), 24.-27. April 1995
- [13] **Gudenau; H. W.
Rachner, J.-G.** "Hot metal production in a cupola Furnace", Journal of University of Science and Technology Beijing, Vol. 15, 1993, Proceedings of the 1st Academic Conference of RWTH Aachen and USTB Beijing

- [14] **Rachner, J.-G.** "Einblasen von feinkörnigen Feststoffe in den Kupolofen", Dissertation, RWTH Aachen, 1995
- [15] **Kruse
Schwarz (Thyssen
Henschel GmbH)** "Aufbereitung der Shredderleichtfraktion", persönliche Mitteilung vom 13.11.1996

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. H. W. Gudenau
Dipl.-Ing. G. Schwanekamp
Institut für Eisenhüttenkunde, RWTH
Inzestr. 1
52072 Aachen

7. Schmelzen von Reststoffen und Schlacken zur Inertisierung und gleichzeitigen Wertstoffrückgewinnung

U. Meurer, K. Krone, J. Krüger, Aachen

1 Einleitung

Der Trend, die Anforderungen an die Emissionen zu verschärfen, wird sowohl in den technischen Anleitungen Abfall und Siedlungsabfall, als auch durch die Verordnungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes weitergeführt. Dabei steht besonders eine weitgehende umweltverträgliche Verwertung und Nutzung von Reststoffen vor deren Ablagerung im Vordergrund.

Am Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie (IME) ist die stoffliche Verwertung durch Schmelzen von Reststoffen und Schlacken zur Inertisierung und gleichzeitigen Wertstoffrückgewinnung ein zentrales Thema. In diesem Zusammenhang sollen die wesentlichen Arbeiten vorgestellt werden.

Tabelle 1: Übersicht der Arbeitsgebiete

Verfasser	Jahr	Thema
J. Höfler	1988	Reduktion NE-metallhaltiger Schlacken im Elektroofen
K.J. Richter	1992	Verarbeitung von Eisenfällprodukten der hydro-metallurgischen Zinkgewinnung
H.S. Park	1992	Verarbeitung von V-Cr-haltigen Reststoffen unter Ausnutzung von Synergismuseffekten
K. Jiang	1994	Aufbereitung von speziellen Cr- und Ti-Schlacken zur Wertstoffrückgewinnung
G. Grund	1995	Verarbeitung metallhaltiger Stäube im Elektroofen bei Chargierung durch eine Hohlelektrode
U. Meurer	1997	Aufarbeitung von Wälzschlacken und Müllrostaaschen durch Schmelzen im Elektrolichtbogenofen

Der Schwerpunkt der Arbeiten hat sich in den letzten Jahren von den typisch metallurgischen Einsatzstoffen zu der Behandlung von Reststoffen bzw. Abfällen verschoben.

2 Beschreibung der Versuchsanlage

Die Arbeiten sind nach Vorversuchen in einem Lichtbogenofen im Pilotmaßstab durchgeführt worden. Die Pilotanlage, die im IME installiert ist, zeigt Bild 1.

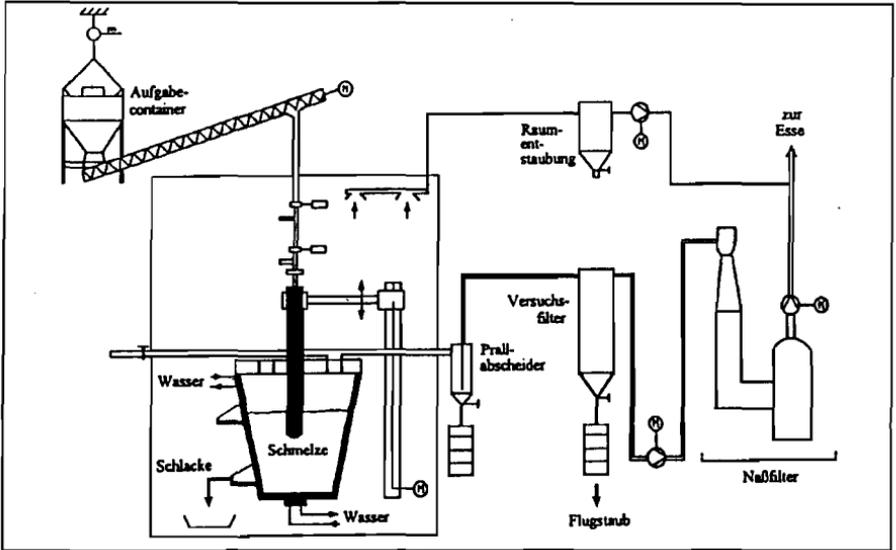


Bild 1: Pilotanlage des Elektroofens im Institut für Metallhüttenwesen der RWTH

Die Chargierung kann wahlweise konventionell durch den Deckel und/oder durch eine Hohlelektrode erfolgen. Der Lichtbogenofen kann sowohl im Gleichstrom- (max. 5234 A / max. 94 V) als auch im Wechselstrombetrieb (max. 4290 A / max. 110 V) bei einer Leistung von ca. 450 kW mit anodisch oder kathodisch geschalteter wassergekühlter Bodenelektrode, Bauart Mannesmann Demag Hüttentechnik, Duisburg betrieben werden. Das mit einer Doppelmantelkühlung ausgestattete Ofengefäß hat ein Fassungsvermögen von ca. 500 kg Schlacke.

Das Aufgabematerial befindet sich bei Verwendung des Hohlelektrodensystems (HES) zusammen mit den notwendigen Zuschlagsstoffen in einem geschlossenen Aufgabecontainer. Das Gewicht dieser Einheit wird ständig über eine Kranwaage ermittelt. Die kontinuierliche Chargierung des Aufgabegutes durch eine in ihrer Drehzahl regelbare Schnecke erfolgt staubfrei durch das HES direkt in die Schmelze.

Das Prozeßgas wird durch die Deckelöffnung abgesaugt, nachverbrannt, gequenscht und einer Mischkammer zugeführt. Der Sekundärflugstaub wird in einem Einkammer-Pulsjet-Taschenfilter aus dem Rohgas getrennt und in Spannringfässern unterhalb des Versuchsfilters gesammelt. Das entstaubte Reingas wird in einer alkalisch betriebenen Venturiwaschanlage mit ca. 800 l Fassungsvermögen nachgereinigt und der Esse zugeleitet. Die eigentliche Ofenanlage ist zusätzlich vollständig eingehaust und wird ebenfalls kontinuierlich abgesaugt. Die Abluft dieser Ofenraumentstaubung wird einer gesonderten Filteranlage zugeführt.

Die Pilotanlage ist mit entsprechenden Meß- und Registriereinrichtungen zur Prozeßsteuerung und -überwachung ausgerüstet, so daß alle relevanten Daten gesammelt und ausgewertet werden können.

3 Beschreibung der Arbeitsgebiete

Im folgenden Kapitel werden die in Tabelle 1 aufgeführten Arbeiten kurz vorgestellt.

3.1 Reduktion NE - metallhaltiger Schlacken im Elektroofen

Bei der Reduktion NE-metallhaltiger Schlacken lag ein besonderer Schwerpunkt auf dem kinetischen Aspekt der Metallabreicherung. Dabei wird dargelegt, welchen Einfluß die Badzirkulation, die im wesentlichen durch den Elektrodenabbrand (Gasrührung) hervorgerufen wird, auf die Entfernung flüchtiger Komponenten und das Absetzverhalten von suspendierten Metalltröpfchen hat.

Zur Inertisierung von NE-Metallschlacken und der Metallrückgewinnung wurden vier unterschiedliche Schlackentypen eingesetzt.

Tabelle 2: Gehalte der Einsatzschlacken zum Armschmelzen

Einsatzschlacken	Cu	Pb	Zn	Sn	Ag	Cr
	%	%	%	%	ppm	%
Sekundärkupfer	1,3	0,7	8,6	0,3		
edelmetallhaltig	1,1	2,3	1,3	1,0	1200	
Zinn	0,8	1,6	5,1	1,3		
Chrom						6,2

Die in dieser Tabelle hervorgehobenen Gehalte zeigen die kritischen Werte an. So zeichnen sich die Schlacken durch Cu-Gehalte bis zu 1,3%, Pb-Gehalte bis zu 2,3%, Zn-Gehalte bis zu 8,6% sowie Sn-Gehalte bis zu 1,3% aus. Die edelmetallhaltige Schlacke weist Ag-Gehalte von 1200 ppm auf. Die Cr-Gehalte in der Chromschlacke liegen bei 6,2%.

Unter Zusatz von Reduktionsmitteln gelingt es unter optimierten Bedingungen, die NE-Metallinhalte auf geringe Gehalte abzusenken.

Tabelle 3: Gehalte der Endschlacken

Endschlacken	Cu	Pb	Zn	Sn	Ag	Cr
	%	%	%	%	ppm	%
Sekundärkupfer	0,5	0,1	1,3	0,3		
edelmetallhaltig	0,2	0,3	0,3		50	
Zinn	0,2	0,1	0,1	0,1		
Chrom						1,2 1,5

Art	Zusatz
	%
Koks	2-3
Koks	2-3
- *	- *
Koks	3,4
Si	3,7

* 12% C in der Einsatzschlacke

Bei einem 2-3 prozentigen Koksbeimengungsanteil konnten die Cu-, Pb-, Zn- und Sn- Gehalte auf kleiner gleich 0,3% gesenkt werden. Lediglich der Cu - Gehalt mit 0,5% und der Zn-Gehalt mit 1,3% liegt etwas höher. Der Ag-Gehalt in der edelmetallhaltigen Schlacke konnte um über 95% auf 50 ppm gesenkt werden. Beim Armschmelzen der Chromschlacken konnten beim Einsatz von Koks bzw. Si Cr-Gehalte von weniger als 1,5% erreicht werden. Die Schlacken können als inert bezeichnet werden. Die Wertstoffe reichern sich in einer Metall- oder Flugstaubphase an und können weiter aufgearbeitet werden.

3.2 Verarbeitung von Eisenfällprodukten der hydrometallurgischen Zinkgewinnung

Die Eisenabtrennung bei der hydrometallurgischen Zinkgewinnung kann als Jarosit, Goethit oder Hämatit erfolgen. Hämatit kann weiterverarbeitet werden, Goethit und Jarosit werden deponiert. Die Technologie des Jarosit- und Goethitverfahrens ist gegenüber dem Hämatitverfahren bedeutend einfacher. Der Vergleich der Eisenfällprodukte der hydrometallurgischen Zinkgewinnung zeigt, daß Jarosit mit Abstand das schlechteste zu deponierende Fällprodukt darstellt. Dies liegt vor allem an den hohen Schwefel- und Arsen- Gehalten.

Bild 2 gibt einen Überblick über die untersuchten Aufbereitungsverfahren.

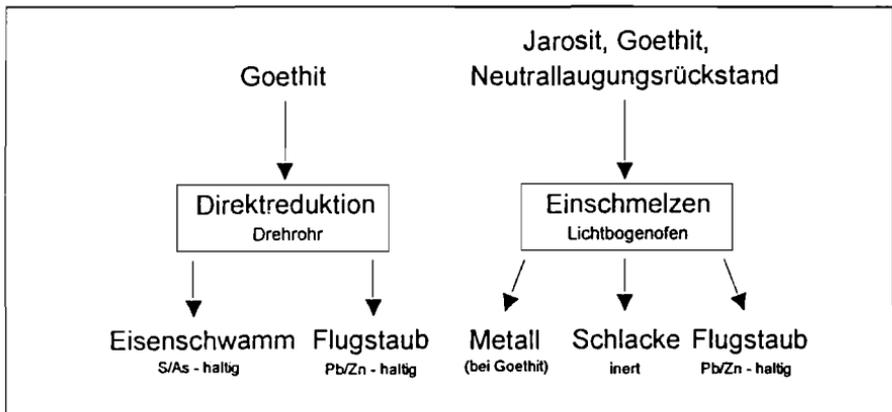


Bild 2: Darstellung der untersuchten Aufbereitungsverfahren

Ziel der Versuche war es, Jarosit in einem einstufigen Prozeß auf eine absetzbare Schlacke und einen angereicherten Flugstaub zu verarbeiten. Daneben wurden im Hinblick auf Veränderungen der Eisenabtrennung ebenfalls Schlackenschmelzversuche mit Neutrallaugungsrückstand und Goethit durchgeführt. Mit Goethit sollte aufgrund des höheren Eisengehaltes zusätzlich eine Fe-reiche Metallphase erschmolzen werden. Daneben wurden mit Goethit Versuche zur Direktreduktion im Drehrohrofen durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Darstellung der Ergebnisse

Verfahren	Reststoffe	Produkte
Direktreduktion Drehrohr	Goethit (FeOOH)	Eisenschwamm (hohe S / As - Gehalte)
Schlackenschmelze E-Ofen	Jarosit (Alkali ₂ Fe ₈ (SO ₄) ₄ (OH) ₁₂) Goethit (FeOOH) Neutrallaugungsrückstand	Pb/Zn - haltiger Flugstaub nutzbare inerte Schlacke

Die Versuche der Direktreduktion mit Goethit zeigen, daß nur ein minderwertiger Eisenschwamm erzeugt werden kann. Diese Tatsache wird im wesentlichen durch das Verhalten des Schwefels beeinflusst, der als Metallsulfid zum Großteil im Eisenschwamm verbleibt. Die Qualität des Produktes entspricht eher den Produkten der industriell betriebenen Drehrohröfen zur Aufarbeitung von Reststoffen. Ebenso kritisch ist die Entschwefelung des Abgases mit SO₂-Gehalten von 0,5%. Sie ist aufwendig und teuer. Eine Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist nicht erkennbar.

Die Ergebnisse der Schmelzversuche sind erfolversprechender. Als Produkte des Schmelzprozesses werden eine Schlacke und ein hoch blei- und zinkhaltiger Flugstaub erzeugt. Unter stark reduzierenden Bedingungen und bei höheren Temperaturen wird außerdem eine reduzierte Phase erschmolzen. Bei der Bildung einer reduzierten Phase kommt es zu einer Verzettelung von Arsen und Schwefel zwischen der Metall- bzw. Steinphase und dem Flugstaub bzw. Abgas. Aufgrund der hohen Schwefel- und Arsengehalte ist eine Verwendungsmöglichkeit dieser reduzierten Phase problematisch. Demzufolge sollte die Bildung reduzierter Phasen bei der schmelzmetallurgischen Aufarbeitung vermieden werden.

Zusammenfassend ist zu sagen, daß die Schlackenschmelze von Jarosit noch die beste Möglichkeit darstellt, Rückstände der hydrometallurgischen Zinkgewinnung aufzuarbeiten. Bei Einstellung der geeigneten Parameter werden ein absatzfähiger hoch Pb/Zn-haltiger Flugstaub und eine nutzbare inerte Schlacke erschmolzen. Die Aufarbeitung von Goethit im Drehrohrföfen stellt keine Alternative dar, da die S/As-Gehalte im Eisenschwamm zu hoch sind.

Die Eisenabtrennung im Neutrallaugungsrückstand mit anschließender pyrometallurgischer Aufarbeitung kann trotz der zu erwartenden Nachteile, wie teilweise Steinbildung im Zuge der strengeren Gesetzgebung in Zukunft wieder interessant werden.

3.3 Verarbeitung von V-Cr-haltigen Reststoffen unter Ausnutzung von Synergieeffekten

Für die Aufarbeitung V-Cr-haltiger Schlacken wurde eine LD-Schlacke der Stahlherstellung und ein Laugungsrückstand der V₂O₅-Herstellung eingesetzt.

Tabelle 5: Gehalte der V-Cr-haltigen Einsatzstoffe

Einsatzstoffe	LD - Schlacke	Laugungsrückstand
FeO/Fe ₂ O ₃	32,4	41,3
MnO	2,4	4,3
Cr ₂ O ₃	0,3	3,9
V ₂ O ₅	2,4	2,8
Na ₂ O	-	5,7
CaO	50	3,5
SiO ₂	8,2	17,4

Die beiden Einsatzstoffe sind hinsichtlich der Elemente Fe, Mn und den Ferrolegierungselementen ähnlich aufgebaut. Höhere wechselnde Gehalte sind vor allem bei CaO und SiO₂ zu sehen.

Als Ziel der Aufbereitung dieser Reststoffe wird eine Reduktion zur Bildung einer Metallphase (Stahl) angestrebt, die dann Fe, Mn, Cr, V und P enthalten soll. Alkalien sollen verflüchtigt und in einem Sekundärflugstaub angereichert werden. Aus dem erzeugten Metall (Stahl) läßt sich durch vorsichtige Oxidation eine an V und Cr angereicherte Schlacke erzeugen, aus der diese Elemente nach herkömmlicher Technik gewonnen werden. Ein ebenfalls wichtiges Ziel ist die Produktion einer Inertschlacke, die der Zementindustrie bzw. dem Straßenbau zugeführt werden soll.

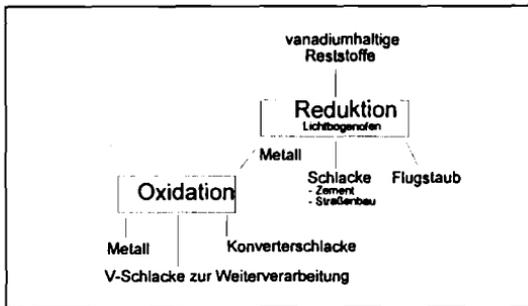


Bild 3: Aufarbeitungsschema zur Schmelz-Reduktion vanadiumhaltiger Schlacken

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Untersuchungen ergaben, daß der Reduktionsgrad bei einer Basizität von 1,2 am günstigsten ist. Durch Zugabe von SiO₂ zur LD-Schlacke bzw. Zugabe von CaO zum Laugungsrückstand wurde die Basizität von 1,2 eingestellt. Ebenso wurden die beiden Reststoffe entsprechend dem Verhältnis zur Basizitätsbildung von 1,2 gemischt. Die Ergebnisse zeigen deutlich, daß durch den Synergieeffekt der Mischung

der Reduktionsgrad von V und Cr auf über 92-95% gesteigert werden konnte und somit deutlich höher ist als bei der Verarbeitung der Einzelreststoffe.

Tabelle 6: Darstellung der Synergieeffekte anhand des Reduktionsgrades

Einsatzmaterial			LD/SiO ₂	LR/CaO	LD/LR
Basizität			1,2	1,2	1,2
Reduktionsgrad	[%]	V	87,3	79,9	94,8
	[%]	Cr	71,6	87,4	92,3
	[%]	Fe	95,7	98	98,2

3.4 Aufbereitung von speziellen Cr- und Ti-Schlacken zur Wertstoffrückgewinnung

Bei dieser Arbeit wurden Untersuchungen an einer Chromzerfallsschlacke und einer Titanschlacke mit dem Ziel durchgeführt, die Wertkomponenten Cr und Ti zu gewinnen. An dieser Stelle sollen nur die Ergebnisse der Chromzerfallsschlacke diskutiert werden.

Die Schlacke enthält hohe Gehalte an Dicalciumsilikaten (39-55% CaO, 20-30% SiO₂) und noch bis 6% Cr₂O₃. Zur Aufbereitung der Chromzerfallsschlacke, d.h. zur Entchromung, wurden verschiedene Methoden, wie

- Armschmelzen im Lichtbogenofen
- direkte physikalische Aufbereitung
- Beeinflussung der Zerfallsneigung durch langsames Abkühlen und Zusätze

untersucht.

Das Armschmelzen im Elektroofen ist zu kostenintensiv. Bei der physikalischen Aufbereitung durch Klassieren, Dichtesortierung, Flotation findet nur eine ungenügende Anreicherung statt. Bei der Beeinflussung der Zerfallsneigung durch Abkühlen und Zusätze bilden sich unterschiedliche Phasen aus.

In Tabelle 7 sind die 4 Phasen aufgelistet. Es ist eine Metallphase mit 2-3 Gew.-%, ein Spinell mit 10-13 Gew.-%, eine Glasphase mit 80 Gew.-% und eine MgO-Phase mit 7-8 Gew.-%. Das Cr befindet sich bevorzugt in der Metall- und Spinellphase. Nach langsamer Abkühlung ändert sich die Korngrößen- und Cr-Verteilung in der Zerfallsschlacke. Cr neigt dazu, sich in der größeren Fraktion anzureichern. Zusätze von MgO und Al₂O₃ bewirken eine Cr-Anreicherung in der größten Fraktion (>0,071 mm). Die Bildung von Spinell MgO (Al₂O₃, Cr₂O₃) und der Abbau von magnesiumhaltigen Silikat ist zur Erklärung der Ergebnisse herangezogen worden. Bei einem Zusatz von 10% Al₂O₃ und 5% MgO und einer Abkühlungsgeschwindigkeit von 50°/h im Temperaturbereich von 1450 - 1200°C erreicht die größte Fraktion

(>0,071 mm) einen Cr-Anteil von ca. 70%, wobei diese Fraktion nur 10 - 15 Gew. - % der Schlacke ausmacht.

Tabelle 7: Darstellung der unterschiedlichen Phasen bei langsamer Abkühlung einer Zerfallsschlacke

Phasen			Ergebnis
2-3	%	Metall	Cr - Anreicherung größte Fraktion (>0,071mm) 10-15 Gew-% @ 70% Cr-Anteil
10-13	%	Spinell (MgO (Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃))	
80	%	Glas	
7-8	%	MgO	

3.5 Verarbeitung metallhaltiger Stäube im Elektroofen bei Chargierung durch eine Hohlelektrode

Für der Verarbeitung metallhaltiger Stäube wurden Flugstäube einer Müllverbrennungsanlage, Stahlwerksflugstaub und Goethit eingesetzt. Dabei stand die Chargierung der feinkörnigen Ausgangsmaterialien ohne vorherige Agglomeration in die flüssige Schmelze im Vordergrund. Mit dieser Chargiermethode sollte im E-Ofen eine verwertbare inerte Schlacke und hochwertiger Pb/Zn-haltiger Flugstaub erzeugt werden.

Deutliche Unterschiede sind beim Fe-Gehalt mit 30 - 40%, beim Goethit bzw. EAF - Staub und mit 3,1% beim MVA - Staub zu sehen. Der Zn-Gehalt von 17,6% ist beim EAF sehr hoch. Ebenfalls hoch ist der Schwefelgehalt mit 3,6% beim Goethit.

Tabelle 8: Gehalte der feinkörnigen Einsatzstoffe

Einsatzstoffe		MVA	Goethit	EAF
Fe	%	3,1	40	30
Zn	%	3,1	7,3	17,6
Pb	%	0,8	2,0	1,8
Na	%	1,6	0,1	1,1
K	%	2,1	-	0,8
S	%	2,7	3,6	0,7
SiO ₂	%	27,5	5,4	3,9

Für den Einsatz des Elektroofens zur Verarbeitung dieser Reststoffe ist der in Bild 4 dargestellte Verfahrensablauf angewandt worden.

