

Siegfried Nowak

Umweltrechtliche Bestimmungen und moderne Technologien einer integrierten Abfallwirtschaft*

Die Abfallwirtschaft ist heute ein bedeutender Wirtschaftszweig in jeder Industriegesellschaft, der durch moderne Technologien, vielfältige Gesetze, Verordnungen und Regelungen sowie ökologische und ökonomische Gesetze geprägt ist.

Die Vielfalt verfahrenstechnischer Lösungen der Abfallbehandlung sowie die selbst für einen Fachmann schwer überschaubaren bundeseinheitlichen wie landesrechtlichen Regelungen für die Abfallwirtschaft erlauben mir hier nur die Darlegung einiger wesentlicher Verwertungs- und Entsorgungstechnologien und der diesen zugrunde liegenden Gesetze, Grenzwerte und ökologische Erfordernisse.

Grundlage und Zielstellung einer modernen Abfallwirtschaft ist die Erarbeitung von Abfallwirtschaftskonzepten und Abfallbilanzen für Städte, Gemeinden, Regionen oder betriebliche Einrichtungen, die die abfallwirtschaftlichen Grundsätze und Zielrichtungen für die Vermeidung, Verwertung und die Beseitigung von Siedlungs- und Industrieabfällen sowie Sonderabfällen enthalten.

Die Abfallbilanz stellt Art, Menge und Verbleib aller überwachungsbedürftigen Abfälle für das vergangene Jahr dar. Diese ist jeweils bis zum 1. April des vergangenen Jahres zu erstellen.

Das **Abfallwirtschaftskonzept** enthält die Prognose des betrieblichen Abfallgeschehens für die nächsten 5 Jahre mit Vermeidungs-, Verwertungs- und Beseitigungsmaßnahmen für die entstehenden Abfälle.

Was sind Abfälle?

Abfälle im Sinne des Gesetzes sind bewegliche Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will oder deren geordnete Entsorgung zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit, insbesondere des Schutzes der Umwelt geboten ist.

* Vortrag im Plenum der Leibniz-Sozietät am 18. Januar 2001

Die Erstellung von Abfallwirtschaftskonzepten und Abfallbilanzen, insbesondere aber für Sonderabfälle, sind ganz wesentliche Instrumente, die Handlungsanleitungen zur Vermeidung, Verminderung, Verwertung und zur Entsorgung der kommunalen bzw. industriellen Abfälle enthalten und die zu Kostenentlastungen in der Kommune und im Betrieb führen sollen.

Es geht grundsätzlich nicht nur um eine umweltgerechte Entsorgung/Be-seitigung der Abfälle, sondern um das Vermeiden von Abfällen, um die Entwicklung abfallfreier Technologien und damit um eine effektive Ausnutzung der eingesetzten Rohstoffe. Für den Chemiker wie den Verfahrenstechniker heißt das, die Selektivität bestehender und neu zu entwickelnder Verfahren weiter zu erhöhen und den Anfall von Neben- und Abprodukten, aber insbesondere von Schadstoffen zu verringern.

Die Forderungen und Zielstellungen an moderne Verfahren heißen daher integrierter Umweltschutz. Damit ist gemeint, dass in den Innovationsprozess der Verfahrensentwicklung Umweltschutzmaßnahmen von Beginn an zu integrieren sind. Verfahren mit integriertem Umweltschutz sind für die chemische Industrie nicht neu und sollen bei möglichst geringem Rohstoff- und Energieeinsatz möglichst wenig Abfall zur Folge haben, um einen fühlbaren Beitrag zur Umweltentlastung zu leisten.

Wie neueste Untersuchungen in der Chemie Ingenieur Technik zeigen, entstehen der chemischen Industrie durch mangelnde Berücksichtigung ökologischer Aspekte bei der Planung von Anlagen bis zu 15% der Gesamtkosten. Das entspricht volkswirtschaftlichen Kosten in Höhe von 100–300 Mrd. DM. Demgegenüber wird mit Kosteneinsparungen von etwa 40 Mrd. DM gerechnet, wenn von einem integrierten Umweltschutz ausgegangen wird. Ungeachtet dessen betrachten viele Einrichtungen und Betriebe einen weiterführenden Umweltschutz ausschließlich als Kostenfaktor, weil Überlegungen des integrierten Umweltschutzes nicht von vornherein in die Entwicklung einbezogen wurden und die Mehrzahl der Umweltschutzaktivitäten vor allem am Ende des Produktionsprozesses stattfinden, wie z.B. Maßnahmen zur Reinhaltung der Luft, des Wassers oder des Bodens. Für diese als additiven Umweltschutz oder „end of pipe“ bezeichneten Maßnahmen, wurden z.B. in der chemischen Industrie im Jahre 1995 etwa 6,1 Mrd. DM ausgegeben.

