

Restmüllverbrennung

– Ziele und aktueller Stand der Technik

Hubert Vogg

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Technische Chemie, Bereich Thermische Abfallbehandlung, D-76021 Karlsruhe

Zusammenfassung

Heutige wie wohl auch künftige Abfallwirtschaftskonzepte führen trotz steigender stofflicher Verwertungsanteile zu Restmüll mit hohem Heizwert, so daß dieser sinnvoll thermisch behandelt werden muß. Aufgabe der Abfallverbrennung ist es, das „Brennbare“, das sind vor allem die Anteile an Kohlenstoff und Wasserstoff, in die Verbrennungsprodukte Kohlendioxid und Wasser umzuwandeln. Ein quantitatives Maß für diesen Prozeß ist der Ausbrand, der sowohl im Abgas als auch in den Reststoffen zu maximieren ist. Damit wird u.a. auch eine Minimierung der primären Bildung von polychlorierten Dioxinen/Furanen erreicht. Ein weiteres Qualitätskriterium muß die „Nullemission“ sein, die dann gegeben ist, wenn die im gereinigten Abgas vorliegenden Schadstoffkonzentrationen so extrem klein sind, daß sie immissionsseitig nicht mehr bemerkt werden, also unerheblich sind. Die Reststoffe, vor allem die Schlacke, müssen so weit inert gemacht werden, daß sie bedenkenlos einer Wiederverwertung zugeführt werden können.

Alle diese wichtigen Teilaspekte der Abfallverbrennung wurden in den letzten Jahren konsequent vorangetrieben mit dem Ergebnis, daß oben genannte Ziele als erreicht gelten können. Die Abfallverbrennung ist keine Schadstoffquelle mehr, sie ist eine Schadstoffsenke.

1 Ausgangssituation

Ungeachtet aller Bemühungen, Müll zu vermeiden sowie Stoffkreisläufe durch Verwertung zu schließen, bleiben in der Bundesrepublik Deutschland ca. 15 Mio Tonnen Restmüll übrig, die behandelt und entsorgt werden müssen.

Nach heutigem Kenntnisstand besitzt der Restmüll einen Heizwert von ca. 10 MJ/kg, d.h. die thermische Behandlung als Methode der Mineralisierung und Inertisierung dieses sehr vielfältigen Stoffgemisches, in Verbindung mit dem keinesfalls zu unterschätzenden oder gar zu vernachlässigenden positiven Nebeneffekt einer möglichen energetischen Nutzung, drängt sich geradezu auf.

An dieser Ausgangslage wird sich auch in Zukunft kaum etwas ändern, da sich im Hinblick auf den Heizwert beispielsweise die Verwertungsanstrengungen zur Kompostierung des biologischen Anteils des Hausmülls mit denen des versuchten stofflichen Kunststoff-Recyclings weitgehend kompensieren.

Die Restmüllverbrennung wird in integrierten Abfallwirtschaftskonzepten demnach nicht nur als wichtiger Entsor-

gungspfeiler erhalten bleiben – 50 Hausmüllverbrennungsanlagen mit jeweils 2 bis 3 Verbrennungslinien in Rostfeuerungs-technik sind in Deutschland z.Z. in Betrieb –, sie wird sogar noch deutlich weiter ausgebaut werden müssen [1].

Technisch gesehen besteht das Ziel der Abfallverbrennung darin, das „Brennbare“ – das sind, bezogen auf den heutigen Ist-Zustand des Brennstoffs Restmüll ca. 30 % Kohlenstoff und knapp 5 % Wasserstoff – möglichst vollständig in die Verbrennungsprodukte Kohlendioxid und Wasser umzuwandeln [2]. Als Maß dafür, inwieweit diese Aufgabe gelungen ist, dient der sog. Ausbrand, der sowohl im Abgas als auch in den festen Verbrennungsprodukten zielgemäß zu maximieren ist. Meßgrößen für ungenügenden Ausbrand sind in der Gesamtheit aller Outputströme der Verbrennung die gasförmigen Komponenten Kohlenmonoxid und die Summe aller noch vorhandenen oder neu gebildeten Kohlenwasserstoff-Verbindungen einerseits sowie in den Reststoffen Flugstaub und Rostschlacke der Anteil an organischem Kohlenstoff andererseits. Sie werden zum Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt des Brennstoffinputs in Beziehung gesetzt. Ausbrandwerte > 99 % werden heute erwartet.

Mit maximalem Ausbrand ist die Aufgabe der Verbrennung noch nicht ausreichend beschrieben. Als zweiter wichtiger Gesichtspunkt muß sichergestellt sein, daß durch den Verbrennungsvorgang keine die Umwelt beeinträchtigenden Emissionen stattfinden. Die geforderten „Nullemissionen“ sind spätestens dann erreicht, wenn sie am ungünstigsten Aufpunkt der Abgasfahne nur noch mit weniger als 1 % zu der dort bereits vorhandenen Schadstoffbelastung beitragen und daher als völlig unerheblich gelten können. Diese Forderung hat in aufwendigen sekundären Rauchgasreinigungsmaßnahmen deutlich sichtbaren technischen Ausdruck und eine überzeugende Lösung gefunden [3].

Ein ebenso wichtiges drittes Anliegen der Abfallverbrennung stellt heute die Verwertbarkeit der bei der Verbrennung entstehenden festen Produkte Schlacke und Flugstaub sowie der gasförmigen Stoffe Chlorwasserstoff und Schwefeldioxid dar [4]. Auch wenn über den ökonomischen Sinn solcher „Produktionen“ die Meinungen auseinandergehen und darüber auch unter Ökobilanzgesichtspunkten kritisch nachgedacht werden muß, so sind doch schon allein aus Akzeptanzgründen nicht nur energetisch optimierte Lösungen, sondern besonders auch stofflich überzeugende Verbrennungskonzepte aus heutiger Sicht dringend nötig. Die Technik hat längst begonnen, sich konsequent darauf einzustellen.

2 Der Verbrennungsprozeß

Die Rostfeuerungs-technik für Restmüll hat in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht. Vor allem hat man gelernt, mit weniger Verbrennungsluft auszukommen. Während früher, nach erfolgter Verbrennung, Restsauerstoffgehalte im Abgas von 10 – 12 % durchaus üblich waren, strebt man heute solche zwischen 7 und 9 % an. Als Folge dieser Maßnahmen ließen sich höhere Verbrennungstemperaturen sowohl in der Gasphase als auch im Gutbett einstellen und die Menge der mit dem Rauchgas transportierten Flugstäube konnte dadurch erheblich vermindert werden [5]. Hinzu kommt, daß eine effektivere Vermischung der Rauchgase im Feuerraum durch verbesserte geometrische Anordnungen erreicht wurde. Fortschritte wurden auch bei der Reduzierung von Flugascheablagerungen in Abhitze-kesseln gemacht. Sie beruhen entweder auf geänderten Bauformen (Horizontal-kessel sind gegenüber Vertikalkesseln z.B. auf dem Vormarsch) und/oder auf modifizierten Konzepten beim Reinigen dieser Aggregate durch häufiges mechanisches Klopfen anstelle von relativ seltenem Rußblasen.

