



## FACHINFORMATION

Umwelt & Entwicklung Bayern

# Müllverbrennung: Die thermische Behandlung von Abfällen



DIE THERMISCHE BEHANDLUNG VON ABFÄLLEN

1/2002



# FACHINFORMATION

---

Umwelt & Entwicklung Bayern

## **Müllverbrennung: Die thermische Behandlung von Abfällen**

---

## Impressum

### **Müllverbrennung: Die thermische Behandlung von Abfällen**

München, September 2002

#### **Herausgeber:**

Bayerisches Staatsministerium  
für Landesentwicklung und  
Umweltfragen (StMLU)  
Rosenkavalierplatz 2  
81925 München  
Internet: <http://www.umweltministerium.bayern.de/>  
© StMLU, alle Rechte vorbehalten

ISBN: 3-910075-41-x

#### **Bearbeitung:**

Bayerisches Landesamt für  
Umweltschutz (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Strasse 160  
86179 Augsburg

#### **Textüberarbeitung:**

Prof. Dr. H.-C. Flemming  
Jägerstr. 36  
45478 Mülheim

#### **Abbildungen:**

StMLU und LfU  
(in Einzelfällen wird auf die  
Quellenangaben in der Abbildung  
hingewiesen)

#### **Gesamtproduktion:**

FM Verlagsgesellschaft mbH  
Kraillingerstrasse 12  
82131 Stockdorf

#### **Gestaltung und Herstellung:**

Demmel G.  
Josef-Brückl-Strasse 98  
81825 München

#### **Druck:**

Bartels & Wernitz, München

#### **Bezugshinweis:**

StMLU  
Rosenkavalierplatz 2  
81925 München

Tel.-Bestellung: Bürgerinformation:  
Telefon: ++49-(0)89/9214-3535  
Bestellservice:  
[http://www.umweltministerium.bayern.de/  
aktuell/infothek/infothek.htm](http://www.umweltministerium.bayern.de/aktuell/infothek/infothek.htm)  
Bestellung per E-Mail:  
[poststelle@stmlu.bayern.de](mailto:poststelle@stmlu.bayern.de)

*Gedruckt auf Recycling-Papier aus  
100% Altpapier.  
Umschlag aus Recycling-Karton.*



# Was diese Broschüre soll

Schauen wir uns um: Alle Gebrauchsgegenstände, die wir sehen, werden einmal zu Abfall. Sie werden es spätestens dann, wenn sie kaputtgehen oder wenn wir sie aus anderen Gründen loswerden wollen.

Wohin damit? Schließlich verschwinden sie nicht einfach. Früher wurde mit dem Abfall anders umgegangen. In den meisten Fällen wurde er vor die Tür, hinters Haus, in den Wald oder in den nächsten Bach geworfen. So lange ist das gar nicht her, denn es war die einfachste Art der Entsorgung. Aber sie ist längst nicht mehr akzeptabel – wir alle wollen eine Umwelt, die nicht durch unsere Abfälle verschandelt oder gefährdet wird.

Die beste Lösung für das Müllproblem ist natürlich die Vermeidung. Wesentliche Anstrengungen dazu wurden in den letzten Jahren unternommen. Geradezu perfektioniert wurde im letzten Jahrzehnt die Verwertung großer Teile des Hausmülls. Weitverzweigte getrennte Sammelsysteme wurden aufgebaut. Heute ist es für uns selbstverständlich, Verpackungen getrennt zu sammeln, Papier und Glas zu den Containern zu transportieren und organische Abfälle zu kompostieren.

Was geschieht jedoch mit den immer noch beachtlichen Men-

gen der verbleibenden Abfälle, dem sogenannten Restmüll? Ein Lösungsansatz wäre die Errichtung weiterer Deponien nach dem neuesten Stand der Technik. Gerade hier aber hat man in den früheren Jahren schlechte Erfahrungen gesammelt. Denn Müll liegt nicht für alle Zeiten einfach unverändert in der Deponie, sondern kann darin auch reagieren. Im feuchten Müll können chemische Reaktionen ablaufen und Mikroorganismen leben, die z. T. unerwünschte Stoffwechselprodukte erzeugen. Dabei entstehen Gase und Sickerwässer, die über viele Jahrzehnte hinweg aufgefangen und behandelt werden müssen. Wer garantiert uns und kommenden Generationen, dass die heute geforderten Barrieren auch in den modernsten Deponien für immer halten werden? Wer kommt dann für Nachsorge und die erforderlichen Sanierungsmaßnahmen auf? Ganz abgesehen vom Platzbedarf, den diese Anlagen beanspruchen.

Die zukunftsorientierte Lösung ist deshalb nach wie vor, den Restmüll vor seiner Ablagerung so zu behandeln, dass die dann noch verbleibenden und möglichst reaktionsträgen Rückstände langfristig sicher abgelagert werden können. Als Behandlungsmethode wurde die thermische Abfallbehandlung über viele Jahre hinweg weiter entwickelt;

sie hat sich in der Praxis bewährt und erfüllt in hervorragender Weise die Anforderungen an eine ökologisch und ökonomisch tragbare Entsorgung.

Die thermische Abfallbehandlung ist seit Jahren ein unverzichtbarer Bestandteil des Bayerischen Integrierten Entsorgungskonzepts.

Sie hat sich in Bayern bewährt und wird auch vor dem Hintergrund einer kritischen Öffentlichkeit weitgehend akzeptiert. Auch haben sich die Inhalte der Diskussion zwischenzeitlich erheblich gewandelt. Standen bis Mitte der neunziger Jahre noch Fragen der Emissionen aus den thermischen Abfallbehandlungsanlagen und ihre Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit im Vordergrund, kreisen heute viele Diskussionen um die Abfallgebühren, um angebliche oder tatsächliche Überkapazitäten, mechanisch-biologische Verfahrensalternativen oder Kombinationen dieser mit thermischen Behandlungsverfahren.

Diese Broschüre soll über den aktuellen Stand des Wissens und die gegenwärtige Diskussion um die Müllverbrennung auch für Nichtfachleute verständlich, umfassend, detailliert und sachgerecht informieren.



# Inhalt



## Kapitel 1

Das integrierte Abfallentsorgungskonzept

7



## Kapitel 2

Gesetzliche Grundlagen und  
Entsorgungssituation in Bayern

9



## Kapitel 3

Die Müllverbrennung –  
eine wichtige Station in der Kreislaufwirtschaft

13



## Kapitel 4

Maßnahmen zur Luftreinhaltung  
und deren gesetzliche Vorgaben

16



## Kapitel 5

Der lange Weg zu den Emissionswerten von heute

18



## Kapitel 6

Umwelteinwirkungen von Schadstoffen  
aus Müllverbrennungsanlagen (MVA)

22



## Kapitel 7

Gesundheitliche Beurteilung  
der Abfallverbrennung

24



## Kapitel 8

Anforderungen  
an die Genehmigung einer MVA

26



## Kapitel 9

Aufbau und Funktionsweise  
einer modernen MVA

27



## Kapitel 10

Methoden der Abgasreinigung

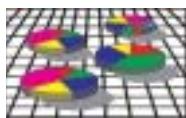
30



## Kapitel 11

Was emittieren die bayerischen Anlagen?

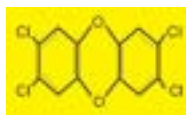
39



## Kapitel 12

Rückstände aus der MVA

40



## Kapitel 13

Dioxine – ein Sonderfall

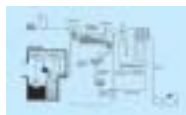
45



## Kapitel 14

Verwertung der Verbrennungsenergie  
und Klimarelevanz

50



## Kapitel 15

Neuentwicklungen bei thermischen Verfahren

52



## Kapitel 16

Was kostet die Abfallbehandlung?

56



## Kapitel 17

Trends in der Abfallwirtschaft

57



## Kapitel 18

Ausblick

59



## Glossar und Abkürzungen

60



## CD-Lernspiel

64





# Das integrierte Abfallentsorgungskonzept

Die Grundlage der bayerischen Abfallwirtschaftspolitik ist das Bayerische Abfallwirtschaftsgesetz (BayAbfG). Für dieses Gesetz hat sich die bayerische Bevölkerung in einem Volksentscheid mehrheitlich ausgesprochen. Es trat im März 1991 in Kraft und wurde 1996 novelliert. Es ist ein anerkannt vorbildhaftes Abfallgesetz und gibt den Rahmen für eine „nachhaltige umweltverträgliche Kreislaufwirtschaft“ vor.

*Fünf Ziele nennt das Gesetz:*

1. Den Anfall von Abfällen so gering wie möglich zu halten (**Abfallvermeidung**)
2. Schadstoffe in Abfällen so weit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern (**Schadstoffminimierung**)
3. Entstandene Abfälle, vor allem Glas, Papier, Metall, Kunststoff, Bauschutt und kompostierbare Stoffe weitestgehend in den Stoffkreislauf zurückzuführen (**stoffliche Abfallverwertung**)
4. Stofflich nicht verwertbare Abfälle so zu behandeln, dass sie umweltverträglich verwertet oder abgelagert werden können (**Abfallbehandlung**); die thermische Behandlung ist für solche Abfälle geeignet, für welche die oben genann-

ten Maßnahmen ausgeschöpft wurden.

5. Nicht verwertbare oder nicht weiter zu behandelnde Abfälle sind umweltverträglich abzulagern (**Abfallablagerung**)

Schwerpunkt ist die Vermeidung von Abfällen. Hier sind

sowohl die Hersteller als auch die Verbraucher angesprochen. Wer Produkte auf den Markt bringen will, muss bereits vorher daran denken, welche Abfälle bei der Produktion entstehen und welchen Lebensweg sie von Anfang bis Ende durchlaufen. Sie sollten nach Gebrauch möglichst wiederverwendet oder gut verwertet

## Ziele und Umsetzung des integrierten Entsorgungskonzeptes

**Abfälle vermeiden** (soweit wie möglich), durch

- das abfallarme Herstellen, Be- und Verarbeiten von Erzeugnissen
- die Erhöhung der Gebrauchsdauer und Haltbarkeit von Erzeugnissen
- weniger Verpackungen und mehr Mehrwegsysteme

**Abfälle stofflich verwerten** (so viel wie möglich), durch

- die schadstoffarme Produktion
- die getrennte Erfassung von stofflich verwertbaren Abfällen, z. B. Glas, Papier, kompostierbare Materialien
- die Entwicklung und Anwendung von Verfahren zur Verwertung von Abfällen

**Abfälle behandeln** (so viel wie nötig), durch

- die flächendeckende Errichtung von Müllverbrennungsanlagen (in Bayern bereits abgeschlossen)

**Abfälle ablagern** (so wenig wie möglich), durch

- die Schaffung sicherer und umweltfreundlicher Deponien nach den Vorgaben der TASI (s. S. 9) und der Ablagerungsverordnung

Diese Rangfolge ist nicht absolut starr. Selbstverständlich können nach Abwägung der ökologischen und ökonomischen Vor- und Nachteile auch Abweichungen vom Vorrang der Verwertung vorgenommen werden.





## Kapitel 1

werden können. Zumindest sollten sie als schadstoffarmer Abfall anfallen, wenn es keine anderen Möglichkeiten gibt. Der Verbraucher wiederum kann durch umweltbewusstes Einkaufen und Handeln zur Abfallvermeidung beitragen.

Das Ziel lautet: Nichts soll zu Abfall werden, was noch sinnvoll verwertet werden kann.

Die stoffliche Verwertung stößt allerdings auf Grenzen. Die Kosten für Anschaffung und Unterhalt der Container und -standplätze, Wertstoffhöfe, Transport etc. können nur bei einigen Wertstoffen durch die Erlöse aus deren Verkauf gedeckt werden.

Zudem ist der Markt für die sog. Sekundärrohstoffe nicht unbegrenzt und von der Nachfrage abhängig.

Nach Absonderung der Wertstoffe bleiben noch rund 40 Gewichtsprozent der Abfälle als Restmüll, der vor seiner Ablagerung behandelt werden muss. Als Behandlungsmethoden sind nach dem Bayerischen Abfallwirtschaftsgesetz insbesondere thermische Verfahren geeignet, beispielsweise die Müllverbrennung.

Das integrierte Entsorgungskonzept soll auch in der Abfallwirtschaft zu einer nachhaltigen, umweltverträglichen Ent-

wicklung beitragen. Im Vordergrund steht dabei der sparsame Umgang mit Stoffen und Energie.

Stichworte hierzu sind: Ressourcenschonung und Kreislauf-führung, die Verminderung des Schadstoffeintrages in die Umwelt und die Vermeidung künftiger Altlasten. ■



# Gesetzliche Grundlagen und Entsorgungssituation in Bayern

Mit dem Bayerischen Abfallwirtschaftsgesetz (BayAbfG) und dem Abfallentsorgungsplan Bayern (AbfPV) vom Dezember 2001 sind die Ziele der integrierten Abfallwirtschaft und ihre konkre-

te landesweite Umsetzung vorgegeben.

Die großen Anstrengungen der entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften (Landkreise und

kreisfreie Städte) und die tatkräftige Mithilfe der Bürger haben in den letzten 10 Jahren dazu beigetragen, die Situation der Abfallwirtschaft in Bayern entscheidend zu verbessern.

## Was ist die TA Siedlungsabfall, kurz TASI ?

TASi heißt „Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen“.

Sie enthält Rahmenbedingungen für die Entsorgung (d.h. Verwertung und Beseitigung) von Siedlungsabfällen unter Berücksichtigung der Entsorgungssicherheit, der Ressourcenschonung und der Minderung von Schadstoffbelastungen für die Umwelt. Wesentlich ist darüber hinaus, dass die Entsorgungsprobleme von heute nicht auf künftige Generationen verlagert werden. Ziel der TASi ist eine nachhaltige, umweltverträgliche Abfallentsorgung.

**Dazu werden drei Schwerpunkte genannt:**

- **Anforderungen an die Schadstoffentfrachtung und die stoffliche Verwertung:**

Um das abzulagernde Abfallaufkommen zu verringern, geht die TASi davon aus, dass Abfälle soweit wie möglich (und sinnvoll) stofflich verwertet werden.

- **Anforderungen an die abzulagernden Abfälle:**

Um die Gefahren durch abzulagernde Abfälle für die Umwelt zu minimieren und zukünftige Altlasten zu vermeiden, dürfen auf Deponien nur noch erdkrustenähnliche, reaktionsträge (inerte) Stoffe abgelagert werden.

Dies macht eine Vorbehandlung der Abfälle erforderlich. Die abzulagernden Abfälle müssen weitestgehend schadstoffentfrachtet und mineralisiert sein. Die Inertisierung wird u.a. definiert durch einen maximalen organischen Kohlenstoffanteil der abzulagernden Abfälle von 3 Gewichtsprozent bzw. einen Glühverlust von max. 5 Prozent. Diese Werte sind als Ablagerungskriterien in der TASi festgelegt und können nach dem der zeitigen Stand der Technik nur durch thermische Verfahren wie die Verbrennung erreicht werden. Die Deponierung biologisch und chemisch umsetzbarer Abfälle ist nur noch in Ausnahmefällen und übergangsweise noch bis spätestens zum 01.06.2005 erlaubt.

- **Anforderungen an die Deponien:**

Um auch in Zukunft sichere Deponien zu haben, werden strenge Anforderungen an den langfristig sicheren Einschluss und damit an die Deponietechnik gestellt.



## Kapitel 2

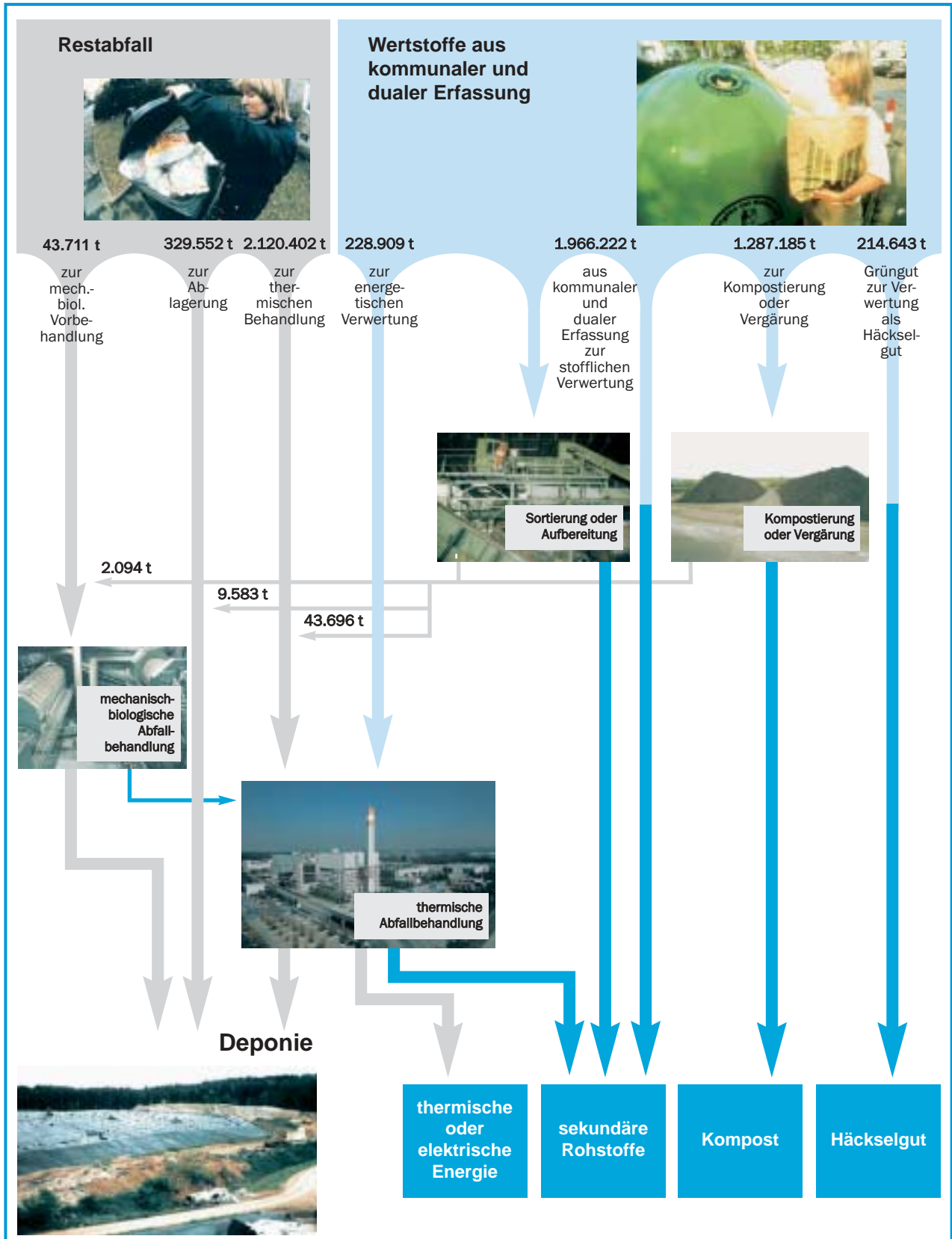


Abbildung 1: Abfallströme in Bayern (Datenstand 1999).

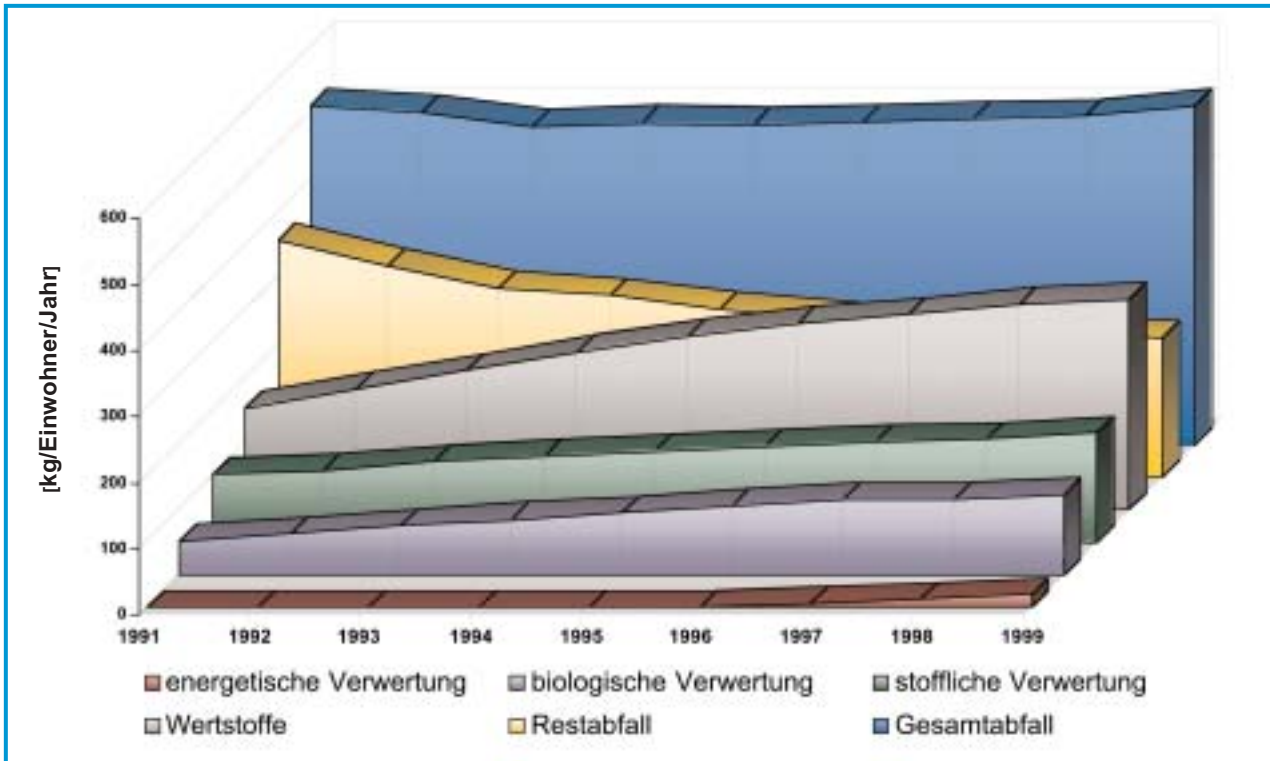


Abbildung 2: Vergleich der Abfallströme in Bayern 1991 und 1999.

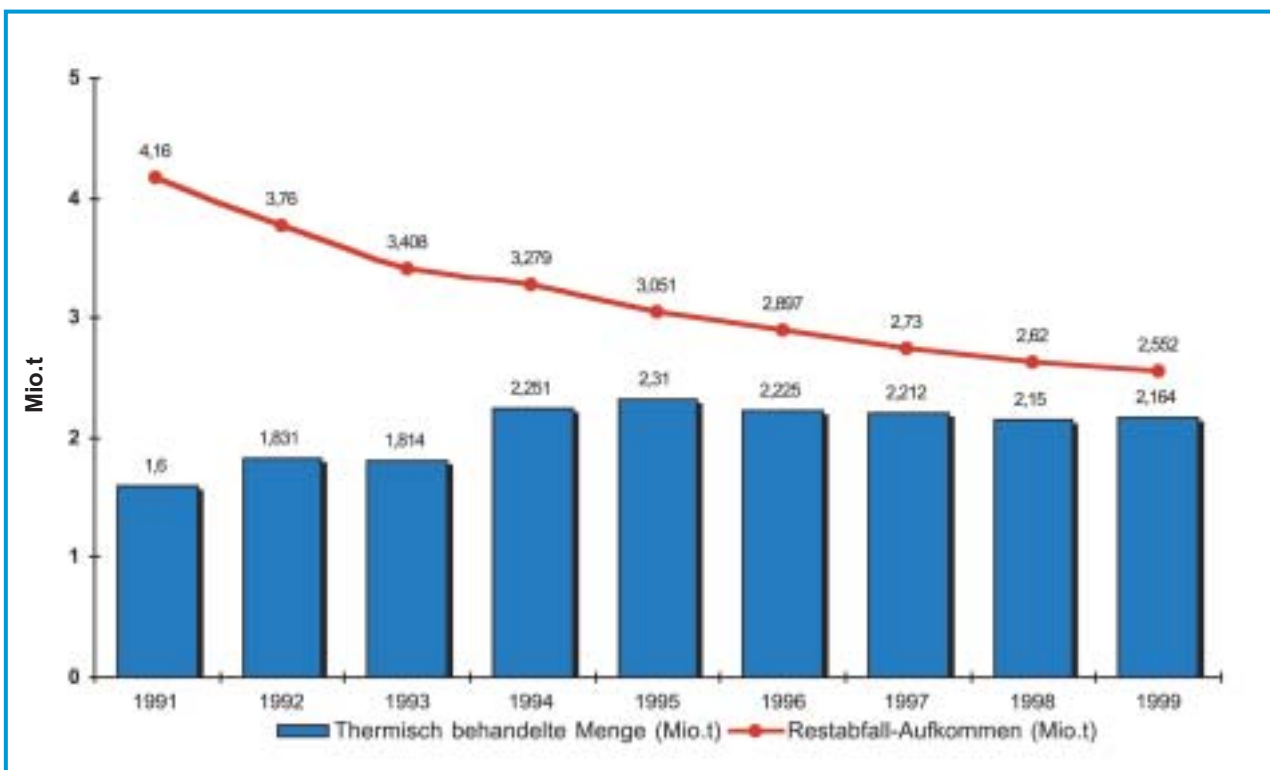


Abbildung 3: Entwicklung des Restabfallaufkommens und des thermisch behandelten Anteils in Bayern, von 1991 bis 1999.



## Kapitel 2

Seit dem Jahr 1991 haben die Entsorgungspflichtigen (Landkreise und kreisfreie Städte) Jahresbilanzen über Art, Menge und Herkunft der Abfälle sowie über deren Entsorgung zu erstellen. Die Erfolge der Vermeidungs- und Verwertungsbemühungen sind somit klar nachvollziehbar (siehe Abbildung 1). Die Restabfallmengen haben kontinuierlich und deutlich abgenommen, obwohl die Einwohnerzahl stetig zunahm!