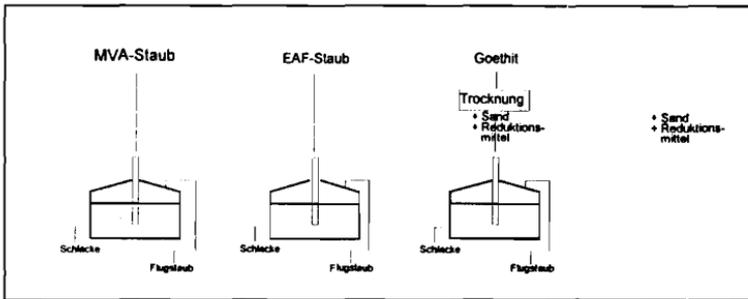


Bild 4: Schema der Versuchsdurchführung

MVA-Flugstaub wird ohne weitere Zuschläge chargiert. EAF-Staub und Goethit (nach Trocknung) werden unter Zugabe von Sand und Reduktionsmittel aufgegeben. Die Zugabe weiterer Schlackenbildner ist nicht erforderlich.

Bei der Aufarbeitung aller Materialien entsteht eine inerte Schlacke und ein Pb/Zn -haltiger Sekundärflugstaub. Beim Goethit muß damit gerechnet werden, daß zusätzlich eine reduzierte Phase erschmolzen wird.

Tabelle 9: Verteilung der Elemente auf die Produkte

Verteilung		Metall (nur Goethit)	Schlacke	Flugstaub	Abgas
Fe	%	(30-90)	>90 *	<5	
Zn	%		<5 **	70-100	
Pb	%		<15	>80	
Na	%		>50	<50	
K	%		>30	<70	
S / SO ₂	%	(70)	> 30 ***	>10	>50
SiO ₂	%		>95	<5	

* <60 Goe

** <30 EAF

*** <10 MVA

Wenn keine Metallphase erschmolzen wird, gehen das Fe und die Schlackenbildner wie z.B. SiO₂ zu über 90% in die Schlacke. Zn und Pb reichern sich im Flugstaub an. Na und K verteilen sich zu etwa gleichen Teilen zwischen Schlacke und Flugstaub. S geht zu über 50% als SO₂ in das Abgas. Bei der Bildung einer Metallphase werden bis zu 90% des Fe reduziert und der Schwefel geht überwiegend als Sulfid in die reduzierte Phase.

3.6 Aufarbeitung von Wälzschlacken und Müllrostaschen durch Schmelzen im Elektrolichtbogenofen

Ein laufendes Projekt ist die Aufarbeitung von Wälzschlacken und Rostaschen durch Schmelzen im Elektro-Lichtbogenofen. Diese Materialien sind nicht ausreagiert, da sie nicht schmelzmetallurgisch behandelt worden sind. Restgehalte an Cu, Cr, Zn und Pb sowie gewisse Anteile an Alkalien und hohe Restkohlenstoffgehalte sind in Wälzschlacken und Müllrostaschen enthalten. Der Einsatz von Müllverbrennungsschlacken im Straßen- und Wegebau wird - selbst bei Einhaltung der Vorschriften und Merkblätter- unter Hinweis auf ökologische oder materialeitige Langzeitfolgen kritisiert. So ist die fehlende Akzeptanz für solche Rückstände verständlich. Ein Zitat einer Mediziner-Tagung aus einem aktuellen Artikel der Frankfurter Rundschau vom 21.10.96 soll diese Aussage unterstreichen: „Überdies enthalte auch die Schlacke hohe Giftgaskonzentrationen. Durch die Verarbeitung im Straßenbau würden auch diese Schadstoffe in die Umwelt und letztlich auch in den menschlichen Körper gelangen.“

Um Wälzschlacken und Rostaschen so aufzuarbeiten, daß verwendungsfähige Inertstoffe und eben solche Sekundärrohstoffe entstehen ist es notwendig

- Materialien mit verschiedenen Schwermetallgehalten, besonders Kupfer, getrennt aufzuarbeiten, um so gezielt Cu-arme und Cu-reiche Metallphasen zu erzeugen.
- die Wälzschlacken bzw. Rostaschen aus dem Drehrohr bzw. Rost heiß, teilweise aufgeschmolzen, direkt in einen nachgeschalteten Elektrolichtbogen einzusetzen, um den Energieverbrauch zu minimieren. Dabei ist mit einem Energieverbrauch von 250 kWh/t zu rechnen.
- die Abgase des Elektrolichtbogenofens in die bestehende Abgasreinigung zurückzuführen, um Kosten zu senken.

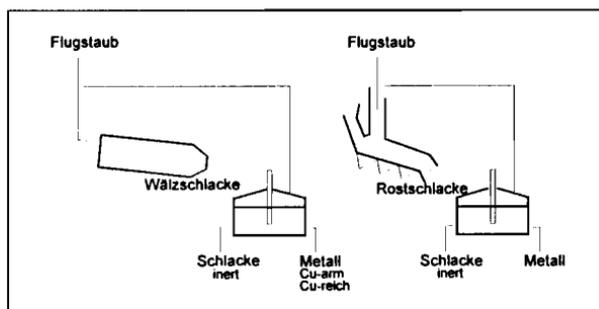


Bild 5: Schema der gedachten Aufarbeitungsmöglichkeit

In Tabelle 10 sind die chemischen Analysen der Einsatzmaterialien zusammengestellt.

Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung der Einsatzmaterialien

Einsatzstoffe		Wälzschlacke		Rostasche
		W1	W2	R1
Zn	%	0,48	1,91	0,36
Pb	%	0,42	1,01	0,28
Fe	%	22,3	32,00	9,07
Fe(met.)/Fe	%	86,1	93,1	12,9
Cu	%	0,43	0,72	0,24
Na	%	0,09	0,65	0,56
K	%	0,045	0,48	0,30
C	%	9,29	1,51	1,18

Die Analysen zeigen unterschiedliche Gehalte an Zn bis zu 2%, Pb bis zu 1%, Cu bis zu 1%. Die Fe-Gehalte sind in den Wälzschlacken mit bis zu 35% deutlich höher, als die der Rostaschen mit bis zu 10%. Der Metallisierungsgrad ist mit ca. 90% ebenfalls deutlich höher als der der Rostasche mit ca. 13%. Bemerkenswert sind die hohen Restkohlenstoffgehalte mit bis zu 10%.

Bei der pyrometallurgischen Behandlung der Wälzschlacke wurden als preiswerte Zuschlagsstoffe Pb-Schlacke und bei der Rostasche Gießpfannenschlacke chargiert, um das Einschmelzverhalten und das elektrische Verhalten der Schlacke zu verbessern.

Zn und Pb reichern sich im Flugstaub an. Beim Auftreten einer reduzierten Phase verteilen sich Fe und Cu zu gleichen Teilen zwischen Metall und Schlacke. Na und K verteilen sich etwa zu gleichen Teilen zwischen Schlacke und Flugstaub.

Tabelle 11: Verteilung der Elemente auf die Produkte

Verteilung		Metall	Schlacke	Flugstaub
Zn	%	<2	<30	>75
Pb	%	<2	<15	>85
Fe	%	>50	<50	<2
Cu	%	>50	<50	<5
Na	%	<2	>60	<40
K	%	<2	>60	<40

Als Hauptbestandteil erhält man also eine inerte verwertbare Schlacke sowie eine in Abhängigkeit vom Einsatzmaterial Cu-arme bzw. Cu-reiche Metallphase und einen mit Pb und Zn angereicherten Flugstaub. Die Metallphase kann, falls sie Cu-arm ist, im Fe-Bereich (Stahlwerk), falls sie Cu-reich ist, im NE-Bereich (Cu/Pb-Reduktionsmetall für Schachtofen bzw. Schachtofen/Konverterprozess) eingesetzt werden. Der

Flugstaub läßt sich nach einer eventuell nötigen hydrometallurgischen Behandlung zur Entfernung von Na, K und Cl in den IS-Ofen zur Zn/Pb-Gewinnung eingesetzt.

4 Abschlußbemerkung

Die vorgestellten Arbeiten geben nur einen groben Überblick über die Aktivitäten des Institutes für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie (IME) der RWTH Aachen bezüglich des Schmelzens von Reststoffen und Schlacken zur Inertisierung und gleichzeitigen Wertstoffrückgewinnung.

Die Verwertung von Abfällen soll Primärrohstoffe schonen und nur solche Stoffe sind zu deponieren, die vorher inertisiert und mineralisiert worden sind, damit keine unvertretbaren Umweltbeeinträchtigungen entstehen. Bei der Inertisierung von Reststoffen darf jedoch nicht nur die ökologische Verträglichkeit betrachtet werden, sondern auch der Blick auf die Ökonomie darf nicht verloren gehen.

Literatur

- [1] Höfler, J. Reduktion NE-metallhaltiger Schlacken im Elektroofen unter besonderer Berücksichtigung der Verwendung gleichgerichteten Schmelzstroms, Dissertation, RWTH Aachen, 1988.
- [2] Richter, K.-J. Eisenproblematik der hydrometallurgischen Zinkgewinnung, Dissertation, RWTH Aachen, 1992.
- [3] Park, H.-S. Synergismuseffekte bei der Aufarbeitung von V-Cr-haltigen Reststoffen der chemisch-metallurgischen Industrie, Dissertation, RWTH Aachen, 1992.
- [4] Jiang, K. Beitrag zur metallurgischen und physikalischen Aufbereitung von speziellen Chrom- und Titan-Schlacken, Dissertation, RWTH Aachen, 1994
- [5] Grund, G. Verarbeitung metallhaltiger Stäube im Elektroofen bei Chargierung durch eine Hohlelektrode, Dissertation, RWTH Aachen, 1995.
- [6] Meurer, U. Aufarbeitung von Wälzschlacken und Müllrostaaschen durch Schmelzen im Elektrolichtbogenofen, Dissertation, RWTH Aachen, demnächst.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. U. Meurer
Dr.-Ing. K. Krone
Prof. Dr.-Ing. J. Krüger
Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie (IME)
der RWTH Aachen
52056 Aachen

8. Verwertung von Altreifen und anderen Abfällen bei der Zementproduktion

H. D. Winkler, Essen

1 Einleitung

Mit Inkraftsetzung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) [1] und der darin postulierten Rangfolge

- Vermeidung
vor
- Verwertung
vor
- Beseitigung

kommt der Verwertung von Abfällen zukünftig eine größere Bedeutung zu. Hierbei steht nach dem Zweck des Gesetzes die Schonung natürlicher Ressourcen mittels Substitution von Rohstoffen und Brennstoffen im Vordergrund und zwar in den Formen der

- stofflichen Verwertung
- energetische Verwertung.

Die stoffliche Verwertung beinhaltet die Substitution von Rohstoffen durch Gewinnung von Stoffen aus Abfällen (sekundäre Rohstoffe) oder die Nutzung der stofflichen Eigenschaften der Abfälle für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke mit Ausnahme der unmittelbaren Energierückgewinnung (§ 4 Abs. 3 KrW-/AbfG).

Die energetische Verwertung beinhaltet den Einsatz von Abfällen als Ersatzbrennstoff (§ 4 Abs. 4 KrW-/AbfG).

Die Verwertung von Abfällen als stoffliches oder energetisches Substitut erfolgt nicht in speziell zu diesem Zweck errichtete Anlagen, sondern in bereits vorhandene Produktionsanlagen, deren unternehmerisches Ziel auf die Herstellung von Produkten ausgerichtet ist.

Eine besondere Rolle bei der Verwertung von Abfällen wird dem Zementherstellungsprozeß zukommen. Er ist aus technischer Sicht ein prädestiniertes Verfahren zur stofflichen und energetischen Verwertung von Abfällen.

2 Technologie

Zement ist ein fein gemahlenes Bindemittel, das hydraulische Eigenschaften besitzt, d.h. mit Wasser vermengt an der Luft oder unter Wasser erhärtet. Hauptbestandteile

sind Portlandzementklinker, Hüttensand und Traß. Als Nebenbestandteile enthalten Zemente zur Regelung des Erstarrens Gipsstein und/oder Anhydrit bis zu einem Höchstgehalt von 3,5 - 4,5 Gew.% SO_3 . Zur Verbesserung physikalischer Eigenschaften können außerdem bis zu 5 Gew.% anorganische mineralische Stoffe zugesetzt werden.

2.1 Rohstoffe

Die natürlichen Rohstoffe zur Herstellung des Zementklinkers enthalten hauptsächlich Calciumoxid (CaO), Siliciumdioxid (SiO_2) und in geringen Mengen Aluminiumoxid (Al_2O_3) sowie Eisenoxid (Fe_2O_3). Stoffe, die diese Bestandteile enthalten, sind (Tabelle 1):

Tabelle 1: Natürliche Rohstoffe der Zementherstellung

Kalkkomponenten	Kalkstein Kreide Kalkmergel Mergel	96 - 100 % CaCO_3 98 - 99 % CaCO_3 75 - 90 % CaCO_3 40 - 75 % CaCO_3
Tonkomponenten	Kaolin Montmorillonit Tonglimmer	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$ $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Korrekturbedandteile	Bauxit Eisenerz Sand	Al_2O_3 Fe_2O_3 SiO_2

Aus diesen Materialien werden entsprechend der zu erzeugenden Zementart Rohmehlmischungen folgender Zusammensetzung hergestellt (Tabelle 2):

Tabelle 2: Rohmehlzusammensetzung

Komponente	Gehalt [%]
CaO	40 - 45
SiO_2	12 - 16
Al_2O_3 0 TiO_3	2 - 5
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Mn}_2\text{O}_3$	≤ 2
MgO	0,3 - 3
K_2O	0,2 - 1,4
Na_2O	$\leq 0,3$

Die eigentliche Herstellung des Zementklinkers erfolgt durch Erhitzen der Rohstoffe auf ca. 1450°C . Dabei reagieren die Einzelkomponenten chemisch miteinander und bilden völlig neue chemische Verbindungen, die sogenannten Klinkerphasen. An-

schließlich erfolgt eine schockartige Abkühlung. Dabei wird das bei der Sintertemperatur erreichte Schmelzgleichgewicht bei Raumtemperatur "eingefroren". Dieser Vorgang ist für die hydraulischen Eigenschaften des Zementes verantwortlich. Der Klinker wird abschließend unter Zugabe von Erstarrungshilfsmittel, z.B. Gips, zum fertigen Zement vermahlen.

Für den Brennprozeß der Klinkerherstellung sind folgende verfahrenstechnische Merkmale charakteristisch:

- Maximale Gastemperaturen im Drehrohrofen oberhalb 2000°C
- Brennguttemperatur von mindestens 1450°
- Zerstörung organischer Schadstoffe durch Rauchgastemperaturen oberhalb von 1200°C bei Verweilzeiten von bis zu vier Sekunden
- Vergleichmäßigung der Ausbrandbedingungen bei Lastschwankungen, durch hohe Wärmekapazität des Drehofens
- Chemisch-mineralogische Einbindung von Spurenelementen, z.B. Schwermetallen
- Absorption gasförmige Schadstoffe - HF, HCl, SO₃ - durch alkalische Ofenatmosphäre
- Kurze Verweilzeit der Abgase im Temperaturbereich der PCDD/F-Neubildung (De-Novo-Synthese).

Mit den Rohstoffen werden als Verunreinigung eine Vielzahl von Spurenelementen eingetragen. In Abhängigkeit von der natürlichen Verteilung in der Erdrinde treten im Rohmaterial und Rohmehl folgende Gehalte auf (Tabelle 3):

Tabelle 3: natürliche Verunreinigungen in Zement-Rohstoffen

Element	Einheit	Tone und Ton-schiefer	Kalkstein und Kalkmerge	Rohmehl
V	mg/kg	98 - 170	10 - 60	32 - 102
Zn	mg/kg	59 - 115	22 - 24	31 - 47
Cr	mg/kg	90 - 109	1,2 - 16	23 - 39
Ni	mg/kg	67 - 71	1,5 - 7,5	18 - 23
As	mg/kg	13 - 23	0,2 - 12	3 - 15
Pb	mg/kg	13 - 22	0,4 - 13	4 - 15
Co	mg/kg	10 - 20	1 - 5	3 - 9
Be	mg/kg	2 - 4	0,2 - 2	0,7 - 2,5
Tl	mg/kg	0,7 - 1,6	0,05 - 0,5	0,21 - 0,78
Cd	mg/kg	0,016 - 0,3	0,035 - 0,1	0,04 - 0,15
F	mg/kg	300 - 990	100 - 940	300 - 950
Cl	mg/kg	15 - 450	50 - 240	40 - 290
Br	mg/kg	1 - 58	≤ 5,9	4,7 - 18,9
J	mg/kg	0,2 - 2,2	0,25 - 0,75	0,24 - 1,1

Die natürlichen Rohstoffe können durch Abfälle, die die Hauptbestandteile des Rohmehls - SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO und/oder CaSO₄ - enthalten, substituiert werden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Rohstoffsubstitute der Zementherstellung

Rohstoffgruppe	Reststoffe
Ca-Gruppe	Industriekalk Kalkschlämme Kabidschlamm Trinkwasserschlamm
Si-Gruppe	Gießereialsande Chromsand
Fe-Gruppe	Kiesabbrand Synth. Hämatit Rotschlamm
Si-Al-Ca-Gruppe	Flugaschen Schlacken Brechsande
S-Gruppe	REA-Gips Chemiegipse

2.2 Brennstoffe

Die deutsche Zementindustrie gehört mit einem Anteil von ca. 1 % zu den großen Primärenergieverbrauchern der Bundesrepublik. Als Brennstoffe kommen überwiegend Stein- und Braunkohlenstaub zum Einsatz. Diese natürlichen Energieträger enthalten ebenfalls Verunreinigungen, die nahezu das gesamte Periodensystem umfassen. Die Gehalte variieren in Abhängigkeit von der Lagerstätte, Abbau und Aufbereitung in weiten Grenzen. Folgende Bereiche sind üblich (Tabelle 5).

Tabelle 5: Natürliche Verunreinigungen in Kohlen [2]

Element	Gehalt [mg/kg]	
	häufigster Wert	Wertebereich
Be	1,6	0,6 - 3,4
B	31	7 - 75
F	141	30 - 370
P	315	40 - 1240
Sc	-	-
V	75	30 - 180
Cr	26,5	6 - 80
Mn	125	30 - 315
Co	16,7	5 - 34
Ni	45	15 - 96
Cu	33	10 - 60
Zn	81	6 - 210
As	13,6	2 - 36
Se	1,9	0,6 - 4,3
Br	10,3	< 1 - 44
Sr	53	14 - 267
Mo	13,8	6 - 29
Ag	0,45	0,1 - 1,2
Cd	0,3	0,1 - 1
Sb	0,9	0,4 - 2
Te	< 0,5	0,2 - 0,6
J	2,5	< 1 - 5
Ba	168	47 - 349
Hg	0,2	0,1 - 1
Tl	0,3	0,1 - 1,2
Pb	68	10 - 270
Th	< 3	2 - 9
U	< 1	0,2 - 2

Aufgrund des relativ hohen Energiekostenanteils an der Bruttowertschöpfung von ca. 40 %, kommt den Energiekosten eine bedeutende wirtschaftliche Rolle zu. Die Zementherstellung hat sich deshalb schon seit geraumer Zeit mit den Möglichkeiten der

Substitution von fossilen Brennstoffen durch Sekundärbrennstoffe auseinander gesetzt. Folgende Abfälle wurden zur energetischen Verwertung erprobt bzw. befinden sich im Einsatz (Tabelle 6):

Tabelle 6: Ersatzbrennstoffe der Zementindustrie (erprobt bzw. im Einsatz)

Sekundärstoff	Aggregatzustand	Sekundärstoff	Aggregatzustand
Papier, Pappe	fest	Säureharz	flüssig
Petrokoks	fest	Altöl	flüssig
Graphitstaub	fest	Ölschlamm	flüssig
Holzkohle	fest	polyaromatische KW	flüssig
Kunststoffe	fest	polychlorierte Biphenyle	flüssig
Gummi	fest	chlorhaltige Aromaten	flüssig
Reifen	fest	andere chlorhaltige zyklische Verbindungen	flüssig
Batteriereste	fest		
Bleicherde	fest		
Ölschiefer	fest		
Torf	fest	Deponiegas	gasförmig
Holz (Rinde, Späne)	fest		
Reisspreu	fest		
Olivenkerne	fest		
Kokosnußschalen	fest		
Hausmüll	fest		
Shredder	fest		
Klärschlamm	fest		
PE-Folien mit Zellstoff	fest		
Alu-PE-Folien	fest		
geschredderte Windelreste	fest		
Teppichreste	fest		
Photopapier	fest		

Altreifen stellen in dieser "Brennstoffpalette" nur eine von vielen Substitutionsmöglichkeiten dar. Dieses Material besitzt jedoch aufgrund eines Anteils von ca. 6 % am Gesamtenergiebedarf der Zementindustrie eine herausragende Bedeutung. Nach Angaben des wirtschaftsverbandes der deutschen Kautschukindustrie wurden 1995 ca. 210.000 t Altreifen in der Zementindustrie als Ersatzbrennstoff eingesetzt (Tabelle 7) und dadurch ein entsprechendes Energiepotential von ca. 280.000 t Kohle substituiert.

Tabelle 7: Verwertung von Altreifen in Deutschland - 1995 -

Gebrauchtreifen	65.000 t
Runderneuerung	105.000 t
Granulate / Regenerate	75.000 t
Brennstoff-Zementindustrie	210.000 t
Brennstoff-Kraftwerke	35.000 t
Export als Brennstoff	40.000 t
andere Verwendung / Deponie	70.000 t
Gesamtmenge	600.000 t

Quelle: Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie

Die Reifen sind für alle Kategorien (PKW, Nutzfahrzeuge, Flugzeugreifen) aus den gleichen Grundstoffen (Tabelle 8) und in annähernd gleichen Mengenanteilen aufgebaut. Lediglich der Stahlanteil variiert zwischen 18 % (PKW) und 25 % (LKW).

Tabelle 8: Grundbestandteile von PKW-Reifen

Komponente	Gehalt [%]
Kautschuk (Natur, Synthetik)	48
Ruß	23
Stahldraht	18
Textilgewebe	3
Zuschlagstoffe	8
Heizwert	26 - 30 MJ/kg

Mit den Grundbestandteilen werden in den Reifen Spurenelemente eingetragen (Tabelle 9):

Tabelle 9: Spurenelemente in Altreifen [3]

Komponente	Höchstwert [mg/kg]	Mittelwert [mg/kg]	Niedrigstwert [mg/kg]
As	-	20	-
Be	-	0,05	-
Pb	760	410	60
Cd	20	8	5
Cr	-	97	-
Hg	0,43	0,17	0,10
Ni	-	77	-
Tl	0,3	0,25	0,2
V	-	5,3	-
Zn	20500	15000	9300
S	12000	15000	19000

Die vorstehenden Daten machen deutlich, daß sowohl mit den natürlichen Roh- und Brennstoffen, als auch mit den zur Substitution verwendeten Abfällen - aufgrund von Verunreinigungen natürlichen oder technischen Ursprungs-Spurenelemente in unterschiedlichsten Konzentrationen und Frachten in den Zementprozeß eingetragen werden. Diese Elemente - sowie sämtliche Elemente des Periodensystems - sind nicht mit technischen Mitteln zerstörbar, es lassen sich allenfalls Verbindungen dieser Elemente umwandeln und in immobile Formen überführen. Dies kann geschehen z.B. durch Sinterung oder Verglasung.