Besonders augenfälliges positives Ergebnis aller dieser Bemühungen sind deutlich reduzierte, primär gebildete Niveaus polychlorierter Dioxine/Furane im Rohgas, die von früher 20 – 40 ng TEQ/Nm³ auf ca. 1 ng TEQ/Nm³ in heutigen modernen Anlagen zurückgegangen sind [5].

Im Kernforschungszentrum Karlsruhe wurde an der Pilot-hausmüllverbrennungsanlage TAMARA unlängst eine Untersuchung durchgeführt, die zeigt, daß auch zwischen dem Heizwert des dem Rost aufgegebenen Brennstoffs und dem Verbrennungsergebnis ein interessanter Zusammenhang besteht: je höher der Heizwert war, um so besser erwies sich der Ausbrand der Schlacke [6]. In Abb. 1 ist diese Erkenntnis als Funktion zwischen prozentualen Anteil an gesamtorganischem Kohlenstoff (TOC) im Rostabwurf und dem Heizwert des Brennstoffs dargestellt.

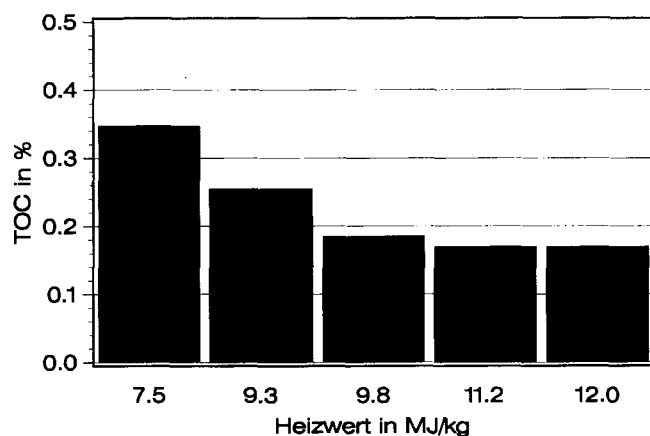


Abb. 1: Heizwertabhängigkeit des Restkohlenstoffs im Rostabwurf der TAMARA

3 Polychlorierte Dioxine/Furane (PCDD/PCDF)

Das Auftreten von PCDD/PCDF beim Abfallverbrennungsprozeß beruht vorzugsweise auf De-novo-Synthesen im Temperaturbereich zwischen 200 und 500 °C, d.h. die PCDD/PCDF werden auf dem Abkühlweg der Verbrennungsrauchgase im Abhitze-kessel solcher Anlagen gebildet [7]. Die Flugstäube spielen dabei die entscheidende Rolle, zum einen, weil sie als Reaktanden wichtige Inhaltsstoffe, wie z.B. partikulären organischen Kohlenstoff, verschiedenste anorganische Chloride als Chlorlieferanten sowie katalytisch wirksame Metallspezies enthalten [8, 9, 10] zum andern auch deshalb, weil man sie in jeder großtechnischen Anlage in zu-meist Hundertkilogramm-Mengen in den kritischen Temperaturfeldern des Wärmenutzungsaggregats mit Verweilzeiten von mehreren Stunden deponiert vorfindet und sie deshalb ausreichend für die Neubildung zur Verfügung stehen [11]. In der Gasphase sind vor allem der Sauerstoffgehalt, der anwesende Wasserdampf sowie die Konzentrationen an Chloraromaten zu beachtende Einflußgrößen.

Möglichkeiten, durch technische Primärmaßnahmen auf verminderte PCDD/PCDF-Bildung hinzuwirken, sind bereits in Abschnitt 2 dargestellt worden. In Ergänzung dazu muß noch darauf hingewiesen werden, daß auch durch Beeinflussung der Müll-/Brennstoffzusammensetzung die primär entstehenden PCDD/PCDF-Niveaus reduziert werden können. So wurde von uns bereits vor Jahren gezeigt, daß mit der Feuchte des Mülls das PCDD/PCDF-Bildungspotential zunimmt [12]; ähnliches ist mit Sicherheit auch für erhöhten Eintrag von Kupfer zu erwarten. Ein direkter Zusammenhang zwischen PVC und PCDD/PCDF wurde dagegen bis heute signifikant nicht berichtet. Es gibt eher gegenteilige Hinweise [13].

Die heute möglichen sekundären Minderungsmaßnahmen im Rahmen der üblichen Rauchgasreinigungstechnik bzw. die tertiären Feinreinigungsmethoden im Ultraspurenbereich am Ende der Rauchgasreinigungsprozessekette zum Zwecke weiterer Verminderung der Emissionen werden im Abschnitt 4 behandelt. Verfahren zur thermischen Zerstörung von PCDD/PCDF in den ausgeschleusten Flugstäuben werden im Abschnitt 5 „Rückstände“ näher erläutert.

4 Rauchgasreinigung

In der Regel wird die Rauchgasreinigung in neueren Abfallverbrennungsanlagen gemäß dem in Abb. 2 dargestellten Schema 5-stufig ausgeführt.

Einer möglichst effektiv gestalteten Entstaubung folgt ein erstes, stark sauer betriebenes Naßwaschsystem zur Abscheidung von Chlorwasserstoff und Quecksilber, dem sich ein neutral arbeitender Schwefeldioxid-Wäscher anschließt. Nach Wiederaufheizung der Rauchgase werden die Stickoxide durch Zugabe von Ammoniak mittels sog. SCR-Technik in Stickstoff umgewandelt. Am Ende der Prozessekette schließlich werden adsorptiv wirksame Feinreinigungsmethoden, z.B. Kohle-Schüttstofffilter oder Kalk/Kohle-Gewebe-filter-Kombinationen, vorzugsweise zur Eliminierung letzter Spuren von PCDD/PCDF sowie von Quecksilber, angebracht.