Die auf den einzelnen Einwohner bezogene Restabfallmenge ging in diesem Zeitraum von 360 kg im Jahr 1991 auf 211 kg im Jahr 1999 zurück. Dabei blieb die Menge des Gesamtabfalls mit 512 kg (1999) in etwa gleich. Es wird heute erheblich mehr wiederverwertet. So stieg die Menge der verwerteten Stoffe im gleichen Zeitraum von rund 153 kg pro Einwohner und Jahr auf rund 305 kg. Für das Jahr 1999 bedeutete dies, dass nicht weniger als rund 3,6 Millionen Tonnen einer Verwertung zugeführt wurden

und somit die Entsorgungseinrichtungen entlasteten.

Die Veränderungen der Abfallströme zwischen 1991 und 1999 sind in Abbildung 2 wiedergegeben.

Seit 1991 hat der thermisch behandelte Anteil des Restmülls kontinuierlich zugenommen und lag 1999 bereits bei rund 85% (siehe Abbildung 3). Hier werden die großen Anstrengungen der Entsorgungspflichtigen deutlich, den gesetzlichen Vorgaben nach einer möglichst raschen Beendigung der Ablagerung unbehandelter Abfälle nachzukommen.

Unterstützt wird diese Entwicklung durch ein bundesweit geltendes Regelwerk, der Technischen Anleitung Siedlungsabfälle (TASi) aus dem Jahr 1993 sowie durch die Ablagerungsverordnung aus dem Jahre 2000. Diese enthalten wichtige Rahmenbedingungen für die Entsorgung von Siedlungsabfällen.

### Unter Siedlungsabfällen versteht man unter anderem:

- Hausmüll
- Sperrmüll
- hausmüllähnliche Gewerbeabfälle
- sonstige kommunale Abfälle
- Bauabfälle und
- Abfälle und Schlämme aus dem Betrieb kommunaler Kläranlagen und der Kanalisation

Bayern hat seine Hausaufgaben bereits erledigt und verfügt heute über genügend thermische Kapazitäten und Deponien, um eine TASi-gerechte Entsorgung zu gewährleisten. ■



# Die Müllverbrennung – eine wichtige Station in der Kreislaufwirtschaft

## Die Müllverbrennung ist ein unverzichtbarer Baustein des integrierten Entsorgungskonzeptes und erfüllt folgende Aufgaben:

- Verringerung von Menge und Volumen der behandelten Abfälle (70 – 80 % weniger Masse, 85 – 90 % weniger Volumen).
- Möglichst vollständige Oxidation der organischen Bestandteile im Müll und ihre Umwandlung in einfache natürliche Endprodukte wie Kohlendioxid und Wasser.
- Konzentrierung der Schwermetall-Spuren in den Rückständen aus der Abgasreinigung und damit in einem kleinen Volumen.
- Erzeugung möglichst schadstoffarmer Schlacken, die stofflich verwertet oder umweltverträglich abgelagert werden können.
- Möglichst optimale Nutzung der Energie, die bei der Verbrennung entsteht.

Auf diese Weise erfüllt die thermische Abfallbehandlung wesentliche Anforderungen an eine nachhaltige Abfallwirtschaft. Zusätzlich liefert der Verbrennungsprozess einen nicht zu verachtenden Beitrag verwertbarer Energie in Form von Prozessdampf, Fernwärme oder Strom, die an externe Verbraucher abgegeben wird.

Mit der Inbetriebnahme der ersten Anlage in Rosenheim im Jahre 1963, also vor fast 40 Jahren, begann die Chronik der Müllverbrennung in Bayern. Anfang der 70er Jahre wurde bereits ein Viertel der Siedlungsabfälle in Müllverbrennungsanlagen verbrannt. 1999 lag der Anteil bereits bei etwa 85 %, während es 1991 noch rund 38 % waren (siehe auch Abbildung 3). Damit ist Bayern unter den Flächenländern bundesweit führend.

Den Stand der Müllverbrennung in Bayern zeigt die folgende Tabelle 1 sowie Abbildung 4.

Im Jahre 1999 standen in Bayern 17 Müllverbrennungsanlagen für Siedlungsabfälle zur Verfügung. Eine Ersatzanlage wurde 2001 in Betrieb genommen (Nürnberg). Ersatzofenlinien wurden in Ingolstadt und Würzburg dazugebaut. In Ansbach ist

eine Thermoselect-Anlage (innovative Technik) vorgesehen, mit deren Bau 1999 begonnen wurde.

Die Schwelbrenn-Anlage in Fürth wurde nach erheblichen technischen Problemen Anfang 1999 stillgelegt. Insgesamt sind die verfügbaren Kapazitäten in etwa gleich geblieben und genügen nun für eine vollständige Behandlung aller in Bayern anfallenden Siedlungsabfälle über das TASI-Stichjahr 2005 hinaus.

Im bundesweiten Vergleich zeigt sich eine sehr ungleichmäßige Ausstattung der einzelnen Bundesländer mit thermischen Behandlungsanlagen. Vor allem in den neuen Bundesländern werden zur Zeit noch beachtliche Abfallmengen unbehandelt abgelagert. Die Zahlen des Umweltbundesamt (UBA) weisen für 1999 im gesamten Bundesgebiet insgesamt 57 Anlagen zur Verbrennung von Siedlungsabfällen aus, in denen ca. 13 Millionen Tonnen Abfälle behandelt werden können. ■



## Kapitel 3

**Tabelle 1:** Stand der thermischen Abfallbehandlung in Bayern (Abfallbilanz 1999).

Standort	Inbetriebnahme	Auslegung/Durchsatz	Durchsatz 1999	Energieverwertung
Augsburg	1994	3 x 10 t/h	200.679 t/a	Strom, Fernwärme
Bamberg	1978 1981	2 x 6 t/h 1 x 6 t/h	115.305 t/a	Strom, Fernwärme
Burgau (Pyrolyse)	1987	2 x 3 t/h	20.519 t/a	Strom
Burgkirchen	1994	2 x 15 t/h	191.893 t/a	Strom, Prozessdampf
Coburg	1989	2 x 11 t/h	109.138 t/a	Strom, Fernwärme
Geiselbullach	1975 1985	1 x 6 t/h 2 x 6 t/h	85.944 t/a	Strom
Ingolstadt	1996 1983	2 x 12 t/h 1 x 8 t/h	199.375 t/a	Strom, Fernwärme
Kempton	1996 1975	1 x 8,5 t/h 1 x 7 t/h	76.569 t/a	Strom, Fernwärme
Landshut	1981	1 x 6 t/h	42.245 t/a	Strom
München-Nord	1984 1991	2 x 20 t/h 2 x 35 t/h	600.097 t/a	Strom, Fernwärme
Neufahrn	1978	1 x 3 t/h	22.739 t/a	Fernwärme
Nürnberg	1968 1981	3 x 12,5 t/h 1 x 20 t/h	189.000 t/a	Strom, Fernwärme
Rosenheim	1988	1 x 10,5 t/h	56.643 t/a	Strom, Fernwärme
Schwandorf	1983 1992	3 x 18,7 t/h 1 x 23 t/h	365.996 t/a	Strom, Fernwärme, Prozessdampf
Schweinfurt	1994	3 x 8 t/h	140.016 t/a	Strom, Fernwärme
Weißenhorn	1992	2 x 6,5 t/h	83.587 t/a	Strom
Würzburg	1984 1999	2 x 12,5 t/h 1 x 15 t/h	174.484 t/a	Strom, Fernwärme

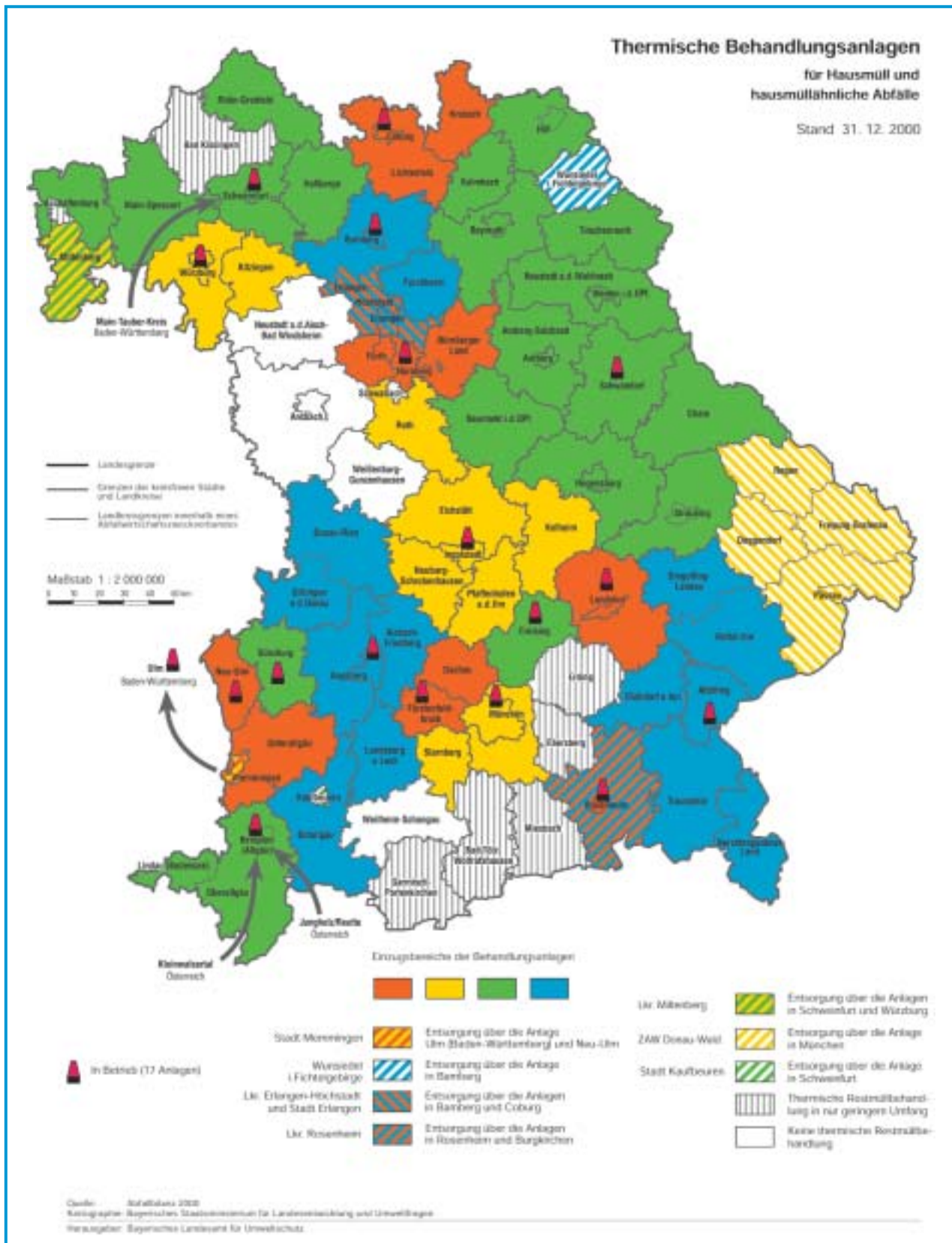


Abbildung 4: MVA-Standorte in Bayern.





# Maßnahmen zur Luftreinhaltung und deren gesetzliche Vorgaben

Wenn Abfälle verbrannt werden, dann entstehen wie bei allen anderen Verbrennungsprozessen Rückstände und Abgase.

Die Schlacken, Flugstäube und Reaktionsprodukte aus der Abgasreinigung sind Feststoffe; flüssige Rückstände fallen in einigen Anlagen mit Abgaswäschen an.

Die festen und flüssigen Rückstände werden direkt in der Anlage gezielt erfasst und einer geordneten Verwertung oder Beseitigung zugeführt. Nur die vorher gereinigten Abgase werden über den Kamin in die Atmosphäre abgegeben. Besonders die gasförmigen Emissionen haben in der Öffentlichkeit we-

gen ihren möglichen gesundheitlichen Wirkungen häufig zu äußerst kontroversen Diskussionen geführt. ■

### Wissenswertes über Abgase aus Müllverbrennungsanlagen

Bei der Hausmüllverbrennung entstehen ca. 5.000 m<sup>3</sup> Abgase pro Tonne Abfall. Die Hauptbestandteile des Abgases sind:

- **Stickstoff:** 56 – 77 %
- **Sauerstoff:** 7 – 14 %
- **Kohlendioxid:** 6 – 12 %
- **Wasser:** 10 – 18 %

Diese Emissionen sind nicht giftig und gesundheitlich unproblematisch. Jedoch finden sich unter den Spurenstoffen Verbindungen wie Kohlenmonoxid, Stickoxide, Salzsäure, Dioxine und Schwermetalle. Für diese Stoffe wurden Grenzwerte festgelegt. Zu ihrer Rückhaltung bzw. zu ihrer Zerstörung wurden aufwändige und kostenintensive Techniken zur Abgasreinigung entwickelt, die heute eingesetzt werden.

Die Schadstoffe werden nach der 17. BImSchV in Milli- oder Nanogramm pro Kubikmeter Abgas angegeben. Welche Stoffe in den Abgasen auftreten, hängt auch davon ab, was verbrannt wird. Das ist nicht anders als bei der Verbrennung von Öl: Es gibt schwefelreiche Sorten, aus denen viel Schwefeldioxid entsteht, und schwefelarme Sorten, bei denen entsprechend weniger Schwefeldioxid entsteht. Wichtig sind auch die Bedingungen der Verbrennung, also die Temperatur, die Verweilzeit im Feuerraum und die Luftzufuhr. Auch davon wird die Konzentration der Stickoxide oder des Kohlenmonoxids im Abgas beeinflusst.



### Grenzwerte und die dazugehörigen Vorschriften

Für die nach dem Immissionsschutzrecht genehmigungsbedürftigen Anlagen werden die maximal zulässigen Emissionsbegrenzungen durch die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (**TA Luft 86**) geregelt. Für Abfallverbrennungsanlagen wurden zusätzlich durch die 17. Verordnung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (**17. BImSchV**) gegenüber der TA Luft 86 deutlich niedrigere Emissionsgrenzwerte festgelegt. Erstmals wurde auch ein sehr niedriger Wert für polychlorierte Dibenzodioxine und -furane eingeführt.

#### **Vorsorgeprinzip:**

Bereits die Emissionsbegrenzungen der TA Luft 86 wurden vorsorglich so niedrig angesetzt, dass nicht nur akute schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, sondern auch bei deren Überschreitung keine negativen Umwelteinwirkungen zu erwarten sind. Deshalb werden sie „Vorsorgewerte“ genannt. Eine Überschreitung bedeutet also noch keine unmittelbare Gefährdung für die Umwelt oder die Gesundheit der Bevölkerung.

#### **Überwachung der Emissionen:**

Nichts wird dem Zufall überlassen: Neben der Höhe der Grenzwerte wird in der 17. BImSchV auch festgelegt, wie und in welchem Umfang die Überwachung zu erfolgen hat. Für viele Schadstoffe wie z. B. Staub oder Schwefeldioxid sind kontinuierliche Messungen vorgeschrieben. Schadstoffe, die sich heute noch nicht auf diese Weise erfassen lassen, sind jährlich wiederkehrend zu messen. Die Untersuchungen dürfen nur von den durch die Oberste Immissionsschutzbehörde (in Bayern das StMLU) zugelassenen Messinstituten vorgenommen werden. Zusätzlich müssen für den ordnungsgemäßen Betrieb der MVA wichtige Betriebsgrößen wie Abgastemperatur, -volumen, -feuchte und -druck kontinuierlich ermittelt und ausgewertet werden.

#### **Information der Öffentlichkeit:**

Die Betreiber der Anlagen müssen die Öffentlichkeit jährlich über die Messergebnisse unterrichten. Einige Betreiber nutzen dies als Chance und informieren darüber hinaus die interessierten Bürger mit Aushängen, Zeitungsveröffentlichungen oder über das Internet. So können die Werte von allen MVAS auch im Internet über <http://www.umweltministerium.bayern.de/bereiche/abfall> abgefragt werden.



# Der lange Weg zu den Emissionswerten von heute

Wie bei Kraftfahrzeugen und anderen technischen Anlagen auch wurden die Abgase der ersten Müllverbrennungsanlagen bei weitem nicht so gründlich gereinigt wie heute. Seit Inbetriebnahme der ersten Müllverbrennungsanlage in Rosenheim 1963 haben sich Anforderungen und Standard der Abgasreinigung entscheidend geändert. Früher wurden diese Anlagen gezielt nahe oder innerhalb städtischer Gebiete errichtet, um die bei der Verbrennung freigesetzte Energie in Form von Fernwärme oder Dampf optimal nutzen zu können. Dem damaligen Standard der Luftreinhaltung entsprechend verfügten diese Anlagen aber lediglich über eine Entstaubung der Abgase, in der Regel mit Elektrofilter. Die Emissionen aus diesen Anlagen lagen damals um ein Vielfaches höher als heute.

Während der letzten drei Jahrzehnte wurden die Anforderungen immer weiter verschärft. Tabelle 2 zeigt diese Entwicklung über den Zeitraum von 1986 (TA Luft) bis 1999 (17. BImSchV); jede Verschärfung machte neue technische Entwicklungen erforderlich, um die Emissionen auf die geltenden gesetzlichen Vorgaben zu senken.

### Was hat sich geändert?

#### TA Luft 74

In der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) von 1974 wurden erstmals Begrenzungen für die Emissionen von Staub, Chlorwasserstoff (HCl) und Kohlenmonoxid (CO) festgelegt.

Zur Entstaubung wurden Elektrofilter eingebaut. Zur Abscheidung des HCl (Salzsäure), das auch bei der Verbrennung von PVC entsteht, wurden Wäscher installiert. Das entsprach dem damaligen Stand der Technik (vgl. Abbildung 5).

#### TA Luft 86

Mit der TA Luft 86 wurden die Emissionsgrenzwerte deutlich verschärft, vor allem für die Freisetzung von CO, Gesamtkohlenstoff, HCl und Staub. Für andere Stoffe wurden erstmals Grenzwerte festgelegt. Dazu gehören Schwefeldioxid und Stickoxide, Fluorwasserstoff und bestimmte Schwermetalle.

Um diese Vorschriften einhalten zu können, waren weitere technisch anspruchsvolle und kostspielige Maßnahmen zu installieren. Um Schwefeldioxid zu entfernen, war ein zweiter (neutraler) Wäscher erforderlich. Auch die Entstaubung musste

deutlich verbessert werden. Um das Kohlenmonoxid (siehe Glossar) und die organischen Verbrennungsgase vollständig zu verbrennen, musste auch die Feuerung entscheidend optimiert werden. Außerdem galt es, den Austrag von Schwermetallen mit dem Abgas zu verhindern. Da diese überwiegend mit den Stäuben ausgetragen werden, war eine effektive Entstaubung hier die erfolgversprechendste Strategie.

#### 17. BImSchV

Die Verordnung über die Verbrennungsanlagen von Abfällen und ähnlichen brennbaren Stoffen zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (17. BImSchV), die 1990 in Kraft trat, hat die bereits auf Vorsorge bedachten Grenzwerte der TA Luft 86 nochmals deutlich verschärft (siehe Tabelle 2).

Die 17. BImSchV gibt zusätzlich auch Verbrennungsbedingungen für Abfälle vor, beispielsweise die Mindestanforderungen für Temperatur (850°C) und Verweilzeit (2 Sekunden) der Abgase im Feuerraum. Dies soll sicher stellen, dass die im Müll enthaltenen organischen Schadstoffe vollständig zerstört werden.

Um die neuen Anforderungen zu erfüllen, waren in den beste-



**Tabelle 2:** Grenzwerte und die dazugehörigen Vorschriften.

Parameter	Einheit	1986: TA Luft	1990: 17. BImSchV			1999: Neuregelung der 17. BImSchV		
			TMW <sup>1)</sup>	HMW <sup>2)</sup>	1h-MW <sup>3)</sup>	TMW	HMW	1h-MW
Cges	mg/m <sup>3</sup>	20	10	20	-	10	20	-
CO	mg/m <sup>3</sup>	100	50	-	100	50	100	-
HCl	mg/m <sup>3</sup>	50	10	60	-	10	60	-
HF	mg/m <sup>3</sup>	2	1	4	-	1	4	-
SO <sub>2</sub>	mg/m <sup>3</sup>	100	50	200	-	50	200	-
NO <sub>x</sub>	mg/m <sup>3</sup>	500	200	400	-	200	400	-
Staub	mg/m <sup>3</sup>	30	10	30	-	10	30	-
Parameter	Einheit	1986: TA Luft	TMW	HMW	Mittel über Probezeit	TMW	HMW	Mittel über Probezeit
TA Luft 86: Klasse I (Cd, Hg, Tl)	µg/m <sup>3</sup>	200	-	-	-	-	-	-
Cd, Tl	µg/m <sup>3</sup>		-	-	50	-	-	50
Hg	µg/m <sup>3</sup>		-	-	50	30	50	-
TA Luft 86: Klasse II (Ni, As, Co, Se, Te)	mg/m <sup>3</sup>	1	-	-	-	-	-	-
TA Luft 86: Klasse III (Sb, Pb, Cr, CN, F, Cu, Mn, Pt, Pd, Rh, Sn, V)	mg/m <sup>3</sup>	5	-	-	-	-	-	-
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn	mg/m <sup>3</sup>		-	-	0,5	-	-	0,5
PCDD/PCDF	ng TE/m <sup>3</sup>		-	-	0,1	-	-	0,1

<sup>1)</sup> Tagesmittelwert;

<sup>2)</sup> Halbstundenmittelwert;

<sup>3)</sup> Stundenmittelwert;



# Kapitel 5

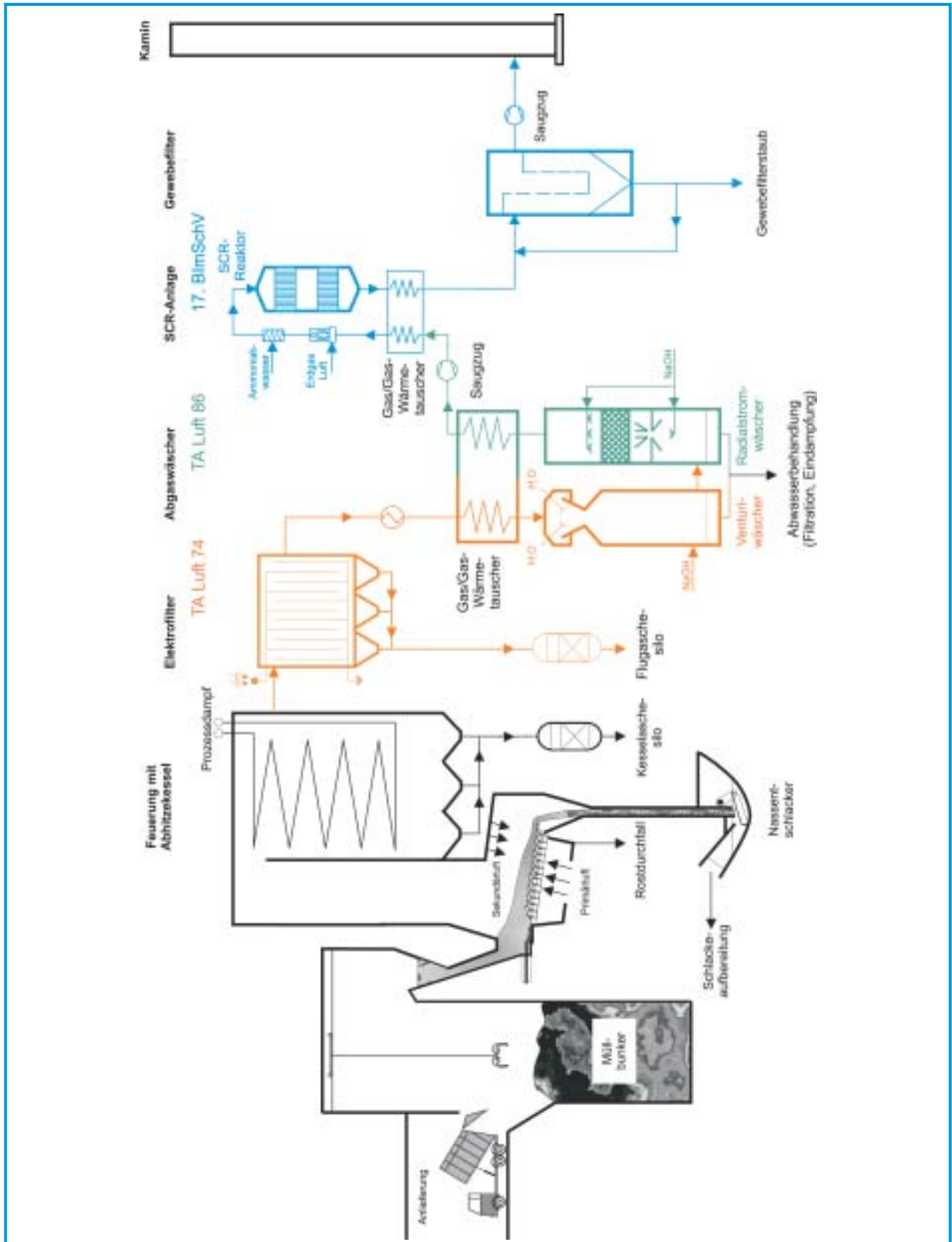


Abbildung 5: Abgasreinigung nach dem Stand der Technik (1974, 1986 und 1990).



**Tabelle 3:** Schadstoffgehalte im Roh- und Reingas von Müllverbrennungsanlagen im Vergleich mit den Grenzwerten der 17. BImSchV.