Während der Sinterphase des Zementbrennprozesses wird ein Großteil der schwerflüchtigen Spurenelement in die sich neugebildete Zementmatrix eingebunden und immobilisiert. Leichtflüchtige Spurenelemente verdampfen in der Aufheizphase, kondensieren im Wärmetauscher bzw. der Rohmehlmühle und werden im Elektrofilter abgeschieden. Hochflüchtige Stoffe, wie Arsen, Blei, Cadmium, Thallium und Quecksilber befinden sich in Abhängigkeit von der im Abscheider auftretenden Abgastemperatur teilweise noch in der Gasphase, eine Abscheidung erfolgt hier ausschließlich über Sorptionsreaktionen.

Die im Abgas auftretenden Konzentrationen sind abhängig von ihrer Flüchtigkeit. Kennzeichnend ist der Einbindegrad. Folgende Erfahrungswerte liegen vor (Tabelle 10):

Tabelle 10: Einbindegrade von Spurenelemente in den Klinker

Komponente [%]	Klinkereinbindung
Be	~ 99
Cd	74 - 88
Hg	0 - 40
Tl	0
As	83 - 91
Co	~ 93
Ni	83 - 97
Se	~ 0
Te	~ 80
Sb	83 - 91
Pb	72 - 96
Cr	91 - 97
Cu	~ 88
V	90 - 95
Sn	~ 80
Zn	80 - 99
S	67 - 94
Cl	14 - 33
F	88 - 95

In den Abscheidern anfallender Stäube werden dem Herstellungsprozeß wieder zugeführt. Hierdurch kommt es bei "leichtflüchtigen" Schwermetallen zu Kreislaufanreicherungen. Zur Erzielung eines konkreten Emissionsverhaltens auf niedrigem Niveau ist es erforderlich, den Staubkreislauf zu entlasten. Hierzu wird am Elektrofilter des Drehrohrofens Filterstaub abgezogen und im Rahmen der vorgegebenen Normen in der Zementvermahlung als Zumahlstoff eingesetzt. Diese Stoffe gelangen über den Zement in den Beton und werden im Betonteil fixiert. Alle bisherigen Untersuchungen zeigen, daß die Freisetzung von Schwermetallen aus Betonteilen äußerst gering ist. Die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung werden deutlich unterschritten.

3 Gesetzliche Regelungen

In der "Siebzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionschutzgesetzes" [4] wird die Verbrennung fester und flüssiger Abfälle in genehmigungsbedürftigen Anlagen nach der 4. BImSchV [5] geregelt.

Anlagen zur Herstellung von Zementklinker sind nach Nr. 2.3 der 4. BImSchV genehmigungsbedürftig. Die 17. BImSchV findet demnach bei der Verbrennung fester und flüssiger Abfälle oder ähnlicher brennbarer Stoffe, die nicht "konventionelle Regalbrennstoffe" nach Nr. 1.2 der 4. BImSchV sind, Anwendung (Tabelle 11).

Tabelle 11: Feste und flüssige Brennstoffe nach Nr. 1.2 der 4. BImSchV

Kohle
Koks
Petrolkoks
Restkoks aus Kohlevergasung
Kohlebriketts
Torfbriketts
Brenntorf
Heizöle
Methanol
Äthanol
naturbelassenes Holz
gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz oder Holzwerkstoffe (Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten, verleimtes Holz), sowie daraus anfallende Reste, ohne Holzschutzmittel und ohne halogenorganische Beschichtung

Ausgenommen sind ferner Stoffe der Tabelle 12, sofern sie neben den Brennstoffen der Tabelle 11 ausschließlich eingesetzt werden.

Tabelle 12: Stoffe, auf die beim ausschließlichen Einsatz die Vorschriften der 17. BImSchV keine Anwendung finden.

Holz oder Holzreste einschließlich Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz mit Beschichtungen aus halogenorganischen Verbindungen
oder
Stroh, Nußschalen oder ähnliche pflanzliche Stoffe
oder
flüssige brennbare Stoffe, wenn der Massengehalt an polychlorierten aromatischen Kohlenwasserstoffen, wie polychlorierte Biphenyle (PCB) oder Pentachlorphenol (PCP), bis 10 Milligramm je Kilogramm und der untere Heizwert des brennbaren Stoffes mindestens 30 Megajoule je Kilogramm beträgt
und
sonstige flüssige brennbare Stoffe, soweit aufgrund ihrer Zusammensetzung keine anderen oder höheren Emissionen als bei der Verbrennung von Heizöl EL auftreten können
oder
Destillations- oder Konversionsrückstände der Erdölverarbeitung von Rückständen der Spaltung von Naphta im Eigenverbrauch

Eine Konkretisierung des Begriffes "brennbar" erfolgt in der 17. BImSchV nicht. Entsprechende Regelungen enthält das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG -. Der Einsatz von Abfällen als Ersatzbrennstoff wird demnach entsprechend der Verwertungsart als energetische Verwertung angesehen, wenn Abfälle zur Gewinnung von Energie genutzt werden. Eine Verwertung liegt nicht vor, wenn die energetische Verwertung lediglich nachgeordneter Zweck eines hauptsächlich auf Entledigung ausgerichteten Vorganges ist.

Eine energetische Verwertung im Sinne des KrW/AbfG ist bei Einhaltung folgender Kriterien zulässig:

- Heizwert Ohne Vermischung mit anderen Stoffen mindestens 11 MJ/kg (ausgenommen nachwachsende Rohstoffe)
- Feuerungswirkungsgrad mindestens 75 %
- eigene Nutzung der entstehenden Wärme oder Weitergabe an Dritte
- Ablagerung anfallender neuer Abfälle möglichst ohne weitere Behandlung.

Durch die Festschreibung eines Mindestheizwertes von 11 MJ/kg wird das energetische Verwertungsgebot zahlenmäßig definiert. Der Entledigungsgesichtspunkt z.B. von Schwermetallen bedarf jedoch ebenfalls einer Konkretisierung. Entsprechende Rechtsverordnungen existieren noch nicht.

Um bis zur Vorlage einer entsprechenden Rechtsverordnung nach § 6 Abs. 1 KrW-/AbfG ein einheitliches Handeln zu gewährleisten, wurden vom LUA NRW auf der Grundlage der im KrW-/AbfG postulierten Grundsätze, Grundpflichten und Anforderungen Richtwerte erarbeitet, die eine konkrete Zuordnung einzelner Abfälle oder Abfallarten ermöglichen [6].

Ausgehend vom einzelnen Abfall sind nach § 4 Abs. 4 KrW-/AbfG die Kriterien

1. Art der Verunreinigung des einzelnen Abfalls
2. Ausmaß der Verunreinigung des einzelnen Abfalls
3. bei der Behandlung anfallenden weiteren Abfälle
4. bei der Behandlung entstehende Emissionen

zugrunde zu legen.

Alle vier Kriterien sind gleichrangig. Sie fordern eine ganzheitliche medienübergreifende Betrachtungsweise unter Beachtung abfallspezifischer und anlagentechnischer Gesichtspunkte.

Bei den Kriterien 1 und 2 ist der stoffliche Bezug des Einzelabfalls hinsichtlich seiner Verunreinigungen maßgebend. Setzt man voraus, daß der Ersatzbrennstoff definitionsgemäß "Substitutionsqualität" besitzt, d.h. den Regelbrennstoffen nach Nr. 1.2 der 4. BImSchV entspricht, so lassen sich aus den Schadstoffgehalten dieser Brennstoffe Abgrenzungskriterien ableiten. Relevante Brennstoffe sind Kohlen unterschiedlicher Herkunft. Unberücksichtigt bleiben jedoch atypische Kohlen, z.B. Salzkohlen sowie Misch- bzw. Ballastkohlen, sofern sie Abfälle, wie z.B. Schlämme oder Bleicherden enthalten. Derartige Brennstoffe oder Brennstoffgemische bedürfen einer Einzelfallprüfung.

Auf vorstehender Grundlage errechnete Richtwerte sind in Tabelle 13 dargestellt. Abweichend von der allgemein üblichen Bezugsgröße mg/kg wurde ein Bezug auf den die Verwertung bestimmenden Energiebezug in mg/MJ gewählt. Hierdurch lassen sich die unterschiedlichsten Abfallarten hinsichtlich ihrer Schadstoffgehalte einheitlich bewerten. Außerdem wird eine Vermischung mit Abfällen geringerer Heizwerte (< 11 MJ/kg) eingeschränkt.

Tabelle 13: Maximalwerte konventioneller Regelbrennstoffe der Zementindustrie

Komponente	Maximalwert [mg/MJ]
Be	0,13
Cd	0,3
Hg	0,06
Tl	0,15
As	1,9
Co	1,2
Ni	3,5
Se	0,2
Te	0,04
Sb	0,07
Pb	10
Cr	3,7
Cu	3,7
V	6,7
Sn	0,4
Zn	8
S	740
Cl	60
F	14

Die vorgeschlagenen Richtwerte stellen einen "synthetischen Ersatzbrennstoff" auf der Grundlage von Regelbrennstoffen" dar, der ausschließlich aus Maximalwerten gebildet wurde. Bei Unterschreitung der Richtwerte ist grundsätzlich eine energetische Verwertung vorauszusetzen. Sie sind für alle Branchen anwendbar und ermöglichen - sofern die Verwertungstechnologie nicht bekannt ist - eine erste pauschale Abgrenzung.

Die Kriterien 3 und 4 besitzen einen überwiegend technischen Bezug hinsichtlich Verwertungs-/Beseitigungstechnologie, Prozeßführung und Emissionsminderungstechnik. Die Unterschiedlichkeit der im Anhang II des KrW-/AbfG aufgelisteten Beseitigungs- und Verwertungsverfahren ermöglicht keine allgemeinverbindliche Abgrenzung. Durch Einflußnahme auf Prozeß- und Emissionsminderungstechnik können Reststoffe und Emissionen hinsichtlich Art und Ausmaß verändert werden. Aus diesen Kriterien abzuleitende Richtwerte sind demzufolge variabel. Es sind allenfalls branchenbezogene Bewertungen möglich. Damit kann - unbeschadet einer Einzelfallprüfung - eine generalisierende Bewertung erfolgen.

Bei einer branchenbezogenen Betrachtung sind folgende Gesichtspunkte ergänzend bestimmend:

- Stand der Prozeß-/Verfahrenstechnik
- Stand der Emissionsminderungstechnik

Für die Zementindustrie ist der Stand der Prozeß-/Verfahrenstechniken der Richtlinie VDI 2094 festgelegt. Der Stand der Emissionsminderung bei der Verbrennung von Abfällen und ähnlichen brennbaren Stoffen leitet sich aus der 17. BImSchV ab.

Unter Zugrundelegung der dort ausgewiesenen Emissionsgrenzwerte, der für die einzelnen Schadstoffe spezifische Einbindegrade in den Klinker, der Abscheidegrade des Abgasreinigungssystems (Elektrofilter) sowie der mit dem Rohmaterial eingetragene Schadstoffe, lassen sich maximal mögliche Schadstoffgehalte in den zur energetischen Nutzung vorgesehenen Abfällen berechnen. Hierbei ist jedoch zu beachten, daß die errechneten Daten die Emissionsgrenzwerte "maximal" ausschöpfen würden. Unter Berücksichtigung der dem Berechnungsmodell und Probenahme anhaftenden Toleranzbreiten wurden die Maximalwerte mit einem schadstoffabhängigen Abschlag versehen. Das Ergebnis ist für die Zementindustrie in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Zuordnungswerte für eine energetische Verwertung von Abfällen in der Zementindustrie

Komponente	Maximalwert [mg/MJ]
Be	3
Cd	6
Hg	0,6
Tl	5
As	25
Co	20
Ni	40
Se	2
Te	2,5
Sb	10
Pb	80
Cr	60
Cu	80
V	70
Sn	30
Zn	800
S	1500
Cl	2500
F	2500

PCB	50 mg/kg
PCP	5 mg/kg

Heizwert (H_U)	≥ 11 MJ/kg
--------------------	-----------------

Die Anwendung der Zuordnungswerten ermöglicht die Herstellung von qualitätsgeprüften Sekundärbrennstoffen in Entsorgungsbetrieben einschließlich einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung.

Verbrennungsbedingungen

Nach § 4 der 17. BImSchV ist eine Anlage so zu errichten und zu betreiben, daß ein weitgehender Ausbrand der Brennstoffe erreicht wird. Die für eine Feuerungswärmeleistung von > 25 % Abfall vorgegebenen Mindestanforderungen

Temperatur : 1200°C
 Verweilzeit : 2 Sekunden
 Sauerstoffgehalt : 6 %

werden beim *primärseitigen* Einsatz im Drehrohrofen stets erfüllt. Dies trifft jedoch nicht für die Sekundärfeuerung am Ofenmehleinlauf zu. In diesem Fall sind Ausnah-

men nach § 5 Abs. 3 möglich, sofern durch Messungen nachgewiesen wird, daß keine höheren Emissionen, insbesondere an Dioxinen und Furanen oder Biphenylen, entstehen, als unter Regelbedingungen. Bei der Verbrennung von Altreifen in der Sekundärfeuerung konnten diese Voraussetzungen meßtechnisch nachgewiesen werden. Gründe für eine Ausnahmeregelung zu § 4 Abs. 3 liegen somit vor.

Problematischer erscheint der Einsatz der Vorkalziniertechnik, insbesondere mit gestufter Verbrennung zur NO_x -Minderung. Die bis ca. 900°C endotherm ablaufende Entsäuerung des CaCO_3 zu CaO und CO_2 ermöglicht aufgrund des relativ niedrigen Temperaturniveaus den Einsatz heizwertschwächerer Brennstoffe, als sie zur Klinkerbildung bei 1450°C an der Primärfeuerung erforderlich sind. Hierfür sind aus verfahrenstechnischer Sicht Abfallbrennstoffe nutzbar.

Moderne Anlagen sind zur NO_x -Minderung mit gestufter Kalzinatorfeuerung ausgerüstet. Der Verbrennungsprozeß erfolgt in der ersten Stufe zur gezielten CO -Erzeugung unter Sauerstoffmangel. Stickstoffoxide werden in dieser Phase durch Kohlenmonoxid reduziert. In der zweiten Stufe erfolgt anschließend eine Nachverbrennung der Rauchgase in oxidierender Atmosphäre.

Die Mindestanforderungen an die Verbrennungsbedingungen sind sowohl beim Einsatz der Vorkalzination wie auch der gestuften Sekundärfeuerung zur NO_x -Minderung nicht einzuhalten. Bei Überschreitung der durch Abfälle erzeugten Feuerungswärmeleistung von $> 25\%$ ist deshalb im jeweiligen Einzelfall ein meßtechnischer Nachweis darüber erforderlich, daß keine höheren Emissionen entstehen.

Zur Emissionsbegrenzung werden in der 17. BImSchV die in Tabelle 15 dargestellten Emissionswerte vorgeschrieben. Unter realistischen Betriebsverhältnissen erzielte Meßergebnisse sind Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 15: Emissionsgrenzwerte (17. BImSchV)

(1/2 h-Mittelwert)	
Gesamtstaub	30 mg/m^3
Summe C	20 mg/m^3
Cl ⁻	60 mg/m^3
F ⁻	4 mg/m^3
So _x	0,20 g/m^3
No _x	0,40 g/m^3
Cd, Tl	0,05 mg/m^3
Hg	0,05 mg/m^3
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	0,5 mg/m^3
PCDD/PCDF	0,1 ng/m^3 TE
Bezugs-O ₂ -Gehalt	11 %

Tabelle 16: Emissionen beim Einsatz von Reststoffen in der Zementindustrie

Komponente	Einheit	Einsatzstoffe				17. BImSchV
		Altreifen	Lösungsmittel	Sägemehl	BRAM	
F ⁻	mg/m ³	-	< 0,2	< 0,5	1,3	4
Cl ⁻	mg/m ³	-	1,2 - 4,0	<5	4,3	60
PAH's	mg/m ³	0,03·10 ⁻³	5,1·10 ⁻³	-	1,5·10 ⁻³	
PCB	mg/m ³	0,04·10 ⁻³	3,06·10 ⁻³	1,0·10 ⁻³	0,23·10 ⁻³	
TCDM	mg/m ³	n.n.	0,1·10 ⁻³	<0,02·10 ⁻³	n.n.	-
PCB _(z)	mg/m ³	0,18·10 ⁻³	0,031·10 ⁻³	n.n.	n.n.	-
PCP _(h)	mg/m ³	0,03·10 ⁻³	1,1·10 ⁻³	n.n.	0,06·10 ⁻³	-
Cd, Tl	mg/m ³	-	1,3·10 ⁻³	6,6·10 ⁻³	9,9·10 ⁻³	50·10 ⁻³
Hg	mg/m ³	-	10,5·10 ⁻³	13,7·10 ⁻³	33,9·10 ⁻³	50·10 ⁻³
PCDD/F	ng/m ³ ITE	0,02	0,06	0,003	0,02	0,1

Legende:

PAH	-	polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	-	polychlorierte Biphenyle
TCDM	-	monomethylierte, tetrachlorierte Diphenylmethane
PCB _z	-	polychlorierte Benzole
PCP _h	-	polychlorierte Phenole
PCDD/F	-	polychlorierte Dibenzodioxine/Dibenzofurane

Einer besonderen Bedeutung kommt der Emission an polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen zu.

Zementwerke, wie im übrigen andere Feuerungssysteme auch, emittieren selbst ohne Abfalleinsatz Dioxine und Furane. Die "Normalemission" liegen zwischen 0,01 und 0,02 ng/m³ TE mit Höchstwerten bis 0,04 ng/m³ TE.

Eine energetische Verwertung ist nach dem KrW-/AbfG selbst bei Einhaltung der Grundkriterien des § 4 Abs. 4 nur zulässig, sofern nach § 6 Abs. 2, Nr. 2 auch die anlagenspezifische Anforderung eines Feuerungswirkungsgrade von mindestens 75 % erfüllt wird. Durch diese Forderung soll das im Abfall vorhandene Energiepotential effektiv ausgeschöpft werden. Nach der Begründung des Bundestag-Umweltausschusses errechnet sich der Feuerungswirkungsgrad aus dem Heizwert abzüglich des Abgasverlustes. Der Abgasverlust ist der auf den Heizwert bezogene Energieverlust über das Abgas im Bereich des Feuerungsraumes.

In der Zementindustrie wird das Energiepotential nicht nur im Feuerungsraum sondern entsprechend den Anforderungen des § 6 Abs. 2 Nr. 3 - Selbstnutzung entste-

hender Wärme - auch im Rohmehlvorwärmer und in der Rohmehltrocknung genutzt. Auf dieser Grundlage ergeben sich für den heutigen Stand der Technik entsprechende Anlagen Wirkungsgrade > 80 %. Die Forderungen des § 6 Abs. 2 Nr. 2 sind damit erfüllt.

Mischungsregelung

Von grundlegender Bedeutung für die zukünftige Abfallverwertung in der Zementindustrie kann sich die Mischungsregelung der 17. BImSchV erweisen. Nach § 5 Abs. 3 gelten die Emissionswerte der 17. BImSchV nur für den Teil des Abgasstromes, der bei der Verbrennung des höchstzulässigen Anteiles der Abfälle entsteht. Für den übrigen Teil des Abgasstromes gelten die hierfür verbindlichen Emissionsgrenzwerte bzw. Emissionsbegrenzungen.

Die Vorschriften des § 5 Abs. 3 erfordern demzufolge - sofern keine Ausnahmeregelungen nach § 19 zur Anwendung kommen - ohne Einschränkung die Durchführung von Mischungsrechnungen auf der Grundlage des höchstzulässigen Anteiles der Abfälle für alle Emissionsgrenzwerte der §§

5 Abs. 1 Nr. 1 und 2	(Gesamtstaub, Gesamt C, Stickstoffoxide, Schwefeloxide)
5 Abs. 1 Nr. 3	(Schwermetalle und Spurenelemente)
5 Abs. 1 Nr. 4	(Dioxine und Furane)
4 Abs. 6	(Kohlenmonoxid)

Hierbei ist zu beachten, daß die Mischungsrechnung nicht nach der anteiligen Feuerungswärmeleistungen durchzuführen ist, sondern auf der Basis anteiliger Abgasströme. Dies erfordert gesonderte Abgasvolumenberechnungen aus der Elementaranalyse der eingesetzten Brenn- und Abfallstoffe.

Der Zementprozeß ermöglicht unter Berücksichtigung der verfahrenstechnische Besonderheiten des Herstellungsverfahrens bei sachgerechter Anwendung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung von Abfällen. Durch Substitution können natürliche Ressourcen geschont werden. Entsprechende Potentiale sind vorhanden. So ließen sich allein bei 50 %iger Energiesubstitution durch aufbereiteten Hausmüll in NRW-Zementwerken 8 der 13 vorhandenen Hausmüllverbrennungsanlagen einsparen.

Literatur

- [1] **N.N.** Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG) vom 6. Oktober 1994, BGBl. I. S. 2705
- [2] **K. Kautz** Spurenelementgehalte in Steinkohlen und den daraus entstehenden Reingasstäuben - VGB-Kraftwerkstechnik, Oktober 1975, S. 672

- [4] **N.N.** Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetz (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe - 17. BImSchV) vom 23. November 1990, BGBl. I, S. 2545
- [5] **N.N.** Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen - 4 BImSchV) vom 24. Juli 1985, BGBl. I, S. 1586
- [6] **Winkler, H.-D.** Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, Richtwerte für eine energetische Verwertung von Abfällen in der Zementindustrie - Jahresbericht 1995 des Landesumweltamt NRW
- [7] **Winkler, H.-D.** Anwendung der Abfallverbrennungsverordnung - 17. BImSchV - bei der energetischen Verwertung von Abfällen in der Zementindustrie - Bericht des Landesumweltamtes NRW vom Mai 1995

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. H.-D. Winkler
Landesumweltamt NRW
Postfach 10 23 63
45023 Essen

9. Einsatz von ölhaltigen Sanden und Schlämmen bei der Ziegelherstellung

A. Grehl, Hüttisheim-Humlangen

Das Ziegelwerk Grehl in Humlangen wurde 1844 gegründet und ist bereits seit 1890 im Besitz der Familie Grehl. Das Werk wurde vom jetzigen Inhaber 1985 übernommen und beschäftigt heute 17 Mitarbeiter.