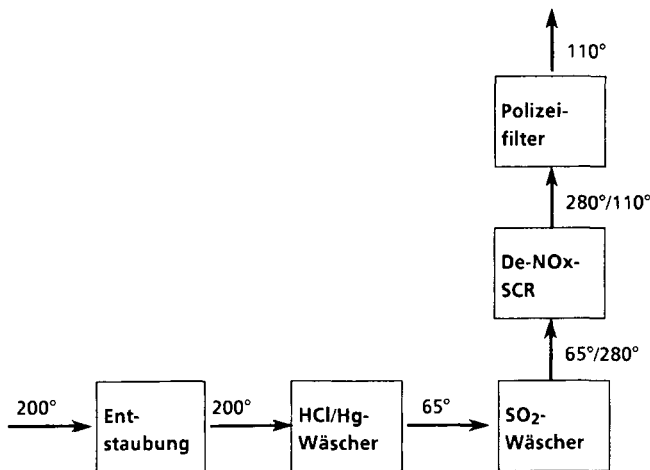


Abb. 2: Rauchgasreinigungs-Schema

Es liegt auf der Hand, daß im Vergleich zu den 70er Jahren oder auch noch der ersten Hälfte der 80er Jahre, als die Abfallverbrennung nur mit Entstaubungseinrichtungen versehen war, sich bei den Schadstoffemissionen bis heute durch die neuen Technologien gewaltige Reduzierungen haben erreichen lassen. **Tabelle 1** zeigt dies anschaulich [4].

Tabelle 1: Zeitliche Entwicklung der Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen

	Staub mg/Nm ³	Cd mg/Nm ³	HCl mg/Nm ³	SO ₂ mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	Hg mg/Nm ³	PCDD/F (TEQ) ng/Nm ³
1970	100	0,2	1000	500	300	0,5	50
1080	50	0,1	100	100	300	0,2	20
1990(5)	1	0,005	5	20	100	0,01	0,05

Die Zeitangabe 1990(5) trägt dem Umstand Rechnung, daß zwischen 1990 und 1995 die neuesten Verbesserungen in fließenden Übergängen stattfinden. Spätestens ab 1995 können die hier genannten Zahlen aber als Stand der Technik festgeschrieben werden. Die Grenzwerte der 17. BImSchV werden unterschritten.

Wegen ihrer besonderen ökotoxischen Bedeutung wird nachfolgend im einzelnen noch kurz auf die Schadstoffe Staub, Cadmium, Quecksilber und PCDD/PCDF eingegangen.

4.1 Staub

Wie in Abschnitt 2 bereits dargelegt, haben die Bemühungen um eine „sanftere“ Verbrennungstechnik zu Rohgasstaubkonzentrationen von heute nur noch ca. 1 g/Nm³ geführt [14]. Mit 2- bis 3feldrigen Elektrofiltern lassen sich Reingasstaubwerte von 10 mg/Nm³ einstellen; Gewebefilter sind sogar in der Lage, Werte von ca. 1 mg/Nm³ zu erreichen [15].

Gegenüber früher ist in der Staubemission also eine Verbesserung um den Faktor 100 eingetreten. Dies wirkt sich bei den heute üblichen, bereits vorhandenen Staubimmissionskonzentrationen von ca. 40 µg/m³ nur noch in additiven

Einträgen in die Umwelt aus, die weit unterhalb von 1‰ liegen.

Besondere Beachtung muß den Betriebstemperaturen der jeweiligen Entstaubungsaggregate geschenkt werden. Von Elektrofiltern ist bekannt, daß sie oberhalb 200 °C als PCDD/PCDF-Brüter wirksam sind, bei steigenden Temperaturen mit zunehmender Tendenz [14, 16]. Gewebefilter werden normalerweise stets unterhalb der kritischen Temperatur von 200 °C betrieben. Sie haben den zusätzlichen Vorteil, daß der Vorgang der Staubabscheidung durch einen Filterkuchen hindurch erfolgt und dabei auch eine adsorptive Eliminierung gasförmiger PCDD/PCDF-Spezies gelingt. Diese Befunde machen den Einsatz von Gewebefiltern in der Rauchgasreinigungstechnik der Abfallverbrennung heute besonders interessant [15].

4.2 Cadmium

Dieses Schwermetall zeigt im Verbrennungsvorgang eine hohe Flüchtigkeit und tritt danach durch Kondensationsprozesse auf dem Abkühlweg der Rauchgase erheblich aufkonzentriert in den Flugstäuben auf.

Die Cd-Inputkonzentration des Resthausmülls beträgt ca. 10 g pro Tonne. Maximal 15 % davon verbleiben in der Schlacke, 85 % werden als Kessel- und vor allem Filterstäube ausgeschleust [17]. Als Konsequenz der in Abschnitt 4.2 beschriebenen vorzüglichen Entstaubung werden am Kamin nur einige wenige Promille Cd emittiert. Quasi-gasförmige Cd-Spezies kommen so gut wie nicht vor [18].

In städtischen Gebieten werden als Immissionskonzentration 2 – 5 ng Cd/m³ gemessen [19]. Daran orientiert beträgt der Cd-Eintrag einer modernen Abfallverbrennungsanlage weniger als 1 %. Bei derart niedrigen Zahlen können auch Langzeitanreicherungen in Böden ausgeschlossen werden.

4.3 Quecksilber

Im Rohgas von Hausmüllverbrennungsanlagen muß mit etwa 500 µg Hg/Nm³ gerechnet werden. Wegen der hohen HCl-Konzentrationen liegt es fast vollständig als HgCl₂ vor und kann als solches in der ersten, stark sauer (pH ≥ 1) betriebenen Waschstufe gut in die wäßrige Phase eingebunden werden [20]. Nicht selten kommt es aber bereits an dieser Stelle zu geringer Bildung von metallischem Quecksilber, das aus der Lösung ausgetrieben wird und zur Emission ansteht. Der Dampfdruck des HgCl₂ im ersten Wäscher führt schließlich dazu, daß ein teilweiser Weitertransport in den neutral eingestellten SO₂-Wäscher stattfindet und dort unter dem Einfluß vorhandener Sulfid-Ionen wiederum Hg(0)-Bildung, nun aber in vermehrtem Maße, erfolgt [21].

Aus der Praxis der nassen Rauchgasreinigung sind Abscheidungsgrade für Quecksilber > 90 % kaum berichtet worden. Eine mindestens 90 %ige Abscheidung aber ist notwendig, will man den Grenzwert der 17. BImSchV von 50 µg/Nm³ sicher einhalten. Deshalb ist es sehr hilfreich, daß im Zusammenhang mit Maßnahmen zur PCDD/PCDF-Zurückhaltung (→ *Abschnitt 4.4*) adsorptive Reinigungsstufen mit Aktivkohle am Ende der Rauchgasreinigungsprozesskette zur Anwendung kommen. Mit ihrer Hilfe gelingt es, durch Ad-

sorption vor allem des erwähnten metallischen Quecksilbers an Kohle Reingaswerte schließlich sogar $< 10 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ zu garantieren.

Daraus resultieren Immissionskonzentrationen von $< 0,1 \text{ ng Hg}/\text{m}^3$, die, gemessen an ubiquitären Quecksilberkonzentrationen von ca. $10 \text{ ng Hg}/\text{m}^3$ [19], wiederum weniger als 1 % ausmachen.