Komponente	Gehalt im Rohgas	Grenzwert 17. BImSchV	Jahresmittel 1999 AVA Augsburg
Chlorwasserstoff (HCl)	900 – 2.000 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>	2,7 mg/m <sup>3</sup>
Fluorwasserstoff (HF)	9 – 18 mg/m <sup>3</sup>	1 mg/m <sup>3</sup>	< 0,2 mg/m <sup>3</sup>
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	100 – 300 mg/m <sup>3</sup>	50 mg/m <sup>3</sup>	1,4 mg/m <sup>3</sup>
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	150 – 500 mg/m <sup>3</sup>	0,2 g/m <sup>3</sup>	0,07 g/m <sup>3</sup>
Staub	800 – 15.000 mg/m <sup>3</sup>	10 mg/m <sup>3</sup>	1,1 mg/m <sup>3</sup>
Dioxine/Furane	1 – 15 ng/m <sup>3</sup>	0,1 ng/m <sup>3</sup>	0,0033 ng/m <sup>3</sup>

henden Müllverbrennungsanlagen zum Teil erhebliche Um- und Nachrüstungen erforderlich. Für sie wurde deshalb eine Übergangsfrist bis spätestens zum 1. Dezember 1996 eingeräumt. Seit diesem Zeitpunkt erfüllen mit Ausnahme der Altanlagen Nürnberg und Neufahrn für Stickoxide (NO<sub>x</sub>) alle Anlagen in Bayern die strengen Vorgaben der 17. BImSchV. Neufahrn wurde Anfang 2000 aus dem Entsorgungsbetrieb genommen, die Altanlage Nürnberg wurde nach Inbetriebnahme der Ersatzanlage stillgelegt.

Die gestiegenen Anforderungen haben eine intensive technische Entwicklung insbesondere im Bereich der Abgasreinigung ausgelöst und das Know-how erheb-

lich erweitert. Aus den frühen Müllverbrennungsanlagen, damals von vielen als „Dioxin- und Dreckschleudern“ bezeichnet, sind heute High-Tech-Schadstoffsenken geworden.

Weitere Schwerpunkte bei der Abgasbehandlung lagen in der Minderung der Emissionen an Stickoxiden und polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/PCDF). Stickoxide lassen sich zu elementarem Stickstoff reduzieren, der gefahrlos abgegeben werden kann. Unsere Atmosphäre besteht ohnehin zu 80 Prozent daraus. Erstmals wurde auch ein Emissionsgrenzwert für PCDD/PCDF festgelegt. Dazu mussten zusätzliche Reinigungsverfahren eigens für diesen Zweck entwickelt werden.

Tabelle 3 gibt die Größenordnung der Schadstoffkonzentration einiger Stoffe wieder, die bei der Verbrennung von Abfällen entstehen.

Die Werte im Rohgas liegen deutlich über den Grenzwerten; die tatsächlich über den Kamin abgegebenen Emissionen liegen jedoch mit Abstand unter den Grenzwerten. Daran lässt sich erkennen, was eine Abgasreinigung wirklich zu leisten hat. ■



# Umwelteinwirkungen von Schadstoffen aus Müllverbrennungsanlagen (MVA)

Die Abgase werden nach der Reinigung über den Kamin abgegeben. Die dabei freigesetzten Stoffe werden Emissionen genannt. Die Einwirkungen der emittierten Schadstoffe auf Mensch und Umwelt sowie Gebäude nach ihrer Ausbreitung in der Luft nennt man Immissionen. Das Ausmaß der Immissionsbelastung hängt von der Konzentration der Stoffe am Messpunkt – z. B. eine Straßenkreuzung – und von der Dauer der Einwirkung ab.

Bei den üblichen Kaminhöhen werden die Schadstoffe durch die Ausbreitung in der Luft um das hunderttausend- bis fünfhunderttausendfache verdünnt, so dass ihre Konzentration am Boden, im Umfeld der MVA, äußerst gering bzw. kaum messbar sind.

Die eigentliche Frage ist: Wie groß ist die Belastung für die Umwelt auf Dauer, trotz niedriger Schadstoffkonzentrationen in den Abgasen? Diese Frage muss im Rahmen der Genehmigungsverfahren für Abfallverbrennungsanlagen beantwortet werden. Dabei werden zunächst Vorbelastungsmessungen durchgeführt. Diese geben die Belastung in der Umgebung der geplanten Anlage wieder, die bereits vorliegt. Zugleich wird eine Immissionsprognose erstellt, mit

der die langfristig zu erwartende Zusatzbelastung durch den Betrieb der Anlage ermittelt wird. Die sehr aufwändigen Berechnungen haben auch die meteorologische Situation am Standort zu berücksichtigen. Der „worst case“, also die ungünstigste Situation, ist zugrunde zu legen.

Tabelle 4 zeigt die Belastung (I1V) mit den die zu erwartenden Zusatzbelastungen (I1Z) verglichen werden. Die Werte sind

auf die entsprechenden Immissionswerte für Langzeiteinwirkung (IW1-Werte) nach TA Luft 86 bezogen, und zwar in Prozenten.

Es ist ersichtlich, dass die maximal gemessenen Vorbelastungswerte (I1V) alle deutlich unter den Immissionswerten (IW1) der TA Luft 86 liegen. Lediglich für NO<sub>2</sub> und Schwebstaub (SSt) liegen die Vorbelastungen bereits über 50 % der IW1-Werte. Die Zu-

**Tabelle 4:** Maximale Zusatzbelastung durch eine Müllverbrennungsanlage in Prozent zur TA Luft.

	Richtwert IW1 nach TA Luft	maximale Vorbelastung I1V	maximale Zusatzbelastung I1Z
SO <sub>2</sub>	100	21,4	0,05
NO <sub>2</sub>	100	75	0,18
CO	100	20	0,001
HCl	100	20	0,01
HF	100	16	0,13
SSt	100	53,3	0,01
Cd im SSt	100	3,4	0,16
Pb im SSt	100	13,5	0,03
StN	100	45,7	0,004
Cd im StN	100	20,6	0,27
Pb im StN	100	48	0,05



satzbelastungen (I1Z), die durch den Betrieb der Anlage erwartet werden, sind demgegenüber mit maximal 0,27 % des IW1-Wertes (Cadmium im Staubniederschlag) so gering, dass sie messtechnisch während des Betriebes der Anlage überhaupt nicht erfasst werden

können. Das Beispiel zeigt, dass moderne Abfallverbrennungsanlagen nur noch vernachlässigbar geringe Belastungen der Luft und Umgebung verursachen.

**Tabelle 5:** Auswirkungen der Emissionen einer Müllverbrennungsanlage nach 30 Jahren Betrieb auf den Boden der Umgebung.

	<b>Anhang 1 UVPVwV</b>	<b>mittlere Vorbelastung</b>	<b>maximale Zusatzbelastung</b>
Arsen	100	15	0,0005
Cadmium	100	8,67	0,1867
Chrom	100	8	0,0017
Kupfer	100	51,67	0,001417
Quecksilber	100	42	0,083
Nickel	100	14	0,00008
Blei	100	47	0,00667
Thallium	100	20	0,56
Zink	100	26,5	0,00298
PAK	100	0,1	0,001
BaP	100	0,7	0,000016

Dies lässt auch erkennen, welche langfristigen Auswirkungen der Betrieb einer nach dem Stand der Technik (gemäß 17. BImSchV) errichteten Anlage über den Luftpfad auf den Boden haben wird. Eine Modellabschätzung der Auswirkungen eines 30jährigen Anlagenbetriebes, bei dem die Emissionsgrenzwerte ausgeschöpft werden, zeigt Tabelle 5.

Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Betrachtung der Luftbelastung. Die Vorbelastung liegt unterhalb der Orientierungswerte gemäß den Vorschriften zur Umweltverträglichkeitsprüfung. Der Betrieb der Abfallverbrennungsanlage bringt in 30 Jahren eine Zusatzbelastung unterhalb von 1%, die kaum messbar ist. Die Orientierungswerte bleiben weit unterschritten. ■





# Gesundheitliche Beurteilung der Abfallverbrennung

Die Auswirkungen moderner Müllverbrennungsanlagen auf die Umgebung der Anlagen und auf die Gesundheit der im Umfeld solcher Anlagen lebenden Menschen sind nach Auffassung anerkannter Fachleute als äußerst gering bzw. als vernachlässigbar einzustufen. Neben namhaften Medizinern und Toxikologen veröffentlichte 1993 auch der wissenschaftliche Beirat der Bundesärztekammer nach eingehender Bewertung der Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen, die den Anforderungen der 17. BImSchV genügen, seine Erkenntnisse:

*„Die durchgeführte Beurteilung zeigt, dass durch den Betrieb von Müllverbrennungsanlagen, die dem Stand der Technik entsprechen, nur äußerst geringe und deshalb als vernachlässigbar einzustufende gesundheitliche Risiken für die im Umgebungsbereich solcher Anlagen lebende Bevölkerung zu erwarten sind.“*

Die Umweltrelevanz der anorganischen Gase aus Müllverbrennungsanlagen zeigt Tabelle 6. Ein Vergleich der zu erwartenden Immissionsbelastung mit den Immissionswerten (IW1) und anderen Grenzwerten (siehe auch Glossar: MAK, MIK, TRK) zeigt,

**dass die langfristige Zusatzbelastung weit weniger als ein Prozent der Grenzwerte beträgt.** Selbst in den weitgehend unbelasteten ländlichen Gebieten würde der Betrieb einer Müllverbrennungsanlage zu keiner messbaren Erhöhung der dort bestehenden Grundbelastung mit anorganischen Gasen führen. Auch wenn es zu kurzfristigen Belastungsspitzen kommt, liegen die Immissionen selbst bei ungünstigen Wetterbedingungen noch deutlich unter den geltenden Grenzwerten. Der Anteil der Müllverbrennung an der Gesamt-Immission anorganischer Gase ist so gering, dass diese Quellen auch nicht für die Zunahme von Pseudo-Krupp-Erkrankungen oder allergischen Reaktionen verantwortlich sind. Hier muss nach anderen Ursachen gesucht werden.

Die Metallverbindungen im Abgas sind überwiegend an die Staubpartikel gebunden. Sie können daher mit einer wirkungsvollen Entstaubung, wie sie in modernen Anlagen installiert ist, weitgehend abgeschieden werden. Die verbleibende Belastung liegt danach weit unterhalb der Hintergrundbelastung ländlicher Gebiete. Quecksilber ist dabei ein problematisches Element, weil es aufgrund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften leicht flüchtig ist. Seine Rückhaltung in der Abgasreinigung er-

fordert besondere Aufmerksamkeit; aber auch Quecksilber wird wirkungsvoll entfernt, wie Tabelle 7 zeigt.

Der wissenschaftliche Beirat hat sich ebenso mit den Emissionen organischer Verbindungen befasst.

### Dabei handelt es sich um:

- polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH oder PAK)
- Benzol, chlorierte Benzole und Phenole, polychlorierte Biphenyle (PCB)
- polychlorierte Dibenzodioxine und polychlorierte Dibenzofurane (PCDD/PCDF)

Danach würde für alle diese Verbindungen selbst in ländlichen Gebieten keine messbare Erhöhung der Grundbelastung durch den Betrieb einer Müllverbrennungsanlage resultieren. Die Zusatzbelastung wäre unbedeutend. Dies liegt daran, dass die Hauptbelastung mit diesen Stoffen, vor allem mit PCDD/PCDF, überwiegend aus der Nahrungsaufnahme stammt.

Auch hier gilt: es sollten die tatsächlichen Belastungsquellen identifiziert und verschlossen werden. ■



**Table 6:** Emissionen anorganischer Gase aus der Müllverbrennung gemäß der 17. BImSchV (Tagesmittelwerte) – Vergleich der daraus resultierenden Immissionskonzentrationen mit weiteren Grenzwerten und der Vorbelastung.

	Einheit	CO	SO <sub>2</sub>	HCl	HF	NO <sub>x</sub>
maximale Konzentration im Abgas nach 17. BImSchV	mg/m <sup>3</sup>	50	50	10	1	200
Immissionskonzentration (Verdünnungsfaktor 1:500.000)	ng/m <sup>3</sup>	100	100	20	2	400
Immissionswert (IW1) TA Luft	ng/m <sup>3</sup>	10.000.000	140.000	100.000	1.000	80.000
MIK-Werte (1/2 h)	ng/m <sup>3</sup>	1.000.000	-	-	-	200.000
MAK-Wert bzw. TRK, dividiert durch Faktor 100	ng/m <sup>3</sup>	330.000	50.000	70.000	20.000	90.000
Konzentration in ländlichen Gebieten	ng/m <sup>3</sup>	20.000	10.000	-	-	10.000
Konzentration in Ballungsgebieten	ng/m <sup>3</sup>	2.500.000	70.000	60.000	500	60.000
Immissionsgrenzwerte für Pflanzen	ng/m <sup>3</sup>	-	50.000	30.000	300	100.000

**Table 7:** Metall-Emissionen entsprechend den Grenzwerten der 17. BImSchV – Vergleich der daraus resultierenden Immissionskonzentrationen mit weiteren Grenzwerten und der Vorbelastung.

	Einheit	Pb <sup>2)</sup>	Cd <sup>1)</sup>	Cr <sup>2)</sup>	Cu <sup>2)</sup>	Ni <sup>2)</sup>	As <sup>2)</sup>	Hg
maximale Konzentration im Abgas nach 17. BImSchV	mg/m <sup>3</sup>	0,5	0,05	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05
Immissionskonzentration (Verdünnungsfaktor 1:500.000)	ng/m <sup>3</sup>	1	0,1	1	1	1	1	0,1
MAK-Wert bzw. TRK, dividiert durch Faktor 100	ng/m <sup>3</sup>	1.000	-	1.000 <sup>3)</sup>	1.000	5.000	-	1.000
Konzentration in ländlichen Gebieten	ng/m <sup>3</sup>	100	0,8	5	30	5	5	1
Konzentration in Ballungsgebieten	ng/m <sup>3</sup>	-	10	-	-	-	30	12

<sup>1)</sup> als Summenwert (Cd, Tl);

<sup>2)</sup> als Summenwert (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn);

<sup>3)</sup> MAK-Wert für Chromtrioxid;



# Anforderungen an die Genehmigung einer MVA

Müllverbrennungsanlagen benötigen eine Genehmigung nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Dieses gilt für alle Anlagen, die „aufgrund ihrer Beschaffenheit oder ihres Betriebes in besonderem Maße geeignet sind, schädliche Umwelteinwirkungen oder Nachteile für die Nachbarschaft oder Allgemeinheit hervorzurufen“ (§ 4 BImSchG).

Die vierte Verordnung zur Durchführung des BImSchG (4. BImSchV) regelt in ihrem Anhang, welche Anlagen unter diese Bestimmungen fallen. Das Spektrum reicht von Brauereien bis hin zu Chemieanlagen.

Die Verordnung schreibt vor, diese Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass:

1. schädliche Umweltauswirkungen und sonstige Benachteiligungen nicht hervorgerufen werden können,
2. im Vorfeld bereits Vorsorge gegen schädliche Umwelteinflüsse getroffen wird,
3. dort Abfälle so weit wie möglich vermieden und verwertet sowie, falls nicht möglich, umweltverträglich beseitigt werden,
4. die bei der Verbrennung entstehende Wärme genutzt wird.

Um diese Ziele sicherzustellen, werden aus verschiedenen Bereichen Anforderungen für die

Errichtung und den ordnungsgemäßen Betrieb festgelegt. Umgang und Ablauf des Genehmigungsverfahrens sind in der 9. BImSchV geregelt und sehen die Beteiligung der Fachbehörden und Gutachter zu Fragen der Luftreinhaltung, des Lärmschutzes, der Anlagensicherheit, des Gewässerschutzes, des Arbeitsschutzes, des Brandschutzes vor. Sie legen nach Prüfung der Unterlagen fest, welche Anforderungen und Auflagen zu stellen sind, um die genannten Vorgaben zu erfüllen.

Auch nach Inbetriebnahme der Anlagen werden die Auflagen von Fachbehörden, z. B. dem Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU) oder dem örtlich zuständigen Gewerbeaufsichtsamt, weiterhin überwacht. ■



# Aufbau und Funktionsweise einer modernen MVA

**Aufgabe einer Müllverbrennungsanlage ist:**

Alle organischen Bestandteile im Restmüll möglichst vollständig zu Kohlendioxid und Wasser umzusetzen, die mineralischen, nicht brennbaren Bestandteile zu inertisieren und zu hygienisieren und dabei die Anforderungen des Immissionsschutzes einzuhalten.

Der prinzipielle Aufbau einer modernen Müllverbrennungsanlage ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die wesentlichen Funktionseinheiten sind:

- Müllaufgabe und Müllbunker
- Verbrennungsrost, Feuerraum
- Schlackeaustrag
- Dampferzeugung und Kessel

- Abgasreinigungsanlage
- Kamin mit Emissionskontrolle

Der angelieferte Müll wird zunächst im Müllbunker eingelagert. Dort wird er mit Hilfe von Kränen vermischt und homogenisiert, um so die Beschickung des Verbrennungsrosts weitgehend zu vergleichmäßigen. Über den Einfüllschacht und spezielle Beschickungsaggregate wird der Müll auf den Rost aufgegeben.

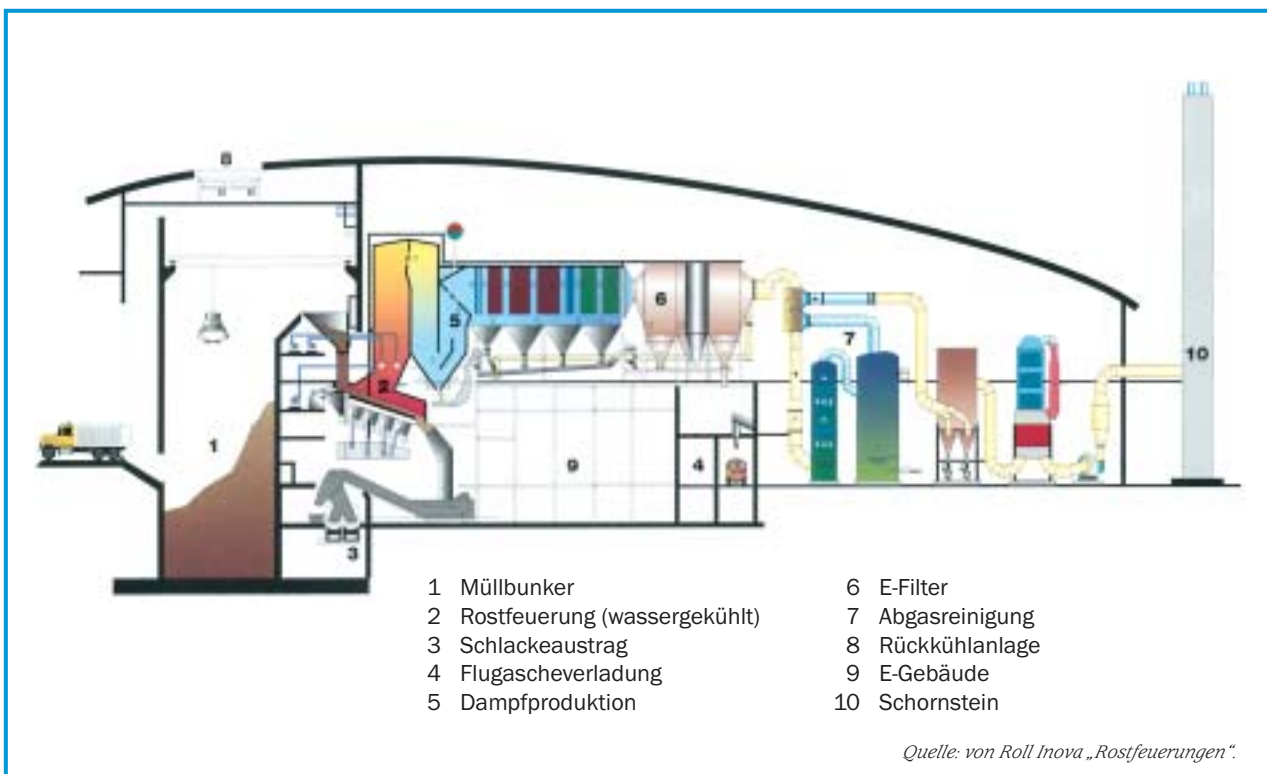


Abbildung 6: Schema einer modernen MVA mit ihren Funktionseinheiten.



Die Schritte der Verbrennung auf dem Rost lassen sich unterteilen in:

- Trocknung und Entgasung des Mülls
- Vergasung und Verbrennung der aus dem Müll ausgetriebenen flüchtigen Bestandteile
- Verbrennung der organischen Reste in der festen Phase
- Bildung der Verbrennungsschlacke.

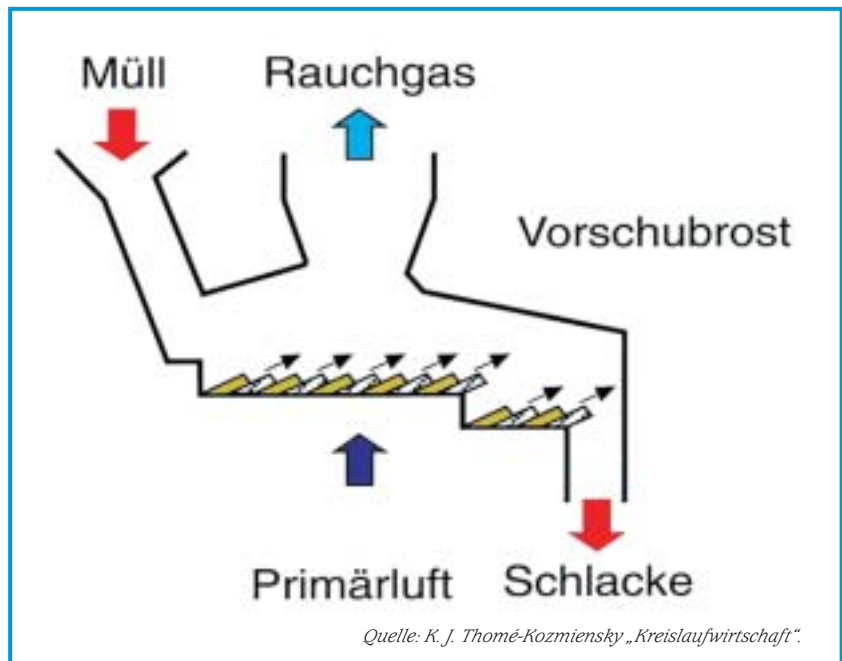
Der Rost hat die Funktion, das Verbrennungsgut durch die verschiedenen Zonen des Verbrennungsprozesses bis zum Schlackeaustrag zu transportieren (Abbildung 7, 8 und 9).

Er sorgt auch für die Durchmischung des Abfalls und für die geregelte Luftzufuhr (sogenannte Primärluft, auch „Unterwind“ genannt). Insgesamt bleibt der Müll etwa eine Stunde lang auf dem Rost, bis all diese Prozesse abgeschlossen sind.

Das klingt zwar einfach, erfordert aber gut durchdachte technische Lösungen.

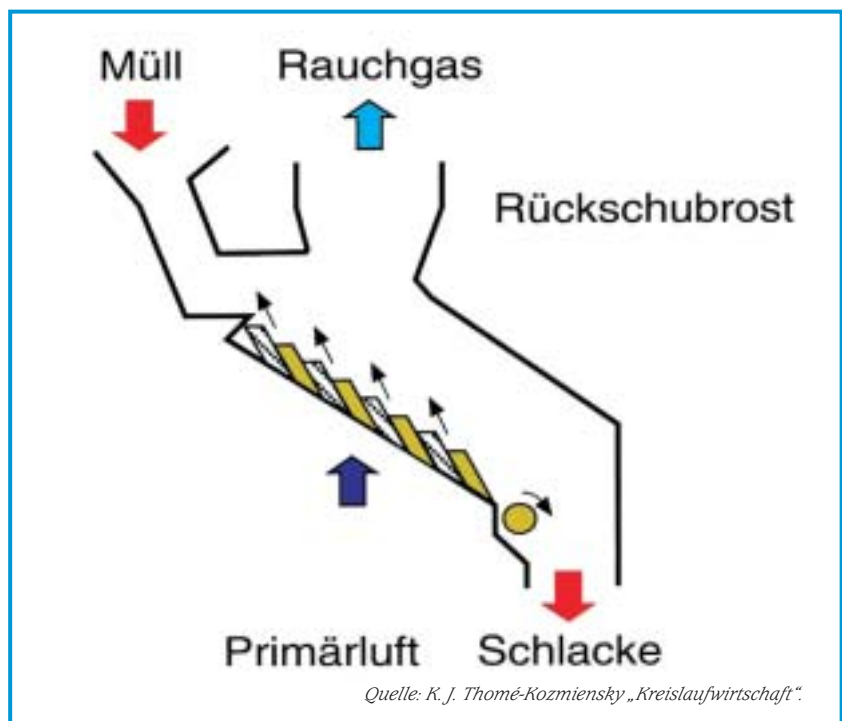
Im Feuerraum über dem Rost werden die gasförmigen Bestandteile und die Stäube unter Zugabe weiterer Verbrennungsluft, der sogenannten Sekundärluft ausgebrannt. Die 17. BImSchV schreibt vor, dass die Temperatur dabei nicht unter 850 °C liegen darf. Die Verweilzeit der Abgase muss bei dieser Temperatur mindestens zwei Sekunden betragen, um einen möglichst vollständigen Ausbrand sicherzustellen.