Grundlage der Produktion sind seit Betriebsbeginn die örtlichen Tonvorkommen im Raum Hüttisheim-Humlangen. Hergestellt werden Mauerziegel in verschiedenen Ausführungen, vor allem aber Schallschutzziegel.

Seit November 1993 liegt eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung zur keramischen Verwertung nachfolgender Stoffe vor:

- mineralölverunreinigte Böden, Sand, Tone
- Sande aus der Gießereisandaufbereitung (Feinanteil)
- Schlamm aus der Bodenwäsche, Feinschluff aus der Bodenwäsche
- Fangstoffe aus der papierverarbeitenden Industrie (als Porosierungsmittel)

1995 wurde das unter Projekträgerschaft des Umweltbundesamtes durchgeführte Forschungs- und Entwicklungsvorhaben erfolgreich abgeschlossen.

Das Forschungsvorhaben

"Entwicklung eines schadstofffreien keramischen Verfahrens zur Verarbeitung von energiehaltigen Erdmaterialien und energiehaltigen Reststoffen als Zuschlagstoff zur Ziegelherstellung"

Zielstellung des Vorhabens war, im Labormaßstab und in großtechnischen Versuchen nachzuweisen, daß durch den Prozeß der Keramisierung eine unlösliche Einbindung der in Roh- und Reststoffen enthaltenen Spurenelemente stattfindet und die Emissionsströme im Bereich der mit herkömmlichen Zuschlagstoffen liegen.

Vorversuche

prinzipielle Eignung verschiedener Reststoffe - Beurteilungskriterien waren die bauphysikalischen Parameter (DIN 105).

- Schwindung (Maßhaltigkeit)
- Druckfestigkeit (Druckfestigkeitsklasse)
- Scherbenrohddichte (Rohdichteklasse)
- Ausblühverhalten (schädliche Salze)

Umweltverträglichkeit des Ziegels

Von ausgewählten Materialmischungen (Lehm / Ton - Reststoffzusatz) wurden die Schwermetallgehalte im getrockneten und gebrannten Material untersucht - Prüfung unterschiedlicher Aufschlußmethoden.

Zur Beurteilung der Umweltwechselwirkung wurde das Eluat der gebrannten Ziegel untersucht.

Großtechnische Versuche

Nach erfolgreichem Abschluß einer 1. Laborphase wurden die entwickelten Rezepturen im großtechnischen Maßstab erprobt und durch Emissionsmessungen begleitet.

Folgende Fragestellungen sollten beantwortet werden :

1. Welche Messungen und Analysen sind für eine zuverlässige Charakterisierung des Verfahrens erforderlich ?
2. Welche Auswirkungen zeigen Art und Menge unterschiedlicher Schadstoffe auf das Emissionsverhalten der Anlage sowie auf die Produkteigenschaften ?
3. Welche Auswirkungen hat der zusätzliche Energieeintrag durch die energiehaltigen Materialien auf den Brennprozeß ?
4. Welche Anforderungen werden an die Anlagentechnik gestellt, damit die zulässigen Emissionswerte eingehalten werden.

Großtechnisch untersuchte Stoffe / Stoffgruppen :

Sedimentfilterkuchen aus Bodenwaschanlagen (Bodenwaschschlamm)
ölkontaminierter Boden
Schlamm aus der Abwasserreinigung
Gipsfilterkuchen
Neutralisationsschlamm

Ergebnisse des Forschungsvorhabens

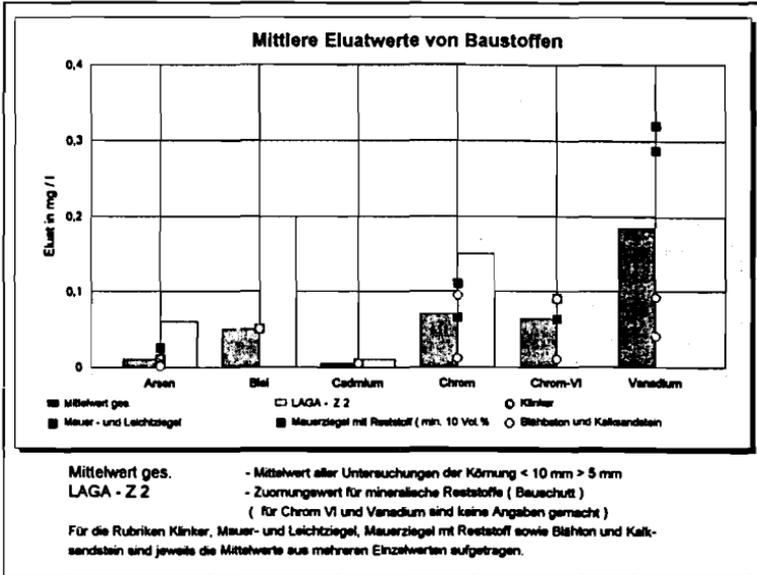
Grundsätzlich ist festzustellen, daß die untersuchten kontaminierten Böden und Reststoffe als Zuschlagstoffe für die Ziegelherstellung geeignet sind und hinsichtlich der bauphysikalischen Eigenschaften sowie der Umweltwechselwirkungen keine Nachteile gegenüber Produkten haben, die auf die herkömmliche Weise hergestellt wurden.

Die Emissionsströme liegen - unabhängig vom Reststoffgehalt in der Materialmischung - im Bereich der beim Einsatz herkömmlicher Zuschlagstoffe gemessenen Werte. Die Emission organischer Verbindung wird durch die interne thermische Rauchgasverbrennung wirkungsvoll minimiert.

Die Emissionsgrenzwerte werden sicher eingehalten bzw. unterschritten.

Die meisten Schwermetalle werden in der keramischen Matrix irreversibel eingebunden. Es ist davon auszugehen, daß mit steigender Brenntemperatur die Löslichkeit der einzelnen Schwermetalle aus der Matrix abnimmt.

Die Eluate der Schwermetalle liegen im Bereich der Werte herkömmlicher Ziegelprodukte und zu einem großen Teil auf dem Niveau der Nachweisgrenze. Eine signifikante Abhängigkeit von Schwermetallgehalt und Eluierbarkeit konnte nicht festgestellt werden.



Der Einsatz von geruchsintensiven Materialien und Reststoffen mit erhöhtem Quecksilbergehalt ist in der für die großtechnischen Versuche verwendeten Anlage nicht möglich.

Neben der Herstellung von Ziegeln eignet sich das Verfahren auch zur r e i n e n Immobilisierung von Schwermetallen, so daß die Deponierung des keramisch inertisierten Materials auf einer Deponie mit geringwertigeren Sicherungsmaßnahmen ermöglicht wird.

Im Hinblick auf eine ökologische Bewertung von Baustoffen, die unter Verwendung von Reststoffen hergestellt werden, fehlt es derzeit an geeigneten Beurteilungsgrundlagen, die einen Vergleich mit Naturbaustoffen zulassen.

Einsatz von ölhaltigen Sanden und Schlämmen bei der Ziegelherstellung

Das der keramischen Verwertung zugrundeliegende technologische Konzept unterscheidet sich nicht nur technisch, sondern auch in seinem grundsätzlichen strategischen Herangehen von herkömmlichen Verfahren der Altlastenbehandlung. Für das Unternehmen ist erstes Produktionskriterium die Marktakzeptanz des Endprodukts. So ist der Prozeß der Verziegelung von Reststoffen konsequent vom Endprodukt aus entwickelt : dem bauphysikalisch einwandfreien und umweltverträglichen Bauziegel, der auf dem Markt der Baustoffe ohne jede Einschränkung einsetzbar ist.

Vorteile : ökologischer Fortschritt durch Schadstoffzerstörung und Schadstoffimmobilisierung

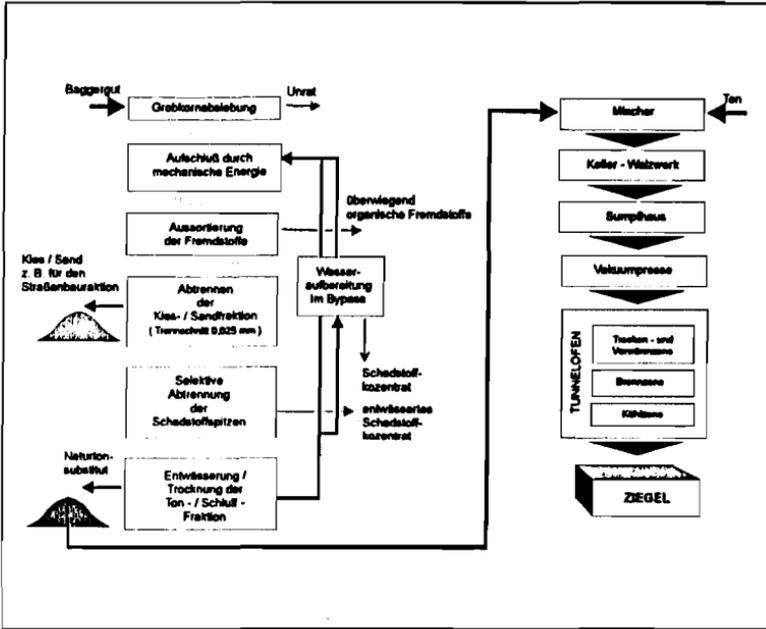
ökologischer Fortschritt durch Verringerung der zu deponierenden Mengen

höhere Wirtschaftlichkeit der Entsorgung

hoher Verwertungsgrad durch technisch hochwertige und umweltverträgliche Produkte - d.h. auch: Ressourcenschonung

Einstieg in einen flexiblen Technologiebereich

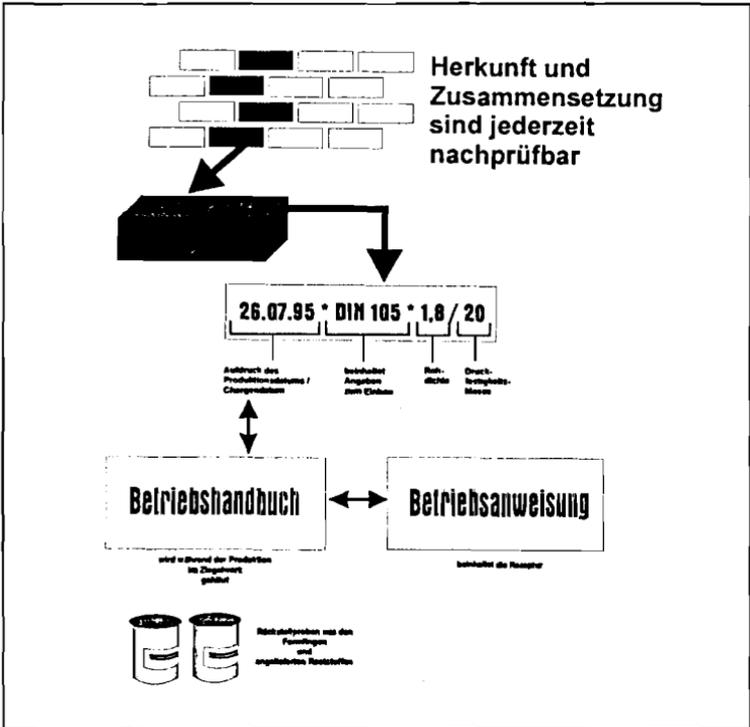
Der Prozeß der keramischen Verwertung besteht aus 2 wesentlichen Teilverfahren, der Gewinnung des Naturtonsubstitutes und dem Herstellen der Ziegel. Im 1. Teilverfahren wird eine Altlast, z.B. ölverunreinigtes Baggergut mittels einer naßmechanischen Aufbereitungstechnik gewaschen und in mehrere gereinigte, insbesondere - Kies, Schotter und Sand sowie eine mit Kontaminationen angereicherte Schlufffraktion getrennt. Die Entwässerung dieser Schlämme (< 0.063 mm) erfolgt über eine nachgeschaltete Siebbandpresse. Das anfallende, mit Partikeln und Schadstoffen belastete Abwasser wird über eine biologische Wasserreinigungsanlage mit integrierten Akitvkohleadsorber geführt und zu Prozeßwasserqualität gereinigt. Im 2 Teilverfahren wird die Schlufffraktion unter Zugabe von Naturton zu Ziegeln verarbeitet.



Der Einsatz dieses Schluffs erfolgt jedoch nur nach umfangreichen Untersuchungen („Freigabeprozedur“). Es wird eine Feststoffanalyse angefertigt und im keramischen Labor wird das Tonsubstitut auf seine Eignung für die Herstellung von Ziegeln getestet, dazu wird ein entsprechender Masseversatz mit einem bestimmten Anteil des Materials hergestellt. Die angefertigten Laborproben werden einer bauphysikalischen Prüfung entsprechend der DIN - Vorschriften für Ziegelprodukte geprüft. Nach positiven Ergebnissen wird das Eluatverhalten der Laborproben nach den LAGA - Richtlinien untersucht. Nach Abschluß der Prüfungen werden die Unterlagen dem entsprechenden Umweltamt zur Prüfung und Einsatzgenehmigung vorgelegt.

Die fertigen Ziegel werden darüber hinaus mit einer Nummer versehen, die das gesamte Verfahren ebenso lückenlos wieder zurückverfolgen lassen. Anhand der eingetragenen Nummern können im Betriebshandbuch des Ziegelwerkes die Ausgangsstoffe und die genaue Rezeptur aller Ziegel auch später noch jederzeit festgestellt werden. Auch bei der Aufbereitungsanlage läßt sich der Ursprung und die Zusammensetzung jeder einzelnen Charge anhand des Betriebstagebuches präzise recherchieren.

Parallel dazu bewahrt die Ziegelei von jeder Rezeptur eine verplombte Rückstellprobe auf, die chemische Zusammensetzung der einzelnen Ziegel ebenfalls auf Dauer dokumentieren.



Anschrift des Verfassers:

A. Grehl
 Ziegelwerk Grehl
 89185 Hüttisheim-Humlangen

10. Abfallverwertung in nicht-oxidativen thermischen Prozessen

S. Große-Allermann, J.-D. Herbell, Duisburg

1 Einleitung

Eine Wirtschaftsform, in der sämtliche Stoffe vollständig im Kreis geführt werden, wird auch in Zukunft nicht zu erreichen sein. Bedenkt man realistisch die Gefahren, die sich aus einer möglichen Schadstoffanreicherung innerhalb eines Kreislaufes ergeben können, ist ein solcher Zustand auch gar nicht erstrebenswert. Es wird immer Stoffe / Abfälle geben, die sich für eine stoffliche Kreislaufführung nicht eignen, oder die aus einem bestehenden Kreislauf ausgeschleust werden müssen, um der Schadstoffanreicherung entgegenzuwirken.

Für diese Abfälle kommt es darauf an, flexible und leistungsstarke Verfahren zur Verfügung zu haben, durch die die verwertbaren Komponenten des Abfalls separiert werden bzw. der Abfall in eine verwertbare oder schadlos deponierbare Form überführt wird.

Die hierfür in Frage kommenden **nicht-oxidativen, thermischen Abfallverwertungsverfahren** beinhalten dabei folgende Grundverfahren:

- **Pyrolyse**
- **Vergasung**
- **Hydrierung**

• Pyrolyse Schmel-Brenn-Verfahren	$(\text{Abfall} \xrightarrow{\Delta T} \text{Pyrolysekoks} + \text{Pyrolysegas})$ (Pyrolyse + Verbrennung)
• Vergasung ESPAG-Verfahren Konversionsverfahren Thermoselect-Verfahren	$(\text{Abfall} + \text{Vergasungsmittel} \xrightarrow{\Delta T} \text{Synthesegas} (\text{CO}_2, \text{CO}, \text{H}_2))$ (Festbettdruck- bzw. Flugstromvergasung) (Pyrolyse + Flugstromvergasung) (Pyrolyse + Festbettvergasung)
• Hydrierung VCC-Verfahren	$(\text{Abfall} + \text{Wasserstoff} \xrightarrow{\Delta T} \text{Synthesegas} (\text{C}_x\text{H}_y))$

Bild 1: Grundprozesse nicht-oxidativer thermischer Verfahren

Bei der Pyrolyse wird der zu verwertende Abfall unter Ausschluß eines zusätzlichen Reaktionspartners auf Temperaturen von ca. 400 - 600°C erhitzt. Hierbei erfolgt eine

teilweise Zersetzung der organischen Bestandteile. Als Produkte entstehen ein kohlenstoffreicher Pyrolysekoks sowie ein Pyrolysegas.

Im Unterschied zur Pyrolyse wird bei der Vergasung ein gasförmiges Reaktionsmedium benötigt, mit dem das Einsatzmaterial bei Temperaturen oberhalb 1000°C umgesetzt wird. Als Vergasungsmittel kommen hierbei O₂ (unterstöchiometrisch) und H₂O (dampförmig) zum Einsatz. Das Hauptprodukt der Vergasung ist ein Synthesegas, dessen wesentliche Bestandteile CO₂, CO sowie H₂ sind.

Bei der Hydrierung letztlich handelt es sich um eine spezielle Form der Vergasung, bei der als Vergasungsmittel H₂ eingesetzt wird. Je nach Reaktionsbedingungen, Temperatur, Druck und Katalysatoren, verlassen den Prozeß vorwiegend gesättigte Kohlenwasserstoffe unterschiedlichster Kettenlänge.

Die wichtigsten technischen Verfahren, bei denen diese Verfahrensschritte einzeln oder in Kombination angewandt werden, sind:

- Schwel-Brenn-Verfahren (Pyrolyse + Verbrennung)
- Konversionsverfahren (Pyrolyse + Flugstromvergasung)
- ESPAG-Verfahren (Festbettdruck- bzw. Flugstromvergasung)
- Thermoselect-Verfahren (Pyrolyse + Festbettvergasung)
- VCC-Verfahren (Hydrierung)

Von diesen Verfahren sollen im Folgenden das ESPAG-Verfahren, das VCC-Verfahren sowie das Thermoselect-Verfahren näher erläutert werden.

Um einem Befremden in der Zuhörerschaft zu begegnen, sei an dieser Stelle angemerkt, daß das Thermoselect-Verfahren im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes sicherlich kein „Verwertungsverfahren“ darstellen kann, da es, wie auch das Schwel-Brenn- und das Konversionsverfahren, zur Hausmüllbeseitigung entwickelt worden ist.

Allerdings lassen sich an diesem Beispiel einige interessante Aspekte der Verwertung von Reststoffen, respektive Abfällen zur Verwertung, darstellen, die bei der thermischen Behandlung von Restmüll entstehen.

2 Verfahrensbeschreibungen

A Das ESPAG-Verfahren

Das Verfahren der Energiewerke Schwarze Pumpe AG stellt eine Fortentwicklung der seit den 60er Jahren am selben Standort in Sachsen betriebenen Stadtgas erzeugung dar. Das Verfahren wurde in den letzten Jahren so modifiziert, daß an Stelle der früher verwendeten Braunkohle nun eine Vergasung von Reststoffen möglich ist.

Verfahrensschritte	
festе Abfälle	flüssige Abfälle
<ul style="list-style-type: none"> • Zerkeinerung mittels Shredder • Abtrennung von Eisen, NE-Metallen und inertem Material • Trocknung • Brikettierung 	
<ul style="list-style-type: none"> • Festbettdruckvergasung • Synthesegasreinigung 	Flugstromvergasung Synthesegasreinigung
Betriebsparameter	
Betriebsdruck:	25 bar
Betriebstemperatur:	800 - 1.300°C (Festbett); 1.350°C bzw. 1.800°C (Flugstrom)
Besonderheit	
"Huckepack"-Verfahren:	Abfall + Kohle/Öl Verhältnis: 1:9 bis 1:2

Bild 2: Eckdaten des ESPAG-Verfahrens

Während flüssige Abfälle direkt der Flugstromvergasung und stückige, feste Abfälle der Festbettdruckvergasung zugeführt werden können, müssen nicht-stückige, feste Abfälle zunächst aufbereitet werden. Dabei werden folgende Verfahrensschritte angewandt:

1. Zerkeinerung mittels Shredder
2. Abtrennung von Eisen, NE-Metallen und inertem Material
3. Trocknung
4. Brikettierung

Anschließend werden die so erzeugten Abfallbriketts der Festbettdruckvergasung zugeführt.

Bei der Festbettdruckvergasung wird das stückige Gut mit Korngrößen von max. 100mm einem Gegenstrom-Schachtreaktor zugeführt. Dort erfolgt bei Temperaturen von 800 - 1.300°C und Drücken von ca. 25 bar eine Umsetzung des Einsatzmaterials. Als Vergasungsmittel wird ein Sauerstoff/Wasserdampfgemisch verwendet. Der Vergasungsprozeß ist ein autothermer Vorgang, d.h. die benötigte Wärmemenge wird durch die ablaufenden chemischen Reaktionen, hier vor allem durch eine partielle Verbrennung, gedeckt.

Die Flugstromvergasung wird am Standort in Schwarze Pumpe in 2 Verfahrensvarianten durchgeführt:

Ein Vergaser für flüssige, überwiegend feststofffreie Abfälle, der bei einer Temperatur von 1.350°C betrieben wird, sowie ein weiterer Reaktor, der für Öl-Feststoffgemische geeignet ist und der eine Betriebstemperatur von 1.800°C hat. Beide Reaktoren arbeiten wie der Festbettvergaser bei ca. 25 bar.

Charakteristisch für das ESPAG-Verfahren ist der Umstand, daß den eingesetzten Abfallstoffen im Falle fester Abfälle Kohle, und im Falle flüssiger Abfälle Öl zugemischt wird. Je nach Einsatzmaterial variieren die Abfallanteile zwischen 10 und 45%, belastete Öle können ohne Zumischung vergast werden.

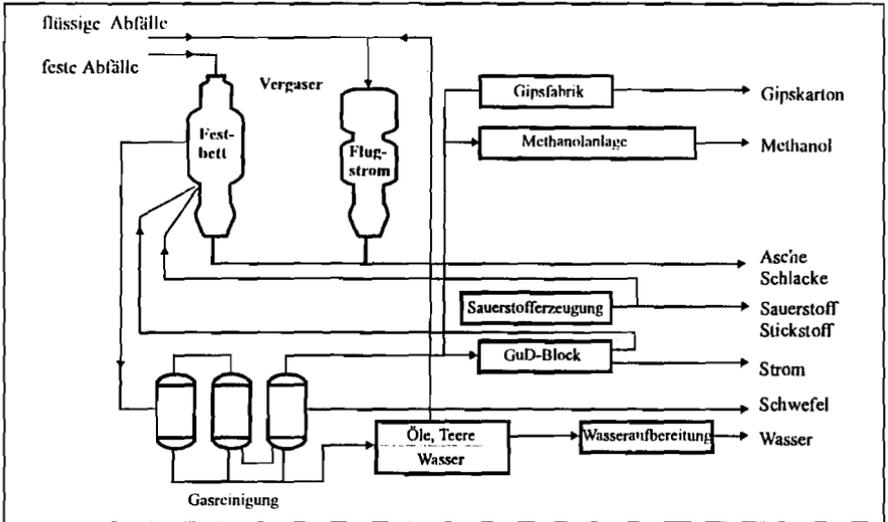


Bild 3: Fließschema des ESPAG-Verfahrens

Im einzelnen beinhaltet der Verfahrensablauf folgende Schritte:

Nachdem das Einsatzmaterial auf den Anlagendruck gebracht worden ist, wird es am Kopf des entsprechenden Reaktors zudosiert. Das Vergasungsmittel wird beim Festbettreaktor am Fuß, beim Flugstromreaktor am Kopf des Reaktors zugegeben. Die entstehende Schlacke läuft aufgrund der hohen Temperaturen flüssig ab. Das Rohgas wird beim Verlassen des Reaktors schockartig mittels eines Quenchsystems auf eine Temperatur unterhalb 200°C und im weiteren Verlaufe der Reinigung bzw. Aufbereitung bis auf 25°C abgekühlt.