Die Entwicklung neuer, leistungsfähiger Verfahren mit integriertem Umweltschutz muss daher dem folgenden Primat folgen:

- der Senkung des Rohstoff- und Energieeinsatzes (das gilt vor allem im Hinblick auf die knapper werdenden natürlichen Rohstoffe,
- der Vermeidung und Verminderung von Abfällen und Schadstoffen,
- der Verwertung von Abfällen im Sinne einer produktionsintegrierten Kreislaufführung.

Die Integration ökologischer Aspekte in die Produktions- und Verfahrensentwicklung ist daher eine Grundforderung für wirtschaftliches und umweltgerechtes Handeln, wobei sich ökonomische und ökologische Faktoren nicht zwangsläufig diametral gegenüberstehen müssen.

Die Forderung nach ökologischer Verträglichkeit und ökonomischer Rentabilität von Produkten und Verfahren ist daher eine Herausforderung an die Wissenschaft und Technik für die Entwicklung von schadstoffarmen und energiesparenden Verfahren und Produkten. Im Bereich der chemischen Industrie bieten sich hier vor allem biotechnologische Verfahren an, beide Zielstellungen zu vereinen. Insbesondere gilt das für die Herstellung von kleintonnagigen Produkten oder von Produkten, die über einen vielstufigen Prozess hergestellt werden müssen.

Die Erarbeitung von sogenannten Ökobilanzen für die Herstellung von Produkten und Erzeugnissen sowie Umweltverträglichkeitsprüfungen gehören daher heute für viele Betriebe und gewerbliche Einrichtungen zum festen Bestandteil unternehmerischer Tätigkeit und sind Voraussetzung für möglichst abfallfreie und schadstoffarme Technologien.

Für die Abfallwirtschaft gilt:

- *Abfallvermeidung ist wichtiger als Abfallminderung,*
- *Abfallminderung ist wichtiger als Abfallverwertung und*
- *Abfallverwertung geht vor Abfallentsorgung.*

Geringere Abfallmengen sparen knappen, nur begrenzt verfügbaren Deponieraum und Energie für Produktion, Transport und Aufbereitung der Abfälle. Aber auch aus Gründen des Umwelt- und Landschaftsschutzes sowie zur langfristigen Rohstoffersparnis und Schonung von anderen Ressourcen müssen Menge und Schadstoffgehalt der Abfälle abnehmen. Es gilt der Grundsatz, dass die Produktion der Güter, ihre Verteilung, ihr Gebrauch und ihre Entsorgung einen Wirtschaftskreislauf bilden sollen.

Es besteht die vorrangige Grundpflicht der Abfallerzeuger und Abfallbesitzer zur Verwertung der Abfälle, was ein wesentlicher Bestandteil des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist.

Das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz enthält Grundsätze und Regelungen für den Erzeuger wie den Besitzer von Abfällen wie z.B.

- die vorrangige Pflicht zur Verwertung der Abfälle,
- die Gleichstellung zwischen stofflicher und energetischer Verwertung, wobei die energetische Verwertung nur dann gerechtfertigt ist, wenn der Heizwert mindestens 1100 kJ/kg und der Feuerungswirkungsgrad mindestens 75% beträgt,
- die Pflicht zur Erstellung von Abfallbilanzen und Abfallwirtschaftskonzepten.

Darüber hinaus beinhaltet und formuliert das Kreislaufwirtschaftskonzept auch die Produktverantwortung wie z.B.

- die Forderung nach mehrfacher Verwendbarkeit und technischer Langlebigkeit der Produkte,
- die Rücknahme nach Gebrauch wie die nachfolgende schadlose Verwertung bzw. Beseitigung.