Bei diesem Prozess wird Energie erzeugt. Diese kann als Prozessdampf, als Fernwärme oder zur Stromerzeugung ge-



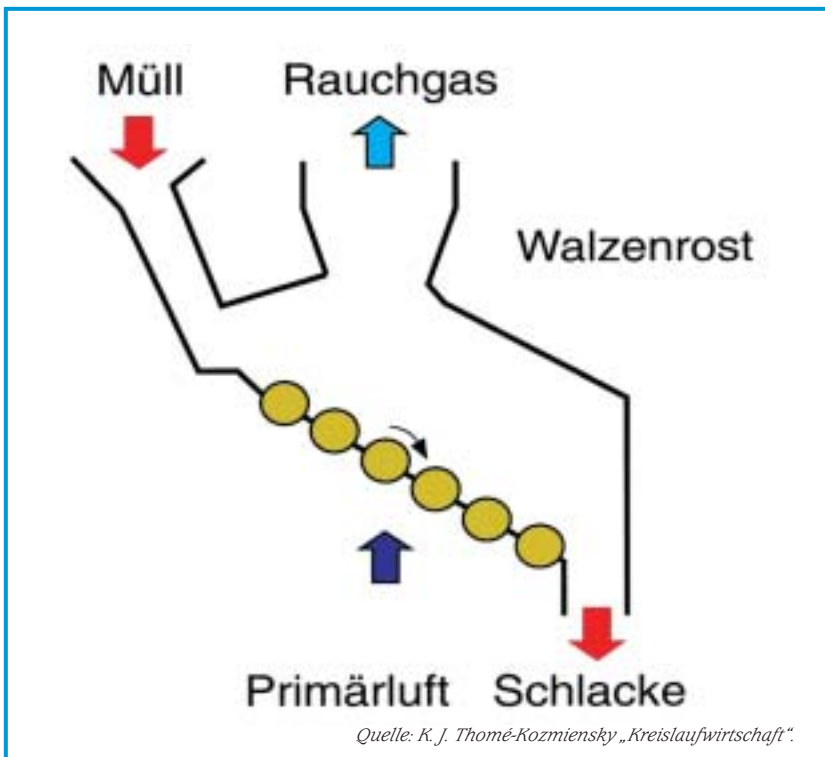
Quelle: K. J. Thomé-Kozmiensky „Kreislaufwirtschaft“.

**Abbildung 7:** Schema eines Vorschubrostes, horizontal oder geneigt, bei dem der Abfall durch Hubbewegungen beweglicher Roststäbe in Richtung Schlackeaustrag geschoben wird.



Quelle: K. J. Thomé-Kozmiensky „Kreislaufwirtschaft“.

**Abbildung 8:** Rückschubrost (geneigt) – hier rutscht das Verbrennungsgut aufgrund der Schwerkraft zum Austrag hin. Die Roststäbe bewegen sich entgegengesetzt und transportieren so bereits brennendes Material in den frischen Müll zurück und sorgen so für eine gute Durchmischung und Verbrennung.



**Abbildung 9:** Walzenrost, bei dem der Abfall durch nacheinander angeordnete Walzen durch den Verbrennungsraum transportiert wird.

nutzt werden. Die Verbrennungsschlacke wird in einem Entschlacker abgekühlt und ausgelesen. Sie kann unter gewissen Randbedingungen z. B. als Baustoff verwertet werden. ■



## Methoden der Abgasreinigung

Bei der Verbrennung entstehen Stoffe, die überwiegend von den Feuerungsbedingungen abhängen (z. B. Kohlenmonoxid, Stickoxide und organische Gase; siehe Glossar). Andere Stoffe stammen aus dem Verbrennungsgut selbst und gehen bei der Verbrennung in die Gasphase über. Sie werden durch die Filtersysteme zurückgehalten.

Grundsätzlich gibt es physikalische und chemische Methoden,

Abgase zu reinigen. Abbildung 10 gibt ein Übersicht der Verfahren.

### 10.1 Abscheidung von Staub

Die Anforderungen an die Abscheidung von Staub im Abgas sind durch die Vorgaben der 17. BImSchV sehr anspruchsvoll geworden. Um sie einzuhalten, werden unterschiedliche Techniken – zum Teil in Kombination – eingesetzt.

### Zyklone

Zyklone sind einfach, robust und werden hauptsächlich zur Vorentstaubung von Gasen mit hohen Staubbelastungen eingesetzt (siehe Abbildung 11). Es können auch mehrere von ihnen parallel geschaltet werden, die dann konsequenterweise als „Multizyklone“ bezeichnet werden.

Das zu reinigende Abgas gelangt über einen Eintrittskanal in

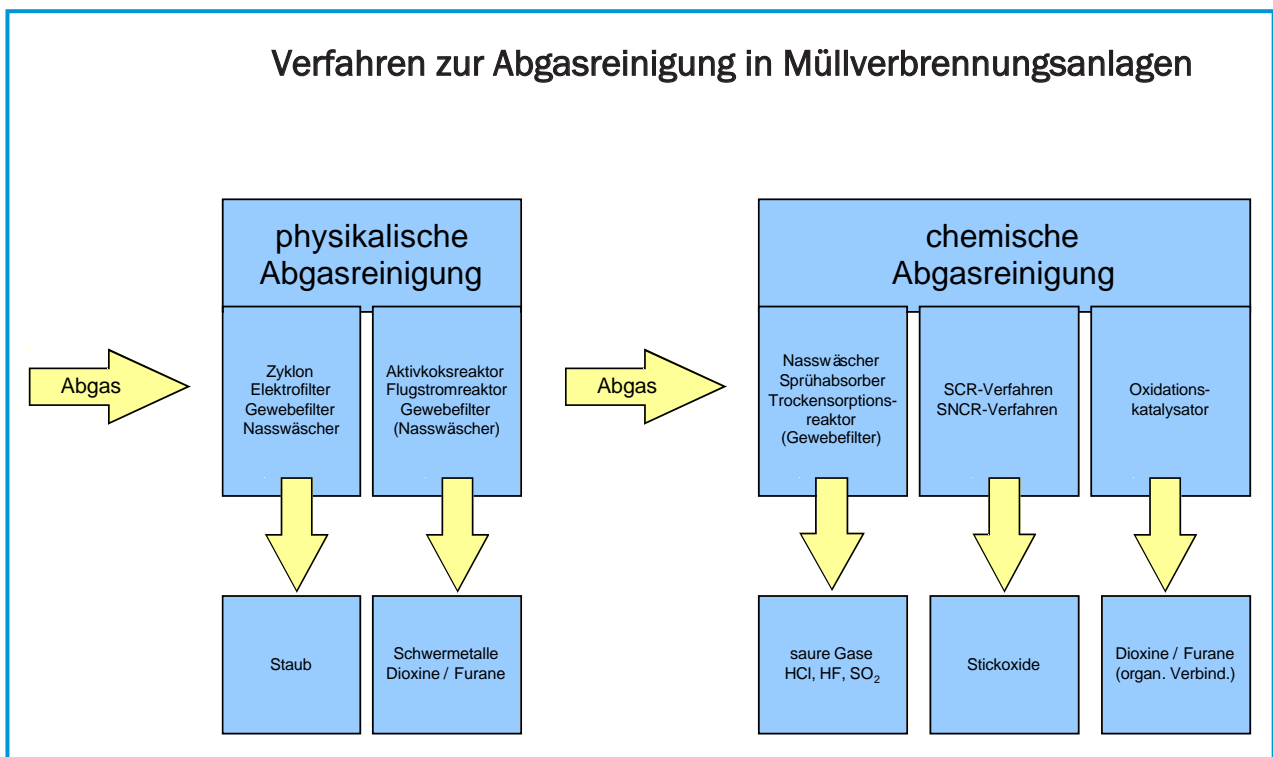
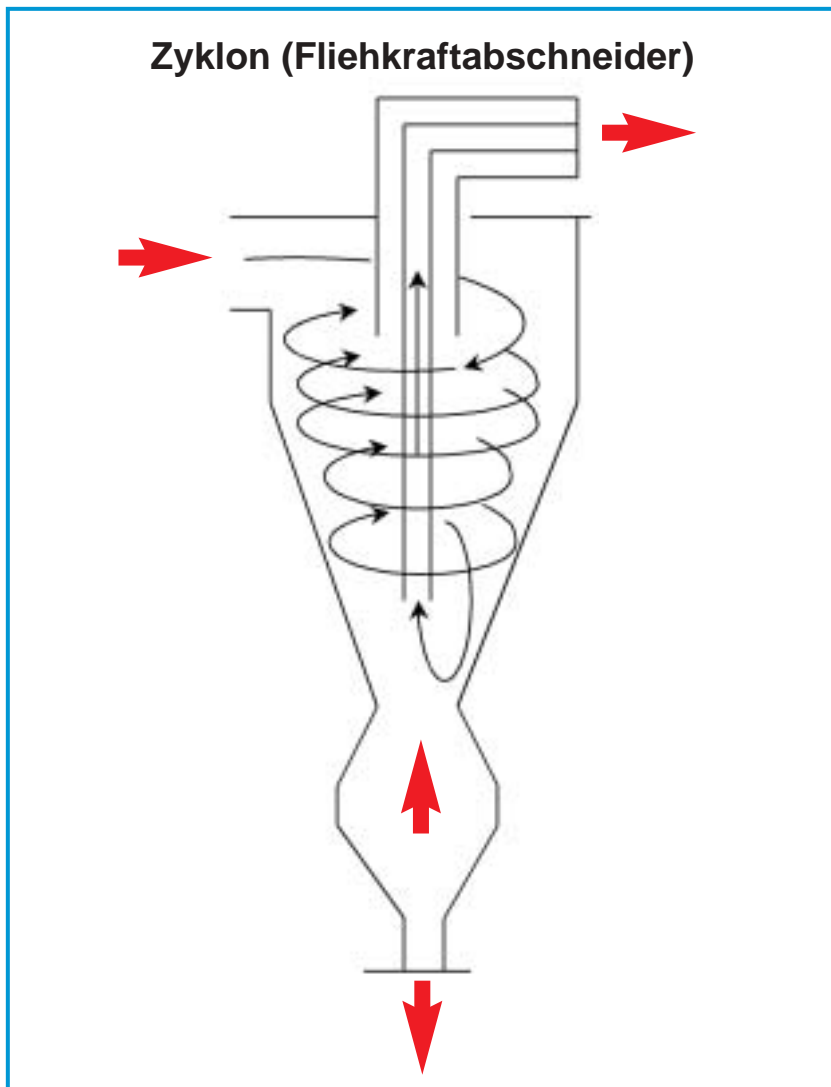


Abbildung 10: Übersicht chemischer und physikalischer Verfahren zur Abgasreinigung.



**Abbildung 11:** Zyklon – Schematische Darstellung und Funktionsweise.

das konische Entstauberrohr. Dabei entsteht eine spiralförmige Drehbewegung, durch welche die Staubteilchen aufgrund der Zentrifugalkraft an die Behälterwand geschleudert werden. Von dort rieseln sie herab und werden abgezogen. Das gereinigte Abgas verlässt den Zyklon über ein Tauchrohr nach oben.

*Elektrofilter*

Das Funktionsprinzip von Elektrofiltern beruht darauf, dass

in einem Gleichspannungsfeld mit einer sogenannten Sprüh-elektrode hohe Feldstärken erzeugt werden. Sie bewirken die Ionisation von Gasmolekülen, die sich an die Partikel im Abgas anlagern und diese aufladen. Die negativ geladenen Staubteilchen wandern zur positiv geladenen Niederschlagselektrode und bilden hier eine Staubschicht, die periodisch entfernt wird. Dieses Prinzip gilt auch für sehr kleine Staubteilchen und auch bei vergleichsweise hohen Temperatu-

ren. Mit Elektrofiltern lassen sich deshalb hohe Abscheidegrade erzielen.

Zur Verbesserung der Abscheideleistung sind moderne Elektrofilter in mehrere Zonen aufgeteilt. So können die jeweiligen Betriebsspannungen entsprechend den abnehmenden Staubkonzentrationen in den einzelnen Feldern optimiert werden. Mit diesen Filtern können die Staubkonzentrationen auf 10 – 50 Milligramm pro Kubikmeter Luft gesenkt werden. Mit modernen Elektrofiltern lassen sich daher selbst die strengen Staubgrenzwerte der 17. BImSchV einhalten.

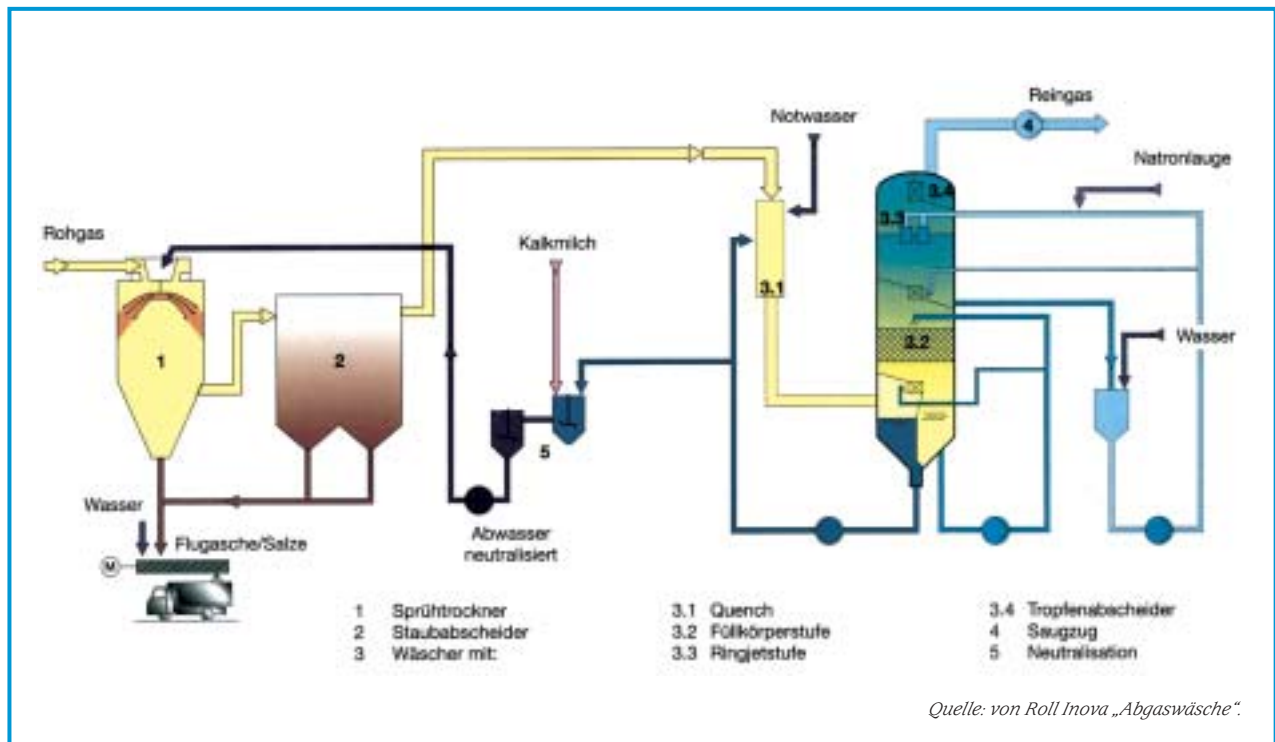
*Gewebefilter*

Gewebefilter kennen wir aus dem Staubsauger. Sie funktionieren nach dem Prinzip des Oberflächenfilters. Mit zunehmender Staubablagerung wirkt die Staubschicht selbst wie ein zusätzlicher Filter (Filterhilfschicht), der auch sehr feine Partikel zurückhält (Tiefenfiltration). Je mehr Staub sich dort ablagert, desto größer wird der Widerstand (Druckverlust) für das Abgas auf dem Weg durch den Filter. Wird ein bestimmter Druckverlust erreicht, wird der Gewebefilter mit einem Druckluftimpuls abgereinigt und der abfallende Staub gesammelt. Es werden sehr niedrige Staubgehalte im Reingas erreicht, die im Bereich von 1 – 10 Milligramm pro Kubikmeter liegen.

**10.2 Abtrennung der sauren Abgasbestandteile**

Eine weitere wichtige Gruppe von Abgasinhaltsstoffen sind die sauren Gase. Dazu gehören Chlor-





**Abbildung 12:** Abwasserfreier Nasswäscher.

wasserstoff (HCl), Fluorwasserstoff (HF) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>). Diese Gase bilden Säuren, sobald sie mit Wasser in Berührung kommen, also Salzsäure, Fluorwasserstoff und Schweflige Säure. Auch diese Gase lassen sich mit physikalischen und chemischen Verfahren abscheiden.

### Nasswäscher

Zu den klassischen Techniken gehört der Nasswäscher. Die wasserlöslichen Gase werden im Washwasser gelöst und auf diese Weise dem Abgas entzogen. Das Washwasser kann dann gesondert behandelt werden. In einigen Fällen werden die Säuren in technisch reiner Form zurückgewonnen und stellen Wertstoffe dar. Wird dem Washwasser Natronlauge zugesetzt, entstehen durch Neutralisation die Natriumsalze der Säuren; eine höhere Abscheiderate wird erzielt. Die

Salze (überwiegend Kochsalz) können verwertet werden.

Moderne Wäscher in Müllverbrennungsanlagen werden mehrstufig betrieben, damit bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen der Stufen die verschiedenen Abgasinhaltsstoffe jeweils optimal getrennt und abgeschieden werden können. So wird grundsätzlich eine Verwertung der Reinigungs-Rückstände möglich.

Die erste Stufe dient der Abkühlung des Abgases auf die Arbeitstemperatur und wird „Quenchstufe“ genannt, (nach engl. *quench* = löschen, dämpfen). In diesem Wäscher wird gewöhnlich Wasser als Absorptionsmedium verwendet. Saure und basische Stufen bilden weitere Einheiten. Als Bauformen sind Sprüh Türme oder auch Kolonnen mit verschiedenen Einbauten (Füllkörper, gelochte Böden) in

Gebrauch. Wird die Abluft durch den Wäscher geleitet, werden feine Tröpfchen der Washflüssigkeit mitgerissen. Deshalb wird in der Regel ein Tropfenabscheider nachgeschaltet. Die entstehenden Washwässer werden dann in einem mehrstufigen Prozess durch Neutralisation, Fällung oder Eindampfung behandelt. Nasswäscher werden heute überwiegend abwasserfrei betrieben. Zur Eindampfung ist jedoch ein erheblicher zusätzlicher Energieaufwand erforderlich. In Abbildung 12 ist schematisch eine mehrstufige Nasswäsche zur abwasserfreien Fahrweise des Wäschers dargestellt.

Die Mehrstufigkeit des Verfahrens und die schnelle Löslichkeit der Gase in Wasser führen zu einer ausgezeichneten Nutzung der Washflüssigkeit mit einem hohen Wirkungsgrad. Auch die im Abgas enthaltenen



Staubreste werden dabei weitgehend entfernt. Deshalb werden mit dieser Technik die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV für saure Gase deutlich unterschritten.

### 10.3 Quasitrocken- und Trockenverfahren

Die Quasitrocken- und Trockenadditivverfahren, wie sie auch zur Entschwefelung in Großkraftwerken eingesetzt werden, beruhen hauptsächlich auf dem Einsatz von Kalkhydrat (Calciumhydroxid). Dabei entsteht als Reaktionsprodukt der Abgasreinigung ein Gemisch aus Calciumchlorid, Calciumfluorid, Calciumsulfat und nicht umgesetztem Kalkhydrat.

Beim sogenannten „quasitrockenen Verfahren“ wird das Absorptionsmittel als Suspension in den Abgasstrom eingedüst. Die Produkte der Reaktion und das überschüssige Calciumhydroxid fallen als Feststoffe an, da das Wasser längs seines Reaktionsweges verdampft. Die Reaktion läuft in Sprühabsorbern mit Rotationszerstäubern ab. Dabei wird Kalksuspension über ein schnell rotierendes Zerstäubungsrad in fein verteilter Form in das Rauchgas eingesprüht. Die Neutralisation der sauren Abgasbestandteile findet im Gasstrom statt. Das Reaktionsprodukt ist fest und kann z. T. bereits im unteren Teil des Absorbers abgezogen werden. Der Rest wird in nachgeschalteten Gewebefiltern zurückgehalten. In der sich bildenden Filterhilfschicht können die Bestandteile weiter ausreagieren. Um den eingesetzten Kalk besser auszunutzen und entstehende Abfälle zu vermindern, wird ein Teil der

Reaktionsprodukte in den Prozess zurückgeführt.

Trockene Verfahren kommen, wie der Name sagt, ohne Wasser aus. Hochreaktiver Kalk wird als Pulver in den Reaktor eingeblasen. Wie beim quasitrockenen Verfahren wird ein Teil der Reaktionsprodukte bereits im Reaktor abgeschieden (Vorentstaubung). Je nach Bauform ist der untere Teil des Reaktors konisch geformt und wirkt wie ein Zyklon. Im nachgeschalteten Gewebefilter werden die restlichen Reaktionsprodukte abgeschieden; auch hier findet in der Filterschicht eine Nachreaktion statt. Wie beim Quasi-Trockenverfahren wird auch hier ein Teil der Reaktionsprodukte rezirkuliert.

Eine Mischform beider Verfahren wird als „konditioniertes Trockenverfahren“ bezeichnet. Hier wird durch Wassereindüsung vor der Zugabe des Kalkes der Feuchtegehalt des Abgases erhöht und zugleich die Temperatur des Gases abgesenkt. Die Abscheideleistung des Verfahrens wird dadurch deutlich verbessert.

Der große Vorteil der trockenen und quasitrockenen Verfahren ist, dass es sich um robuste und betriebssichere Systeme handelt. Zugleich fallen bei diesen Verfahren keine Abwässer an. Außerdem können gleichzeitig die Entstaubung und Abscheidung saurer Gase bei relativ niedrigen Investitions- und Betriebskosten und geringerem Platzbedarf durchgeführt werden. Verglichen mit den Nassverfahren sind die Rückstandsmengen jedoch größer, da ein Teil des Kalkhydrats nicht umgesetzt wird und in den Rückständen verbleibt.

Die abgeschiedenen Filterstäube und Reaktionsprodukte können im sogenannten Bergversatz unter Tage verwertet werden.

### 10.4 Reduktion von Stickoxiden – „Entstickung“

Auch mit optimierten Verbrennungstechniken (Primärmaßnahmen) können in der Regel die  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte der 17. BImSchV nicht eingehalten werden. Daher ist man auf Sekundärmaßnahmen angewiesen. Vorteilhaft: Die ursprünglich im Kraftwerksbereich entwickelten Verfahren lassen sich auch in Müllverbrennungsanlagen einsetzen. Grundlage dieser Verfahren ist die Reduktion der Stickoxide (Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid) durch Zugabe von Ammoniak oder Harnstoff in wässriger Lösung. Chemisch gesehen wird Ammoniak oder Harnstoff oxidiert und die Stickoxide dabei reduziert. Gemeinsame Reaktionsprodukte sind harmloser molekularer Stickstoff und Wasser. Für diese selektive Reaktion wurden Verfahren mit und ohne Katalysator entwickelt.

#### *Selektive katalytische Reduktion (SCR)*

Katalysatoren sind Materialien, mit denen die Geschwindigkeit einer chemischen Reaktion beachtlich beschleunigt werden kann, die sich dabei aber nicht verändern. Katalysatoren werden beispielsweise zur Abgasreinigung bei Automobilen eingesetzt (Drei-Wege-Katalysator).

Beim SCR-Verfahren bestehen die Katalysatoren aus Titandioxid als Trägermaterial und anderen Metalloxiden (z. B. von Molybdän

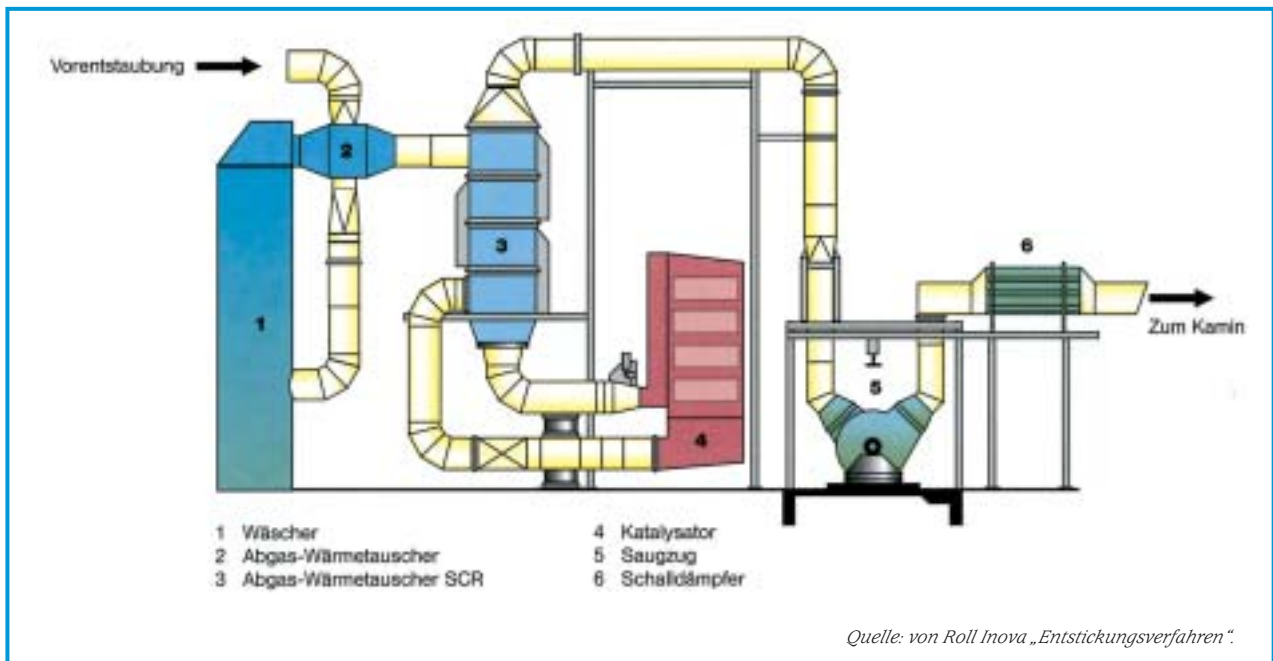


Abbildung 13: Katalytische Entstickung.

und Wolfram) als aktive Komponenten. Der Katalysator ist dabei in mehreren Lagen zu sogenannten Modulen zusammengefasst. Verschmutzungen durch Schwermetalle können seine Aktivität beeinträchtigen. Sie müssen aus dem Abgas vor Eintritt in den Katalysator weitgehend entfernt werden. Damit dies gelingt, sind die SCR-Anlagen in der Regel in einer „Low-Dust-Schaltung“ konfiguriert. Das bedeutet: alle Entstaubungseinrichtungen liegen vor dem Katalysator (Reingaschaltung). Die Betriebstemperatur liegt bei etwa 250 bis 300 °C.