Entspricht das CO/H₂-Verhältnis nicht den geforderten Parametern, so kann in einer Konvertierungsanlage gemäß der chemischen Gleichung



eine gezielte Einstellung des gewünschten Verhältnisses erfolgen.

Das gereinigte Synthesegas wird zum einen für die Energieerzeugung in einer Gas- und Dampfturbinenanlage und zum anderen für die Herstellung von Methanol in einer eigens hierfür errichteten Anlage verwendet. Bei der Gasreinigung anfallender Gips wird in einer benachbarten Gipsfabrik verwertet.

<u>eingesetzte Abfälle</u>	
Altkunststoffe (teilweise bereits kompaktiert)	80 - 130.000 t/a
Klärschlamm (trocken und naß)	80 - 130.000 t/a
sonstige feste Abfälle	30 - 50.000 t/a
<ul style="list-style-type: none"> • Elektronik-Schrott • kontaminiertes Holz • Altlacke und Altfarben 	
flüssig/pastöse Abfälle	45.000 t/a
<ul style="list-style-type: none"> • belastete Öle • Schlämme 	
<u>Produkte</u>	
Methanol	100.000 t/a
Schlacke	7 t/h
Gips	-
Schwefel	-

Bild 4: Eingesetzte Abfälle und Produkte des ESPAG-Verfahrens

Das Spektrum der eingesetzten Abfallstoffe reicht von Altkunststoffen über ölhaltige Betriebsmittel bis hin zu PCB-belasteten Ölen oder Öl/Wassergemischen.

Nach Fertigstellung des kompletten Sekundärrohstoffverwertungszentrums (SVZ) sollen insgesamt rund 220.000 t feste Rückstände im „Huckepack“-Verfahren zusammen mit ca. 250.000 t Trockenkohle verwertet werden. Weitere rund 45.000 t flüssige Reststoffe sollen in der Flugstromvergasung eingesetzt werden.

Als Vergasungsprodukte verbleiben eine Schlacke sowie ein Synthesegas, welches nach einer entsprechenden Reinigung als Rohstoff für die Methanol-Erzeugung oder aber für die Energieerzeugung in einer Gas- und Dampfturbinenanlage genutzt wird. Die in der GuD-Anlage erzeugte Energie wird zur Deckung des Eigenbedarfs verwendet.

Insgesamt sollen im SVZ 100.000 t Methanol pro Jahr produziert werden. Darüber hinaus werden rund 7 t Schlacke pro Stunde produziert, welche als Folge des flüssigen Schlackeaustrages und den damit verbundenen günstigen Eluatwerten für eine Verwertung, z.B. im Straßenbau, geeignet ist.

B Das VCC-Verfahren

Beim Yeba-Combi-Cracking-Verfahren handelt es sich ähnlich wie beim ESPAG-Verfahren um die Weiterentwicklung eines Verfahrens, das ursprünglich nicht für die Verwertung von Abfällen, sondern für die Kohleverflüssigung entwickelt worden ist. Der gesamte Prozeß umfaßt dabei folgende Verfahrensschritte:

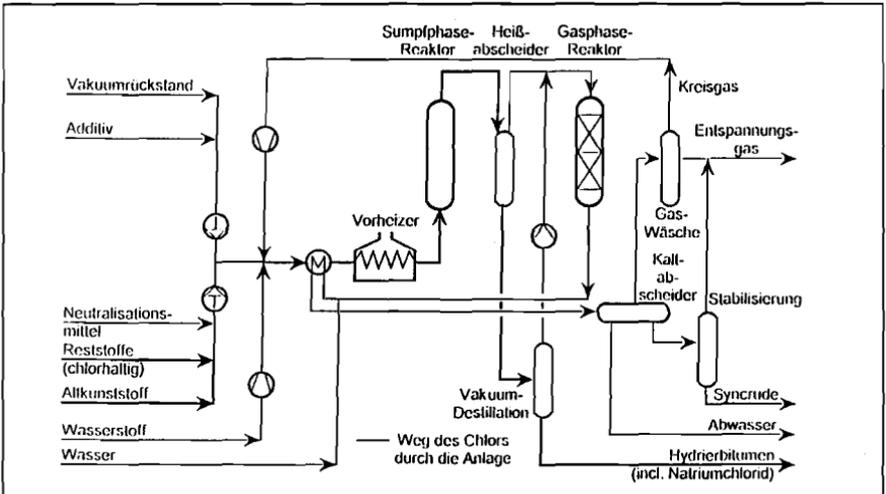


Bild 5: Fließschema des VCC-Verfahrens

- Das Einsatzmaterial wird nach Zugabe eines Additivs mit Hilfe einer Hochdruckpumpe auf den Prozeßdruck von 300 bar gebracht.
- Anschließend erfolgt eine intensive Vermischung mit Wasserstoff und die Erwärmung des Gemisches über Wärmeaustauscher und einen Vorheizser auf die Reaktionstemperatur von 440 - 480°C.
- In der nun folgenden Kaskade aus 3 Sumpffasenreaktoren erfolgt die eigentliche Spaltung der langkettigen Kohlenwasserstoffe. Die hierbei entstehenden „Bruchstücke“ werden durch Wasserstoff abgesättigt.
- Am Ende der Kaskade wird das Reaktionsgemisch mit Hilfe eines Heißabscheiders in leicht- und schwersiedende Komponenten getrennt.
- Die schwersiedende Fraktion, die auch nicht umgesetztes Einsatzmaterial enthält, wird einer Vakuumdestillation unterworfen. Als Sumpfprodukt bleibt ein Hydrierbitumen zurück, der nahezu den gesamten eingebrachten Chloranteil enthält.
- Das Kopfprodukt der Vakuumdestillation wird zusammen mit den leichtsiedenden Komponenten abschließend einer katalytischen Gasphasenhydrierung zugeführt.
- Nach Abtrennung der Produkte wird der überschüssige Wasserstoff zurückgeführt.

Haupteinsatzstoffe:

Vakuurrückstände aus der Erdölraffination
Altkunststoffe (Verpackungsmaterialien und Kunststoffe aus dem Automobilrecycling)

Sonstige Einsatzstoffe:

Schneidöle
Entfettungsrückstände
Lösungsmittel (auch halogenhaltig)
Lackschlämme
Aktivkohlen

Produktspektrum:

Entspannungsgas	(ca. 10 Gew.%)
Gemisch flüssiger Kohlenwasserstoffe	(ca. 80 Gew.%)
20% Naphta und Benzin	
60% Mitteldestillat (Diesel)	
20% Öl	
Hydrierbitumen	(ca. 10 Gew.%)

Bild 6: Einsatzstoffe und Produkte des VCC-Verfahrens

Die für die Hydrierung in Frage kommenden Abfälle sind im wesentlichen Vakuurrückstände aus der Erdölraffination sowie Altkunststoffe aus den Bereichen Verpackungen und Automobile. Darüber hinaus ist die Verwertung einer ganzen Reihe weiterer Abfälle möglich. Hierzu zählen

Schneidöle,
Entfettungsrückstände,
Lösungsmittel (auch halogenhaltig),
Lackschlämme sowie
Aktivkohlen (belastet).

Die Altkunststoffe können als Mischfraktion eingesetzt werden, was den Sortieraufwand deutlich reduziert. (Vorwiegend) durch PVC eingeschlepptes Chlor setzt sich innerhalb des Prozesses zunächst zu HCl und nach Zugabe von Alkalisalzen quantitativ zu den entsprechenden Chloriden um, welche sich im Hydrierbitumen wiederfinden.

Neben diesem Hydrierbitumen fallen als Produkte ein flüssiges Gemisch verschiedener aliphatischer und aromatischer Kohlenwasserstoffe sowie ein Entspannungsgas (ca. 10 Gew.% des eingesetzten Materials), vornehmlich CH_4 und C_2H_6 , an. Das synthetische Rohöl besteht typischerweise

zu 20 Gew.% aus Naphta und Benzin,
 zu 60 Gew.% aus einem Mitteldestillat (Diesel) sowie
 zu 20 Gew.% aus Öl.

Es kann zur Herstellung von Treibstoffen und zur Erzeugung von Vorprodukten für die Kunststoffherstellung weiterverarbeitet werden.

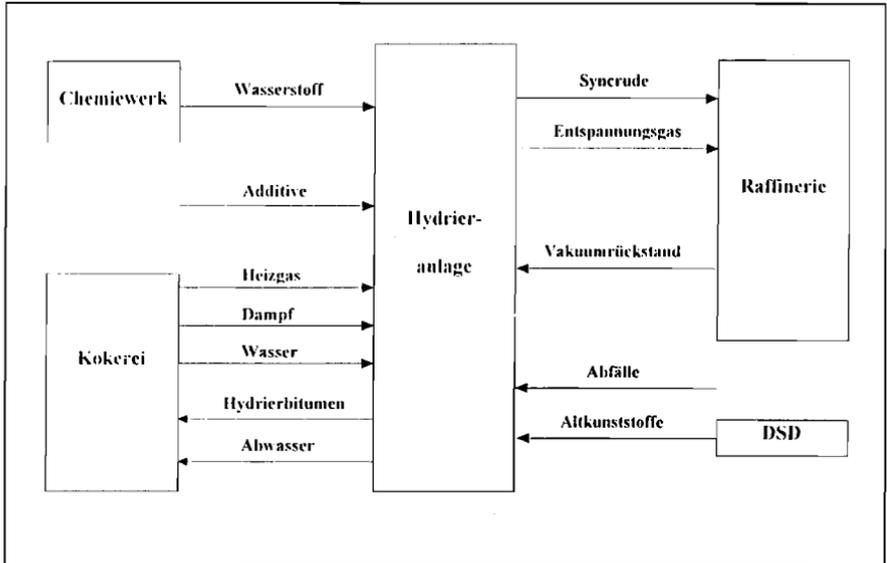


Bild 7: Infrastrukturelle Einbindung der Hydrieranlage

Anzumerken ist hier, daß ein solches Verfahren mit aller Wahrscheinlichkeit kein zweites mal in Deutschland zur Anwendung kommen wird, da die Wirtschaftlichkeit ganz enorm von den strukturellen Gegebenheiten am Standort in Bottrop bestimmt wird. So wird der benötigte Wasserstoff von der nahegelegenen Hüls AG via Pipeline geliefert. Für den Prozeß benötigtes Heizgas, Dampf sowie Wasser werden von der auf demselben Gelände liegenden Kokerei bezogen. Die zur Erzielung der notwendigen Viskosität benötigten Additive werden ebenfalls via Pipeline geliefert. Das erzeugte synthetische Rohöl, das sogenannte Syncrude, wird von einer benachbarten Raffinerie verarbeitet. Letztlich ermöglicht diese Einbindung der Anlage eine Minimierung der Transportkosten und damit eine wirtschaftliche Verfahrensweise.

C Das Thermo-Select-Verfahren

Im Unterschied zu den beiden oben beschriebenen Verfahren handelt es sich beim italienischen Thermo-Select-Verfahren um ein speziell für die thermische Behandlung von Abfällen entwickeltes Verfahren. Ein weiterer Unterschied besteht darin,

daß das Thermo-Select-Verfahren speziell für den Einsatz von Restmüll konzipiert wurde.

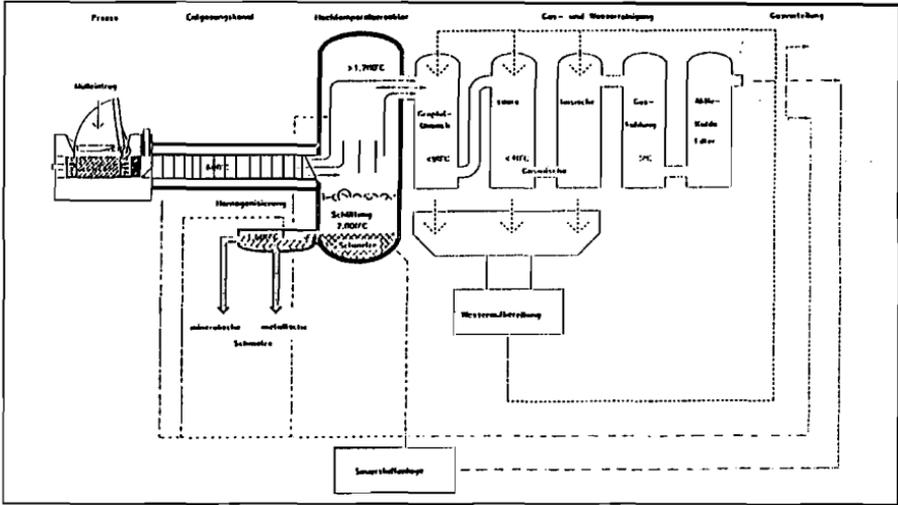


Bild 8: Fließschema des Thermo-Select-Verfahrens

Während das Schmel-Brenn- oder das Konversionsverfahren diskontinuierliche Verfahren in dem Sinne darstellen, daß nach der Pyrolysestufe eine Fraktionierung des Pyrolysekokes durchgeführt wird, stellt das Thermo-Select-Verfahren ein kontinuierliches Verfahren dar, bei dem die beiden Prozessschritte Entgasung und Vergasung zwar räumlich wie zeitlich voneinander getrennt, jedoch unterbrechungslos nacheinander ablaufen. Die wesentlichen Verfahrensschritte stellen sich dabei wie folgt dar:

1. Der angelieferte Restmüll wird mittels herkömmlicher Schrottpressen zu „Müllpfropfen“ verdichtet. Dabei wird das Volumen auf ca. 10% des Ausgangswertes reduziert. Diese Verdichtung hat anlagentechnisch den Sinn, daß der Müllpfropfen als gasdichte Abdichtung fungiert, auf der anderen Seite ist hierdurch eine kompakte und damit wirtschaftliche Bauweise der Ent- und Vergasungsaggregate möglich.
2. Die „Müllpakete“ werden nacheinander in einen Entgasungskanal geschoben. (Der Raum, der dabei zwischen zwei Müllpaketen leer bleibt, kann für die Zugabe pastöser oder sogar flüssiger Abfälle genutzt werden.) Durch eine Außenbeheizung wird am Ausgang des Kanals, welcher gleichzeitig den Eingang zum Vergaser darstellt, eine Temperatur von ca. 600°C erreicht.
3. Bevor der so teilweise entgaste Müll in den Vergasungsreaktor fällt, wird er durch Hochtemperaturstrahlung auf ca. 800°C aufgeheizt. Hierdurch erfolgt eine nahezu vollständige Entgasung. Beim Eintritt in den Reaktor bewirkt der verbleibende

Entgasungsdruck ein Zerplatzen und Verteilen des Müllpaketes im Reaktionsraum.

Bei Temperaturen von 1.200°C und einem Druck von ca. 1,2 bar erfolgt dort die Umsetzung (Vergasung) der organischen Müllbestandteile mit O₂ und dem im Überschuß vorliegenden Wasserdampf zu einem Synthesegas.

Die metallischen und mineralischen Bestandteile werden verflüssigt und am Fuße des Reaktors abgezogen. Durch Frischen mit O₂ wird die Schmelze von Begleitstoffen, hauptsächlich Kohlenstoff, Silizium und Phosphor, befreit. Die starke Exothermie der hierbei ablaufenden Oxidationsreaktionen führt zu einem Ansteigen der Temperatur der Schmelze auf ca. 2.000°C. Bei ca. 1.600°C erfolgt anschließend die Trennung der mineralischen und metallischen Schmelze.

- Nach einer Schockquenchung des Synthesegases mittels Wasser und anschließender Gaswäsche erfolgt zur Reduzierung des Feuchtegehaltes eine Abkühlung des Gases auf T < 80°C. Abgeschlossen wird die Synthesegasreinigung durch einen Aktivkohlefilter.

Eine entsprechende (Pilot-)Anlage mit einer Kapazität von 4,2 t/h wird in Fondotoce (Italien) betrieben. Für mehrere Standorte liegen Anträge auf eine Genehmigung vor, die erste großtechnische Anlage ist in Ansbach geplant.

In bezug auf die Reststoffsituation des Thermo-Select-Verfahrens lassen sich folgende Aussagen, die ähnlich auch für das Konversionsverfahren oder ESPAG-Verfahren gelten, treffen:

<ul style="list-style-type: none"> • stofflich verwertbare anorganische Bestandteile werden abgetrennt • organische Schadstoffe werden thermisch umgewandelt („vernichtet“) • anorganische Schadstoffe werden in eine schadlos deponierbare, konzentrierte Form überführt • organische Bestandteile werden direkt thermisch oder nach Umsetzung zu einem Synthesegas stofflich verwertet 																				
<p>Abfälle zur Verwertung</p> <table> <tr> <td>Eisen:</td> <td rowspan="2">}</td> <td rowspan="2">(29 kg/t)</td> <td>Recycling in der Metallhütte</td> </tr> <tr> <td>NE-Metalle:</td> <td>Verarbeitung zu Industrieprodukten</td> </tr> <tr> <td>Inertien:</td> <td rowspan="2">}</td> <td rowspan="2">(230 kg/t)</td> <td>Einsatzmaterial für die Baustoffindustrie</td> </tr> <tr> <td>Schmelzgranulat:</td> <td>Verwertung im Straßenbau</td> </tr> <tr> <td>Synthesegas:</td> <td></td> <td>(1.200 m³/t)</td> <td>Energierzeugung, Synthese von Methanol bzw. Benzin</td> </tr> <tr> <td>Gasreinigungsrückstände:</td> <td></td> <td>(17 kg/t)</td> <td>Verarbeitung zu Industrieprodukten</td> </tr> </table>	Eisen:	}	(29 kg/t)	Recycling in der Metallhütte	NE-Metalle:	Verarbeitung zu Industrieprodukten	Inertien:	}	(230 kg/t)	Einsatzmaterial für die Baustoffindustrie	Schmelzgranulat:	Verwertung im Straßenbau	Synthesegas:		(1.200 m ³ /t)	Energierzeugung, Synthese von Methanol bzw. Benzin	Gasreinigungsrückstände:		(17 kg/t)	Verarbeitung zu Industrieprodukten
Eisen:	}			(29 kg/t)	Recycling in der Metallhütte															
NE-Metalle:		Verarbeitung zu Industrieprodukten																		
Inertien:	}	(230 kg/t)	Einsatzmaterial für die Baustoffindustrie																	
Schmelzgranulat:			Verwertung im Straßenbau																	
Synthesegas:		(1.200 m ³ /t)	Energierzeugung, Synthese von Methanol bzw. Benzin																	
Gasreinigungsrückstände:		(17 kg/t)	Verarbeitung zu Industrieprodukten																	

Bild 9: Reststoffsituation des Thermo-Select-Verfahrens

- stofflich verwertbare anorganische Bestandteile werden abgetrennt
- organische Schadstoffe werden thermisch umgewandelt („vernichtet“)
- anorganische Schadstoffe werden in eine schadlos deponierbare, konzentrierte Form überführt
- organische Bestandteile werden direkt thermisch oder nach Umsetzung zu einem Synthesegas stofflich verwertet

Als Abfälle zur Verwertung fallen beim Thermo-Select-Verfahren im wesentlichen Inertien (Glas, Keramik) und Schmelzgranulat mit ca. 230 kg je eingesetzter Tonne Müll und Synthesegas mit ca. 1.200 m³ je Tonne an. Daneben fallen rund 29 kg/t Metall und 17 kg/t Gasreinigungssalze an.

Während die Metallfraktion aufgrund sehr geringer Konzentrationen umweltrelevanter Stoffe in der Metallurgie verwertbar ist, kann das Schmelzgranulat, das sich durch günstige Eluatwerte auszeichnet, z.B. als Zuschlagstoff für die Betonherstellung verwendet werden.

Das Synthesegas, das mit Abstand das Hauptprodukt darstellt (ca. 800 kg/t), kann entweder zur Energieerzeugung oder aber zur Herstellung von Methanol bzw. Benzin verwendet werden.

Damit ermöglicht das Thermo-Select-Verfahren im Unterschied zur konventionellen Hausmüllverbrennung eine zumindestens teilweise rohstoffliche Verwertung des Kohlenstoffanteils im Hausmüll und trägt somit seinen Teil zur Kreislaufwirtschaft bei.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß alle im Vorangegangenen skizzierten thermischen Verfahren ihren Beitrag zur Kreislaufführung von Stoffen leisten.

Während das ESPAG- und das VCC-Verfahren geeignet sind, selbst besonders überwachungsbedürftige Abfälle, wie PCB-belastetes Altöl, rohstofflich zu verwerten, stellt das Thermo-Select-Verfahren eine attraktive Alternative zur Hausmüllverbrennung (HMV) dar. Die großtechnische Bewährung steht allerdings noch aus.

Zu den alternativen Verfahren zur konventionellen HMV, von denen hier aus zeitlichen Gründen nur das Thermo-Select-Verfahren angesprochen worden ist, ist anzumerken, daß sie ohne Zweifel hinsichtlich der stofflichen Verwertung der Hausmüllverbrennung überlegen sind, allerdings ist noch keinesfalls geklärt, wie ein Vergleich im Rahmen einer Ökobilanz unter Berücksichtigung aller Randparameter ausfallen wird.

Hier sei auch die im Auftrage des LUA NRW erstellte Studie bezüglich des energetischen Wirkungsgrades thermischer Hausmüllentsorgungsanlagen erwähnt, die keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Verfahren ergeben hat. Zu-

sammen mit dem Umstand, daß sämtliche Verfahren die Grenzwerte der 17. BImSchV sicher unterschreiten, bedeutet dieses Ergebnis, daß bei der Wahl eines Verfahrens letztlich immer die Wirtschaftlichkeit den Ausschlag geben sollte.