4.4 Polychlorierte Dioxine/Furane

Auf die Möglichkeiten, dem Minimierungsgebot der TA-Luft 86 in Primär- und Sekundärmaßnahmen sehr effektiv nachzukommen, ist bereits in den Abschnitten 1, 2, 3 sowie 4.1 ausreichend hingewiesen worden. An dieser Stelle bleibt lediglich zu ergänzen, daß mit Hilfe der ebenfalls bereits angesprochenen tertiären Feinreinigungsmethoden echte „Polizeiﬁlter“ zur Verfügung stehen, die eine Einhaltung des in etlichen Ländern geforderten und auch bei uns eingeführten Grenzwertes von $0,1 \text{ ng TEQ}/\text{Nm}^3$ garantieren.

Drei erprobte Varianten stehen zur Auswahl:

- das mit Aktivkoks betriebene Schüttstofffilter
- der mit Kalk-Kohle-Additiven als Adsorptionsmittel arbeitende sog. Flugstromreaktor
- Oxidationskatalysatoren in Verbindung bzw. Ergänzung der SCR-Technik zur NO_x -Minderung.

Alle erreichen Reduktionsgrade $> 95 \%$. Die beiden erstgenannten Verfahren haben einen mit toxischen Komponenten beladenen Reststoff zur Folge, der zweckmäßigerweise zur Zerstörung der organisch-chemischen Noxen in die Feuerung zurückgeführt wird; beim Katalysator erfolgt die Zerstörung unmittelbar [22, 23, 24].

Vergleicht man diese heutigen Emissionen nochmals mit denen früherer Jahre (\rightarrow Tabelle 1), so stellt man eine Verbesserung um 2 bis 3 Größenordnungen fest. Aus Emissionen $< 0,1 \text{ ng TEQ}/\text{Nm}^3$ resultieren Immissionen $< 1 \text{ fg TEQ}/\text{m}^3$. Weltweit gemessen werden Werte zwischen 25 und $1600 \text{ fg}/\text{m}^3$ [25], d.h. moderne Abfallverbrennungsanlagen tragen zu einer Umweltbelastung mit PCDD/PCDF aktuell nicht mehr bei.

5 Rückstände

Zu einer „schadstoffarmen“ Abfallverbrennung [4] gehört, wie in Abschnitt 1 bereits angedeutet, nicht nur eine weitestgehende Verhinderung von Emissionen in den Luftpfad, vielmehr ist auch der Qualität entstehender Reststoffe im Hinblick auf ihre Umweltverträglichkeit erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken. Es müssen Konzepte entwickelt werden, in denen der Hauptmassenstrom, die Müllverbrennungsschlacke, den Charakter naturähnlicher Inertstoffe annimmt, während die Schadstoffe in möglichst kleinen Nebenstoffströmen aufkonzentriert und durch untertägige Endlagerung der Biosphäre entzogen werden. Man kann eine solche Strategie aber auch zu einer gezielten Rückgewinnung einzelner Komponenten und zur Schließung von Stoffkreisläufen ausbauen.

5.1 Rostabwurf (Schlacke)

Die Verbrennung von 1 Tonne Restmüll ergibt 250 – 300 kg Schlacke. Ein erstes Kriterium für eine mögliche Verwertung als Baustoff ist ihre Ausbrandqualität.

Ein charakteristisches Maß dafür ist der Glühverlust oder besser noch die direkt zu bestimmende analytische Größe „organisch C“. Ältere MV-Schlacken wiesen C-Werte von 3 – 4 % auf. Um heutige Verwertungskriterien zu erfüllen, darf 1 % nicht überschritten werden.

Wie sich der Ausbrand in Abhängigkeit der Temperatur bei halbstündigem Tempern in Luft verändert, zeigt Abb. 3 für zwei unterschiedliche MV-Schlacken, die beide wegen ihres C-Gehaltes von $< 1 \%$ als dem heutigen Stand der Technik entsprechend gelten können [26].

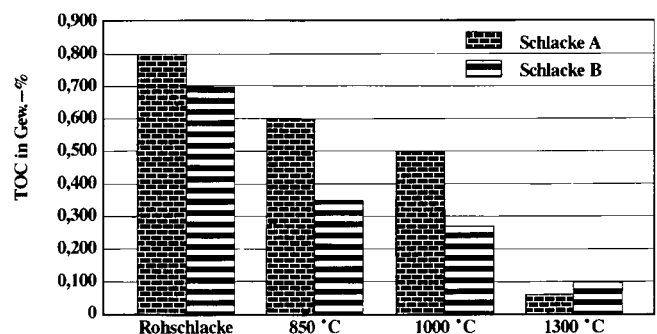


Abb. 3: Ausbrand als Gesamtkohlenstoff in Abhängigkeit von der Behandlungstemperatur

Durch Sinterung bei 1000 °C werden die ursprünglichen C-Werte etwa halbiert, durch Schmelzen bei 1300 °C sogar auf ca. 0,1 % abgesenkt. Dies bedeutet, daß durch konsequente Weiterentwicklung der Feuerraumgeometrie vor allem auch unter dem Aspekt einer gezielten Einflußnahme auf erhöhte Gutbett-Temperaturen Verbesserungspotentiale durchaus noch vorhanden sind. Ob nachträgliches Schmelzen der Schlacke den Aufwand rechtfertigt, muß nicht zuletzt auch aus Ökobilanzgründen eher bezweifelt werden.

Das Verhalten der wohl wichtigsten Schwermetalle in den Schlacken (Cu, Zn, Pb), wie es sich im DEV-S4-Test ausdrückt, ist in Abb. 4 dargestellt.

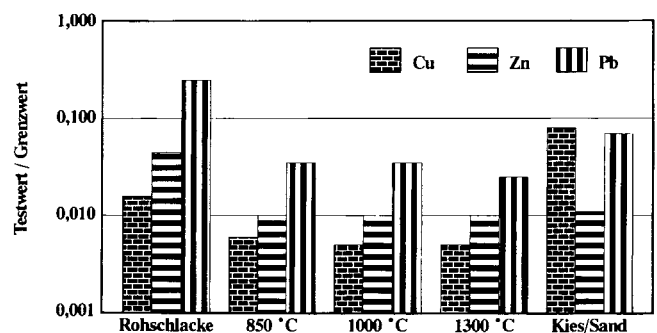


Abb. 4: DEV-S4-Ergebnisse an Schlacke A (normiert auf Grenzwerte der Deponieklasse 1)

Auffälligstes Ergebnis ist die Tatsache, daß bereits die Rohschlacken Naturprodukten wie Kies oder Sand sehr nahekommen. Durch Sinterung oder durch Schmelzen wird die Qualität etwa um den Faktor 5 verbessert. Daraus folgt, daß ein Schwermetallproblem nicht existiert und der Schlackeverwertung daher diesbezüglich nichts entgegensteht. Dies gilt auch dann, wenn der im schwach sauren Milieu durchgeführte Schweizer Test zur Beurteilung herangezogen wird [26].