Gefordert wird auch der vorrangige Einsatz von verwertbaren Abfällen oder sekundären Rohstoffen für die Herstellung von Produkten und Erzeugnissen sowie die Kennzeichnung der Erzeugnisse wie z.B. Plasteteile nach Art und Menge.

Ein ganz wesentlicher Bestandteil der Kreislaufwirtschaft sind die etablierten Sammelsysteme. Um dem Verwertungsgebot des Abfallgesetzes Rechnung zu tragen, sind durch den Gesetzgeber Maßnahmen zur Kennzeichnungspflicht durch den Produzenten und die Rücknahme und Pfandpflicht durch den Produzenten bzw. den Vertrieb erlassen worden. Bekannt sind die Mehrwegsysteme für Flaschen und andere Behältnisse und die Kennzeichnungspflicht für Getränkeverpackungen als „Einweg- oder Mehrweg“-Produkte. Mit der Kennzeichnung soll erreicht werden, dass weitgehend sortenreine Abfallmengen entstehen, die getrennt gesammelt werden können und sich dann besser für die Verwertung eignen. Vielfältige Stoffgemische sind selten gut verwertbar. Die spätere Trennung vermischter gesammelter Abfälle in Papier, Glas, Holz, Schrott, Kunststoff u.a. ist sehr personalintensiv und mit hohen Kosten verbunden. Jede Vermischung von Abfall ist daher zu vermeiden. Insbeson-

dere gilt das für Abfälle mit einem besonderen Schadstoffgehalt (Sonderabfälle), die von dem übrigen Abfallaufkommen möglichst ferngehalten werden sollen und für deren Handhabung und Entsorgung besondere Verordnungen und Gesetze gelten. Der Forderung der TA Siedlungsabfall, Abfälle möglichst zu vermeiden bzw. stoffwirtschaftlich oder energetisch zu nutzen, müssen auch die etablierten Systeme für die Sammlung, den Transport, der Behandlung wie der Deponierung der Abfälle entsprechen und angepasst werden.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine stoffliche oder energetische Verwertung der Abfälle ist daher die getrennte Sammlung, d.h. dass möglichst viele Abfallfraktionen in einer verwertbaren Form bereitgestellt werden, sodass nachfolgende aufwendige und kostenintensive Trennungen entfallen. Jede Vermischung erschwert und verteuert die Entsorgung.

Um die bis heute noch dominierende Trennung per Hand durch moderne, automatisch arbeitende Trennverfahren abzulösen, wurden große Anstrengungen unternommen, die aber bisher wenig erfolgreich verliefen.

Eine perspektivreiche Neuentwicklung für eine voll automatisch arbeitende Sortier- und Aufbereitungsanlage für Leichtverpackungen wurde auf der Expo in Hannover vorgestellt. Entsprechend einer vorliegenden Information in der Chemie Ingenieur Technik vom Dezember 2000 soll es sich hierbei um die wahrscheinlich erste vollautomatisch arbeitende Sortieranlage in der Welt handeln, die im Vergleich mit den bisher angewandten Methoden zu erheblichen Kosteneinsparungen führen soll.

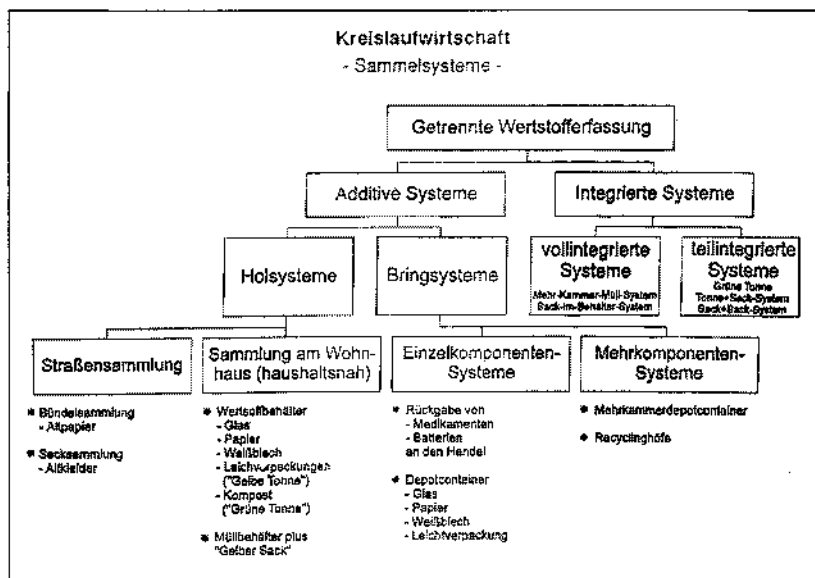
Das sogenannte SORTEC-Verfahren besteht aus drei Verfahrensschritten wie