Das Ammoniakwasser wird verdampft und mit den Abgasen intensiv vermischt, bevor die Reaktion an der Katalysatoroberfläche abläuft. Mit dem SCR-Verfahren sind hohe Reduktionsgrade bei gleichzeitig geringem Ammoniakverlust, d. h. Ammoniakrestgehalt im Abgas, realisierbar. Die  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte der

17. BImSchV können sicher eingehalten werden. Billig ist dieses Verfahren allerdings nicht, denn es erfordert erhebliche Investitionen. Außerdem müssen die Abgase vor dem Eintritt in den Katalysator aufgeheizt werden, um die erforderliche Betriebstemperatur zu erreichen.

Eine schematische Darstellung des Verfahrens ist in Abbildung 13 gegeben.

### Selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR)

Bei diesem Verfahren wird Ammoniak bzw. Ammoniakwasser oder auch eine Harnstofflösung in den Feuerraum eingedüst. Dies geschieht in einem Bereich mit Abgastemperaturen von 900 bis 1000 °C (Temperaturfenster). Liegt die Temperatur darunter, ist die Umsetzungsgeschwindigkeit geringer. Das führt zu einer ungenügenden Entstickung und zu einem relativ hohen „Ammoniak-

Schlupf“. Liegen die Temperaturen darüber, wird ein Teil des Ammoniaks in Stickstoffmonoxid umgesetzt. Das „Temperaturfenster“ ist deshalb sicher einzuhalten. Der Ammoniak-Verbrauch liegt höher als beim SCR-Verfahren, auch sind die Umsetzungsgrade geringer. Vorteilhaft sind die deutlich niedrigeren Investitionskosten und die Tatsache, dass bestehende Anlagen mit dieser vergleichsweise einfachen Technik leichter nachgerüstet werden können.

### 10.5 Abscheidung von Schwermetallen und Dioxinen/Furanen

Schwermetalle und polychlorierte Dioxine und Furane (PCDD/PCDF) sind zwar nur in sehr geringen Konzentrationen im Rohgas enthalten, aber aufgrund ihrer Toxizität so weit wie möglich aus dem Abgas zu ent-

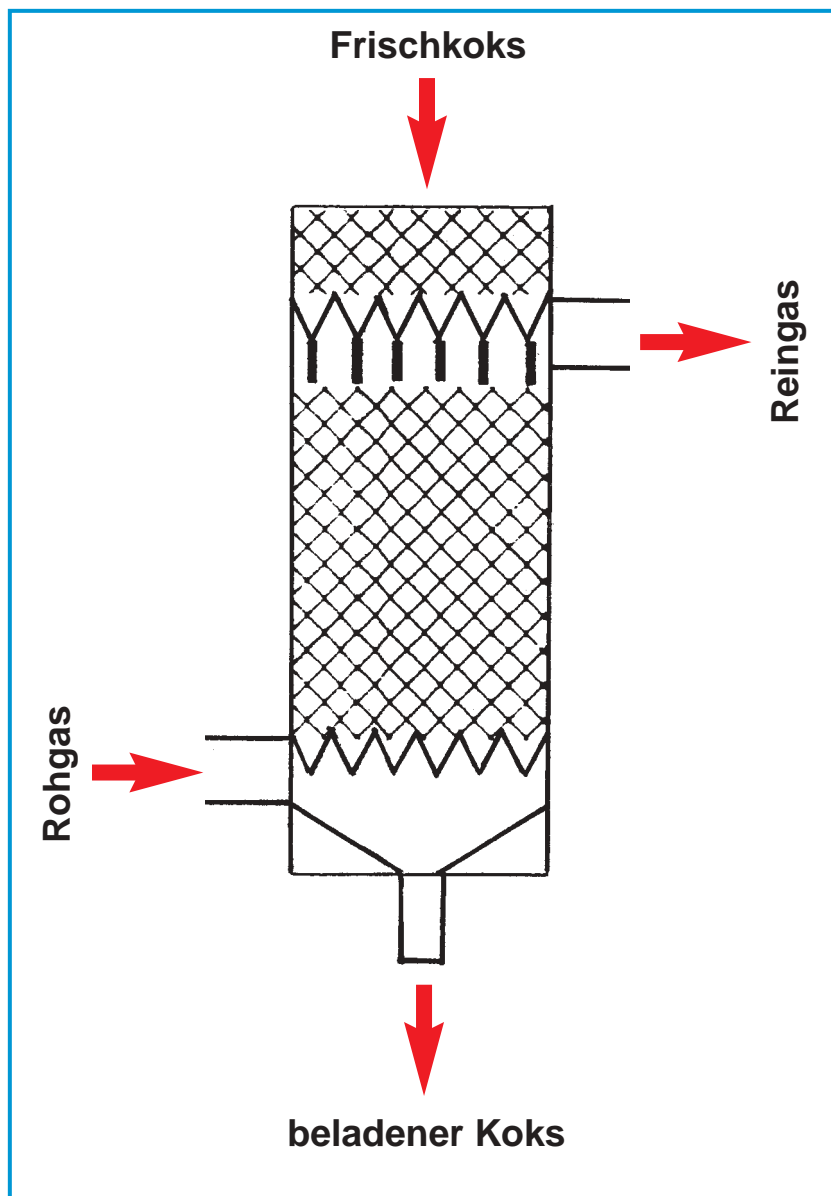


Abbildung 14: HOK-Wanderbettreaktoren.

fernen. Hierzu wurden spezielle Reinigungsverfahren entwickelt bzw. bestehende Verfahren modifiziert.

In den schon beschriebenen Verfahrensschritten wird bereits ein Teil der Schwermetalle und polychlorierten Dioxine und Furane aus dem Abgas entfernt. Die Anforderungen der 17. BImSchV werden dabei jedoch noch nicht

erfüllt. Daher sind zusätzliche Maßnahmen zur „Feinreinigung“ erforderlich.

Unter den Schwermetallen ist es vor allem das leicht flüchtige Quecksilber und seine Verbindungen, die weitergehende Reinigungsverfahren erfordern, während die übrigen Schwermetalle und ihre Verbindungen im wesentlichen durch eine ef-

fektive Entstaubung in ausreichendem Umfang entfernt werden können. Vorteilhaft ist, dass zur Verminderung sowohl der Dioxin/Furan- als auch der Quecksilber-Konzentrationen die gleichen Verfahren verwendet werden können. Aktivkohle- und Aktivkoksverfahren werden eingesetzt. Mit ihnen lassen sich aufgrund der großen Oberfläche und Adsorptionskraft dieser Kohlen noch Spuren aus dem Abgas entfernen. Als verfahrenstechnische Lösungen haben sich das „Wanderbettverfahren“, recht plastisch auch als „Kokskisten“ bezeichnet, und das „Flugstromverfahren“ in der Praxis bewährt.

#### Wanderbettverfahren

„Wanderbetten“ werden Reaktoren genannt, in denen die Abgase eine Aktivkoksschüttung durchströmen. Dabei werden Schwermetalle, Dioxine und Furane und auch weiterer Reststaub an der Koks Oberfläche adsorbiert. Dies gilt auch für die sauren Bestandteile.

Wanderbetten wurden ursprünglich für die Abgasreinigung von Kraftwerken entwickelt. Sie funktionieren als Gegenstrom- oder Kreuzstrom-Reaktoren. Die Strömungsrichtungen von Gas und Koks sind Abbildung 14 für einen Kreuzstromreaktor zu entnehmen. Da Aktivkohle teuer ist, wird der billigere Herdofenkoks (HOK) bevorzugt. Er wird in einem speziellen Verfahren aus Braunkohle hergestellt.

Mit Wanderbettreaktoren ist die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte für Schwermetalle und Dioxine/Furane sicher möglich. Allerdings sind die Investitionskosten hoch. Zugleich werden im laufenden Betrieb gro-

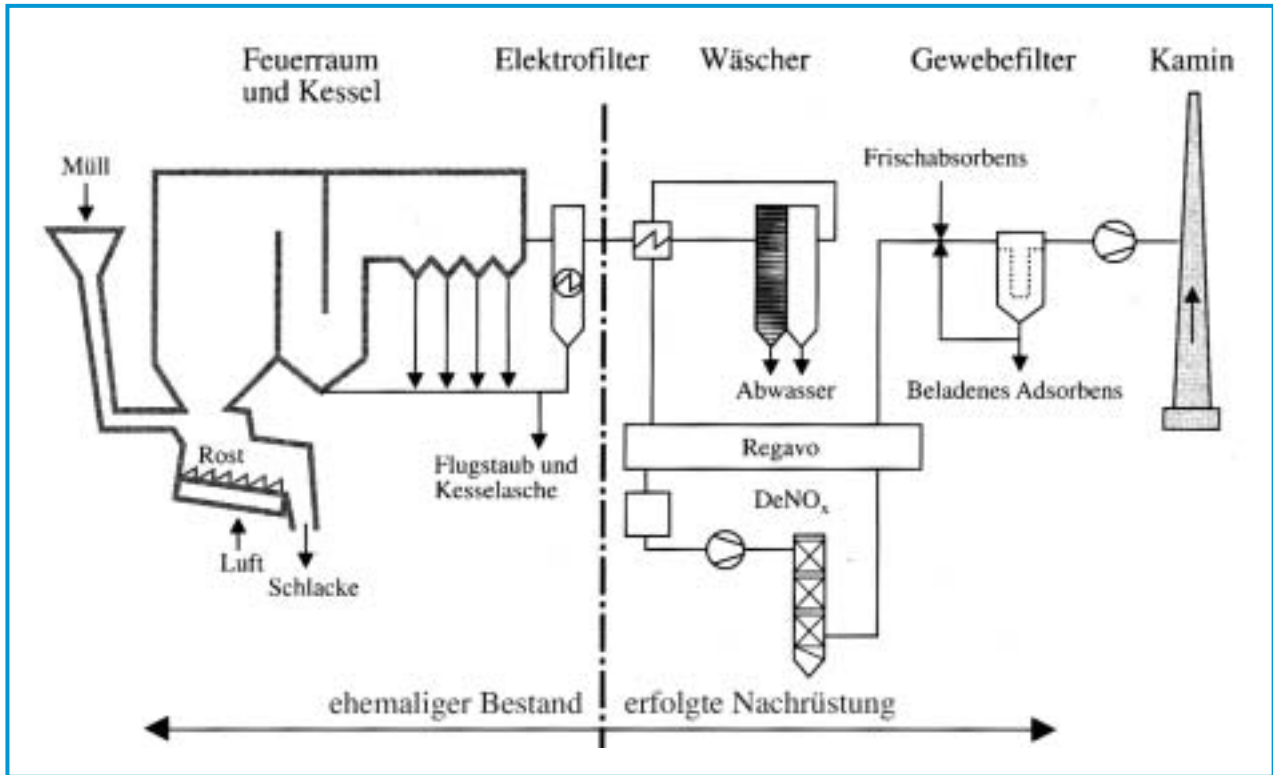


Abbildung 15: Schema der Verbrennungslinie III der MVA Ingolstadt.

ße Aktivkohlmengen benötigt, die zu hohen Anforderungen an die Sicherheitstechnik führen (Glimmbrände). Außerdem benötigen die Reaktoren relativ viel Platz, was sich bei der Nachrüstung bestehender Anlagen als nachteilig erwies.

In Bayern wird das Wanderbettverfahren in einer Müllverbrennungsanlage (MKW Weißenhorn) angewandt. Ein wesentlicher Gesichtspunkt für die Auswahl dieses Verfahrens war hier die innovative Kombination der Wanderbett-Technik mit einer nachgeschalteten Nieder-temperatur-Entstickung bei Temperaturen um 150 °C, also ohne die sonst erforderliche Wieder-aufheizung der Abgase. Voraussetzung hierfür waren allerdings die extrem geringen Gehalte an SO<sub>2</sub> im Reingas.

### Flugstromverfahren

Unter dem „Flugstromverfahren“ versteht man die Eindüsung von pulverisierter reiner Aktivkohle oder Kohle-Kalk-Gemischen in den Abgasstrom mit nachfolgender Abscheidung auf einem Gewebefilter. Dieses Feinreinigungungsverfahren wird sowohl in Alt- als auch in Neuanlagen vielfach angewandt, weil es zugleich zur Abscheidung von sauren Abgasbestandteilen, Reststäube, Schwermetallen sowie Dioxinen und Furanen geeignet ist. In Bayern war das Flugstromverfahren die am häufigsten gewählte Lösung für die Nachrüstung von Trocken- bzw. konditionierten Trockenverfahren, da damit in den bestehenden Trockensorptionsanlagen statt des üblicherweise eingesetzten Kalkes ein Gemisch aus Kalk mit

1 – 5 % HOK eingesetzt werden kann. Hierzu sind nur geringe bauliche Veränderungen nötig. Diese Verfahren haben sich deshalb bevorzugt als Nachrüstungsmaßnahmen angeboten.

In jüngster Zeit kamen weitere Materialien auf den Markt, die ähnliche Sorptionseigenschaften wie HOK aufweisen, aber nicht brennbar sind und somit keine explosionsfähigen Staub-Luftgemische bilden können. Dazu gehören Zeolithe (siehe Glossar) oder spezielle Arten von Ton.

### Oxidationskatalysatoren

Ein nützlicher Nebeneffekt des bereits beschriebenen SCR-Verfahrens ist, dass an den Katalysatoren nicht nur Stickoxide reduziert, sondern dass auch organische Spurenstoffe in beträchtli-

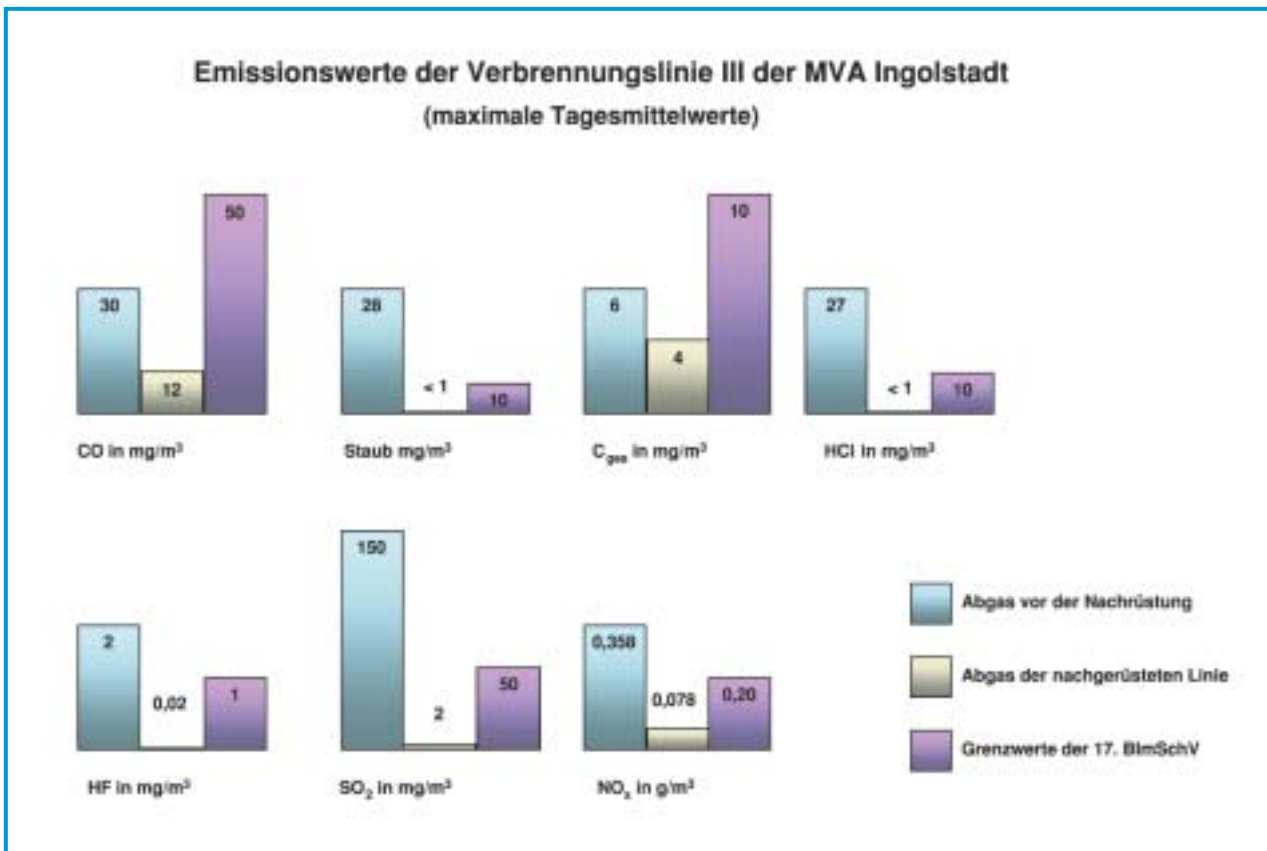


Abbildung 16: Emissionswerte der Verbrennungslinie III.

chem Umfang oxidiert werden. In systematischen Untersuchungen zeigte sich, dass die PCDD/PCDF dabei abgebaut werden können. Nach erfolgreichen Tests in Pilotanlagen – mit Abbauraten von über 90 % – kam die katalytische Dioxinzerstörung auch großtechnisch zum Einsatz. Aufgrund der ähnlichen Betriebsbedingungen für Entstickung und Dioxinzerstörung ließ sich ein Reaktor mit wechselnden Katalysatorschichten für die gleichzeitige Minderung von NO<sub>x</sub> und Dioxinen realisieren.

Ein wesentlicher Vorteil der Oxidationskatalysatoren gegenüber Adsorptionsverfahren ist die Zerstörung der organischen Verbindungen. Dabei entstehen keine zusätzlichen Rückstände. Die

Oxidation führt im Wesentlichen zu Kohlendioxid, Wasser und Spuren von Chlorwasserstoff im Bereich weniger Nanogramm pro Kubikmeter, die messtechnisch nicht mehr erfasst werden können. Die simultane Entfernung von NO<sub>x</sub> und Dioxinen war ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu verfahrens- und apparatetechnisch einfachen Lösungen, die zudem auch noch kostengünstig sind. Bei gleichbleibend hohem Niveau der ökologischen Standards sind hier künftig erhebliche Vereinfachungen in der Anlagentechnik zu erwarten. In Bayern wurde ein solches System erstmals in der Anlage Schwandorf installiert. Messungen ergaben, dass die PCDD/PCDF bis zu 99,8 % zerstört werden. Der Emissionsgrenzwert der 17. BImSchV

wird dabei um Größenordnungen unterschritten.

## 10.6 Beispiel für eine moderne Abgasreinigungsanlage

Ein Beispiel für eine moderne Anlage, die auch zeigt, dass eine Nachrüstung gemäß neuen Vorschriften möglich ist, ist die Verbrennungslinie III in der MVA Ingolstadt. Hier bestand die Abgasreinigung ursprünglich lediglich aus einem Elektrofilter und einem einstufigen Wäscher. Zwar konnten die Anforderungen der TA Luft 86 (mit Ausnahme von Schwefeloxid) eingehalten werden, nicht aber jene der 17. BImSchV. Abbildung 15 zeigt das Schema der nachgerüsteten



## Kapitel 10

Verbrennungslinie III in Ingolstadt:

Zunächst strömen die Abgase durch das bereits vor der Nachrüstung vorhandene Elektrofilter. Nach Abkühlung in einem Wärmetauscher werden sie in einem neu installierten dreistufigen Wäscher gereinigt. Die erste (saure) Stufe dient der Abscheidung von HCl und HF, in der zweiten (basischen) Stufe werden Natronlauge und Schwefeldioxid aus den Abgasen entfernt sowie die Feinstäube und Aerosole abgeschieden.

Danach werden die Abgase in einem Wärmetauscher auf die Betriebstemperatur des Katalysators aufgeheizt. Mit Hilfe eines Kanalbrenners werden Wärmeverluste des Systems ausgeglichen. In der Entstickungsstufe wird 25%iges Ammoniakwasser zugesetzt und die Stickoxide katalytisch zu Stickstoff umgesetzt. Gleichzeitig wird ein Teil der PCDD/PCDF zerstört. Die so vorgereinigten Abgase gelangen schließlich in einen Flugstromreaktor, der als Feinreinigungsstufe dient. Hier wird Aktivkoksstaub in den Abgas-

strom eingedüst. Der Aktivkoks mit den adsorbierten Schwermetallen und Dioxinen wird anschließend an einem Gewebefilter abgeschieden.

Die gereinigten Abgase unterschreiten die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV deutlich. Dies ist aus Abbildung 16 zu entnehmen, in der die tatsächlichen Betriebswerte für Schwermetalle und Dioxine mit den Grenzwerten verglichen werden. ■



# Was emittieren die bayerischen Anlagen?

In Abbildung 17 ist die Entwicklung der Emissionswerte der MVA Bamberg über fast zwei Jahrzehnte dargestellt. Auf jede Verschärfung der Grenzwerte folgte eine Senkung der Emissionen. Dies ist besonders deutlich an den Staub- und Schwefeldioxid-Emissionen zu erkennen. Auch die Emissionen an HCl, HF und Stickoxiden haben beachtlich abgenommen. Bei den

Parametern „Gesamtkohlenstoff“ (Cges) und „Kohlenmonoxid“ (CO) ist dies nicht so ausgeprägt, jedoch ist an den Werten klar abzulesen, dass die Verbesserung der Verbrennungstechnik sich auch hier in geringeren Emissionen bemerkbar machte.

Die aktuellen Daten zu den Emissionen der Müllverbrennungsanlagen in Bayern sind im

Internet unter der Adresse [www.umweltministerium.bayern.de/bereiche/abfall/einwirk](http://www.umweltministerium.bayern.de/bereiche/abfall/einwirk) für jeden öffentlich zugänglich und werden dort auch eingehend erläutert. ■

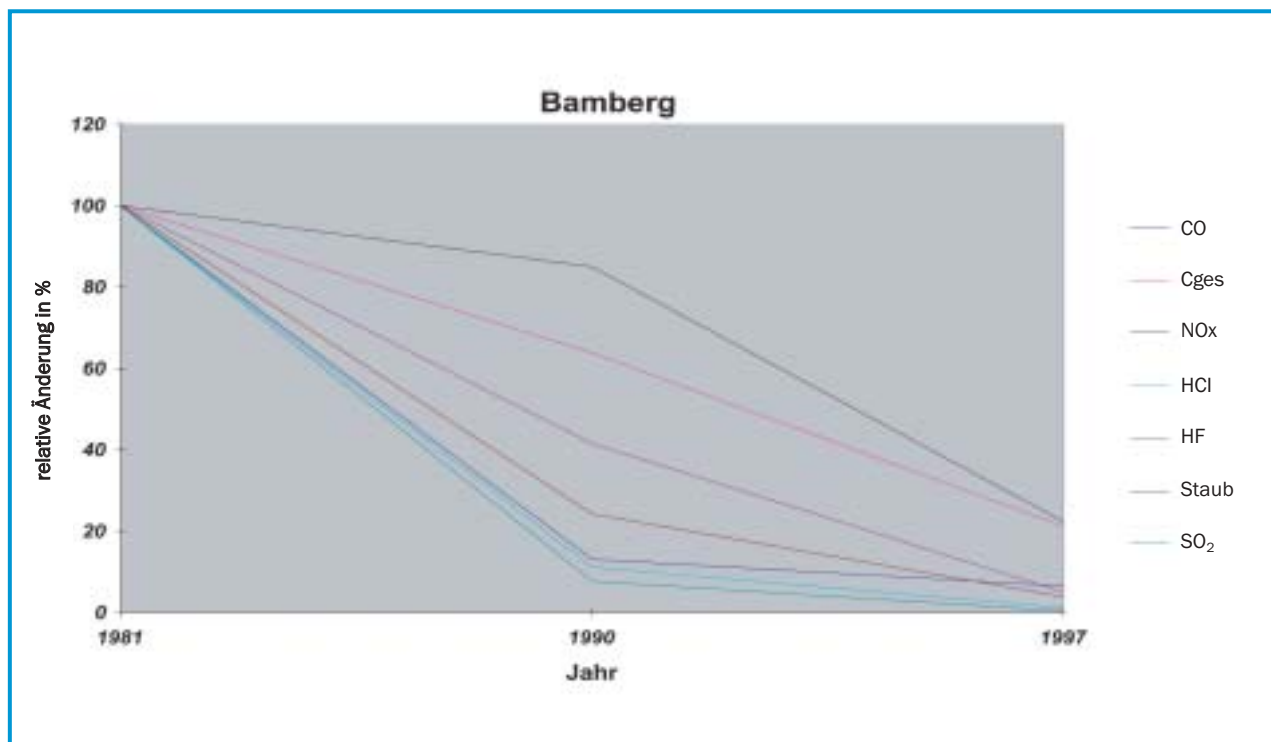
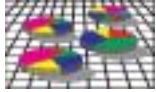


Abbildung 17: Entwicklung der Emissionswerte der MVA-Bamberg in den Jahren 1981 bis 1997, Angaben in Prozent.





# Rückstände aus der MVA

Art und Menge der Rückstände, die bei der Müllverbrennung anfallen, werden hauptsächlich von der jeweiligen Verbrennungstechnik, Abgasreinigung und Abfallzusammensetzung bestimmt.

Die Mengen an festen Rückständen, die bei der Verbrennung einer Tonne Abfall entstehen, sind in Tabelle 8 gezeigt.

Den größten Teil machen mit einem Viertel bis einem Drittel der verbrannten Abfallmenge die Schlacken aus. Pro Tonne Abfall fallen etwa 250 bis 350 kg Rohschlacken an.

Die Rückstände aus der Abgasreinigung belaufen sich demgegenüber auf 5 bis maximal 10 %, bezogen auf den eingesetzten Abfall.