Weniger befriedigend in den Schlacken ist das Löslichkeitsverhalten der noch enthaltenen Salze, vor allem der Chloride. Aus Abb. 5 z.B. sieht man, daß Schlacke B den in Baden-Württemberg gültigen Grenzwert von 100 mg/l überschreitet. Hier besteht Handlungsbedarf. Durch Tempern kann man die Qualität verbessern. Abb. 5 zeigt aber auch, daß einfaches (und daher billiges) Waschen mit Wasser zu vergleichbaren Qualitäten führt [26].

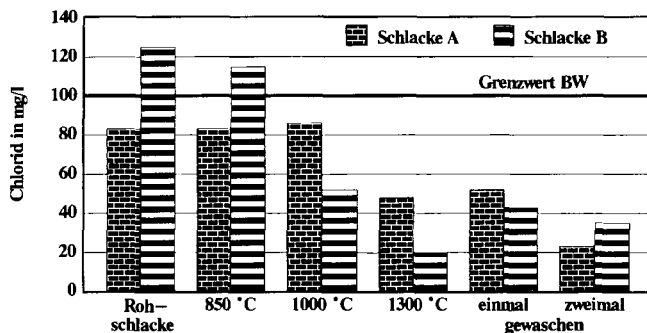


Abb. 5: Chloridelution im DEV-S4 Test

Aus den dargelegten Sachverhalten kann das Fazit gezogen werden, daß trotz inzwischen erheblich verschärfter Maßstäbe zur Umweltverträglichkeit die Müllverbrennungsschlacken eine gute Chance besitzen, nach konsequent erfolgter Weiterentwicklung als verwertbare Produkte ihren Marktwert vor allem im Straßenbau zu behalten oder sogar noch weiter auszubauen. Ökologische Risiken gehen von solchen Anwendungen nicht aus.

5.2 Flugstäube

Die bei der Verbrennung freigesetzten Flugstäube erfahren auf dem Weg durch die Anlage eine Korngrößenseparation der Art, daß die größeren Teilchen im Kessel als sog. Kesselaschen abgeschieden werden, während die feineren Partikel den Kessel durchströmen und dann erst in einem Filter (→ Abschnitt 4.1) vom Gas getrennt werden.

Es ist bekannt, daß mit abnehmender Teilchengröße die spezifischen Gehalte vor allem an Schwermetallen zunehmen, d.h. Kesselaschen sind weniger mit Schwermetallen belastet als Filterstäube. Da die Kesselaschen in ihrer Zusammensetzung aber immerhin den Filterstäuben sehr viel ähnlicher sind als z.B. den Rostaschen, werden sie heute vorschriftsgemäß mit den Filterstäuben gemeinsam behandelt und entsorgt.

Eine typische Inhaltsstoffanalyse von MVA-Filterstaub zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: MVA-Filterstaub

Element	Zn	Fe	Pb	Cu	
Konzentration in mg/kg	45370	21490	19960	1800	
Kohlenstoff 1,6 %		Chlorid 8,2 %			
Mn	Sb	Cr	Cd	Sn	Tl
1340	910	670	500	420	110
Sulfat 13,0 %			PCDD/PCDF 1,5µg TEQ/kg		

Es fallen recht erhebliche Gehalte an Schwermetallen auf, die aufgrund der hohen Chlorid- und Sulfatkonzentrationen z.T. auch löslich sind. Außerdem sind nicht vernachlässigbare, schwer flüchtige, toxische organische Verbindungen enthalten. Die hier genannte Konzentration an PCDD/PCDF mit 1,5 µg TEQ pro kg Filterstaub ist zwar gegenüber Filterstäuben aus älteren Verbrennungsanlagen um mehr als den Faktor 10 niedriger; dennoch müssen auch die heutigen Filterstäube vor allem wegen der eher noch angestiegenen Schwermetallanreicherung weiterhin der Kategorie „Sonderabfall“ zugerechnet werden.

Nachdrücklich stellt sich heute die Frage, wie die Flugstäube am zweckmäßigsten entsorgt werden. Eine oberirdische Ablagerung ohne Vorbehandlung, darüber ist man sich weitgehend einig, ist problematisch und sollte vermieden werden. Eine Verbringung in eine Untertagedeponie wäre sinnvoll, allerdings mit hohen Kosten verbunden und je nach Standort nicht überall realisierbar.

Aus diesen Gründen sind in den letzten Jahren vielfältige Versuche unternommen worden, durch nachträgliche Behandlung eine Umwandlung in eine ungefährliche, d.h. inerte Stoffqualität zu erreichen [4].

Verfestigungsverfahren, z.B. mit Zement als Additiv, werden kaum noch propagiert, da sie in der Langzeitstabilität der Produkte nicht überzeugen.

Als aussichtsreich übriggeblieben sind

- Schmelzprozesse, die allerdings energieintensiv sind und sich als Sekundärproblem bei Temperaturen von 1300 – 1400 °C erneut mit Teilverflüchtigungen von toxischen Schwermetallen und deren Zurückhaltung auseinandersetzen müssen, sowie
- Extraktionsprozesse, die im schwach sauren Milieu mobile Schwermetalle abtrennen [27], in Kombination mit einer thermischen Zerstörung der toxischen organischen Substanzen [28], die durch Rückführung des kompaktierten Filterkuchens in den vorhandenen Müllverbrennungsofen geschieht (3R-Verfahren).

Die aus den Schmelzprozessen wie auch aus dem 3R-Verfahren resultierenden Endprodukte sind frei von PCDD/PCDF und zeichnen sich durch hohe Laugungsresistenz aus. Sie sind dem Verhalten von Naturprodukten wie Kies oder Sand sehr ähnlich.

Das Schema des im Kernforschungszentrum Karlsruhe entwickelten 3R-Prozesses ist in Abb. 6 dargestellt.

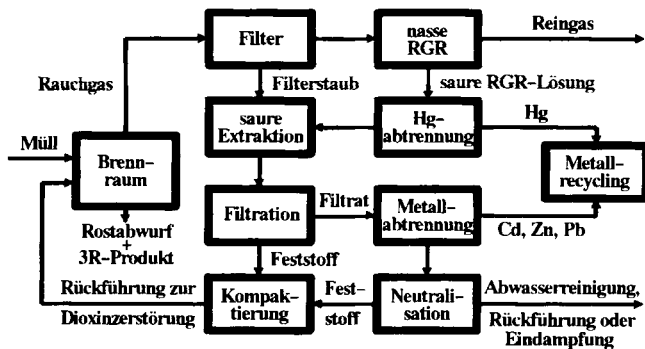


Abb. 6: Fließschema des 3R-Prozesses

Der Prozeß nutzt die vorhandene Waschlösung des sauren Wäschers als Reagenz und den Brennraum der Anlage zur thermischen Behandlung. Eine Verwertung der abgetrennten Metalle sowie vor allem der 3R-Produkte, letztere zusammen mit der Schlacke, ist möglich.