- der trockenmechanischen Vorsortierung,
- einer nassmechanischen Aufbereitung und
- der sogenannten Kunststoffveredelung.

Durch die Kombination dieser Verfahrensschritte wird aus unterschiedlichem Verpackungsmaterial weitgehend sortenreines Polyethylen, Polystyrol und eine Polyolefinfraktion gewonnen, sodass diese werkstofflich oder rohstofflich genutzt werden können.

Die Verwertung der Abfälle wird in hohem Maße von den etablierten **Sammlsystemen** beeinflusst, welche Systeme einer getrennten Sammlung bzw. Wertstofffassung existieren, zeigt die Abbildung 1.

Abbildung 1



Besondere Bedeutung besitzen die sogenannten haushaltnahen Holsysteme mit einer weitgehenden getrennten Sammlung des Haushaltsmülls, wie auch die von der Hausmüllabfuhr unabhängigen Containersysteme für die verschiedensten Abfallstoffe.

Interessante Zahlen über das gegenwärtige und künftige Abfallgeschehen im Land Brandenburg enthält der neue Abfallwirtschaftsplan. Dem Abfallwirtschaftsplan Brandenburgs zufolge soll sich die zu beseitigende Menge der Siedlungsabfälle von 1,9 Mio t im Jahre 1999 auf 1,33 Mio t im Jahre 2010 reduzieren. Bedeutsam ist, dass die zu deponierende Menge von 1,2 Mio t im Jahre 1999 auf 0,5–0,8 Mio t im Jahre 2010 sinken soll.

Die wesentlichsten Maßnahmen im neuen Abfallwirtschaftskonzept Brandenburgs sind

- Ressourcenschonung durch Abfallvermeidung und Schadstoffreduzierung,
- Reduzierung der zu beseitigenden Abfallmengen bis zum Jahre 2010 auf 60% im Vergleich zu 1999 durch zunehmende Kreislaufführung und hochwertige Verwertungsmöglichkeiten,

- Reduzierung der zur Deponierung verbleibenden Abfälle um etwa 50%.

Durch abfallbewusstes Verhalten der Bürger und des Gewerbes und die zunehmende Getrennthaltung von Abfällen, sind die zu deponierenden Abfälle stark zurück gegangen. Wurden noch 1995 2,5 Mio t Siedlungsabfall deponiert, waren es 1999 nur noch 1,2 Mio t. Der Hausmüll ist von 303 kg pro Einwohner im Jahre 1990 auf 167 kg im Jahre 1999 gesunken. Im selben Zeitraum stieg die Menge der in den Haushalten getrennt erfassten Wertstoffe von 113 kg je Einwohner auf 192 kg pro Jahr.

Mit der zunehmenden Getrennthaltung von Abfällen und den daraus resultierenden Verwertungspotenzialen stieg auch die Zahl der Recyclinganlagen stark an. So gibt es heute in Brandenburg 500 ortsfeste Anlagen zur Abfallbehandlung und -verwertung von Siedlungsabfällen. 1993 waren es erst 43.

Darüber hinaus wurden bedeutende Fortschritte bei der Deponierung von Abfällen erreicht. 1989 wurden noch 2000 Standorte für die kommunale Abfallentsorgung genutzt, die jedoch keinerlei modernen Umweltstandards entsprachen. Viele Standorte wurden geschlossen. Heute werden noch 34 Deponien genutzt, von denen in 30 Jahren etwa 25–30 geschlossen werden sollen.