Lassen Sie mich abschließend auch noch anmerken, daß zu den thermischen Verwertungsverfahren, die bereits seit einigen Jahren große Abfallmengen aufnehmen, sicherlich auch die pyrometallurgische Verwertung metallhaltiger Abfälle, insbesondere von Metallschlümmen, gehört. Wie die intensive Beschäftigung mit diesen Verfahren in unserem Hause zeigt, werden die in der Pyrometallurgie verwerteten Abfallmengen in Zukunft weiter ansteigen, diese Verfahren damit zunehmend einen Beitrag zur Kreislaufführung von Stoffen leisten.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. rer. nat. Jan-Dirk Herbell
Dr. rer. nat. Stefan Große-Allermann
Institut für Umwelttechnologie und Umweltanalytik e.V.
Abteilung Abfallwirtschaft
Bliersheimerstraße 60
47229 Duisburg

11. Produktionsintegrierte Energiegewinnung am Beispiel der Holzverarbeitenden Industrie

R. Marutzky, Braunschweig

1 Einleitung

Das am 7. Oktober 1996 in Kraft getretene Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz fordert für nicht vermeidbare Abfälle die Verwertung oder die Beseitigung. Bei der Be- und Verarbeitung von Holz und Holzwerkstoffen und bei der Herstellung von Produkten fallen Produktionsreste an. Nach Gebrauch werden Holzprodukte zu Alt- oder Gebrauchtholz. Beide Abfallgruppen sind von den Bestimmungen des neuen Gesetzes betroffen. Die Entsorgung wirft dabei verschiedene Probleme auf, die derzeit diskutiert werden und die noch einer Lösung bedürfen (Schneider, Deppe 1996, Schmidt 1996). Die folgende Betrachtung soll die verschiedenen Verwertungswege für Rest- und Gebrauchtholz unter besonderer Berücksichtigung der produktionsintegrierten Energiegewinnung in der Holzverarbeitenden Industrie darstellen.

2 Holzanfall und Zusammensetzung

In Deutschland wachsen derzeit pro Jahr etwa 60 Mio. Kubikmeter Holz entsprechend einer Trockenmasse von rund 30 Mio. t nach. Davon werden etwa 2/3 eingeschlagen und zu Balken, Brettern, Masten, Schwellen, Pfählen, Möbeln, Packmitteln, Holzwerkstoffen, Papier und anderen Holzprodukten verarbeitet. Nach den Sägewerken ist dabei die Holzwerkstoffindustrie der wichtigste Nutzer des Holzes. Die Papier- und Zellstoffindustrie hat als Schwach- und Restholzverwerter dagegen zunehmend an Bedeutung verloren. Dies liegt zum einen am stark gestiegenen Recycling von Papier, zum anderen an der Verschiebung der Produktionskapazitäten für Zellstoffe ins Ausland.

Die bei der Bearbeitung des Holzes anfallenden Sägespäne, Hobelspäne, Furnierrestrollen, Schwarten, Spreisel, Kappstücke, u.a.m. entsprechen in ihrer Zusammensetzung dem naturbelassenen Holz. In der Holzwerkstoffindustrie sowie in Holzverarbeitenden Betrieben des Handwerks und der Möbelindustrie fallen darüber hinaus Produktionsreste an, die Bindemittel, Anstrichstoffe und Beschichtungen ("Störstoffe") enthalten. Be- und Verarbeitungsreste, die Holzschutzmittel ("Kontaminationen") enthalten, sind heute eher selten und beschränken sich im wesentlichen auf Abfälle beim Zuschnitt von imprägniertem Bauholz und bei der Herstellung geschützter Holzwerkstoffe. Bild 1 verdeutlicht die Menge und Zusammensetzung der anfallenden Resthölzer. In Tabelle 1 sind Angaben zum Verbleib des in der Holzindustrie anfallenden Restholzes aufgeführt.

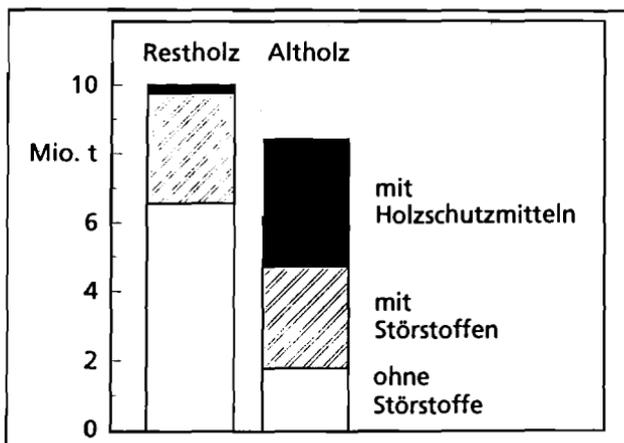


Bild 1: Menge und Zusammensetzung von Rest- und Gebrauchtholz

Tabelle 1: Verbleib des industriellen Restholzes nach Untersuchungen von Frühwald (1990)

Verbleib	(%)
Rohstoffnutzung	
- Zellstoff/Papier	22
- Spanplatten	22
- Faserplatten	3
- andere	2
Energienutzung	
- Holzindustrie/Handwerk	36
- übriges Gewerbe	6
- private Haushalte	3
Deponie/ Humus	6

Nach ihrer Verwendung werden Holzprodukte zu Alt- oder Gebrauchtholz. Der jährliche Gebrauchtholzfall in Deutschland beträgt etwa 8 Mio. t. Davon wird derzeit etwa die Hälfte Sammel- und Verwertungsstellen zugeführt. In Zukunft ist mit einer Zunahme des erfaßten Holzes zu rechnen. Die Zusammensetzung des Gebrauchtholzes ist vielfältig und nicht immer bekannt (Voß, Willeitner 1994). Auch ist ein größerer Teil des Gebrauchtholzes mit ökologisch relevanten Bestandteilen behaftet als beim Restholz (Bild 1). Dies kann bei unsortierten Mischholzsportimenten den Entsorgungsweg der Gesamtcharge bestimmen. Daneben gibt es aber auch nicht oder wenig belastete Materialien. Tabelle 2 gibt eine Übersicht der verschiedenen Gebrauchtholzsortimente und der darin enthaltenen Fremdstoffe.

Tabelle 2: Einteilung, Zusammensetzung und Mengenanfall der wichtigsten Gebrauchtholzsortimente mit typischen Beispielen

Gebrauchtholzsortiment	Zusammensetzung	Beispiele (Auswahl)	Geschätzter Mengenanfall Mio. t / a
Holzpackmittel	wenig Fremdstoffe keine Holzschutzmittel	Kisten, Steigen, Paletten	1,0 (ca. 10 %)
Holz aus dem Baubereich	zahlreiche Fremdstoffe, z.T. Holzschutzmittel	Fenster, Türen, Treppen, Dachstühle, Bodendielen	3,2 (ca. 40 %)
Holz aus der Außenanwendung	fast immer mit Holzschutzmitteln behandelt	Schwellen, Masten, Zäune, Stangen, Pfähle	0,7 (< 10 %)
Gebrauchte Möbel, möbelartige Holzteile	zahlreiche Fremdstoffe, keine Holzschutzmittel	Kastmöbel, Sitzmöbel, Wand- und Deckenpaneele, Laminatfußböden	2,8 (35 %)
sonstige Holzteile	variabel	Kabeltrommeln, Gründungspfähle	< 0,3 (< 5 %)

3 Sortierung, Aufbereitung und Qualitätssicherung

Um die Gebrauchthölzer optimal in der Wirtschaftskreislauf zu integrieren, müssen sie getrennt erfaßt oder sortiert werden. Ein Teil der Holzsortimente kann aufbereitet werden. Zur Qualitätskontrolle sind Stichproben- und Deklarationsanalysen erforderlich. Die verschiedenen Schritte der Qualitätssicherung umfassen daher die Anfallstelle, die Aufbereitungsanlage und die Anlage des Verwerfers. In Tabelle 3 sind die verschiedenen Qualitätssicherungsmaßnahmen zusammengefaßt. Durch Kombination von Sortier- und Aufbereitungsverfahren und unter Einbeziehung von Qualitätssicherungssystemen lassen sich so Gebrauchtholzsortimente gewinnen, die zur stofflichen oder energetischen Verwertung in der Holzwerkstoffindustrie geeignet sind (Ostwald 1995, Marutzky 1996). Bild 2 zeigt die Teilschritte beim Aufbereitungsvorgang und die Schnittstelle zwischen Abfall- und Produktbereich.

Tabelle 3: Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Sammlung, Aufbereitung und Verwertung von Gebrauchtholz

Verwertungsschritt	Qualitätssicherungsmaßnahmen
Anfallstelle	Sammlung nach Herkunft und Anwendung gezielter Rückbau Vorsortierung Orientierungsanalysen Kennzeichnung nach Herkunft und Anwendung
Zwischenlagerung und Transport	strikte Getrennthaltung Deklarationsbögen Vermeidung von Vermischung und Verunreinigung Transportdokumentation
Aufbereitungsstelle	Festlegung von Annahmekriterien Eingangskontrolle 2. Sortierstufe Überwachung des Aufbereitungsprozesses Ausgangskontrolle mit Stichproben- und Deklarationsanalysen Dokumentation Personalschulung
Verarbeitungsstelle	Eingangskontrolle Stichprobenanalyse Kontrollanalyse Getrennthaltung nach Herkunft und Verwertungsweg vertragliche Abmachungen
sonstige Maßnahmen	Öffentlichkeitsarbeit eindeutige Festlegung von Qualitätsstufen und Grenzwerten RAL-Gütezeichen

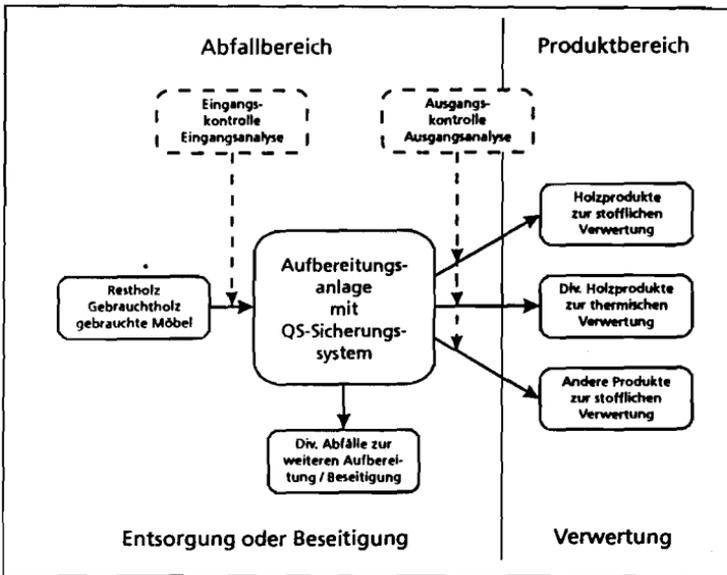


Bild 2: Aufbereitungsvorgänge bei Gebrauchtholz mit der Schnittstelle zwischen dem Abfall- und dem Produktbereich

Durch Kombination von empirischen Erkenntnissen aus der Praxis und begleitenden wissenschaftlichen Untersuchungen hat es auf diesen Gebiet in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gegeben.

4 Zuordnung der Verwertungs- und Beseitigungswege

Die Zuordnung von Abfallhölzern kann vereinfacht wie folgt geschehen:

- Unbehandelte Resthölzer sowie nicht oder wenig verunreinigte Holzpaletten und -packmittel, Holzwerkstoffreste sowie gebrauchte Möbel auf Holz- oder Holzwerkstoffbasis können direkt oder nach Aufbereitung stofflich verwertet werden. Sie sind auch als Brennstoffe nach 1.2 des Anhangs der 4. BImSchV in gewerblichen Feuerungsanlagen der 4. BImSchV/TA Luft verwertbar. Holzteile mit PVC-Beschichtungen sind Brennstoffe nach 1.3 des Anhangs der 4. BImSchV, können aber in den Feuerungsanlagen der 4. BImSchV mit zusätzlichen Emissionsauflagen energetisch verwertet werden.
- Masten, Schwellen und Holzteile aus der Außenanwendung sowie aus dem Garten- und Landschaftsbau sind fast immer mit Schutzmitteln behandelt und damit generell Brennstoffe nach 1.3 des Anhangs der BImSchV für Feuerungsanlagen nach der 17.BImSchV. Eine Dekontamination ist in der Regel nicht möglich. Damit scheidet eine stoffliche Verwertung - abgesehen von wenigen Ausnahmen - aus.

Diese Materialien müssen energetisch verwertet oder thermisch behandelt werden.

- Holzteile aus dem Bauwesen wie Dachstühle, Treppen, Türen oder Fenster werden, sofern eine Analyse nicht das Gegenteil nachweist, wie behandelte Holzteile eingestuft. Sie können durch Aufbereitung dekontaminiert werden (Marutzky 1996).

Aus technologischen und hygienischen Gründen ist ein Teil der Holzabfälle für die stoffliche Verwertung nicht geeignet und muß energetisch verwertet oder durch thermische Behandlung beseitigt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche dieser beiden Entsorgungswege Vorrang haben soll.

Sowohl die Verordnungslage als auch die wissenschaftlichen Erkenntnisse ermöglichen eine energetische Verwertung der belasteten Holzabfälle. Einerseits sind behandelte Hölzer nach dem Immissionsschutzrecht ohne Ausnahme Brennstoffe nach Anhang 1.3 der 4. BImSchV und können somit in Feuerungsanlagen, die der 17. BImSchV unterliegen, energetisch verwertet werden. Andererseits haben wissenschaftliche Untersuchungen und Verbrennungsversuche gezeigt, daß viele Holzschutzmittelwirkstoffe bei gutem Ausbrand und effektiver Abgasentstaubung ohne Emissionsrelevanz sind (Marutzky 1995). Weitere Emissionen, z.B. gas- oder dampfförmige Halogenwasserstoffe können mittels vorhandener Abgasreinigungstechniken beherrscht werden. Eine Vorrangigkeit der Beseitigung wird aus praktischen Erwägungen jedoch im Fall der mit Schutzmitteln auf Quecksilberbasis behandelten Hölzer ("kyanisiert") und der kesseldruckimprägnierten Holzteile mit Salzen auf Arsenbasis empfohlen. Beide Elemente erfordern bei der Verbrennung besonders aufwendige Abgasreinigungseinrichtungen. Hier ist die Beseitigung in einer bereits auf diese Schadstoffe ausgelegten thermischen Behandlungsanlage (Müll- oder Sondermüllverbrennungsanlage) die sinnvollere Lösung.

5 Voraussetzungen für die Verwertung

Voraussetzung für die stoffliche Verwertung ist eine Eignung der Abfälle für den vorgesehenen Einsatzbereich verbunden mit einem entsprechenden Rohstoffbedarf. Die Eignung hat bei Holzabfällen dabei sowohl einen technologischen als auch einen hygienischen Aspekt. Das Holz muß für den potentiellen Verwerter in einer geeigneten Form (Stückigkeit, Form, Verschmutzungsgrad) vorliegen oder mit vertretbarem Aufwand in eine solche überführt werden können. Weiterhin soll es biologisch nicht angegriffen sein. Besonders wichtig ist, daß es nicht oder nur unerheblich mit Holzschutzmitteln kontaminiert ist.

Für die energetische Verwertung sind die genannten Bedingungen von geringerer Bedeutung. Hier ist wichtig, daß beim Verwerter möglichst ganzjährig ein ausreichend hoher Energiebedarf besteht, denn nur dann sind Errichtung und Betrieb einer aufwendigen Energieanlage sinnvoll. Von Vorteil ist dabei ein Bedarf an elektrischer Energie und Prozeßenergie, denn diese werden in der Regel ganzjährig benötigt. Wärmeenergie zur Beheizung von Gebäuden wird dagegen nur für einen Teil des Jahres gebraucht.

Berücksichtigt man diese Grundbedingungen, so ist in der Forst- und Holzwirtschaft die Zahl der Betriebe begrenzt, die Holzabfälle ganzjährig und in ausreichender Menge verwerten können. Die Konditionen für die stoffliche und energetische Verwertung von Rest- und Gebrauchtholz werden vor allem im Bereich der Holzwerkstoffindustrie erfüllt (Leukens 1993, 1996).

Für die Herstellung von 1 Kubikmeter Span- oder Faserplatte werden etwa 1,5 bis 2 Kubikmeter Rohholz benötigt. Es können sowohl groß- als auch kleinstückige Holzsortimente verarbeitet werden. Anhaftende Fremdeile und Verschmutzungen lassen sich vielfach durch Aufbereitung entfernen. Bild 3 zeigt dabei als Beispiel das Ablaufschema der Plattenproduktion in einem Spanplattenwerk. Es werden dabei sowohl thermische als auch elektrische Energie benötigt (Bild 4). Eine Übersicht über den Energieverbrauch für die verschiedenen Holzprodukte geben Bild 5 und Tabelle 4.

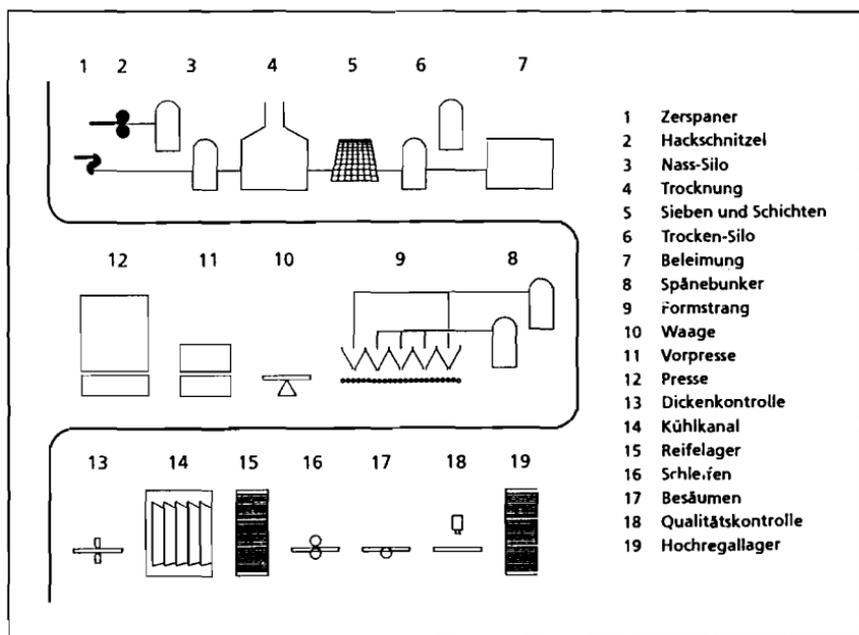


Bild 3: Ablaufschema der Spanplattenproduktion

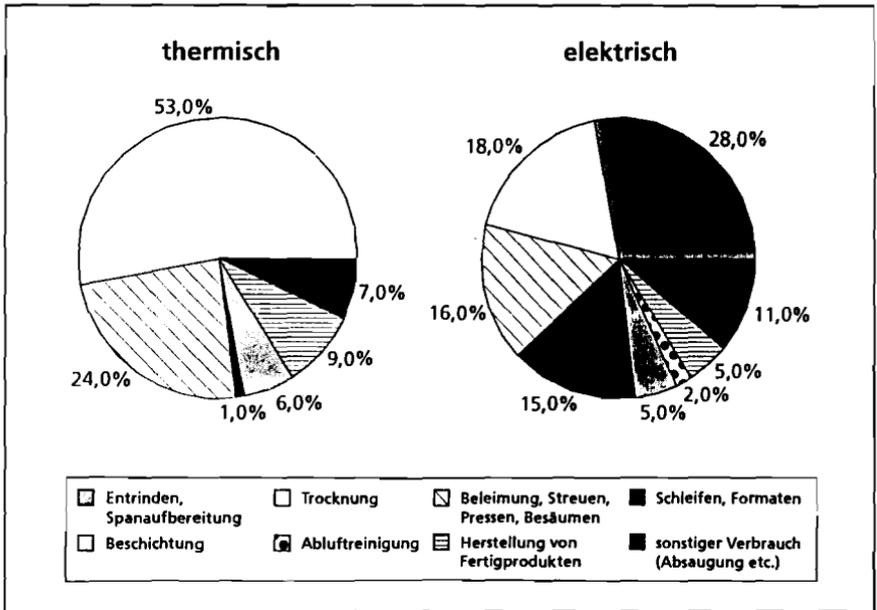


Bild 4: Aufteilung des thermischen und elektrischen Energieverbrauchs bei der Spanplattenherstellung

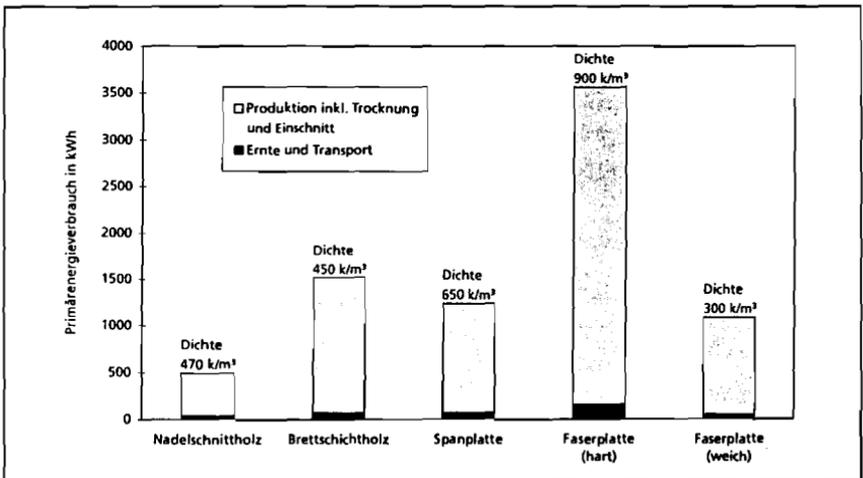


Bild 5: Primärenergieverbrauch bei der Herstellung verschiedener Holzprodukte nach Richter und Sell (1992)

Tabelle 4: Primärenergieverbrauch wichtiger Holzwerkstoffe bei der Herstellung

Plattenart	Hauptbindemittel (% der Holzmasse, atro)	Primärenergieverbrauch *
OSB (oriented strand board)	ca. 2,5 % Phenolharz (Pulver)	ca. 1400 kWh/m ³
Spanplatte	ca. 8,5 % Harnstoffharz	ca. 1400 kWh/m ³
MDF (medium density fibreboard)	ca. 11 % Harnstoffharz	ca. 2450 kWh/m ³
Gipsspanplatte	75 - 80 % Gips	ca. 1150 kWh/m ³ (mit Kalzinierung)
Zementspanplatte	60 - 70 % Zement Davon können 20 - 30 % durch Flugasche ersetzt werden. Das reduziert den Energieverbrauch auf:	ca. 1700 kWh/m ³ (Zementproduktion) ca. 1500 kWh/m ³

* Bei der Stromerzeugung wurde ein Wirkungsgrad von 33 % unterstellt.

Quelle: Blson 1995

Auch von der Quantität her sind die Betriebe in der Holzwerkstoffindustrie interessant. Moderne Spanplattenwerke haben heute Produktionskapazitäten von 1000 bis 2000 Kubikmetern pro Tag. Der Rohstoffbedarf der Werke liegt dann zwischen 700 und 1400 t, der Primärenergiebedarf bei etwa 1400 bis 2800 MWh. Bei Faserplattenwerken ist der Rohstoff- und Energiebedarf noch höher.