5.3 Salze

Bei der Rauchgasreinigung fallen je Tonne verbrannter Restmüll ca. 12 kg mehr oder minder wasserlösliche Chloride und Sulfate an, die, gemessen an anderen Einleitern, z.B. Kläranlagen, mengenmäßig ohne große Bedenken an potente Vorfluter abgegeben werden könnten. Voraussetzung ist freilich eine vorangehende effektive Abtrennung von Schwermetallen und organischen Substanzen, für die es einen weit entwickelten Stand der Technik gibt. Vor allem aus politischen Gründen wird heute aber die abwasserlose Rauchgasreinigungstechnik bevorzugt [27].

Konsequenterweise läßt dies nur zwei Alternativen für die Salze zu: Verbringung untertage oder Prozeßführung so, daß verwertbare Produkte entstehen. Zu letzterer Variante laufen verschiedene technische Erprobungen, die bereits heute die prinzipielle Machbarkeit unter Beweis stellen.

Der Verwertung des im Restmüll enthaltenen Chlorinventars kommt unter dem Aspekt der Schließung des Chlorkreislaufs erste Priorität zu. In 15 Mio Tonnen Restmüll sind immerhin bis zu 150 000 Tonnen Chlor enthalten.

Während am Anfang der Verwertungs Bemühungen die Gewinnung von Kochsalz im Vordergrund stand, wird neuerdings die Produktion von konzentrierter Salzsäure besonders favorisiert. Dies erfordert Anpassungen im Rauchgasreinigungskonzept, in dem durch Vorschalten einer speziellen Quenchstufe die Produktion einer ca. 15 %igen Rohsäure sichergestellt werden muß. Diese wird dann in einer anschließenden Rektifikation und weiteren Aufkonzentrierung zu einer verkaufsfähigen Säure verarbeitet [30].

Verglichen mit der Chlor-Recycling-Stufe hat die Gewinnung von Gips aus dem Sulfit/Sulfat-Inventar des zweiten Wäschers geringere ökologische Bedeutung. Sie wird dennoch in etlichen Fällen durchgeführt, einfach deshalb, weil abgeleitet von der Kohleverbrennung dazu ein Stand der Tech-

nik existiert, der in einfacher Weise auch auf die Abfallverbrennung übertragen werden kann.

6 Prozeßkontrolle

Technische Verbesserungen in Verbrennung, Rauchgasreinigung und Rückstandsbehandlung setzen weiterentwickelte Methoden der Prozeßsteuerung und -überwachung zwingend voraus. In der Tat ist auf diesem Gebiet z.Z. erhebliche Bewegung festzustellen. Das Interesse konzentriert sich auf Temperatur- und Spurengasmessungen im Feuerraum, auf die Messung von Leitgrößen im Rohgas hinter Kessel sowie auf fortschrittliche Überwachungsmessungen schwer meßbarer, aus Toxizitätsgründen aber besonders wichtiger Emissionseinzelkomponenten.

Aus letztgenannter Gruppe soll kurz noch auf zwei im Kernforschungszentrum Karlsruhe entstandene Entwicklungen zur objektiven Emissionsdauerüberwachung partikulär vorliegender Schwermetalle und von PCDD/PCDF einerseits [31, 32] sowie von Quecksilber andererseits eingegangen werden. [33].

Abb. 7 zeigt das Verfahrensschema des Langzeitprobennahmesystems mit isokinetischer Entnahmesonde, Filtermodul zur Staubabscheidung und Adsorptionsmodul zur Beladung mit flüchtigen Komponenten.

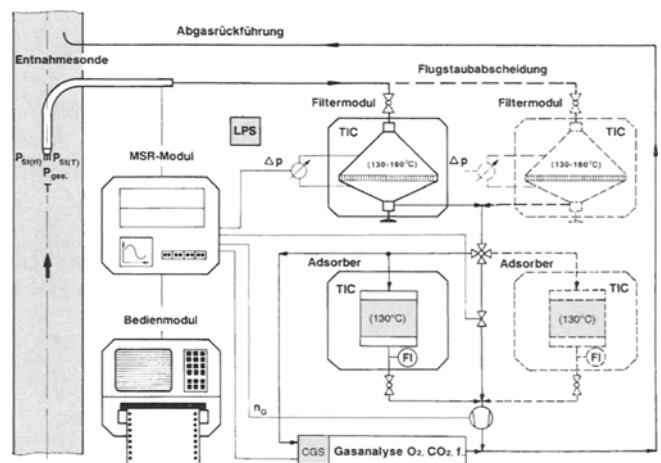


Abb. 7: Verfahrensschema des Langzeitprobennahmesystems (LPS)

Das Prinzip des Verfahrens besteht darin, über möglichst lange Zeiträume durch Dauerbeobachtung archivierbare Tages- oder sogar Wochenproben zu gewinnen, die dann für beliebige analytische Tests zur Verfügung stehen bzw. durch Aliquotierung und Vereinigung mehrerer Einzelproben zu noch längeren Sammelzeiträumen zusammengefügt und analysiert werden können. Das System ist an einigen Anlagen bereits im großtechnischen Einsatz.

Abb. 8 stellt einen realen Schrieb des on-line-Hg-Monitors zur kontinuierlichen Messung von Hg in der Gasphase, z.B. im Rahmen einer Kaminmessung, dar. Quecksilber wird im

Monitorgerät reduktiv in Hg(0) umgewandelt und als solches kontinuierlich in einer Atomabsorptionsküvette gemessen.

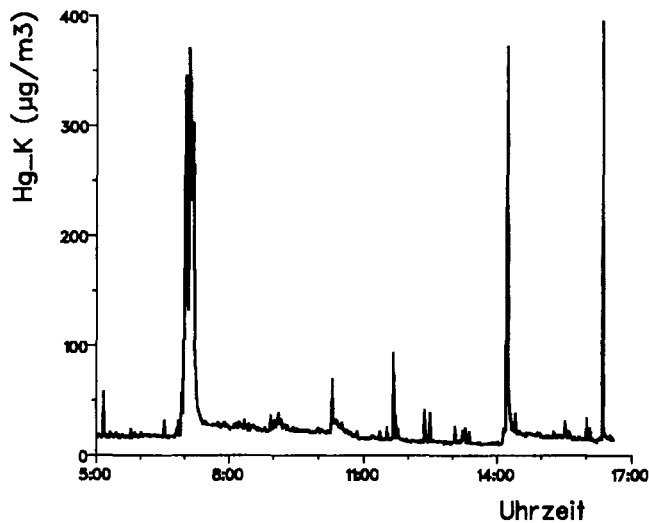


Abb. 8: On-line Hg-Emissionsmessung an TAMARA

Die Abbildung zeigt anschaulich, daß Quecksilber meist als markantes Einzelereignis in die Feuerung eingetragen und dann auch, sichtbar als Rest-Peak, am Kamin emittiert wird. Mittelwertbildungen und die Überwachung von Grenzwerten sind mit einem angeschlossenen PC leicht möglich.