Die trockenen und quasitrockenen Verfahren hinterlassen höhere Rückstandsmengen als die Nassverfahren; dies liegt an den verfahrensbedingten Unterschieden dieser Techniken.

### 12.1 Flüssige Rückstände

*Im Betrieb entstehen drei wesentliche Abwasserströme:*

- Waschwasser aus der Abgasreinigung

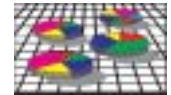
- Kühl- und Waschwasser aus der Nassentschlackung
- Abwässer aus verschiedenen Betriebsprozessen, z. B. Spül-, Reinigungs- und Spritzwasser

Am höchsten belastet mit Schadstoffen sind die Abwässer aus der Abgasreinigung. Hingegen können die Abwassermengen aus den beiden anderen Strömen erheblich größer sein. Für die Einleitung in ein Kanalnetz oder ein Oberflächengewässer („Vorfluter“ genannt) sind in der Regel Einleitungsgrenzwerte

vorgeschrieben. Sie gelten beispielsweise für den pH-Wert, die Temperatur, die Menge der absetzbaren Stoffe, Fluoride und Schwermetalle. Um diese Werte einzuhalten, muss das Abwasser gereinigt werden. Dabei kommen verschiedene Techniken zum Einsatz, beispielsweise die Flockung oder Fällung. Je nach verwendetem Absorptionsmittel entstehen bei der Nasswäsche vor allem Kochsalz, Natriumsulfat, Calciumchlorid und Calciumsulfat in unterschiedlichen Mengenverhältnissen. Schwermetalle müssen durch spezielle Fällungsverfahren entfernt werden.

Tabelle 8: Rückstände aus der Abfallverbrennung

Spezifische Menge (trocken) in kg/t Abfall	
<b>Rückstände aus der Abgasreinigung</b>	
Nassverfahren <i>ohne</i> Staub	8 – 15
Quasitrockenverfahren <i>ohne</i> Staub	15 – 35
Trockenverfahren <i>ohne</i> Staub	25 – 45
Nassverfahren <i>mit</i> Staub	30 – 50
Quasitrockenverfahren <i>mit</i> Staub	40 – 65
Trockenverfahren <i>mit</i> Staub	50 – 80
<b>Filterstaub aus der Entstaubung</b>	20 – 40
<b>Schlacke</b> (Rostabwurf, Rostdurchfall, Flugasche)	250 – 350



## 12.2 Feste Rückstände aus der Abgasreinigung

Die festen Rückstände aus der Abgasreinigung bestehen im Wesentlichen aus den Filterstäuben und aus den Reaktionsprodukten der quasitrockenen bzw. trockenen Abgasbehandlung. Wo keine Vorentstaubung vorgenommen wird, werden Flugstäube und Reaktionsprodukte gemeinsam abgeschieden.

### Elektrofilterstaub

Pro Tonne verbrannten Abfalls entstehen 20 – 40 Kilogramm Filterstaub (siehe Tabelle 8); die Konzentration im Roh-Abgas der Verbrennung liegt bei mehreren Gramm pro Kubikmeter Abluft. Der Staub ist sehr feinkörnig und überwiegend mineralisch. Die

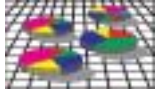


Abbildung 18: MVA-Schlacke.

Tabelle 9: Zusammensetzung fester Rückstände aus der Abgasreinigung.

Parameter/Inhaltsstoffe	Elektrofilterstäube	Reaktionsprodukte
Glühverlust	0,3- 2,8 %	1,2 - 9,1 %
Aluminium	26 - 58 g/kg	4 - 72 g/kg
Calcium	144 - 274 g/kg	120 - 404 g/kg
Eisen	13 - 29 g/kg	3 - 26 g/kg
Silicium	45 - 116 g/kg	7 - 157 g/kg
Chlorid	35 - 212 g/kg	33 - 377 g/kg
Sulfat	96 - 138 g/kg	38 - 351 g/kg
Blei	6 - 20 g/kg	1,3 - 17,3 g/kg
Cadmium	298 - 715 mg/kg	74 - 613 mg/kg
Chrom	395 - 840 mg/kg	42 - 1.330 mg/kg
Kupfer	1.310 - 2.200 mg /kg	117 - 1.890 mg/kg
Nickel	35 - 90 mg/kg	10 - 284 mg/kg
Zink	19,9 - 55 g/kg	4,4 - 38,7 g/kg

Schadstoffe werden dabei stark aufkonzentriert. In den Filterstäuben finden sich im Vergleich zur Schlacke hohe Anteile an Schwermetallen und organischen Verbindungen sowie wasserlöslicher Chloride und Sulfate. Filterstäube werden deshalb als „besonders überwachungsbedürftige Abfälle“ eingestuft. Sofern sie nicht in irgendeiner Form verwertet werden können, müssen sie auf Sonderabfalldeponien abgelagert werden. Als gängiger Verwertungsweg ist die Verfüllung ehemaliger Bergbaustollen mit diesen Stäuben (Ersatzbaustoff) anerkannt. Weiter können sie als Zuschlag für Baustoffe verwendet werden, die im Bergbau zur Auskleidung und Stützung der Stollen eingesetzt werden. Auf diese Weise werden die enthaltenen Schadstoffe zugleich über geologische Zeiträume von der Biosphäre ausgeschlossen.



## Kapitel 12

**Tabelle 10:** Eluatwerte und Zusammensetzung einer typischen Müllverbrennungsschlacke im Jahresmittel.

Parameter	LAGA-Merkblatt	Eluatwerte einer typischen MVA-Schlacke	Zusammensetzung einer typischen MVA-Schlacke
TOC	1 %	-	0,35 %
EOX	3 mg/kg	-	< 0,6 mg/kg
pH-Wert	7 - 13	11,2	-
Leitfähigkeit	6.000 µS/cm	1.690 µS/cm	-
Arsen	-	< 0,006 mg/l	8,5 mg/kg
Blei	0,05 mg/l	< 0,006 mg/l	1.113 mg/kg
Cadmium	0,005 mg/l	< 0,001 mg/l	6,3 mg/kg
Chrom (ges.)	0,2 mg/l	< 0,06 mg/l	214 mg/kg
Nickel	0,04 mg/l	< 0,01 mg/l	168 mg/kg
Quecksilber	0,001 mg/l	< 0,0005 mg/l	< 0,2 mg/kg
Kupfer	0,3 mg/l	0,02 mg/l	2.975 mg/kg
Zink	0,3 mg/l	0,05 mg/l	3.150 mg/kg
Chlorid	250 mg/l	100 mg/l	-
Sulfat	600 mg/l	99 mg/l	-

### *Reaktionsprodukte aus Trocken- und Quasitrockenverfahren*

Bei den Trocken- und Quasitrockenverfahren wird als Hauptbestandteil Kalk eingesetzt, von dem sich ein Teil unverändert in den staubförmigen Reaktionsprodukten wiederfindet. Pro Tonne Abfall fallen etwa 65 bis 80 Kilogramm Flugstaub an. Auch diese Stäube sind besonders überwachungsbedürftig. Diese Rückstände sind nach den Vorgaben der TA Abfall (siehe Glossar) wegen ihres hohen Salzgehaltes vorrangig in Untertage-deponien abzulagern. Wie bei den Filterstäuben ist die derzeitige Praxis ebenfalls die untertägi-

ge Verwertung in ehemaligen Bergbaustollen.

Die Zusammensetzung von Elektrofilterstäuben und Reaktionsprodukten kann Tabelle 9 entnommen werden.

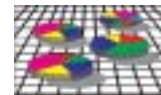
### *Schlacke*

Die Schlacke (siehe Abbildung 18) besteht im Allgemeinen aus dem Rostabwurf. Daneben kann sie den Rostdurchfall (was durch die Zwischenräume des Rostes fällt) und eventuell auch Kesselasche (Ablagerungen auf dem Kessel, die durch mechanisches Klopfen abgereinigt werden) enthalten.

*Die Zusammensetzung dieser Roh-Schlacken lässt sich in groben Zügen folgendermaßen beschreiben:*

- 3 bis 5 % Restorganik
- 7 bis 10 % Metall (überwiegend Eisen, Kupfer, Messing, Aluminium)
- 5 bis 7 % grobstückiges Material (> 32 mm)
- 80 bis 83 % feinstückiges Material (< 32 mm)

In der grob- und feinstückigen Schlacke sind hauptsächlich geschmolzene Mineralanteile, Steine, Beton, Glas sowie Gips-, Keramik- und Porzellanstücke



**Tabelle 11:** Verwertung von Rückständen der Müllverbrennung in Bayern.

Jahr	Schlacke gesamt (incl. Metall)	Schlacke verwertet (incl. Metall)	Abgasreinigungsrückstände gesamt	Abgasreinigungsrückstände verwertet
1991	446.410	202.783 ( <b>45,4</b> %)	69.749	11.090 ( <b>16</b> %)
1992	492.719	231.308 ( <b>46,9</b> %)	90.684	47.087 ( <b>51,9</b> %)
1993	488.268	240.287 ( <b>49,2</b> %)	89.298	57.460 ( <b>64,3</b> %)
1994	590.573	413.495 ( <b>70,2</b> %)	115.814	49.055 ( <b>42,4</b> %)
1995	635.391	499.275 ( <b>78,6</b> %)	110.986	78.319 ( <b>70,6</b> %)
1996	628.861	516.983 ( <b>82,2</b> %)	105.447	76.575 ( <b>72,6</b> %)
1997	598.000	450.792 ( <b>75,4</b> %)	108.108	84.800 ( <b>78,4</b> %)
1998	592.395	456.540 ( <b>77,1</b> %)	104.979	84.797 ( <b>80,8</b> %)
1999	620.331	481.986 ( <b>77,7</b> %)	116.820	95.873 ( <b>82,1</b> %)

## Einsatzmöglichkeiten von HMV-Schlacken

- 1) Im Straßen- und Wegebau, bei der Anlage befestigter Flächen in Industrie- und Gewerbegebieten (Parkplätze, Lagerflächen), bei sonstigen Verkehrsflächen (z. B. Flugplätze, Hafenbereiche, Güterverkehrszentren) als:
  - Tragschicht unter wasserundurchlässiger Deckschicht (Beton, Asphalt, Pflaster)
  - gebundene Tragschicht unter wenig durchlässiger Deckschicht (Pflaster, Platten)
- 2) Bei Erdbaumaßnahmen (kontrollierte Großbaumaßnahmen) in hydrogeologisch günstigen Gebieten als:
  - Lärmschutzwand mit mineralischer Oberflächenabdichtung und darüber liegender Rekultivierungsschicht.
  - Straßendamm (Unterbau) mit wasserundurchlässiger Fahrbahndecke und mineralischer Oberflächenabdichtung im Böschungsbereich und darüber liegender Rekultivierungsschicht.

enthalten. Chemisch gesehen, sind die Hauptbestandteile wasserunlösliche Silikate, Aluminiumoxide, Eisen- und Eisenoxide, Carbonate und Chloride

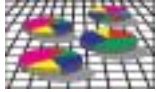
der Alkali- und Erdalkalimetalle (siehe Glossar). Verglichen mit den Filterstäuben und Reaktionsprodukten enthalten Schlacken nur wenig wasserlösliche Salze.

## 12.3 Verwertung

Müllverbrennungsschlacken erfüllen die Kriterien der TASI i.d.R. ausnahmslos, dürften also auch künftig ohne Einschränkung auf TASI-gerechten Deponien abgelagert werden. Jedoch gilt auch für diese Schlacken der Vorrang der Verwertung vor Ablagerung.

Einer uneingeschränkten Verwertung stehen allerdings einige ihrer Eigenschaften und Inhaltsstoffe entgegen. Zu diesen Inhaltsstoffen zählen u. a. auch die schwerflüchtigen Schwermetalle. Die leichter flüchtigen Elemente wie Quecksilber, Cadmium und Blei (siehe Glossar) hingegen sind im Ofen überwiegend verdampft und finden sich in den Filterstäuben und Reaktionsprodukten wieder.

Entscheidend für die Verwertbarkeit der Schlacken sind letztlich nicht die Inhaltsstoffe, sondern ihr Auslaugverhalten (Eluier-



## Kapitel 12

barkeit). Aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen werden auch die Schwermetalle fest in die Schlacken eingebunden und chemisch immobilisiert. Ihre Löslichkeit in Wasser nimmt dadurch drastisch ab. In feuchten Schlacken, die über mehrere Monate offen gelagert werden, nimmt deren Löslichkeit weiter deutlich ab. Die dabei ablaufenden chemischen Reaktionen mit Wasser und Kohlendioxid (Hydratisierung, Carbonatisierung, Umbaureaktionen) führen zu einer beachtlichen Immobilisierung.

Zur Beurteilung der Verwertbarkeit gibt es normierte Elutionsverfahren, mit denen er-

mittelt wird, ob die Richtwerte für auslaugbare Stoffe eingehalten werden. Die Verfahren und die Grenzwerte sind im Merkblatt der „Länderarbeitsgemeinschaft Abfall“ (LAGA) festgeschrieben (siehe Glossar).

In Tabelle 10 sind die Richtwerte nach LAGA den realen Eluatwerten und der Zusammensetzung der Schlacken gegenübergestellt.

Werden die Eluatwerte eingehalten, ist eine Verwertung dieser Schlacken unter definierten technischen Sicherheitsmaßnahmen grundsätzlich möglich. Einsatzgebiete sind beispielsweise gasführende Ausgleichsschichten

auf Deponien oder ihr Einbau in Lärmschutzwällen (siehe Kasten „Einsatzmöglichkeiten von HMV-Schlacken“). Eine weitere Vorsichtsmaßnahme beim Schlackeneinsatz ist ihre Begrenzung auf sogenannte hydrogeologisch günstige Gebiete, also solche, bei denen das Grundwasser durch ausreichend mächtige Deckschichten mit hohem Rückhaltevermögen geschützt wird.

Trotz aller genannten Einschränkungen ist in den letzten Jahren die Verwertungsquote stetig angestiegen. Heute werden mehr als 77 % der Schlacken verwertet (siehe Tabelle 11). Das bedeutet, dass nur noch ein geringer Teil als Abfall zu beseitigen ist. ■



## Dioxine – ein Sonderfall

Seit dem Seveso-Unfall 1976 sind Dioxine (PCDD/PCDF) in die öffentliche Aufmerksamkeit geraten.

Dioxine können in geringen Mengen auch bei der Müllverbrennung entstehen, wenn nämlich chlorhaltige Verbindungen

verbrannt werden. Da einige Dioxine aber als hochtoxisch angesehen werden müssen (siehe Kasten), ist es notwendig, ihre Entstehung und Ausbreitung wirksam zu verhindern. Sie stellen einen Bestandteil des Abgases dar, der besonderer Behandlung bedarf. Durch intensive For-

schung ist es gelungen, Bedingungen zu definieren und Verfahren zu entwickeln, mit denen die Dioxin-Emissionen drastisch reduziert werden können. Die Anforderungen der 17. BImSchV können heute sicher eingehalten werden (vgl. Kapitel 10.5).

### Was sind Dioxine?

Unter Dioxine fasst man die Verbindungsklasse der polychlorierten Dibenzodioxine (PCDD) und der chemisch eng verwandten polychlorierten Dibenzofurane (PCDF) zusammen. Es handelt sich dabei um ein Gemisch ähnlicher Substanzen unterschiedlicher Giftigkeit. Sie enthalten jeweils zwei Benzolringe, die über Etherbrücken (Sauerstoff) miteinander verbunden sind. Bei den Dioxinen sind die Benzolringe über zwei Sauerstoffbrücken verbunden, bei den Furanen nur über eine Sauerstoffbrücke (siehe Abbildung 19).

Es gibt 75 verschiedene polychlorierte Dioxine und 135 verschiedene polychlorierte Furane. Die Vielfalt der Verbindungen (Kongenere) ergibt sich aus dem unterschiedlichen Chlorierungsgrad und der Stellung der Chloratome im Molekül. Je nach Stellung der Chloratome unterscheiden sich die Kongenere in ihrer Toxizität. Das hochgiftige sog. „Sevesogift“ ist das 2, 3, 7, 8-Tetrachlordibenzodioxin, TCDD (siehe Abbildung 19).

Die relative Toxizität der Dioxine wird in TE (Toxizitätsequivalent) angegeben; als Bezugsgröße wird die Toxizität von 2, 3, 7, 8-TCDD gleich 1 gesetzt.

Es gibt 16 weitere Verbindungen, die aus toxikologischer Sicht relevant sind (siehe Tabelle 13). Diese Kongenere sind in der 17. BImSchV im Anhang mit den dazugehörigen Toxizitätsequivalenzfaktoren (TEF) aufgeführt. Als Beispiel sei das 1, 2, 3, 7, 8-Pentachlordibenzodioxin (PCDD) genannt, das den Equivalenzfaktor 0,5 besitzt. Das bedeutet, dass PCDD halb so giftig ist wie TCDD.

Dioxine und Furane werden gemäß der 17. BImSchV in Nanogramm Toxizitätsequivalenten (ng TE) pro Kubikmeter (m<sup>3</sup>) Abgas angegeben.

**Ein Nanogramm (ng) = 0,000.000.001 g = 1 milliardstel Gramm**

1 ng TE/m<sup>3</sup> bedeutet, dass ein bestimmtes Gemisch aus polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen dieselbe Toxizität aufweist wie 1 ng/m<sup>3</sup> des Seveso-Dioxins.

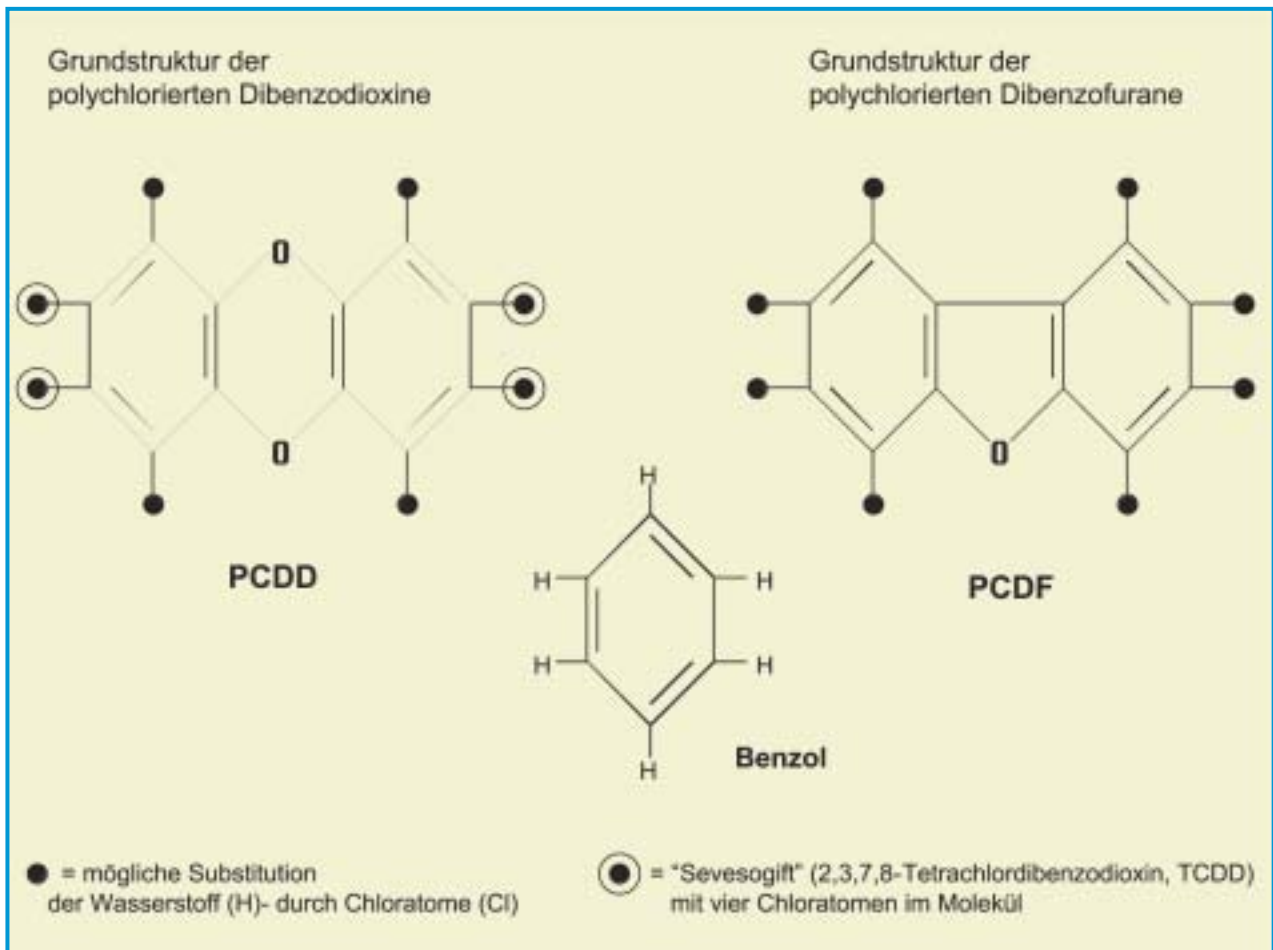


Abbildung 19: Chemische Struktur der Dioxine und Furane.

Im Vergleich zu früheren Jahren hat sich dadurch der Anteil von Dioxinen im Abgas dieser Anlagen entscheidend verringert. Dies belegt eine Übersicht des Umweltbundesamtes für Deutschland. Untersuchungen in Nordrhein-Westfalen haben gezeigt, dass ein großer Anteil der Dioxin-Belastung aus Betrieben der Metallgewinnung und -verarbeitung stammt. Demgegenüber sind die Emissionen aus Müllverbrennungsanlagen sehr gering. Mit Ablauf der Übergangsfristen der 17. BImSchV seit Dezember 1996 ist der Gesamteintrag durch Müllverbrennungsanlagen auch deutlich unter die UBA-Schätzung von 4 g TE (=Toxizitäts-

equivalent; siehe Kasten) pro Jahr zurückgegangen. Heute werden schätzungsweise nicht mehr als 1g TE/a aus allen deutschen Müllverbrennungsanlagen emittiert (vgl. Tabelle 12).

Wie gelangen überhaupt Dioxine ins Abgas von Müllverbrennungsanlagen? Hierfür gibt es mehrere Gründe. Bekannt ist, dass sie bereits im Müll enthalten sind. Bei unvollständiger Verbrennung könnten sie beispielsweise nicht vollständig zerstört werden. Aus Messungen direkt hinter dem Feuerraum älterer Müllverbrennungsanlagen ergibt sich jedoch, dass hier Dioxine praktisch kaum nachweisbar

sind. Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass sich Dioxine bei der Abkühlung des Rohgases bilden können, und zwar aus den Chloriden und Chlorverbindungen, die bereits im Hausmüll enthalten sind. Bei der Verbrennung werden sie für kurze Momente in Chlorgas umgesetzt, das dann mit unvollständig verbrannten organischen Komponenten im Rauchgas innerhalb eines bestimmten Temperaturbereiches während der Abkühlung weiterreagiert. Im Rauchgas enthaltene Partikel und Schwermetalle spielen bei dieser Neubildung (de-novo-Synthese) eine wichtige Rolle. Durch geeignete technische Maßnahmen kann diese unfrei-



**Tabelle 12:** Gesamtbilanz der bekannten Dioxin-Emissionen.

	1989/1990 g TE/a	1994/1995 g TE/a	Prognose 1999/2000 g TE/a
Abfallverbrennung	400	30	< 2 <sup>1)</sup>
Metallgewinnung und -verarbeitung	750	220	< 40
Kraftwerke	5	3	< 3
Industrie- und Gewerbebeheizung	20	15	< 10
Sonstige thermische Prozesse der Industrie	1	< 1	< 1
Hausbrandfeuerstätten	20	15	10
Krematorien	4	2	< 1
Verkehr	10	4	< 1

<sup>1)</sup> laut UBA: Wert für 1999

**Tabelle 13:** Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) gemäß dem Anhang zur 17. BImSchV.

Einzelverbindungen	Äquivalenzfaktor
2, 3, 7, 8-Tetrachlordibenzodioxin	1
1, 2, 3, 7, 8-Pentachlordibenzodioxin (PeCDD)	0,5
1, 2, 3, 4, 7, 8-Hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1, 2, 3, 7, 8, 9-Hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1, 2, 3, 6, 7, 8-Hexachlordibenzodioxin (HxCDD)	0,1
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-Heptachlordibenzodioxin (HpCDD)	0,01
Octachlordibenzodioxin	0,001
2, 3, 7, 8-Tetrachlordibenzofuran (TCDF)	0,1
2, 3, 4, 7, 8-Pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,5
1, 2, 3, 7, 8-Pentachlordibenzofuran (PeCDF)	0,05
1, 2, 3, 4, 7, 8-Hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1, 2, 3, 7, 8, 9-Hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1, 2, 3, 6, 7, 8-Hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
2, 3, 4, 6, 7, 8-Hexachlordibenzofuran (HxCDF)	0,1
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8-Heptachlordibenzofuran (HpCDF)	0,01
1, 2, 3, 4, 7, 8, 9-Heptachlordibenzofuran (HpCDF)	0,01
Octachlordibenzofuran (OCDF)	0,001

willige Dioxinbildung weitgehend vermieden werden.

Die Dioxinkonzentrationen in den Verbrennungsabgasen liegen mit einigen Nanogramm pro Kubikmeter (ng/m<sup>3</sup>) jedoch immer noch über dem Grenzwert der 17. BImSchV und erfordern deshalb spezielle Abgasreinigungsverfahren. In der Abbildung 20 wird die Dioxin-Bilanz einer Müllverbrennungsanlage dargestellt.