Weitere Vorteile der Betriebe der Holzwerkstoffindustrie gegenüber anderen potentiellen Verwertungsbereichen sind:

- Die Betriebe sind in Infrastruktur und Logistik der Forst- und Holzwirtschaft eingebunden.
- Es bestehen Erfahrungen im Umgang mit Holzabfällen.
- Es sind Geräte zur Lagerung, zum Transport und zur Aufbereitung vorhanden.
- Es besteht die Möglichkeit sowohl der stofflichen als auch der energetischen Verwertung.
- Durch die Größe der Werke sind ausreichende Verwertungskapazitäten gegeben.

Im Bereich des Restholzes ist die Holzwerkstoffindustrie daher seit Beginn in die Verwertung eingebunden. Die Forderungen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallge-

setzes eröffnen darüber hinaus auch die Einbindung in die Verwertungswege von Gebrauchthölzern.

6 Stoffliche Verwertung in der Holzwerkstoffindustrie

Die Holzwerkstoffindustrie verarbeitet Schwachhölzer aus Durchforstungsmaßnahmen sowie Produktionsreste aus den Säge- und Furnierwerken zu derzeit jährlich etwa 10 Mio. Kubikmetern Spanplatten und etwa 1 Mio. Kubikmeter Faserplatten. Der Rohstoffbedarf der Betriebe liegt somit bei etwa 7 bis 8 Mio. t/a. In den letzten Jahren hat auch die Nutzung von wenig oder nicht belastetem Gebrauchtholz an Bedeutung gewonnen. Bild 6 zeigt die Entwicklung der Mengenverhältnisse und Holzsortimente für die Spanplattenindustrie in den vergangenen 25 Jahren. Bereits heute werden etwa 10 % des Rohholzbedarfs der Spanplattenwerke durch Gebrauchthölzer, vornehmlich Holzpackmittel und -paletten, gedeckt (Bockelmann, Marutzky 1993). Es wird geschätzt, daß sich der Anteil an Gebrauchtholz auf etwa 25 % steigern ließe. Damit könnten pro Jahr bis zu etwa 2 Mio. t Gebrauchtholz stofflich verwertet werden.

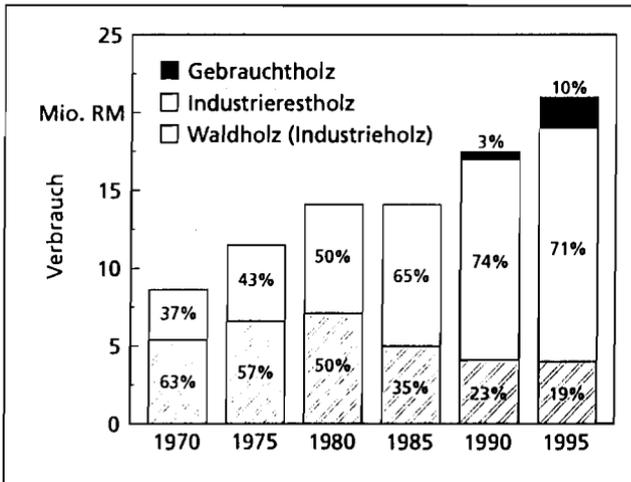


Bild 6: Entwicklung von Menge und Zusammensetzung der Rohstoffsortimente für die Spanplattenherstellung seit 1970

Die stoffliche Verwertung der meisten Gebrauchtholzfraktionen bereitet in diesem Bereich keine Probleme, sofern unerwünschte Fremd- und Störstoffe ausgeschlossen werden. Da die Holzwerkstoffindustrie keine kontaminierten Gebrauchtholzsortimente annehmen möchte, wurden Annahmekriterien aufgestellt. Tabelle 5 gibt ein Beispiel. Für die analytische Überprüfung wurden Leitwerte ausgewählter Elemente und Verbindungen erarbeitet (Tabelle 6).

Tabelle 5: Typische Annahme- und Ausschlußkriterien für Gebrauchtholz in Spanplattenwerken (Auswahl)

Annahmekriterium	Ausschlußkriterium
Holzsortiment* <ul style="list-style-type: none"> • Massivholz aus Abbrüchen • Verpackungsholz • Einwegkisten und -paletten • Holzwerkstoffe 	<ul style="list-style-type: none"> • Holz vermischt oder behaftet mit Kunststoff, Papier, Pappe, Folien oder PVC • unsauberes Bauholz, Möbelteile • stark verschmutzte Obstkisten • mit Holzschutzmitteln behandelte Hölzer
Holzart und -qualität <ul style="list-style-type: none"> • vorwiegend Nadelhölzer • Laubholzanteil nach Vereinbarung 	<ul style="list-style-type: none"> • Holzfäule, Schimmelbefall und Verstokkung
Aufbereitungsbetrieb <ul style="list-style-type: none"> • Nachweis der Qualitätssicherung • Zertifizierung nach ISO 9000 ff. 	
sonstige Anforderungen <ul style="list-style-type: none"> • Unbedenklichkeitsbescheinigung • Deklarationsanalysen 	

* alle Holzsortimente müssen den Bestimmungen der ChemVerbotsVO und der GefStoffVO entsprechen

Ein wichtiges, bisher kaum verwertetes Gebrauchtholzsortiment sind Möbel. Pro Jahr fallen hiervon in der Bundesrepublik Deutschland geschätzt etwa 2,5 Mio. Tonnen an. Ein großer Teil davon sind Kastenmöbel, die zu mindestens drei Vierteln des Gewichts aus Holz- und Holzwerkstoffteilen bestehen. Auch Wand- und Deckenpaneele oder Laminatfußböden aus dem Baubereich haben eine vergleichbare Zusammensetzung. Bisher erfolgte die Entsorgung der Möbel überwiegend auf Depo-nien oder in Müllverbrennungsanlagen.

Die Holzteile der Möbel sind ein hochwertiger Rohstoff, insbesondere da Möbel nicht mit Schutzmitteln behandelt sind. Die Holzwerkstoffe lassen sich durch Kombination von mechanischen, chemisch-hydrolytischen und thermischen Faktoren zu Spänen und Fasern unter Abtrennung von Kunststoff-, Metall- und Massivholzteilen aufschließen. Gleiches gilt für die meisten Produktionsreste in den Span- und Faserplattenwerken und für die bei der Verarbeitung der in der Möbelindustrie oder im Tischlerhandwerk anfallenden Plattenreste. Das Aufschlußverfahren nach Michanickl und Boehme (1986) ist besonders weit fortgeschritten (Bild 7). In zwei Spanplattenwerken wurden inzwischen Pilotanlagen erstellt, in welchen größere Mengen an Recyclingspänen aus Möbeln und Spanplattenresten gewonnen werden. Die Kapazitäten werden derzeit ausgebaut. Im Jahr 1997 dürften auf diesem Weg bereits etwa 75.000 t Sekundärspäne und -fasern in den Produktionsprozeß zurückgeführt werden.

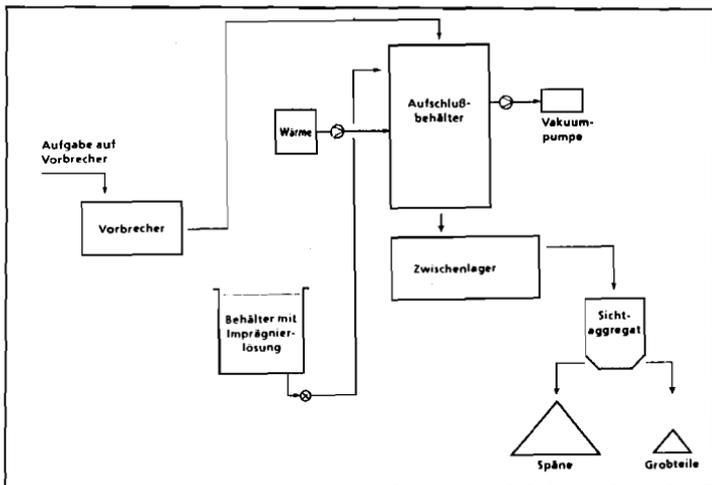


Bild 7: Schematische Darstellung des Aufschlußverfahrens für Holzwerkstoffmöbel und -abfälle nach Michanickl und Boehme (1996)

7 Energetische Verwertung

Holz ist ein traditioneller Brennstoff. Naturbelassene Hölzer sind allgemein zugelassene Brennstoffe - sogenannte Regelbrennstoffe -, die auch bei Kleinfeuerungsanlagen im nicht-gewerblichen Bereich eingesetzt werden dürfen. Bei mit Klebstoffen, Anstrichen und Beschichtungsmitteln versehenen Hölzern ist eine Nutzung in gewerblichen Feuerungen nach der 1. und der 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung zulässig. Für Holzreste mit chlororganischen Beschichtungen sowie bei mit Schutzmitteln versetzten Hölzern gelten besondere Anforderungen. Eine kurze Übersicht der Zuordnung gibt Tabelle 6. Derzeit wird an der Festlegung von Grenzwerten für die verschiedenen Holzfraktionen diskutiert (Winkler 1996, Hoffmann 1996).

Tabelle 6: Leitwerte ausgewählter Elemente und Verbindungen für die stoffliche Verwertung von Gebrauchtholz in der Span- und Faserplattenherstellung

Element/Verbindung	Höchstwert (mg/kg atro)	
Blei	a) 50	b) 30
Chrom	a) 50	b) 30
PCP	a) 5	b) 3
Teeröl	nach Geruch und Verfärbung*	

a) Probenahme aus der Oberfläche

b) Probenahme aus zerkleinertem Material (Mischprobe)

* Nachweis nur bei konkretem Verdacht

Bei der Span- und Faserplattenherstellung besteht für den Aufschluß des Holzes, die Trocknung der Späne und Fasern, die Heißverpressung zu Platten und die Endbearbeitung ein hoher Bedarf an elektrischer und thermischer Energie. Bei der Herstellung und Bearbeitung der Spanplatten fallen je nach Produkt und Technologie etwa 8 bis 15 % Produktionsabfälle an, die nicht oder nur schwer in die Fertigung rückführbar sind. Hierbei handelt es sich um Rinden, Sieb- und Schleifstäube, Besäumsreste und Plattenausschuß. Auch beim Zuschnitt für die Möbelindustrie fallen Sägespäne und Zuschnittreste an. Bei der Faserplattenherstellung kann der Reststoffanfall bis zu 25 % betragen.

Der überwiegende Teil dieser Produktionsabfälle wird seit langem energetisch verwertet. Schleif- und Siebstäube werden dabei zumeist zur Befuerung von direkt beheizten Späne- und Faser Trocknungsanlagen verwendet. Rinden und stückige Holz- und Produktionsabfälle werden in Kesselhäusern zur Erzeugung von Wärme und elektrischer Energie verwendet. Dabei werden zunehmend auch Produktionsabfälle aus anderen Bereichen der Holzwirtschaft angenommen (Merker 1996, Niehaus, Steven 1996). Der Trend geht dabei zu Energiezentralen im Leistungsbereich 50 bis 100 MW mit Kraft-Wärme-Koppelung, die außer Produktionsresten auch belastete Althölzer, z.B. bestimmte Monochargen wie Eisenbahnschwellen energetisch verwerten (Bild 8). Diese Anlagen werden in der Regel als Mischfeuerungen nach der 17. BImSchV konzipiert. Durch Brennversuche wurde nachgewiesen, daß in modernen Feuerungsanlagen auch die als problematisch geltenden Eisenbahnschwellen in Anteilen bis 25 % emissionsarm verbrannt werden können (Vaget 1996).

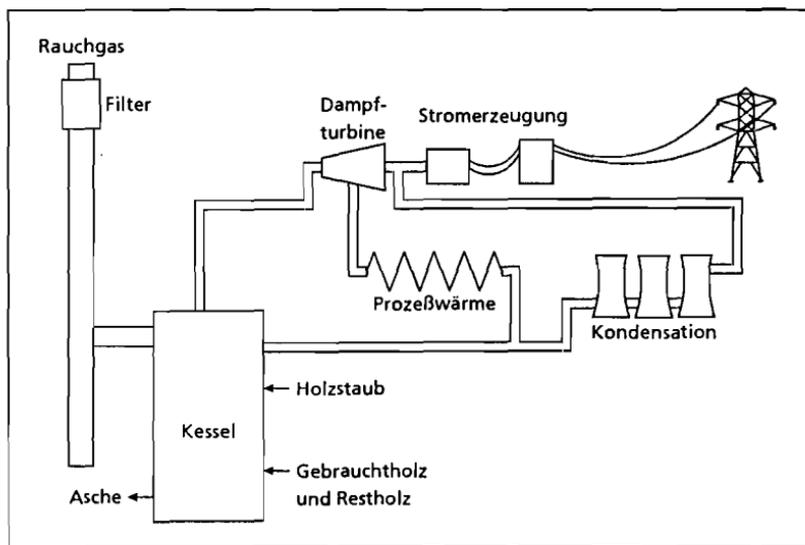


Bild 8: Schematische Darstellung eines Heizkraftwerkes in einem Spanplattenwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung für die energetische Verwertung von Rest- und Gebrauchthölzern

Der Brennstoffbedarf dieser Energiezentralen ist erheblich. Bei 8.000 Betriebsstunden ist eine Anlagen von 60 MW in der Lage, jährlich 120.000 bis 150.000 t Produktionsreste und sonstige Holzabfälle energetisch zu verwerten. Für die gesamte Span- und Faserplattenindustrie errechnet sich bei einem Primärenergiebedarf von ca. $16,5 \times 10^6$ MWh eine mögliche Verbrennungskapazität von 4,5 Mio. Holz t. Da hiervon etwa 0,8 Mio. t eigene Produktionsreste sind, könnten die Betriebe theoretisch bis 3,8 Mio. t Rest- und Gebrauchthölzer zur energetischen Verwertung annehmen.

Tabelle 7: Zuordnung von Holzresten als Brennstoffe für Feststofffeuerungsanlagen

Brennstoffbeschreibung/-gruppe	Feuerungsanlagen
<p>Holzreste, naturbelassen * (Gruppe 1)</p> <ul style="list-style-type: none"> • naturbelassenes, stückiges Holz einschließlich anhaftender Rinde, beispielsweise in Form von Scheitholz, Hack-schnitzeln sowie Reisig und Zapfen • naturbelassenes nicht stückiges Holz, beispielsweise in Form von Sägemehl, Spänen, Schleifstaub oder Rinde 	<p>alle Feststofffeuerungen (1., 4., 13. und 17. BImSchV)</p>
<p>Holzreste, nicht naturbelassen** ohne PVC und Holzschutzmittel (Gruppe 2)</p> <ul style="list-style-type: none"> • gestrichenes, lackiertes oder beschichtetes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen • Sperrholz, Spanplatten, Faserplatten oder sonst verleimtes Holz sowie daraus anfallende Reste, soweit keine Holzschutzmittel aufgetragen oder enthalten sind und Beschichtungen nicht aus halogenorganischen Verbindungen bestehen 	<p>alle Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von mindestens 50 kW und nur in Betrieben der Holzbe- und -verarbeitung</p>
<p>Holzreste, nicht naturbelassen mit chlororganischen Beschichtungen (PVC) und ohne Holzschutzmittel (Gruppe 3)</p>	<p>nur genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV/TA Luft, 13. und 17. BImSchV)</p>
<p>Holzreste, mit Holzschutzmitteln*** (Gruppe 4)</p>	<p>nur genehmigungsbedürftige Anlagen (17. BImSchV und Mischfeuerungen)</p>

* Brennstoffgruppe 1.2a des Anhangs der 4. BImSchV

** Brennstoffgruppe 1.2aa und 1.2bb des Anhangs der 4. BImSchV

*** Brennstoffgruppe 1.3 der 4. BImSchV des Anhangs der 4. BImSchV

8 Zusammenfassung

Rest- und Gebrauchthölzer fallen pro Jahr hierzulande in einer Menge von zusammen mehr als 15 Mio. t an. Für Resthölzer der Holzbe- und -verarbeitung sowie nicht oder wenig belastete Gebrauchthölzer gibt es praktikable Wege der stofflichen Verwertung. Auch für gebrauchte Möbel aus Holzwerkstoffen setzen sich stoffliche Verwertungsverfahren durch. Mit Holzschutzmitteln behandelte Hölzer, kontaminierte Mischholzfraktionen oder bestimmte Möbelgruppen lassen sich dagegen nur schwer stofflich verwerten. Hier ist die thermische Verwertung der vorrangig anzustrebende Entsorgungsweg. Bei integrierten Kreisläufen für Holzabfälle kommt der Holzwerkstoffindustrie eine besondere Bedeutung zu, da sie in der Lage ist, größere Mengen sowohl stofflich als auch energetisch zu verwerten. Die Kapazitäten für die stoffliche Verwertung liegen bei 5 bis 6 Mio. t, wobei weiterhin ein Verbrauch von 2,5 bis 3,5 Mio. t forstlicher Resthölzer angenommen wird. Für die energetische Verwertung zum Eigenbedarf könnten die Verbrennungskapazitäten bis zu einem zusätzlichen Holzbedarf von etwa 3 Mio. t/a ausgebaut werden. Die Nutzung von Rest- und Gebrauchthölzern ist dabei ökologisch vorteilhaft. Sie spart Energie, schont Ressourcen und schließt Stoffkreisläufe. Strenge Annahmekriterien und Eingangskontrollen haben dafür zu sorgen, daß nur unbedenkliche Gebrauchthölzer in den Produktionskreislauf gelangen. Die energetische Verwertung von Holzabfällen substituiert fossile Energieträger und trägt bei nachhaltiger Forstwirtschaft so zu einer Reduktion des CO₂ in der Atmosphäre bei. Sie ist gleichzeitig eine effektive Senke für unerwünschte Schadstoffe.

Literatur

- [1] **Bockelmann, C. Marutzky, R.** Verwertung von Holzpackmitteln und Paletten in der Bundesrepublik Deutschland. Holz-Zentralblatt **119**, S. 289-290 und S. 296-298, 1993
- [2] **Frühwald, A.** Holzbe- und -verarbeitung. VDI-Bericht Nr. 794, S. 9-21, 1990
- [3] **Hoffmann, V.** Zuordnungskriterien für Rest- und Altholz zur energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung. In R. Marutzky, W. Schmidt (Hrsg.): „Alt- und Restholz - Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik“. VDI-Verlag, Düsseldorf 1996, S. 14-24, 1996
- [4] **Leukens, U.** Ökologisch bewußte Nutzung von Holzresten. Holz-Zentralblatt **119**, S. 629-630, 1993
- [5] **Leukens, U.** Thermische Verwertung von Rest- und Altholz - Ökonomische Aspekte und Akzeptanz der thermischen Verwertung. Vortrag beim Haus-der-Technik-Seminar "Thermische Verwertung von Rest- und Altholz", Essen, 12.12.1995
- [6] **Marutzky, R.** Emissionspotential bei der thermischen Verwertung von Rest- und Altholz. Vortrag beim Haus-der-Technik-Seminar „Thermische Verwertung von Rest- und Altholz“, Essen, 12.12.1995

12. Konkurrenz zwischen thermischer Behandlung und thermischer Verwertung - Auswirkungen auf die Entsorgungswirtschaft

K. Rambadt, Aachen

1 Begriffsbestimmung

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz unterscheidet nach Abfällen zur Verwertung und Abfällen zur Beseitigung, wobei der Verwertung stets Vorrang eingeräumt wird.

Demnach können Abfälle stofflich verwertet, aber auch zur Gewinnung von Energie genutzt werden.

Eine energetische Verwertung wiederum wird an folgende Voraussetzungen geknüpft:

- a. Der Heizwert des einzelnen Abfalls muß - ohne Vermischung mit anderen Stoffen - mindestens 11.000 kJ/kg betragen.
- b. Der Feuerungswirkungsgrad muß mindestens 75 % betragen.
- c. Entstehende Wärme ist selbst zu nutzen oder an Dritte abzugeben.
- d. Die bei der Verwertung anfallenden Abfälle sind möglichst ohne weitere Behandlung abzulagern.

2 Verwertung oder Behandlung - Die Entstehung einer Konkurrenzsituation

Kommunale Müllverbrennungsanlagen können die vorgenannten Randbedingungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes einhalten, denn:

- anfallende Abfälle werden abgelagert oder verwertet,
- entstehende Wärme wird über Kraft-Wärme-Kopplungen in eigenen Turbinen oder im Verbund mit Kraftwerken genutzt,
- der Feuerungswirkungsgrad liegt über 75 %,
- ein Heizwert von 11.000 kJ/kg ist - je nach Abfallzusammensetzung - erreichbar.

Insofern würde nichts dagegen sprechen, Müllverbrennungsanlagen als Verwertungsanlagen anzusehen.

Genau dies will der Gesetzgeber aber nicht. Die Formulierung des § 4 Abs. 3 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes läßt daran keinen Zweifel, wenn formuliert wird:

"Die energetische Verwertung beinhaltet den Einsatz von Abfällen als Ersatzbrennstoff. Vom Vorrang der energetischen Verwertung unberührt bleibt die

- [7] **Marutzky, R.** Qualitätsanforderungen und Entsorgungswege für Rest- und Gebrauchthölzer. In R. Marutzky, W. Schmidt (Hrsg.): „Alt- und Restholz - Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik“, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996, S. 25-46
- [8] **Merker, O.** Qualitätssicherung bei der Gebrauchtholzerfassung aus der Sicht des Verwerterers. Vortrag auf dem bvse-Symposium "Altholzrecycling", Bonn, 29.02.1996
- [9] **Michanickl, A.
Boehme, C.** Wiedergewinnung von Spänen und Fasern aus Holzwerkstoffen. HK Holz- und Kunststoffverarbeitung **31**, Heft 4, S. 50-55, 1996
- [10] **Niehaus, G.
Steven, H.** Thermische Verwertung von Produktionsresten und Altmöbeln. Vortrag auf Seminar „Alt- und Restholz“ des VDI-Bildungswerkes, Düsseldorf, 20. Und 21.05.1996
- [11] **Ostwald, A.** Aspekte des stofflichen Altholzrecyclings. Vortrag auf dem 1. Abfall- und Altlastenkolloquium, Dresden, 12.05.1995
- [12] **Richter, K.
Sell, J.** Ökobilanzen von Baustoffen und Bauprodukten aus Holz. Bericht Nr. 115/24, Eigenverlag EMPA, Dübendorf/Schweiz 1992
- [13] **Schmidt, W.** Anforderungen an die Holzwirtschaft nach KrW-/AbfG aus der Sicht einer Umweltbehörde. In R. Marutzky, W. Schmidt (Hrsg.): „Alt- und Restholz - Energetische und stoffliche Verwertung, Beseitigung, Verfahrenstechnik, Logistik“. VDI-Verlag, Düsseldorf 1996, S. 1-13
- [14] **Schneider, U.
Deppe, H.-J.** Die Stellung der thermischen Verwertung und Beseitigung von Alt- und Restholz innerhalb des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes. Holz-Zentralblatt **122**, S. 1090-1091, 1996
- [15] **Vaget, H. St.** Neues Verbrennungssystem zur Energieerzeugung aus Holzwerkstoffen und Gebrauchthölzern. Tagungsband zum Holzwerkstoffsymposium, Eigenverlag WKI, Braunschweig 1996
- [16] **Voß, A.
Willeitner, H.** Gesamtkonzept für die Entsorgung von schutzmittelhaltigen Hölzern. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben 145 06 76 des Umweltbundesamtes, 1994
- [17] **Winkler, H. D.** Problematik der Altholzentsorgung. Vortrag auf dem bvse-Symposium "Altholzrecycling", Bonn, 29.02.1996

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Rainer Marutzky
 Wilhelm-Klauditz-Institut
 Fraunhofer-Institut für Holzforschung
 Bienroder Weg 54 E
 38108 Braunschweig

thermische Behandlung von Abfällen zur Beseitigung, insbesondere von Hausmüll."