7 Ausblick

Die Gründe für oder gegen die Abfallverbrennung haben sich in den letzten Jahren deutlich verändert.

Verbrennungsgegner, die noch Anfang der 80er Jahre in der Abfallverbrennung nicht zu unrecht eine ernst zu nehmende Schadstoffquelle entdeckten, sehen heute (nach den inzwischen erreichten drastischen Verbesserungen) die Unbedenklichkeit dieses Prozesses durchaus ein. Sie wenden sich aber trotzdem nach wie vor gegen den großflächigen Ausbau dieser Technologie, neuerdings mit dem Argument, daß dadurch stoffliche Verwertungschancen behindert würden. Erfahrungen aus der Praxis belegen diese These freilich in keiner Weise.

Auf der anderen Seite traten die Befürworter zunächst dafür ein, vor allem den durch die Verbrennung erzielbaren Volumenreduktionseffekt zu nutzen. Bald zeigte sich, daß diese Begründung nicht ausreichte und daher abgelöst wurde von der propagierten thermischen Verwertbarkeit der Abfälle. Diese fand in Deutschland ihren Niederschlag zunächst auch im Abfallgesetz, in dem stoffliche und thermische Verwertung gleichrangig nebeneinander gestellt wurden. Daß auch diese Auffassung nochmals modifiziert werden mußte, war vor allem denjenigen klar, die im Verbrennungsprozeß schon immer eine hochwertige Behandlungsmethode zur schadstofflichen Entlastung der Umwelt sahen.

So verwundert es nicht, daß die Abfallverbrennung heute in erster Linie als ein Verfahren zur Umwandlung des im Restmüll enthaltenen bedenklichen, vielfältigen Stoffgemisches in ungefährliche Produkte verstanden wird, während die energetische Nutzung des im Restmüll enthaltenen Heizwerts ins zweite Glied zurücktritt. Trotzdem sollte man sich nicht darüber hinwegtäuschen, daß der energetische Aspekt die Ökonomie des Prozesses entscheidend beeinflusst und in Zukunft wohl der ausschlaggebende Faktor dafür sein wird, welche Verfahrensvarianten der thermischen Abfallbehandlung unter Energiemaximierungsgesichtspunkten letztendlich die Oberhand gewinnen werden.

Im Rahmen integrierter abfallwirtschaftlicher Gesamtkonzepte verdient die Verbrennungstechnik schließlich auch bezüglich Ökobilanzoptimierungen hohe Aufmerksamkeit. Dies deshalb, weil in diese Optimierungen, wie gezeigt wurde, nicht nur die Kaminausgänge, sondern auch die festen Reaktionsprodukte der Verbrennung – Schlacken, Stäube, Salze – einbezogen werden. Letztere können durch geschickte Wahl des Verbrennungsprozesses direkt, durch neu entwickelte physikalisch-chemische Nachbehandlungsverfahren indirekt so beeinflusst werden, daß einerseits verwertbare, neutrale Produkte gebildet werden, andererseits kleine Mengen an anorganischen Schadstoffkonzentraten mit der Möglichkeit einer sicheren untertägigen Endlagerung aus dem Prozeß ausgeschleust und organisch-chemische, toxische Begleitstoffe rückstandsfrei zerstört werden.

Solche Verfahrensweisen erfüllen die Funktion einer SCHADSTOFFSENKE, die sich dadurch auszeichnet, daß dem Ökosystem Schadstoffe nachweislich und quantifizierbar entzogen werden.

Bezogen auf eine mittelgroße Verbrennungsanlage mit einem Jahresdurchsatz von 200 000 Tonnen ist dieser Senkengesichtspunkt in Abb. 9 und 10 dargestellt.

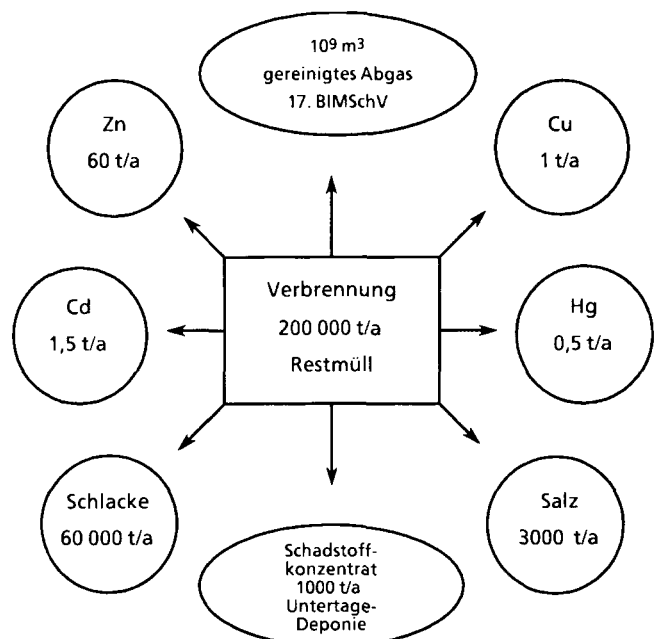
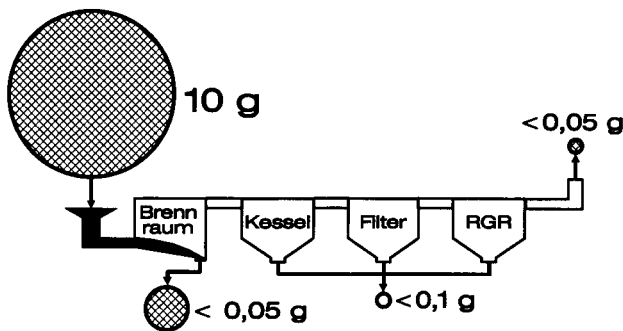


Abb. 9: Abfallverbrennung als anorganische Schadstoffsenke



TEQ für einen Durchsatz von 200 000 Mg/a

Abb. 10: Dioxinsenke Müllverbrennung

Toxische Schwermetalle wie Cadmium und Quecksilber werden im Tonnenmaßstab eliminiert, PCDD/PCDF zu mehr als 90 % zerstört.

Fazit: Es gibt keinen Grund, die Abfallverbrennung abzulehnen oder sich gar vor ihr zu fürchten. Man muß sie vielmehr zum Nutzen unserer Umwelt und im Interesse unserer Gesellschaft tatkräftig vorantreiben. Nicht nur die Wissenschaft, sondern vor allem auch die Politik sind diesbezüglich gefordert.