Das Umweltbundesamt schätzt, dass mit jeder Tonne Hausmüll etwa 60 Mikrogramm (µg) Dioxin in die Müllverbrennung gelangen. Davon gelangt nur ein geringer Bruchteil überhaupt in das Abgas. Wird der Emissionsgrenzwert der 17. BImSchV von 0,1 ng TE pro Kubikmeter ausgeschöpft, würden lediglich 0,5 µg pro Tonne Abfall mit der Abluft freigesetzt. Der größte Anteil findet sich in den Rückständen aus der Abgasreinigung wieder. Diese werden jedoch unter Tage verwertet und damit aus der Biosphäre dauerhaft entfernt. Über





## Kapitel 13

**Tabelle 14:** Dioxinemissionen bayerischer Müllverbrennungsanlagen (1999).

Anlage	Linie	Datum der Messung	Emissionskonzentration Mittelwert
Augsburg	Ofenlinie 1	03/2000	0,0033 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	03/2000	0,0037 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 3	03/2000	0,0130 ng/m <sup>3</sup>
Bamberg	Ofenlinie 1	06/1999	0,0015 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	06/1999	0,0006 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 3	06/1999	0,0008 ng/m <sup>3</sup>
Burgau (Pyrolyse)	-	01/2000	0,0011 ng/m <sup>3</sup>
Burgkirchen	Ofenlinie 1	10/1999	0,002 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	10/1999	0,001 ng/m <sup>3</sup>
Coburg	Ofenlinie 1	12/1999	0,0118 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	12/1999	0,0127 ng/m <sup>3</sup>
Geiselbullach	Abgasreinigungslinie 1	07/1999	0,005 ng/m <sup>3</sup>
	Abgasreinigungslinie 3	07/1999	0,003 ng/m <sup>3</sup>
Ingolstadt	Ofenlinie 1	09/1999	0,016 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	09/1999	0,034 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 3	09/1999	0,037 ng/m <sup>3</sup>
Kempton	-	03/2000	0,0011 ng/m <sup>3</sup>
Landshut	-	05/1999	0,014 ng/m <sup>3</sup>
München-Nord	Block 11	06/1999	0,003 ng/m <sup>3</sup>
	Block 12	06/1999	0,002 ng/m <sup>3</sup>
	Block 31	05,06/1999	0,001 ng/m <sup>3</sup>
	Block 32	05/1999	0,001 ng/m <sup>3</sup>
Neufahrn	-	11/1999	0,003 ng/m <sup>3</sup>
Nürnberg	Ofenlinien 1 - 4	04/1999	0,021 ng/m <sup>3</sup>
Rosenheim	-	07/1999	0,043 ng/m <sup>3</sup>
Schwandorf	Ofenlinie 1	08/1999	0,002 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	08/1999	0,003 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 3	08/1999	0,002 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 4	08/1999	0,005 ng/m <sup>3</sup>
Schweinfurt	Ofenlinie 1	07/1999	0,011 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	07/1999	0,009 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 3	07/1999	0,030 ng/m <sup>3</sup>
Weißenhorn	Ofenlinie 1	09,12/1999	0,0053 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	09/1999	0,0030 ng/m <sup>3</sup>
Würzburg	Ofenlinie 1	11/1999	0,0219 ng/m <sup>3</sup>
	Ofenlinie 2	09/1999	0,0034 ng/m <sup>3</sup>

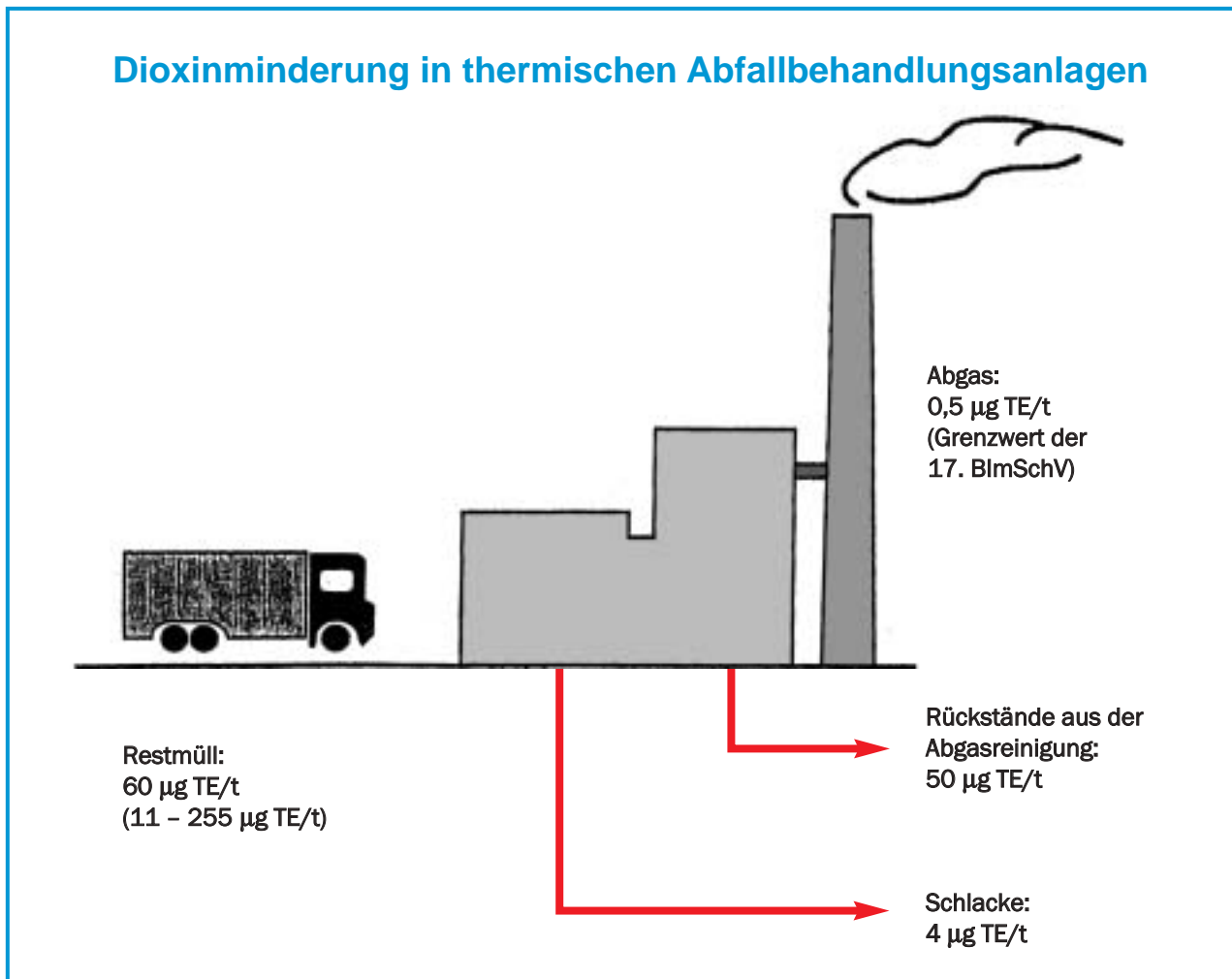


Abbildung 20: Dioxin-Bilanz einer modernen Müllverbrennungsanlage.

die Schlacke werden demgegenüber nur geringe Mengen an Dioxinen ausgetragen. Müllverbrennungsanlagen sind heute zu echten Dioxinsenken geworden, da über die luftgetragenen Emis-

sionen weniger Dioxine freigesetzt werden als mit den Abfällen in die Anlagen gelangen. In Tabelle 14 wird eine Übersicht der Dioxin-Emissionen bayerischer Müllverbrennungsanlagen ge-

zeigt, wie sie Anfang 1999 im Internet veröffentlicht wurde. Der Dioxingrenzwert wird überwiegend um Größenordnungen unterschritten. ■



# Verwertung der Verbrennungsenergie und Klimarelevanz

Was nicht mehr stofflich verwertet werden kann und damit als „Restmüll“ anfällt, enthält immer noch viel Energie. Diese lässt sich durch die Verbrennung nutzen und wird über den Heizwert der Abfälle berechnet. Natürlich schwankt dieser Wert je nach Zusammensetzung des Restmülls. Gerade hier wirkt sich die Abfalltrennung aus: wenn Glas, Metalle oder Grüngut ausgesondert werden, erhöht sich der Heizwert, weil Glas, Metalle unbrennbar sind und Grüngut viel Wasser enthält. Das Aussortieren von Papier und Kunststoffen hingegen senkt den Heizwert. Tendenziell nahm der Heizwert des Restabfalls in den letzten Jahren zu. Er bewegte sich im Bereich zwischen 8.900 und 12.600 Kilojoule (siehe Glossar) pro Kilogramm Abfall. Damit liegt er im gleichen Bereich wie der von Braunkohle.

Sämtliche Müllverbrennungsanlagen in Bayern nutzen diese Energie zur Dampferzeugung. Schon bei der Planung der Anlagen wurde besonderes Gewicht auf eine möglichst hohe Energieausbeute gelegt. Der sogenannte „Feuerungswirkungsgrad“ der Anlagen liegt durchwegs über 80 %; der Rest der Energie geht mit den Abgasen verloren. Er erfüllt damit auch die Voraussetzungen für eine energetische Verwertung nach den Vorgaben des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes.

### Was lässt sich nun mit dem energiereichen Dampf anfangen?

*Hier sind drei große Einsatzbereiche zu nennen. Die Energie kann genutzt werden als*

- Elektrischer Strom
- Fernwärme für Gebäude
- Prozessdampf für Industriebetriebe

Primär wird Strom erzeugt, wobei die Restwärme des Dampfes häufig auch für die Fernwärmeversorgung genutzt wird (Kraft-Wärme-Kopplung). Prozessdampf für Industriebetriebe wird nur in wenigen Fällen abgegeben. Voraussetzung hierfür ist, dass sich die entsprechenden Abnehmer in unmittelbarer Nähe der Anlage befinden. Allerdings versucht man, bereits bei der Planung Standorte mit nahegelegenen Energieabnehmern zu finden. Dies können Produktionsanlagen mit hohem und gleichmäßigem Energiebedarf, beispielsweise Papierfabriken oder auch Wohn- und Gewerbegebiete mit entsprechendem Fernwärmebedarf sein. Solche Kombinationen sind auch ökologisch vorteilhaft, da an die Emissionen von Müllverbrennungsanlagen hohe Anforderun-

gen gestellt werden. Ein Vergleich mit dem für die Bundesrepublik typischen Energiemix (siehe Glossar), wie er in Tabelle 15 gezeigt wird, ist hier sehr aufschlussreich. Dabei werden die Emissionen an Schadstoffen auf die Erzeugung der jeweils gleichen Strommenge bezogen, wie sie aus einer Tonne Abfall erhalten wird. Damit wird deutlich, dass die Müllverbrennung im täglichen Betrieb bedeutend weniger emittiert als die Anlagen aus dem Energiemix.

Bei den anorganischen Gasen ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$  und  $\text{HF}$ ; siehe auch Glossar) wirken sich die ausgefeilten Techniken der Abgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen deutlich aus. Die Betriebswerte moderner Müllverbrennungsanlagen unterschreiten die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV zum Teil erheblich.

Wird nur Strom erzeugt, liegt der Wirkungsgrad nach Abzug des Eigenverbrauches bei gut 20 %. Wird zusätzlich auch die Wärme genutzt, erhöht sich der Gesamtwirkungsgrad bis auf ca. 70 %. Der Rest geht als Wärmeverluste mit dem Abgas und Abgasreinigung verloren. Aus diesem Grunde werden Müllverbrennungsanlagen vornehmlich nahe Ballungszentren errichtet. Dort fällt bei kurzen Transport-



**Tabelle 15:** Emissionen bei der Erzeugung von Strom aus einer Tonne Abfall verglichen mit der gleichen Strommenge aus dem Energiemix.

Parameter	Energiemix pro Tonne Steinkohleeinheit (SKE)	Abfallverbrennung Betriebswerte pro Tonne Abfall	Grenzwerte für Abfallverbrennung (17. BImSchV) pro Tonne Abfall
Stickoxide (NO <sub>x</sub> )	3	0,36 kg	1 kg
Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )	1,4 kg	0,9 g	250 g
Chlorwasserstoff (HCl)	64 g	0,05 mg	50 g
Fluorwasserstoff (HF)	4 g	0,1 g	5 g
Quecksilber (Hg)	31 mg	15 mg	250 mg
PCDD/PCDF	67 ng	6 ng	0,5 µg

wegen viel Müll an und es finden sich viele Abnehmer für die Fernwärme.

**Jährlich geben die Müllverbrennungsanlagen in Bayern etwa folgende Energiemengen ab:**

- **Fernwärme:**  
ca. 1.800.000 MWh  
(das genügt für die Beheizung von ca. 135.000 Wohnungen)
- **Prozessdampf:**  
ca. 810.000 MWh
- **Strom:**  
650.000 MWh  
(ausreichend für ca. 211.000 Haushalte)

Die gesamte, im Jahr 1999 in Bayern angefallene Restabfallmenge von rund 2,6 Mio. Tonnen, entspricht einem Energieinhalt von etwa 600.000 Tonnen Heizöl. Die Abfallverbrennung leistet somit einen nicht unwesentlichen Beitrag zur Schonung nicht erneuerbarer Ressourcen (fossile Brenn-

stoffe). Insgesamt gesehen ist allerdings der Anteil, der aus Müllverbrennungsanlagen stammt, relativ gering – in Bayern liegt er bei etwa 0,5 % der Gesamtenergieerzeugung.

Wie sieht die Kohlendioxid-Bilanz aus? Immerhin ist CO<sub>2</sub> eines der wichtigsten Treibhausgase (siehe Glossar). Es wird bei jeder Verbrennung freigesetzt. Relevant für das Klima ist aber nur der Anteil, der aus den fossilen Brennstoffen stammt, weil dieser nicht erneuert wird. Im Gegensatz dazu ist die CO<sub>2</sub>-Menge, die aus nachwachsenden Rohstoffen freigesetzt wird, Teil des natürlichen Gleichgewichts im Kohlendioxidkreislauf und daher ohne langfristige Auswirkungen auf das Klima. Insgesamt liegt der Beitrag der Müllverbrennungsanlagen zur Gesamtemission von CO<sub>2</sub> zwischen 1 und 2 %. Etwa die Hälfte davon stammt aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holz (Papier, Pappe etc.). Die andere Hälfte stammt aus Kunststoffen, die ihrerseits aus Erdöl hergestellt

werden, also aus einer nicht erneuerbaren Energiequelle. Das bedeutet, dass Müllverbrennungsanlagen nur halb so viel klimarelevantes CO<sub>2</sub> emittieren wie Heizkraftwerke, die fossile Brennstoffe verfeuern. Müllverbrennungsanlagen können somit auch auf eine bessere Kohlendioxid-Bilanz verweisen. ■



# Neuentwicklungen bei thermischen Verfahren

### 15.1 Schwelen statt Brennen

Um die Anforderungen der TASI zu erfüllen, ist es nicht zwingend erforderlich, den Müll nur auf dem Rost zu verbrennen. Es sind auch Kombinationsverfahren denkbar und realisiert worden, bei denen Verfahrensschritte wie die sogenannte Pyrolyse, also die Verschmelzung des Abfalls, integriert sind.

Unter Pyrolyse versteht man die thermische Zersetzung brennbarer Stoffe unter Sauerstoffmangel. Dabei entstehen je nach Verfahrensführung eine ganze Reihe von gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen, die prinzipiell nutzbar sind. Das können Öle sein, es kann aber auch Koks entstehen. Vor ungefähr 20 Jahren setzte eine intensive Entwicklung von Schwelverfahren ein, die dem attraktiven Motto „Öl aus Müll“ folgten. Damals schätzte man die Möglichkeiten der Pyrolyse als Abfallentsorgungs- und verwertungsverfahren recht optimistisch ein.

In Bayern wird seit 1987 eine Müllpyrolyseanlage im Landkreis Burgau betrieben, die in Deutschland einzigartig ist und gut funktioniert. Die reine Verschmelzung von Abfällen wie in Burgau hat sich inzwischen jedoch als wenig zukunftssträftig erwiesen. Beachtliche Mengen an Rück-

ständen (Schwelkoks) können dort aufgrund fehlender technischer Einrichtungen nicht weiter behandelt werden und sind zu entsorgen (Ablagerung).

Heute wird die Verschmelzung in den Behandlungsprozess integriert. Aufbauend auf die Verschmelzung folgt als zweiter Teilschritt entweder die Verbrennung oder die Vergasung der Schwelrückstände bei hohen Temperaturen. Das wesentliche Ziel all dieser Neuentwicklungen ist es, glasartige Rückstände (Schlacken) zu erzeugen. Sie entstehen bei der verfahrenintegrierten Einschmelzung der mineralischen Bestandteile des Abfalls während der Hochtemperatur-Behandlung. Dabei sollen vor allem die metallischen Spurenbestandteile so eingebunden werden, dass sie unter Umweltbedingungen kaum noch mobilisierbar sind. Die bei diesem Verfahren erzeugten Schmelzrückstände weisen eine wesentlich bessere Qualität auf, als die Rückstände aus der Verbrennung auf dem Rost.

#### Je nach Verfahren werden folgende Vorteile angegeben:

- Vollständiger Ausbrand von Gasen und Rückständen
- Erzeugung von glasartigen Schlacken

- Einschmelzen auch von Kessel- und Filterstäuben
- Bessere stoffliche Trennung und Wiederverwertung von Eisen und anderen Metallen, Glas und Steinen
- Geringere Auslaugbarkeit der Schlacken
- Einsatz von Sauerstoff statt Luft und dadurch
- Verringerung der zu reinigenden Abgasmengen und -volumina
- Verringerung der Anlagengröße und der Investitionskosten

Es sind aber auch verfahrensbedingte Nachteile zu erwähnen. Dazu gehört der erhöhte Energieverbrauch für die Erzeugung von Sauerstoff, der für einige Verfahren benötigt wird und die insgesamt geringere Energieausbeute (Strom, Prozessdampf, Fernwärme) wegen der hohen erforderlichen Prozesstemperaturen.

#### Zwei Beispiele

Das *Schwelbrennverfahren* wurde von der Firma Siemens KWU entwickelt und stellt eine Kombination aus Abfallverschmelzung, Verbrennung und Einschmelzung der entstehenden

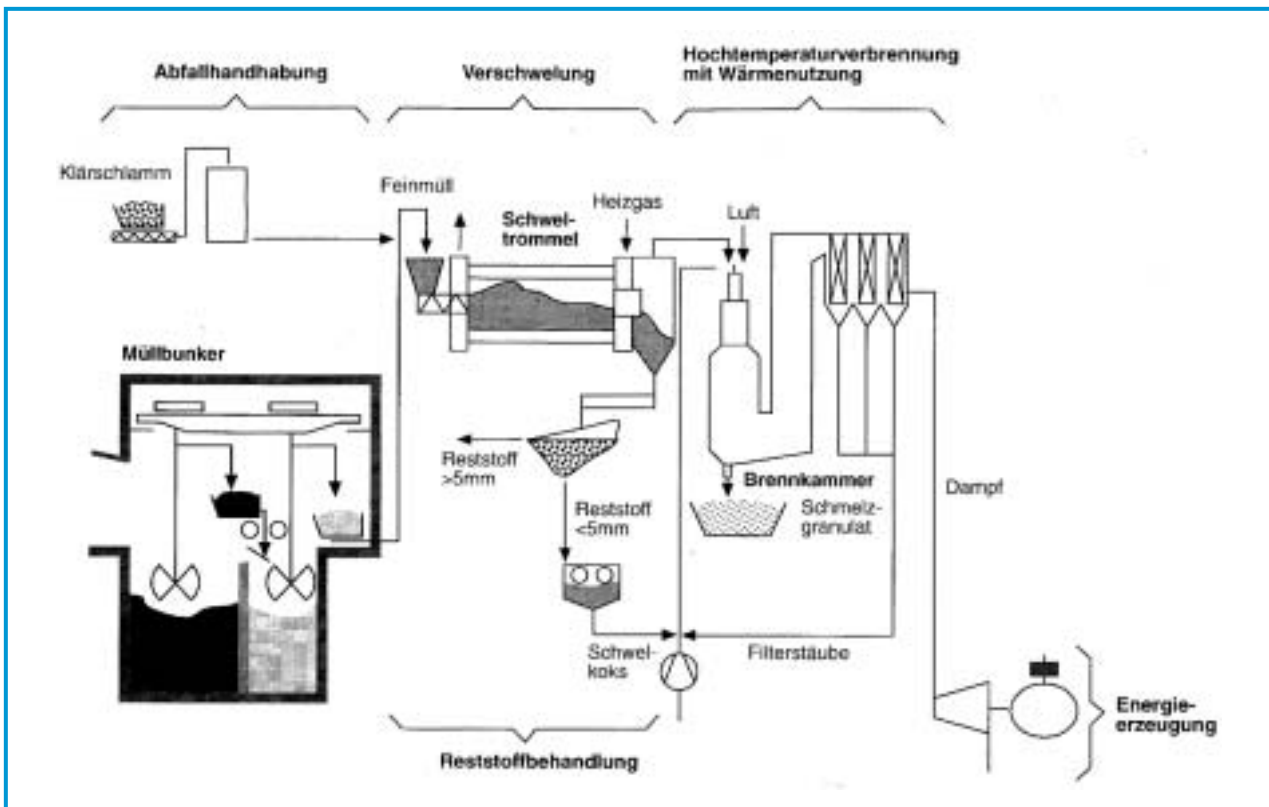


Abbildung 21: Schema des Schmelzbrennverfahrens.

Pyrolyseprodukte dar. Details können Abbildung 21 entnommen werden.

Die Abbildung zeigt den Müllbunker mit einem Grobmüll- und Feinmüllteil. Auch Klärschlamm kann zugesetzt werden. In der Schweltrommel, die mit einer Temperatur von ca. 450 °C arbeitet, entsteht – wie in Burgau – nicht nur Schwelgas, sondern auch Schwelkoks. Das Gemisch aus Schwelkoks, Steinen, Glas, Eisen und Nichteisenmetallen wird in Fraktionen getrennt, der Schwelkoks vermahlen und gemeinsam mit den Filterstäuben aus der Abgasreinigung der Schmelzkammerfeuerung (Hochtemperatur-Brennkammer) zugeführt. Dort werden Schwelgas und Kohlestaub bei ca. 1.300 °C verbrannt. Diese Temperatur

reicht aus, um alle verbleibenden Feststoffe in einem Glasfluss einzuschmelzen, der am Boden der Brennkammer abgezogen und im Wasserbad granuliert wird. Die Abgase werden anschließend wie bei der Müllverbrennung zur Dampferzeugung genutzt. Die entstandenen Verbrennungsgase werden einer konventionellen Abgasreinigung unterzogen, wie sie auch in anderen Müllverbrennungsanlagen installiert ist, bevor sie über den Kamin in die Atmosphäre abgegeben werden.

Was bleibt übrig? Direkt verwertbare Rückstände sind Steine, Glas, Metalle, die aus der Schweltrommel anfallen und vom Pyrolysekoks abgesiebt werden. Das Schmelzgranulat kann beispielsweise im Baubereich eingesetzt werden. Die Rückstände aus

der Abgasreinigung können untertätig verwertet werden.

Welche praktischen Erfahrungen mit dem Schmelzbrennverfahren liegen vor? Die heutige Anlagenkonzeption stützt sich vor allem auf den mehrjährigen Betrieb einer Versuchsanlage in Ulm-Wiblingen. In Fürth wurde eine großtechnische Anlage nach dem Schmelzbrennverfahren errichtet. Allerdings ergaben sich insbesondere Probleme im Bereich der Schweltrommel und der Schwelkoksaufbereitung, die in der vertraglich vorgegebenen Zeit nicht behoben werden konnten. Deshalb wurde die Schmelzbrennanlage im Einvernehmen aller Vertragspartner stillgelegt. Die weitere Entwicklung der Schmelzbrenntechnik in Deutschland ist damit offen. In Japan wird

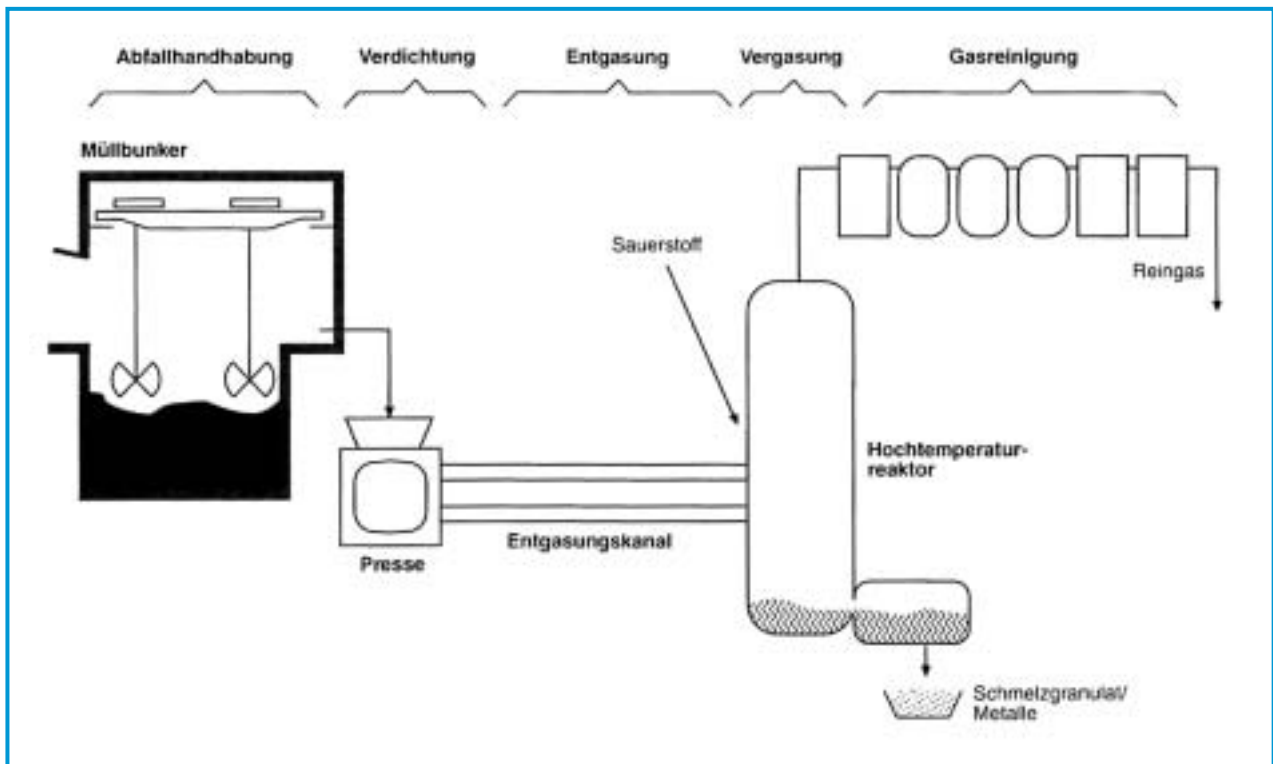


Abbildung 22: Schema des Thermoselect-Verfahrens.

die Technik im großtechnischen Maßstab, jedoch bei anderer Abfallzusammensetzung, weitergeführt.