Dementsprechend stuft der Anhang II a des Kreislaufwirtschaftsgesetzes Müllverbrennungsanlagen als Anlagen zur Abfallbeseitigung ein.

Das heißt: Unabhängig von der Verbrennungsqualität und von der Energieausbeute gelten Müllverbrennungsanlagen als Anlagen zur thermischen Behandlung von Abfällen zur Beseitigung.

Die Konkurrenz der thermischen Behandlung und der thermischen Verwertung wird somit durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz begründet.

Verwertungsanlagen sind begrifflich positiv belegt, stellen ihrem Kunden Verwertungsnachweise aus und können problemlos bundes- und europaweit operieren.

Behandlungsanlagen für Abfälle zur Beseitigung sind demgegenüber begrifflich negativ geprägt, stellen Beseitigungsnachweise aus und werden - zumindest moralisch - bei großräumiger Akquisition mit dem Schlagwort des Mülltourismus belegt.

3 Die Alternativen zur Müllverbrennung

Die zentrale Forderung, Abfälle zur Verwertung als Ersatzbrennstoffe einzusetzen, wird in erster Linie von Hochöfen und Zementwerken erfüllt.

Deshalb besteht grundsätzlich ein hohes Interesse dieser Anlagenbetreiber, gut brennbare Abfälle einzusetzen.

Die Verbrennung erfolgt zur Zeit bereits in größerem Umfang, soweit uns bekannt, im Rahmen von Versuchsbetriebsregelungen.

Einem großtechnischen Einsatz stehen nach unseren Erkenntnissen zur Zeit im wesentlichen 2 Problembereiche entgegen:

Chloranteile im Brenngut gefährden den Prozeß. Deshalb ist bei Kunststoffabfällen die stricte Trennung solcher Kunststoffe erforderlich, die auf Chlorbasis hergestellt werden.

Die Verfeuerung in Hochöfen und Zementwerken erfordert eine spezielle Struktur der Brennstoffe, die nur in Vorbehandlungsanlagen hergestellt werden kann. Diese sind zur Zeit noch nicht in ausreichender Kapazität vorhanden und verteuern im übrigen die Entsorgung beträchtlich.

In der Praxis führt dies dazu, daß viele Abfälle, die eigentlich einer thermischen Verwertung zugeführt werden müßten, nach wie vor für Verbrennungsanlagen verfügbar sind.

4 Technische Bewertung der Alternativen

Während für Müllverbrennungsanlagen die extrem scharfen Grenzwertbestimmungen der 17. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz greifen, werden sonstige Großfeuerungsanlagen nach der TA Luft bzw. der 13. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz bewertet. Die 17. BImSchV enthält wesentlich niedrigere Grenzwerte wie die Gegenüberstellung in nachfolgender Grafik (Bild 1) zeigt.

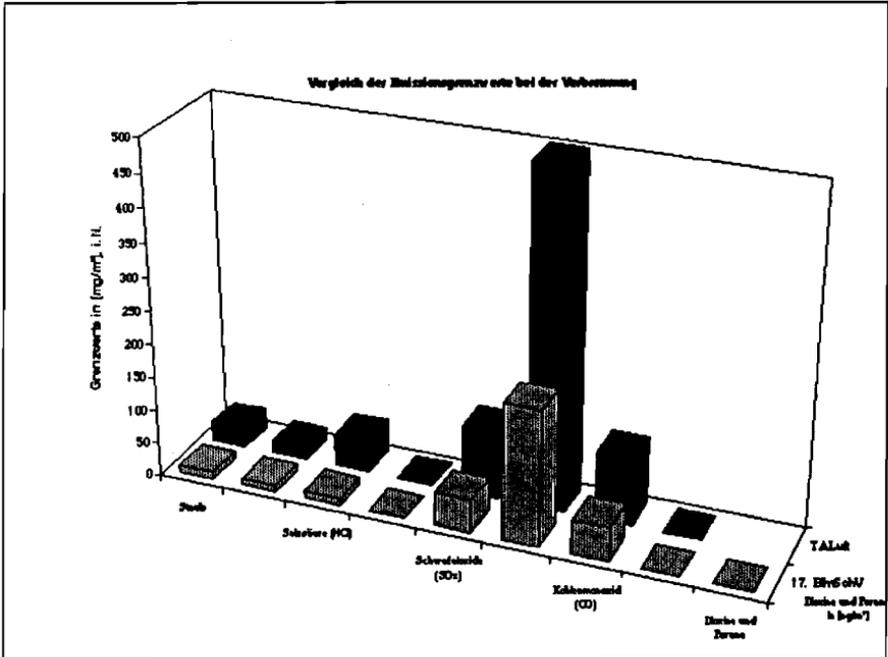


Bild 1: Vergleich der Emissionsgrenzwerte bei der Verbrennung

Zwar gilt bei der Verbrennung von Mischabfällen gemäß TA Luft, daß die Grenzwerte entsprechend der anteiligen Energieausbeute der Einzelkomponenten gemittelt werden. Jedoch bestehen Zweifel bezüglich der Umsetzbarkeit dieser Forderung, wenn beispielsweise für Dioxine und Furane überhaupt keine Grenzwerte bestehen. Außerdem entfällt die Mittelwertbildung wenn der Brennstoff mit den höchsten Emissionswerten mindestens 70 % der zugeführten Energie liefert.

Die Betreiber kommunaler Müllverbrennungsanlagen gehen deshalb davon aus, daß die thermische Verwertung in Großfeuerungsanlagen auf einem deutlich niedrigeren umwelttechnischem Niveau stattfindet, als die Behandlung in Müllverbrennungsanlagen.

5 Auswirkungen auf die Entsorgungswirtschaft

Das Abfallaufkommen insgesamt hat sich in den letzten Jahren kaum verändert. Lediglich die Wege zur Abfallentsorgung und Abfallverwertung werden nach den Regelungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes deutlich aufgeweitet.

Nach statistischen Zahlen der AWA GmbH gehen wir beispielsweise davon aus, daß die zu verbrennenden Abfälle aus Stadt und Kreis Aachen im Jahre 1997 statt früher prognostizierter 290.000 t/a tatsächlich bei ca. 280.000 t/a liegen werden.

Die Differenz mag man als Prognoseunsicherheit oder als Abfallvermeidungspotential bezeichnen. Sie spielt jedenfalls für die Bemessung abfallwirtschaftlicher Anlagen keine Rolle.

Problematisch ist allerdings, daß wir durch verschiedene neu geschaffene Verwertungswege von den zu erwartenden 280.000 t/a nur etwa die Hälfte auch tatsächlich in unsere Verbrennungsanlage bekommen werden.

Bei einem insgesamt stabilisierten Abfallaufkommen führt somit die Eröffnung neuer - und nach unserer Einschätzung zum Teil dubioser - "Verwertungswege" zu einer massiven Konkurrenzsituation im Entsorgungsbereich.

Diese Situation wird noch dadurch verschärft, daß die aller Orten heftig entflammte Diskussion zu Übergangsfristen für Altdeponien nach der TA-Siedlungsabfall dazu führt, daß auch Altdeponien ohne technische Standards weiterhin zu Niedrigspreisen am Markt operieren.

Nun ist es keine Frage, daß Betreiber von Müllverbrennungsanlagen mit anderen Anlagen konkurrieren müssen, um im Interesse der Bürger zu möglichst niedrigen Preisen zu kommen.

Kritisch ist aber, daß - wie vorstehend dargestellt- diese Konkurrenz auf sehr unterschiedlichem technischem Niveau stattfindet. Zur Zeit haben wir den Eindruck, daß der Gesetzgeber genau diese Ungleichbehandlung begünstigt.

Dies treibt Müllverbrennungsanlagen in einen ruinösen Wettbewerb einerseits mit anderen Kommunen, die billig Deponien betreiben, andererseits mit privaten Betreibern von Großfeuerungsanlagen, die als Verwerter auftreten dürfen.

Interessant ist, daß nach den Zuordnungskriterien des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zukünftig gewerbliche Abfälle gute Chancen haben, insgesamt als Wertstoff mit geringen Anforderungen kostengünstig verbrannt zu werden. Demgegenüber muß der als Abfall deklarierte Hausmüll des Bürgers auf höchstem technischem Niveau teuer verbrannt werden.

6 Auswirkungen auf den Bürger

Zwar ist es denkbar, daß niedrige Entsorgungskosten für Gewerbe und Industrie unter dem Gesichtspunkt der Diskussion um den Standort Deutschland vorteilhaft sind. Jedoch ist zu befürchten, daß sich die aktuelle Entwicklung volkswirtschaftlich eher negativ auswirkt, wenn man die Konsequenzen für den Bürger betrachtet.

Denn einerseits kostet die separate Erfassung von Wertstoffen auf der Schiene: "Sammeln - Transportieren - Sortieren - Aufbereiten - Verbrennen in Verwertungsanlagen" den Bürger ein Vielfaches der Direktverbrennung eines Mischabfalls in einer Müllverbrennungsanlage. Interessant ist allerdings, daß der Bürger die hohen "Verwertungskosten" nicht merkt, weil sie in Produktpreise eingerechnet werden. Demgegenüber werden ihm die deutlich geringeren Verbrennungskosten nach ausgiebiger öffentlicher Diskussion per Gebührenbescheid klar erkennbar vorgelegt.

Die kostenmäßig sehr gut getarnten Verwertungsaktivitäten führen auf der anderen Seite zu massiven Auslastungsproblemen kommunaler Müllverbrennungsanlagen und damit wiederum zu einer erheblichen Zusatzbelastung des Bürgers, auf den jetzt noch zusätzlich die sonst nicht zu deckenden Kosten abgewälzt werden müssen.

Damit zahlt der Bürger zunächst einmal auf jeden Fall doppelt.

Nun versuchen sich immer mehr Gebührenzahler durch Klagen gegen Gebührenbescheide diesen Mehrbelastungen zu entziehen.

Ohne die rechtlichen Chancen eines solchen Vorgehens bewerten zu wollen, ist allerdings sicher, daß die eventuell nicht abwälzbaren Kosten den allgemeinen Haushalten der entsorgungspflichtigen Kommunen anheim fallen. Selbstverständlich können derartige Unterdeckungen dann wiederum nur über den steuerzahlenden Bürger hereingeholt werden.

7 Lösungswege

Angesichts der massiven Auslastungsprobleme kommunaler Entsorgungsanlagen treten private Entsorger gerne als Helfer in der Not auf, indem sie kommunalen Anlagen Müllkontingente zur Auslastung zu marktgängigen Preisen anbieten. Daß diese marktgängigen Preise unter den tatsächlichen Kosten der meisten Verbrennungsanlagen liegen, versteht sich in der aktuellen Situation von selbst. Daß die Differenzbeträge zu den tatsächlichen Kosten wiederum vom Bürger bezahlt werden müssen, versteht sich dann auch von selbst. Daß schließlich die privaten Vermittler dennoch für ihre Tätigkeit ausreichende Gewinne erwirtschaften, ist sehr stark zu vermuten.

Natürlich können die von Privatunternehmen vermittelten Abfallauslastungen verschiedener Anlagen auch durch Direktkooperationen der entsorgungspflichtigen Körperschaft erreicht werden.

Ansätze dies zu schaffen haben sowohl der Verband kommunaler Unternehmen (Vku), die Bezirksregierung Köln (aus anderen Bezirken fehlen uns Detailinformationen) und auch das Umweltministerium NW erarbeitet.

Während der Verband kommunaler Unternehmen bei seinen Mitgliedsbetrieben für Kooperationen im Rahmen einer Abfallbörse wirbt, setzt die Bezirksregierung Köln auf die Bildung von Entsorgungsbereichen und die (Teil-) Verbindlicherklärung des Abfallentsorgungsplanes. Das Umweltministerium will als Ergebnis der von ihm

durchgeführten "restriktiven Bedarfsprüfung" die optimale Auslastung der Abfallbeseitigungsanlagen in Nordrhein-Westfalen erreichen.

Allerdings sind die Widerstände der Körperschaften, die von der aktuellen Situation durch niedrige Preise begünstigt werden, erheblich. Es ist deshalb fraglich, ob und wann die vorgenannten Initiativen greifen werden. Es ist auch fraglich, ob entsorgungspflichtige Körperschaften mit hohen Entsorgungskosten und technisch hochwertigen Anlagen die Übergangszeit bis zum Wirken der genannten Initiativen überstehen können.

Wahrscheinlich ist vielmehr, daß Privatfirmen kurzfristig relevante Marktanteile kommunaler Entsorgungsanlagen erwerben werden, um dann nach der allgemein erwarteten Stabilisierung des Abfallmarktes im nächsten Jahrzehnt die Preise zum Nachteil aller Kommunen diktieren zu können.

8 Zusammenfassung

Nach Auffassung der Betreiber kommunaler Entsorgungsanlagen führt das Kreislaufwirtschaftsgesetz durch stark unterschiedliche technische Anforderungen an Verwertungs- und Beseitigungsanlagen zu einem ruinösen Wettbewerb für Müllverbrennungsanlagen. Dieser wird verstärkt durch die völlig unklare Linie im Bezug auf die Schließung von Altdeponien gemäß den Zielen der TA-Siedlungsabfall.

Dem Gewerbe und der Industrie wird durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz eine günstige - als Verwertung deklarierte - Entsorgung geboten. Die Unternehmen der Entsorgungswirtschaft haben beste Chancen, bei völlig verunsicherten entsorgungspflichtigen Körperschaften hohe Marktanteile an Entsorgungsanlagen zu erwerben, weil kommunale Einrichtungen vorerst nicht mehr auszulasten sind.

Der Bürger wird allerdings als Verbraucher, als Gebührenzahler und als Steuerzahler in erheblicher Weise belastet.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. K. Rambadt
Prokurist der
Abfallwirtschaft Kreis und Stadt Aachen GmbH
Gartenstraße 38
52249 Eschweiler

Rechtliche Grundlagen und Rahmenbedingungen der Abfallverwertung in thermischen Prozessen

A. Wendler, Düsseldorf

Das geplante einführende Referat konnte aus Termingründen nicht gehalten werden.

Anschrift:

ORR'in A. Wender
Ministerium für Umwelt, Raumordnung
und Landwirtschaft des Landes NRW
Kennedy-Damm-Center
Schwannstraße 3
40190 Düsseldorf

Seit 1. April 1994 sind bisher folgende „Materialien“ des Landesumweltamtes NRW erschienen:

- | | | |
|----|---|----------|
| 1 | Der Dynamische Daphnientest
– Erfahrungen und praktische Hinweise –
Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 44 S. | 15,00 DM |
| 2 | Umsetzung der TA-Siedlungsabfall bei Deponien
2. Abfallwirtschaftliches Fachgespräch
Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 99 S. | 15,00 DM |
| 3 | Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten
Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 153 S. | 20,00 DM |
| 4 | Einsatz alternativer Baustoffe in Abdichtungssystemen
Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 91 S. | 15,00 DM |
| 5 | Einwicklung im Bereich der Sonderabfallentsorgung
Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 39 S. | 15,00 DM |
| 6 | Ökologische Auswirkungen von Fischteichen auf Fließgewässer
Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 208 S. | 25,00 DM |
| 7 | Ökologische Effizienz von Renaturierungsmaßnahmen an Fließgewässern
Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 462 S. | 28,00 DM |
| 8 | Vermeidung von Bunkerbränden in Abfallverbrennungsanlagen mit Hilfe
der Infrarot-Thermographie
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 53 S. | 15,00 DM |
| 9 | Prozeßleittechnik in Anlagen der chemischen Industrie –
Anlagenschutz und sicherheitsrelevante Komponenten
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 119 S. | 20,00 DM |
| 10 | Sicherheitstechnische Hinweise und Anforderungen an Abschott- und
Entlastungssysteme aus der Sicht der Störfall-Verordnung
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 40 S. | 15,00 DM |
| 11 | Literaturstudien zum PCDD/F-Transfer vom Boden in die Nahrungskette
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 149 S. | 25,00 DM |
| 12 | Die verlust- und kontaminationsfreie Probenahme und -vorbereitung
von Wässern und Feststoffen
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 203 S. | 28,00 DM |
| 13 | Essener Verfahren zur Bewertung von Altlastenverdachtsflächen
– Erstbewertung und normierte Charakterisierung –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 66 S. | 15,00 DM |
| 14 | Optimierung der thermischen Behandlung organischer chlorhaltiger
Problemabfälle
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 132 S. | 25,00 DM |
| 15 | Entsorgungsbericht 1993 über Sonder- und Massenabfälle in NRW
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 75 S. | 20,00 DM |
| 16 | Begleitende meßtechnische Erfolgskontrolle bei der Sanierung
einer Textilreinigungsanlage
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 60 S. | 15,00 DM |

Vertrieb: Landesumweltamt NRW • Postfach 102 363 • 45023 Essen

- 17 Ausgewählte Untersuchungsergebnisse der halbtechnischen Versuchskläranlage
– Untersuchungen zur Stickstoffelimination –
– Praxiserprobung von Online-Meßtechnik –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 110 S. 20,00 DM
- 18 Vergleich verschiedener europäischer Untersuchungs- und Bewertungsmethoden für Fließgewässer
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 140 S. 25,00 DM
- 19 Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer vor gefährlichen Stoffen
– Ergebnisse der Erprobung in NRW –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 150 S. 25,00 DM
- 20 Information und Dokumentation bei Deponien
4. Abfallwirtschaftliches Fachgespräch, 26. Oktober 1994
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 98 S. 20,00 DM
- 21 Ausbreitungsuntersuchungen von Gerüchen anhand einer Modellquelle
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 57 S. 15,00 DM
- 22 Erschütterungen und Körperschall des landgebundenen Verkehrs
– Prognose und Schutzmaßnahmen –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 658 S. 40,00 DM
- 23 Naturraumspezifische Leitbilder für kleine und mittelgroße Fließgewässer in der freien Landschaft
Eine vorläufige Zusammenstellung von Referenzbach- und Leitbildbeschreibungen für die Durchführung von Gewässerstrukturgütekartierungen in Nordrhein-Westfalen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 127 S. 25,00 DM
- 24 Siedlungsabfalldeponien – Oberflächenabdichtung und Sickerwasser
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 162 S. 25,00 DM
- 25 Thermodynamische Analyse der Verfahren zur thermischen Müllentsorgung
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 121 S. 25,00 DM
- 26 Normierung und Konventionen in der Abfallanalytik – Aufgaben und Ziele
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 188 S. 28,00 DM
- 27 Entsorgungsbericht 1994 über Sonder- und Massenabfälle in Nordrhein-Westfalen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 92 S. 20,00 DM
- 28 Umweltüberwachung im Spannungsfeld; integral/medial – privat/staatlich
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 289 S. 30,00 DM
- 29 Bauabfallentsorgung – von der Deponierung zur Verwertung und Vermarktung
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 181 S. 28,00 DM
- 30 Ergebnisse von Dioxin-Emissionsmessungen an Industrieanlagen in NRW – Dioxinmeßprogramm Nordrhein-Westfalen –
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 114 S. 20,00 DM
- 30 Results of Measurements of the Emissions of Dioxins by Industrial Plants in North Rhine-Westphalia – Dioxins Measurement Programme North Rhine-Westphalia – Final Report 1996
English translation of the report LUA-Materialien No. 30 (1996); original edition published in German language – Translated by Edith Navé, Hohenbrunn, Germany
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 102 S. 30,00 DM

Vertrieb: Landesumweltamt NRW • Postfach 102 363 • 45023 Essen

- | | | |
|----|--|----------|
| 31 | Umsetzung der TA Siedlungsabfall bei Deponien in NRW
Fortbildungsveranstaltung am 27./28. Juni 1995 im Bildungszentrum für
die Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH (BEW) in Essen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 189 S. | 28,00 DM |
| 32 | Medienübergreifendes Arbeiten im technischen Umweltschutz
Beiträge aus dem Fachgespräch anlässlich der Verabschiedung von
Herrn Abteilungsleiter Dr.-Ing. H.-O. Weber am 06. Juli 1995
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 78 S. | 20,00 DM |
| 33 | Handbuch der Laborpraxis für Ver- und Entsorgerinnen/
Ver- und Entsorger – 1. und 2. Ausbildungsjahr –
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 186 S. | 30,00 DM |
| 34 | Explosionsschutz bei der Lagerung brennbarer Flüssigkeiten
Entwicklungen und Erkenntnisse
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 54 S. | 18,00 DM |
| 35 | Physikalisch-chemische und biologische Auswirkungen bei der Verwendung
von Waschbergen in Schiffsfahrkanälen
Untersuchungsbericht des Arbeitskreises „Waschberge im Wasserbau“
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 154 S. | 25,00 DM |
| 36 | Anforderungen an sachverständige Stellen für die Bekanntgabe und die
Zulassung im Bereich des Immissionsschutzes
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 132 S. | 25,00 DM |
| 37 | Schadstoffströme bei der Gebrauchtholzverwertung für
ausgewählte Abfallarten
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 275 S. | 30,00 DM |
| 38 | Zivile Anschlußnutzung von Militärstandorten
– Risikofaktor Altlasten/Bodenbelastung – Tagungsband
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 168 S. | 25,00 DM |
| 39 | Flächenhafter Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in das Grundwasser
– Abschlußbericht, Dezember 1994
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 217 S. | 30,00 DM |
| 40 | Gewässerüberwachung in Nordrhein-Westfalen
Teil I: Oberirdische Gewässer
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 40 S. | 15,00 DM |
| 41 | Brand- und Zersetzungsprodukte
Abschlußbericht des Projekts „Integration von Daten zu Brand- und
Zersetzungsprodukten in das Informationssystem für gefährliche/
umweltrelevante Stoffe (IGS)“
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 134 S. | 25,00 DM |
| 42 | Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen
9. Aachener Kolloquium am 5. Dezember 1996 – Tagungsband –
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 156 S. | 25,00 DM |

Vertrieb: Landesumweltamt NRW • Postfach 102 363 • 45023 Essen