8 Literatur

- [1] H. VOGG: Abfallwirtschaft-Symp. Berlin 4. – 7. Dezember 1990, THOME-KOZMIENSKY, K. J. [Hrsg.], Müllverbrennung und Umwelt 4, Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, 1990, S. 1
- [2] A. MERZ; H. DITTRICH; P. KAHANEK: Fachtagung Müllverbrennung und Umwelt, Berlin, 2. – 5. Nov. 1987, Berlin, 2. – 5. Nov. 1987, Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik GmbH, 1987, S. 573
- [3] H. VOGG: BWK/TÜ/UT-Special, Okt. 1992, S.M 14
- [4] H. VOGG; J. VEHLow: Fachbuch Abbau industrieller Schadstoffe, WURSTER, B. [Hrsg.], Köln: Verlag-TÜV Rheinland, 1993 Grundwerk, Kap. 6.3
- [5] H. VOGG: Organohalogen Compounds 6 (1991) 279
- [6] J. VEHLow: Symp. „Die neue TA Siedlungsabfall und ihre Folgen“, Aachen, 22./23. Juli 1993, PÖPPINGHAUS, K., [Hrsg.], FIP Schriftenreihe Band 1, 1993, S. 307
- [7] H. VOGG; L. STIEGLITZ: Chemosphere 15 (1986) 1373
- [8] H. VOGG; M. METZGER; L. STIEGLITZ: Waste Management and Research 5 (1987) 285
- [9] H. HAGENMAIER, et. al.: VDI-Bericht 634 (1987) 557
- [10] L. STIEGLITZ; H. VOGG: Chemosphere 16 (1987) 1917
- [11] H. VOGG: Chemosphere, 25, 1 – 2 (1992) 149
- [12] H. VOGG; H. HUNSINGER; L. STIEGLITZ: Chem. Eng. Technol. 13 (1990) 221
- [13] A. NOTTRODT; U. DÜWEL; K. BALLSCHMITTER: Chemosphere 19 (1989) 309
- [14] H. VOGG, et al.: AbfallwirtschaftsJournal 2 (1990), Nr. 9, 529
- [15] H. VOGG, et al.: AbfallwirtschaftsJournal 2 (1990), Nr. 9, 529
- [16] H. VOGG, et al.: VGB KRAFTWERKSTECHNIK 69 Heft 8 (1989), 795
- [17] P. H. BRUNNER; H. MÖNCH: Waste Management & Research 4 (1986) 105
- [18] H. VOGG; A. MERZ; E. BECKER: Thermal Treatment of Radioactive, Hazardous Chemical, Mixed and Medical Wastes: Proc. of the 1991 Incineration Conf., Knoxville, Tenn., May 13 – 17, 1991, p. 555
- [19] AFR-Berichte Elementanalyse von Schwebstäuben (Vollständige Analysergebnisse des AFR-Luftstaub-Verbundprogramms LVPr, KfK-AFR 007 (1983)
- [20] H. BRAUN; M. METZGER; H. VOGG: Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) 135
- [21] P. DRANSFELD; H. BRAUN: Proc. „Entsorgung von Sonderabfällen durch Verbrennung“, GVC/VDI, Düsseldorf (1989) D4-1
- [22] Th. LÖSER: VDI-Bildungswerk, Seminar 43-59-04 (1991) BW 972
- [23] J. VICINUS; R. KNOCH: Müll und Abfall 23 (1991) 229
- [24] M. FREDE: VDI-Bildungswerk, Seminar 43-59-04 (1991) BW 944
- [25] B. PRINZ: The Toxicology Forum, Current Views on the Impact of Dioxins and Furans on Human Health and the Environment, Berlin, Nov. 9 – 11, 1992, p. 418
- [26] J. SCHNEIDER; J. VEHLow; H. VOGG: Wascon '94, An International Conference on Environmental Implications of Construction Materials and Technology Developments, June 1 – 3, 1994, Maastricht, The Netherlands
- [27] H. VOGG: Chem.-Ing.-Tech. 60 (1984) 740
- [28] J. VEHLow, et al.: CHESNER, W. H. [Ed.], Proc. of the 3rd Internat. Conf. on Municipal Solid Waste Combustor Ash Utilization, Arlington, Va., Nov. 13 – 14, 1990 Durham, N.H.: UNH Printing Services, 1991, p. 317
- [29] H. VOGG: Chem.-Ing.-Tech. 60 (1988) 247
- [30] K. KÜRZINGER; R. STEPHAN: Recycling International, (K.J. THOMÉ-KOZMIENSKY, Ed.), Berlin: EF-Verlag (1989) 1224
- [31] A. MERZ; E. BECKER: Schweizer Maschinenmarkt 50 (1990)
- [32] S. KREISZ; H. HUNSINGER; H. VOGG: GIT 38 (1994)
- [33] H. BRAUN; A. GERIG: AbfallwirtschaftsJournal 2 (1990) 819

Bifa GmbH – Bayerisches Institut für Abfallforschung

Prof. Dr. Hubert VOGG, Autor des Beitrages „Restmüllverbrennung“, ist Vorsitzender des Beirates der Bifa GmbH, deren Organ die UWSF ist. Das Bifa führte am 12. Juli 1994 in Augsburg eine Fachtagung „Unternehmenspolitik und Umweltschutz“ durch.

An der Tagung nahmen rund 250 Teilnehmer aus dem gesamten Bundesgebiet und dem europäischen Ausland teil. Sie wurde vom Bifa in Zusammenarbeit mit der Universität Augsburg durchgeführt und vom Bayerischen Ministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen unterstützt.

Das große Interesse zeige, so der kaufmännische Direktor am Bifa, Prof. Dr. Heinz-Georg BAUM, daß sich das Bifa mit seiner auf *Praxisnähe* ausgerichteten *Wissenschaftlichkeit* auf dem richtigen Weg befinde. Umweltschutz werde mehr und mehr zur *Managementaufgabe*, weshalb künftig auch die *Betriebswirtschaft* verstärkt gefordert sei, ihren Beitrag zur Bewältigung der anstehenden Probleme

in den Unternehmen zu leisten. In diese Richtung wiesen auch die Ausführungen von Prof. Dr. Adolf-Gerhard COENENBERG, Ordinarius an der Universität Augsburg und externer Abteilungsleiter der Abteilung Ökonomie am Bifa, der über die Auswirkungen ökologischer Aspekte auf betriebswirtschaftliche Entscheidungen referierte.

Im Rahmen der Fachtagung wurden in erster Linie die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens vorgestellt, bei dem 1167 Unternehmen im gesamten Bundesgebiet zu den **Wechselwirkungen von Umweltschutz und Unternehmenspolitik** befragt wurden. Weitere Perspektiven zu diesem vielschichtigen Themenkreis beleuchteten Vertreter aus Politik, Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft.

Quelle: Bifa-Mitteilung vom 12. Juli 1994