Das **Thermoselect-Verfahren** läuft ebenfalls in zwei Stufen ab, die nahtlos ineinander greifen. Es weist einige neue Verfahrenselemente auf. Ein Schema des Verfahrens ist in Abbildung 22 dargestellt.

Bei diesem Verfahren wird der unzerkleinerte Hausmüll zu ca. 500 kg schweren Paketen verpresst, die in dichter Folge durch einen Entgasungskanal geschoben werden. Die Temperatur in diesem Kanal steigt kontinuierlich von 50 °C am Eingang auf 600 °C am Austritt in den Hochtemperaturreaktor an. Dabei wird der Hausmüll getrocknet und teilweise verschwelt. Im Hochtemperaturreaktor findet bei hohem

Wasserdampfgehalt eine Restvergasung statt, die zu einem Gas führt, das als Energieträger Kohlenmonoxid und Wasserstoff enthält (Synthesegas). Über sogenannte Lanzen wird Sauerstoff in den Reaktor eingeblasen. So können auch im unteren Teil die erforderlichen Temperaturen von bis zu 1.800 °C erzeugt werden. Die Schmelze sammelt sich am Boden und fließt von dort aus in den sogenannten Homogenisierungsreaktor. Hier trennt sie sich in eine mineralische und eine metallische Fraktion. Die Schmelze wird in einem Wasserbad zu einem körnigen Material granuliert. Das Granulat selbst besteht aus verglaster Schlacke und einer Eisenlegierung. Das Gas wird in mehreren Stufen gereinigt und kann zur Verstromung, Wärmeerzeugung oder auch als Synthesegas genutzt werden.

Als Endprodukte entsteht also eine Metalllegierung mit hohen Anteilen an Kupfer und Nickel, die in einer Buntmetallhütte wieder verwertet werden könnte, und ein mineralisches Granulat, das sich als Zuschlagstoff in der Zementindustrie eignen würde.

Welche praktischen Erfahrungen mit dem Thermoselect-Verfahren liegen vor? Die heutige Konzeption stützt sich auf die mehrjährige Erfahrung an einer Demonstrationsanlage bei Verbania in Italien mit einer Auslegungskapazität von 4,2 Tonnen pro Stunde.

Zwischenzeitlich wurde in Karlsruhe eine Anlage mit einem Jahresdurchsatz von 225.000 t errichtet. Eine endgültige Betriebsgenehmigung steht noch aus. Auch in Ansbach wird gegenwärtig eine Anlage mit ei-



ner Kapazität von ca. 75.000 t/a errichtet. Die in Karlsruhe gemachten Erfahrungen sollen hier einfließen.

### 15.2 Neues vom Rost

Neben vollständigen Neuentwicklungen auf dem Gebiet der thermischen Abfallbehandlung kann aber auch die „konventionelle“ Rostfeuerung noch erheblich verbessert werden. Die Systeme zur Feuerungsregelung werden ständig optimiert, und neuartige Rostsysteme wurden entwickelt. Dazu gehört beispielsweise ein wassergekühlter Rost, der unter anderem höhere Temperaturen im Brennbett zulässt. Ziel dieser Ansätze ist insbesondere die Verbesserung der Qualität der Rückstände (Schlacken).

Das **SYNCOM-Verfahren** der Fa. Martin stellt eine neue Technologie der Müllverbren-

nung dar, die an bestehenden Anlagen nachgerüstet werden kann. Das Verfahren führt zu einer Verringerung der Schadstoffemissionen und -frachten und funktioniert folgendermaßen:

Für die Verfeuerung der Abfälle wird ein Rückschubrost eingesetzt. Um weniger Luft für die Verbrennung zu benötigen, wird die Primärluft mit Sauerstoff auf 26 – 35 % angereichert. Dadurch ergibt sich eine Verringerung der Abgasmenge und eine Erhöhung der Temperatur im sogenannten „Brennbett“. Dies führt auch zu einer Verbesserung der Schlackenqualität durch den höheren Ausbrand, weil die Schlacke bei höherer Temperatur immer glasähnlicher (sintern) wird.

Durch die Rückführung der Verbrennungsabgase nach der Entstaubung in den Feuerraum („Abgaszirkulation“) wird eine intensive Vermischung der Ver-

brennungsluft mit den nicht vollständig ausgebrannten Verbrennungsgasen erreicht. Auf diese Weise werden sie vollständig ausgebrannt. Die rezirkulierte Abgasmenge ersetzt in diesem Verfahren einen Teil der sonst benötigten Sekundärluft. Über eine Infrarot-Kamera in der Feuerraumdecke kann der Prozess optisch überwacht und gesteuert werden.

Messungen an bestehenden Müllverbrennungsanlagen ergaben, dass sich mit dem SYNCOM-Verfahren eine wesentliche Verringerung der Schadstoffe im Abgas erreichen lässt. Auch die Verbesserung der Schlackenqualität konnte nachgewiesen werden. Durch den höheren Anteil gesinterter Fraktionen und der damit einhergehenden stärkeren Immobilisierung war auch die Auslaugbarkeit der eingeschlossenen Schwermetalle geringer. ■



# Was kostet die thermische Abfallbehandlung?

Höhere Ansprüche an die Emissionen sind nur durch verbesserte Abgasreinigungstechniken möglich, und die haben ihren Preis. Die Verbrennungsentgelte in bayerischen Anlagen liegen in einer Spanne zwischen rund 200 und 600 DM pro Tonne Abfall. Wie lässt sich das erklären?

Zunächst einmal sind die unterschiedlichen Randbedingungen zu berücksichtigen. Sie sind bei den bestehenden Anlagen nur wenig zu beeinflussen. Da spielt beispielsweise das Alter und damit die finanzielle Abschreibung der Anlage eine wesentliche Rolle. Die Größe der Anlage wirkt sich ebenfalls stark auf den Preis aus. Je größer die Kapazität, desto geringer die Behandlungskosten pro Tonne. Noch vor wenigen Jahren galt: Bei einer Anlagengröße von 100.000 Tonnen pro Jahr liegen sie bei 300 DM pro Tonne. Kann die Anlage jedoch 500.000 Tonnen pro Jahr verarbeiten, liegen sie nur noch bei etwa 150 DM pro Tonne. Heute werden auch bei kleineren Anlagen um die 200.000 t/a vergleichbare Angebote abgegeben. Wesentlich ist auch die optimale Energieabnahme (Strom, Fernwärme, Prozessdampf) und die Einnahmen daraus.

80 % der Behandlungskosten einer Müllverbrennungsanlage sind Fixkosten. Sie sind unabhängig vom Durchsatz der Anlage und fallen in konstanter Höhe an. Allein der Kapitaldienst für die Investitionskosten macht über 50 % der Gesamtkosten aus. Ist eine Anlage für einen Jahresdurchsatz von 200.000 t ausgelegt und nur zu 40 % ausgelastet, liegen die Behandlungskosten bei 450 DM pro Tonne. Ist sie jedoch zu 100 % ausgelastet, sinken die Behandlungskosten auf rund 200 DM pro Tonne. Die Auslastung ist somit ein wesentlicher Kostenfaktor.

Um Kosten zu sparen, bemühen sich die Betreiber dieser Anlagen, eventuell vorhandene freie Kapazitäten mit Restabfällen aus anderen Kommunen aufzufüllen, die über keine eigene Müllverbrennungsanlage verfügen. Dies kann zumindest zu einer Stabilisierung der Entsorgungsgebühren beitragen. Darüber hinaus konnte durch diese Art der kommunalen Zusammenarbeit in Bayern mittlerweile auf den Bau von nicht weniger als sieben Müllverbrennungsanlagen verzichtet werden, die noch Anfang der neunziger Jahre für notwendig erachtet wurden.

Die Kosten der Abfallentsorgung werden natürlich nicht allein von der Müllverbrennung bestimmt.

### Die wesentlichen Kostenträger sind dabei:

- Sammlung und Transport
- Verwaltung
- Abfallberatung
- Betrieb von
  - Kompostierungsanlagen
  - Deponien, einschließlich deren Nachsorge

Je nach Engagement der entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften im Bereich der Sammlung, Sortierung, Verwertung, Kompostierung, Deponierung etc. können auch hier deutliche Mehrkosten anfallen. Die Abfallgebühren in Gebietskörperschaften mit Müllverbrennung liegen deshalb nicht zwangsläufig über denen von Gebietskörperschaften, die ihren Abfall noch nicht so behandeln lassen. ■



# Trends in der Abfallwirtschaft

Gerade die letzten Jahre haben gezeigt, dass die Abfallwirtschaft sehr raschen Veränderungen unterworfen ist. Sie unterliegt vielfältigen Einflussfaktoren, die auch weltanschaulicher, wirtschaftlicher, technischer und nicht zuletzt politischer Natur sein können. Wie sie sich entwickeln und wie sie sich gegenseitig beeinflussen, lässt sich kaum voraussagen. Dies bedeutet aber auch, dass Gesellschaft, Politik, Verwaltung und Wirtschaft es nicht vernachlässigen dürfen, die abfallwirtschaftlichen Entwicklungen genau zu verfolgen, Tendenzen zu erkennen und möglichst rasch darauf zu reagieren. Wenn nötig, muss auch steuernd eingegriffen werden.

Im Folgenden werden einige Entwicklungen aufgezeigt, die auf die bayerische Abfallwirtschaft seit Beginn der neunziger Jahre einwirken.

## Energetische Verwertung von Abfällen in Produktionsanlagen

Die Menge der zur Müllverbrennung angelieferten Gewerbeabfälle hat in den letzten Jahren beachtlich abgenommen. Wie kommt das? Zum einen liegt es an den Anstrengungen der Wirtschaft, Abfälle so weit wie möglich zu vermeiden. Zum anderen werden aber auch zuneh-

mende Mengen dieser Abfälle in Produktionsanlagen energetisch genutzt. Abnehmer sind z. B. Zementwerke, aber auch Kraftwerke.

Dies ist grundsätzlich positiv zu bewerten, denn durch den Einsatz heizwertreicher Abfälle in diesen Anlagen lässt sich der Verbrauch von Primärrohstoffen wie Heizöl, Kohle und Erdgas verringern. Allerdings hat dies umweltverträglich zu erfolgen und muss den gesetzlichen Vorgaben entsprechen.

Ein „Öko-Dumping“, bei dem der Abfall nur als billige Energiequelle genutzt wird und dabei wissentlich die strengen Ökostandards der Müllverbrennungsanlagen umgangen werden, muss ausgeschlossen sein.

Auch beim Restmüll aus Haushaltungen werden inzwischen verstärkte Anstrengungen unternommen, heizwertreiche Fraktionen zu gewinnen, deren Energie dann in Produktionsanlagen genutzt werden soll.

Dies geschieht zum einen durch Aussortieren bestimmter heizwertreicher Abfallkomponenten, z. B. Kunststoffe (Behälter, Folien etc.). Daraus wird dann ein sogenannter „Brennstoff aus Müll“ (abgekürzt „BRAM“) erzeugt. Solche Überlegungen, die

schon vor Jahrzehnten mit Blick auf eine Optimierung der Müllverbrennung diskutiert wurden, haben mit den Vorgaben des KrW-/AbfG (siehe Glossar) neue Aktualität gewonnen.

Zum anderen wird in jüngster Zeit das „Trockenstabilat-Verfahren“ intensiv diskutiert und vereinzelt bereits eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird der gesamte Restmüll einer Trocknung, Sortierung und Kompostierung („Schnellrotte“) unterworfen. Dabei erzeugen Mikroorganismen Wärme. Diese Wärme wird dazu benutzt, das Material zu trocknen. Der Kompostierungsprozess kommt zum Stillstand, wenn das Material zu trocken wird; die Mikroorganismen werden inaktiv. Zurück bleibt ein weitgehend geruchsfreier, heizwertreicher und bei trockener Lagerung stabiler und lagerfähiger Stoff, das sogenannte „Trockenstabilat“. Dieses kann unter anderem als trockener „Restmüll“ hohen Energieinhaltes in Zeiten erhöhten Energiebedarfes in Müllverbrennungsanlagen eingesetzt werden. Derzeit ist noch umstritten, ob dieses Material sich so deutlich vom Restmüll unterscheidet, dass es grundsätzlich als Ersatzbrennstoff eingestuft werden kann und seine Nutzung in Zement- oder Kraftwerken als energetische Verwertung nach dem KrW-/AbfG einzustufen ist.



Das allerdings könnte auch erhebliche Auswirkungen auf die bestehenden Entsorgungsstrukturen, insbesondere auf die Auslastung der Müllverbrennungsanlagen haben.

Wie solche Verfahren zu beurteilen sind, wird nicht nur von der Technik, sondern auch von der rechtlichen Lage bestimmt. Es geht um die wichtige rechtliche Abgrenzung zwischen Verwertung und Beseitigung. Die Klärung dieser Frage ist nicht immer einfach, weil das KrW-/AbfG hierzu keine eindeutigen Vorgaben enthält.

### **Zu wenig Müll – Überkapazitäten der Anlagen**

Durch die Medien gehen immer wieder Berichte, wonach durch den Rückgang des Müllaufkommens große Überkapazitäten an den Verbrennungsanlagen entstehen. Wie ist die Lage tatsächlich? In Bayern gibt es derzeit an einigen Anlagen freie Behandlungskapazitäten. Das liegt vor allem daran, dass es

seit Anfang der neunziger Jahre zu einem weitaus stärkeren Rückgang der Abfallmengen kam als damals für die Anlagenplanungen prognostiziert. So werden große Teile des hausmüllähnlichen Gewerbeabfalls nicht mehr angeliefert, sondern gehen in die Verwertungsschiene. Die Kapazitäten aller bayerischen Anlagen stellen bereits heute sicher, dass alle in Bayern anfallenden Abfälle auch künftig thermisch behandelt werden können. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Abfallmengen, die derzeit noch aus deponietechnischen Gründen unbehandelt abgelagert werden, künftig auch zu behandeln sind.

Die Bayerische Staatsregierung drängt aus ökologischen Gründen auf eine möglichst rasche Umsetzung der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi) und der 2001 in Kraft getretenen Abfallablagerungsverordnung. Diese lässt unter Bezug auf die TASi ab Mitte 2005 keine Ablagerung unbehandelter Siedlungsabfälle mehr zu.

Die Betreiber von Müllverbrennungsanlagen mit freien Kapazitäten haben auf verschiedene Weise reagiert, um ein Ansteigen der Behandlungskosten zu verhindern. So übernehmen diese Anlagen in den letzten Jahren auch Abfälle aus Gebieten außerhalb ihres ursprünglichen Zuständigkeitsbereiches (siehe auch Kapitel 16).

Zudem verwerten die Müllverbrennungsanlagen zur Erzeugung von Strom, Fernwärme oder Prozessdampf verstärkt energiereiche Abfälle aus Gewerbe und Industrie. Allerdings werden hierfür nur Kostendeckungsbeiträge erzielt. Für diese (energetische) Verwertung hat Bayern nach Festlegung bestimmter abfallwirtschaftlicher Randbedingungen im Sinne des KrW-/AbfG die rechtlichen und materiellen Voraussetzungen bereits 1996 geschaffen. ■



# Ausblick

Die hier aufgezeigten Entwicklungen können erhebliche Auswirkungen auf die Kosten der Müllverbrennung haben.

Ein wichtiges Ziel der Abfallwirtschaftspolitik muss deshalb bleiben, die von den Bürgern zu entrichtenden Gebühren unter Beibehaltung der hohen Umweltstandards so gering wie möglich zu halten.

Zum Schutz unserer Umwelt und zur Vermeidung von Wettbe-

werbsverzerrungen auf dem „Abfallmarkt“ versucht Bayern auf möglichst gleiche abfallwirtschaftliche Rahmenbedingungen innerhalb Deutschlands und unter den Bundesländern hinzuwirken. Viel gravierender jedoch stellen sich die Ungleichmäßigkeiten im europäischen Vergleich dar. Ziel der Abfallpolitik auf EU-Ebene muss es daher sein, einen einheitlichen Vollzug von Umweltvorschriften in allen Mitgliedsstaaten der Europäischen Union zu erreichen.

Ein Ökodumping durch niedrigere Umweltstandards und damit günstigeren Entsorgungskosten in anderen EU Ländern muss verhindert werden. ■



# Glossar und Abkürzungen

## **Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV):**

Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen, in Kraft getreten am 1. März 2001. Legt über die TASI hinaus die Anforderungen an die Ablagerung mechanisch-biologisch behandelter Abfälle fest.

## **Alkalimetalle:**

Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium, Cäsium und Francium; sind chemisch sehr reaktionsfähig.

## **Arsen (As):**

Giftiges Schwermetall. Chronische Vergiftungen durch Arsen-Verbindungen führen zu Nervenschäden, Schwäche, Rückbildung des Knochenmarks, Leberveränderungen. Arsen reichert sich in der Nahrungskette an (Fische, Muscheln, Schweinefleisch etc.).

## **Blei (Pb):**

Häufig vorkommendes Schwermetall. Bleistaub, Bleidampf, Bleiverbindungen sind giftig. Besonders Ungeborene und Kleinkinder sind gefährdet.

## **Cadmium (Cd):**

Schwermetall, das bei der Zinkgewinnung anfällt und bei erhöhter Zufuhr für Menschen, Tiere und Pflanzen giftig ist.

## **Chrom (Cr):**

Schwermetall, kommt in vielen Mineralien vor und ist für lebende Organismen in sehr geringen Konzentrationen lebensnotwendig. Der Wert oder die Schädlichkeit von Chrom für den Menschen hängt von der Oxidationsstufe ab. Cr (VI)-Verbindungen sind bis zu 1000mal giftiger als die häufigeren Cr (III)-Verbindungen.

## **Chlorwasserstoff (HCl):**

Farbloses Gas mit stechendem Geruch, die wässrige Lösung ist die Salzsäure. Wirkt ätzend auf Atemwege. HCl entsteht bei der Müllverbrennung aus chlorhaltigen Stoffen wie z. B. PVC.

## **Elution:**

Auswaschung, Auslaugung bestimmter Stoffe aus festen Materialien (z. B. aus Schlacken von Müllverbrennungsanlagen).

## **Energiemix:**

die Kombination verschiedener Energiequellen (Kohle, Erdöl, Erdgas, Wasser, Kernenergie) zur Stromversorgung.

## **Erdalkalimetalle:**

Die chemisch zweiwertigen Elemente Beryllium, Magnesium, Calcium, Strontium, Barium, Radium.

## **Fluorwasserstoff (HF):**

Gas mit stechendem Geruch. Die wässrige Lösung ist die Flusssäure. HF ist stark ätzend und sehr giftig.

## **inert:**

Material, das reaktionsträge ist.

## **Kilojoule (kJ):**

Physikalische Einheit der Arbeit oder einer Wärmemenge; 1 Kilojoule entspricht 0,2388 Kilokalorien.

## **Kohlenmonoxid (CO):**

Entsteht bei unvollständiger Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen. Hauptemittent ist der Straßenverkehr. Eingeatmetes CO blockiert die Sauerstoffaufnahme im Blut, verursacht Kopfschmerzen, Schwindel und bei höheren Konzentrationen sogar den Tod.



### **KrW-/AbfG:**

Das **Kreislaufwirtschafts-** und **Abfallgesetz** des Bundes von 1996 berücksichtigt die Vorgaben der Europäischen Gemeinschaft und ist darauf ausgelegt, in Deutschland den Stoffkreislauf zu fördern.

### **Kupfer (Cu):**

Schwermetall, Halbedelmetall. Für den Menschen ist Cu in Spuren lebenswichtig, für niedere Pflanzen, wie Algen und Bakterien stellt es ein starkes Gift dar.

### **LAGA:**

In der **Länderarbeitsgemeinschaft Abfall** arbeiten die obersten Landesbehörden zusammen, um einen möglichst landeseinheitlichen Vollzug des Abfallrechts zu gewährleisten.

### **MAK-Wert:**

Heißt **Maximale-Arbeitsplatz-Konzentration**; Grenzwerte für gefährliche Arbeitsstoffe; die MAK-Liste beinhaltet 500 Stoffe mit deren Grenzwerten für die Raumluft am Arbeitsplatz. Die Liste wird jährlich von der Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft herausgegeben.

### **MIK-Wert:**

Heißt **Maximale-Immissions-Konzentrationen**; werden von der VDI-Kommission „Reinhaltung der Luft“ erarbeitet und sollen vor nachteiligen Wirkungen schützen. Darunter versteht man die Wirkungen von Schadstoffen, die zu Krankheiten oder Leistungsbeeinträchtigung führen.

### **Nickel (Ni):**

Metall; Nickelverbindungen sind teilweise stark toxisch sowie krebserregend und können Allergien hervorrufen.

### **Organische Gase:**

Bei Raumtemperatur gasförmige organische Verbindungen (z. B. Methan).

### **Polychlorierte Biphenyle (PCB):**

Gehören zu den chlorierten Kohlenwasserstoffen und sind sehr giftig. PCB sind sehr stabil, nicht brennbar und oxidieren nicht. Sie wurden als Weichmacher in Kunststoffen sowie in Kondensatoren, Farben und Lacken verwendet. PCB reichern sich in der Nahrungskette an und können zu Leber-, Milz- und Nierenschäden führen.

### **Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK):**

Gruppe von ringförmigen Kohlenwasserstoff-Verbindungen, z. B. Benzopyren. PAK sind vor allem im Teer, im Erdöl und in Kohle enthalten. Sie entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von organischem Material. Viele PAK sind krebserregend.

### **Quecksilber (Hg):**

Flüssiges Schwermetall; das Einatmen von Hg-Dampf ist gesundheitsschädlich. MAK-Wert: 0,1 mg/m<sup>3</sup>. Besonders gefährlich sind organische Hg-Verbindungen. Die Aufnahme solcher Verbindungen über die Nahrungskette kann zu Erschöpfung, Depressionen, Augenschäden und Sinnestäuschungen führen. Hg wird in der Elektronik, in der chemischen Industrie, bei der Produktion von Batterien sowie in der Zahnmedizin (Amalgam) verwendet.

### **Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>):**

Ein farbloses, stechend riechendes Gas. Bildet schweflige Säure in Verbindung mit Wasser, diese wirkt auf Menschen durch Reizung und Schädigung der Schleimhäute. Konzentrationen ab 400 – 500 ppm SO<sub>2</sub> sind kurzfristig bei Einatmung lebensbedrohlich. SO<sub>2</sub>-Emissionen werden gemeinsam mit Stickoxiden als Hauptverursacher des sauren Regens und des Waldsterbens angesehen.

### **Stickoxide (NO<sub>x</sub>):**

Typischer Vertreter sind Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>). Bei Verbrennungsvorgängen wird vor allem NO emittiert, das in der Luft zu dem gesundheitsschädlichen NO<sub>2</sub> reagiert. Aus NO<sub>2</sub> kann sich Salpetersäure bilden, die an der Bildung des sauren Regens beteiligt ist.

### **TA Siedlungsabfall (TASi) und TA Abfall:**

Die **Technische Anleitung Siedlungsabfall** und **Abfall** stellen Verwaltungsvorschriften des Bundes dar, in denen die bundeseinheitlichen Anforderungen an die Entsorgung von Siedlungsabfällen und von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen nach dem Stand der Technik festgelegt sind.

### **Treibhauseffekt:**

Bezeichnet den natürlichen Effekt der Erwärmung der bodennahen Luftschicht, der dadurch zustande kommt, dass die abgestrahlte Wärme in der Atmosphäre z. T. absorbiert und wiederum zum Erdboden reflektiert wird. Die Anreicherung der



Atmosphäre mit strahlungsabsorbierenden Gasen ist Hauptursache der Verstärkung des Treibhauseffektes.

**Treibhausgase:**

Gase, die Wärmestrahlung absorbieren. Wichtige Vertreter sind: Kohlendioxid, Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Methan.

**TRK-Wert:**

Technische **R**icht**k**onzentration. Darunter versteht man diejenige Konzentration eines Gefahrstoffes als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft, die als Anhaltspunkt für die zu treffenden Schutzmaßnahmen und die messtechnische Überwachung am Arbeitsplatz heranzuziehen ist. TRK-Werte werden für krebserzeugende und erbgutverändernde Gefahrstoffe aufgestellt.

**Zeolithe:**

Gruppe feldspatähnlicher, meist farbloser Minerale. Ihre Alkali- und Erdalkalitionen lassen sich gegen andere Kationen austauschen.

**Zink (Zn):**

Ein für Mensch, Tier und Pflanze lebensnotwendiges Schwermetall. Allerdings ist das Einatmen von Zinkoxiddämpfen gesundheitsschädlich. Zink-Chromat gilt als krebserzeugend und wird in der MAK-Werte-Liste geführt. ■

*Abbildung Titelseite: „Müllheizkraftwerk Burgkirchen“.*





„Eine Teilaufgabe der Broschüre ist ein interaktives Lernspiel über die thermische Abfallbehandlung in Form einer CD beigefügt.

Dieses CD-Lernspiel mit dem Titel „Go Waste – Wo bleibt der Müll?“ kann auch über den Bestellservice des StMLU unter der Internet-Adresse:  
*<http://www.umweltministerium.bayern.de/aktuell/infothek/infothek.htm>* bezogen werden.“