Eine Darstellung des Aufkommens an Sonderabfällen, d.h. besonders überwachungspflichtiger Abfälle und der Entsorgungssituation im Land Brandenburg liegt mir nur aus dem Jahre 1992 vor. Die Situation zeigt aber, dass aus Berlin mehr Sonderabfälle (322.000 t) entsorgt als eigene Sonderabfälle (ca. 216.000 t) erzeugt wurden. Eine Zusammenarbeit bei der Organisation und beim Aufbau einer umweltverträglichen Verwertungs- und Entsorgungsinfrastruktur ist somit dringend geboten.

Durch das abgestimmte gemeinsame Abfallwirtschaftskonzept der beiden Länder wird auch unterstrichen, das diese Region als ein Entsorgungsraum betrachtet wird und werden muß.

Recycling von Abfällen und Abprodukten

In einem relativ großen Umfang wird in der Bundesrepublik die Recyclisierung von Sekundärprodukten betrieben. Markante Beispiele sind die Wiederverwendung von Altkunststoffen, Papier, Glas, Schrott u.a. Materialien. Insbesondere die werkstoffliche Verwertung von gebrauchten Plastmaterialien

wird durch mechanische Aufbereitung zur Herstellung von Produkten und neuen Gegenständen, z.B. Gartenbänken, Zaunpfählen u.a. genutzt, für Erzeugnisse, die die geforderten Gebrauchseigenschaften vollständig erfüllen, sodass deren Herstellung aus Primärprodukten entfallen kann. Die vor Jahren, insbesondere während der Erdölkrise forcierte Entwicklung einer rohstofflichen Verwertung der Plastabfälle und Altplaste, betraf vor allem ihre Hydrierung bzw. Vergasung zu Flüssigprodukten, zu Ölen oder die Herstellung von Synthesegas für die Synthese von Methanol oder höheren Kohlenwasserstoffen nach dem Prinzip der Fischer-Tropsch-Synthese. Insbesondere hat sich die Staubdruckvergasung in der Schwarzen Pumpe in ganz hervorragender Weise für die Entsorgung von Plastabfällen sowie anderer organischer Abfallstoffe zu Synthesegas und dessen nachfolgender Umsetzung zu Methanol, einem damals wie heute interessanten Ausgangsprodukt für vielfältige Anwendungen erwiesen. Die Hochtemperaturvergasung gehört heute aus meiner Sicht zu den perspektivreichsten Verfahren der Abfallverwertung .

Nach neuesten Informationen wird sich das Rohstoffverwertungszentrum (SVZ) Schwarze Pumpe auch auf dem Markt zur Verarbeitung des in Kritik geratenen Tiermehls und von Tierfett etablieren. So soll ein erster Großauftrag für die Verarbeitung von 10.000 t Tierfett zu Methanol von der Tierkörperverwertungsanlage Genthin vorliegen. Darüber hinaus sollen die Kapazitäten für die Verarbeitung von Tierfett und Tiermehl schrittweise auf 120.000 t/Jahr ausgebaut werden.

Die **Recyclisierung** von Papier hat in Deutschland eine lange Tradition. Erwähnen möchte ich hier auch das SERO-System der DDR, das sich allerdings nicht nur auf Papier bezogen hat und das aus angeblich wirtschaftlichen Gesichtspunkten keine Fortführung erfahren hat. Ungeachtet dessen gibt es Hinweise, dass eine Wiedereinführung sinnvoll und ökonomisch sein soll, da hier die nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz angestrebte sortenreine Erfassung und die hohe Verwertungsrate der Abfälle, wichtige Bestandteile des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, am besten erfüllt sind.

Die Einsammelquote für Papier und Pappe ist im Laufe der Jahre ständig gestiegen. Heute liegt der Grad der Recyclisierung bei etwa 60%. Je höher allerdings die Erfassungsquote und die Mehrfachnutzung des Altpapiers ist, um so stärker sinkt die daraus hergestellte Papierqualität. Die mechanischen

Eigenschaften verschlechtern sich und die organischen wie anorganischen Schadstoffe reichern sich im Recyclingpapier zusätzlich stark an.

Weitere Beispiele für eine Wiederverwendung von Abprodukten ist die Wiederaufbereitung von Altöl durch Raffination, der Klärschlammeinsatz in der Landwirtschaft, die Kompostierung von organischen Abfällen sowie die Rückführung von Glas und dessen Wiederverwendung, entweder als Mehrwegflasche oder als Ausgangsprodukt für Finalerzeugnisse, sowie die vielfältigen Bemühungen zur Verwertung von Inhaltsstoffen von Fernsehern, Kühlschränken und Altautos. So existieren z.B. in Brandenburg 78 Anlagen zur Verwertung von Altautos.

Ein Problem, das auch von seiner Größenordnung große Beachtung verdient, ist die Verwertung der in großen Mengen anfallenden Altreifen. Für Altreifen haben sich eine ganze Reihe von Verwertungsmöglichkeiten empfohlen (s. Abb. 2). So werden etwa 20% für die Runderneuerung eingesetzt. In die stoffliche Wiederverwertung durch thermische Behandlungsverfahren, wie z.B. die Pyrolyse, gelangen etwa 15%. 40% werden energetisch z.B. für die Herstellung von Zement genutzt, aber ein nicht unbedeutender Teil (etwa 20%) wird exportiert (s. Abb. 2).

Ungeachtet dieser Bemühungen durch Recyclisierung weniger Müll zu produzieren und das Verwertungspotential von Abfällen zu erhöhen, dominiert in unserer Gesellschaft aus angeblich wirtschaftlichen Gesichtspunkten der Produktion wie des Konsums die Einwegnutzung von Produkten und Erzeugnissen. So hat sich insbesondere nach der Wende auch im Osten Deutsch-

Abbildung 2: Die Verwertung von Altreifen

Sammlung und Erfassung	Stoffliche Verwertung
Weiterverwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanische Aufbereitung • Pyrolyse • Hydrierung
<ul style="list-style-type: none"> • Export • Runderneuerung • andere Einsatzbereiche 	Energetische Verwertung
	<ul style="list-style-type: none"> • Reifenheizwerk • Zementherstellung

lands eine Wegwerfideologie breit gemacht. Bei einer durchdachteren Gestaltung von Produkten und Erzeugnissen und einer bewussten Anwendung von ökonomischen Hebeln sollte es doch möglich sein, eine Reparatur oder den Ersatz von bestimmten Bausteinen im Vergleich zum Kauf eines kompletten Neugerätes aus Umwelt- und ökonomischen Gesichtspunkten zu favorisieren. Mehr reparieren als wegwerfen sollte und könnte mit dazu beitragen, wertvolle Rohstoffe zu sparen und die Abfallmengen stark zu verringern.

Biologisch-mechanische Verfahren, wie die Kompostierung oder die aerobe wie anaerobe Vergärungstechnologie, leisten heute einen großen Beitrag zur Entsorgung von organischen Abprodukten (Küchen- und Gartenabfälle, Abfälle aus der Landwirtschaft, dem Handel und Marktabfälle, die zur Gewinnung von hochwertigem Kompost oder auch Biogas eingesetzt werden. Für diese Anlagen gibt es strenge Richtlinien und Qualitätskriterien für die Kompostierung und die Anwendung des Kompostes als Düngemittel hinsichtlich Schwermetallgehalt und organischen Inhaltsstoffen, wie z.B. Dioxine oder PAK, sowie für das Betreiben von solchen Kompostierungsanlagen hinsichtlich Geruchsbelästigung, des Abwassers und des Transportes des Kompostes.

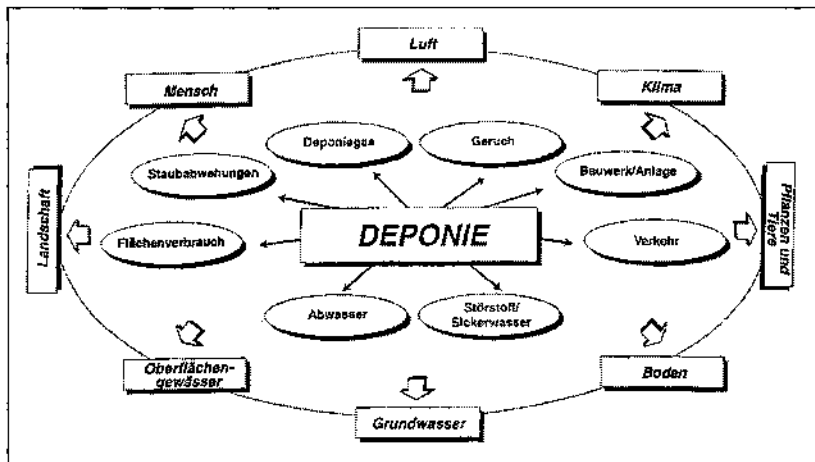
Biologische Verfahrensvarianten werden auch zum Abbau von organischen Schadstoffen in kontaminierten Böden on-site oder in situ eingesetzt. Auf die Vielfalt der Bedingungen, die technologischen Varianten wie die biologisch unterschiedliche Abbaubarkeit der verschiedenen Organika soll hier nicht eingegangen werden. Bekannt ist auch, dass der Sanierungsverlauf sehr langsam verläuft und bestimmte Kohlenwasserstoffverbindungen wie Pestizide, chlorierte Kohlenwasserstoffe, polycyclische Aromaten und Schwermetalle sich einer Entsorgung weitgehend entziehen und zu einer Belastung des Bodens und des Grundwassers führen.

Zur Deponierung von Abfällen

In den letzten 20–30 Jahren war die einfachste Art Abfälle zu entsorgen deren Deponierung. Obwohl strenge Anforderungen an die Ablagerung von Abfällen auf Deponien existieren, die in den letzten Jahren zudem erheblich verschärft und erweitert wurden, sind eine Fülle von Altlasten und Mülldeponien entstanden, ganz zu schweigen von den militärischen Altlasten und wilden Ablagerungen, die nicht nur die Umwelt stark belasten und für deren Beseitigung erhebliche finanzielle und technische Mittel aufgewendet werden müssen.

Welche Umweltauswirkungen Deponien auf die Umwelt und die Menschen haben, zeigt die Abb. 3. Um Gefährdungen der Luft, des Grundwassers, des Bodens und letztendlich des Menschen auszuschließen, werden an die Standortsuche und Sicherung der Deponien hohe Anforderungen hinsichtlich Bodenabdichtung und Abdeckung der Oberfläche gestellt. In Abhängigkeit vom zu deponierenden Abfall werden darüber hinaus die Deponien in die Klassen 1 und 2 eingestuft, für die erweiterte Bestimmungen hinsichtlich des Gehaltes an organischem Anteil gelten (s. Abb.3).

Abbildung 3: Deponierung. Umweltauswirkungen von Deponien



Ein ganz aktuelles Beispiel, welche Gefahren von einer ungesicherten Deponie ausgehen können, zeigt aus dem Berliner Raum der Wannsee-Müllberg, eine Müllhalde auf der rund 32 Mio. Kubikmeter Abfälle lagern, die hier zwischen 1954 und 1982 abgelagert wurden, die eine Höhe von 90 Meter besitzt und aus der tagtäglich 300.000 Liter giftiges Abwasser in die Erde sickert und den Griebnitzsee wie den Wannsee mit Chloriden, Aromaten und Schwermetallen verseuchen. Der seit 1982 geschlossene Abfallberg ist nicht versiegelt, sodass heute dringend das Grundwasser behandelt werden muss, um die genannten Umweltgefährdungen auszuschließen.

An diesem Beispiel wird deutlich, dass trotz klarer Regelungen und Verantwortlichkeiten über die sachgerechte und ökologische Entsorgung von Abfällen, Entscheidungen aus finanziellen Gründen nicht oder zeitlich stark verzögert getroffen werden.

Thermische Abfallbehandlungsanlagen

Für die Entsorgung der Restabfälle kommen im wesentlichen nur zwei Wege infrage, das ist einmal die thermische Behandlung mit Verwertung der entstehenden Reaktionsprodukte oder die Ablagerung des Verbrennungsrückstandes auf einer Deponie.

Bevor ich auf einige ausgewählte thermische Abfallbehandlungsverfahren und ökologische Anforderungen an diese näher eingehe, nachstehend einige Bemerkungen zur ständig wiederkehrenden Diskussion für und wider Verbrennungsanlagen und die alternative Deponie. Die Diskussion wird in der Öffentlichkeit hoch emotional und z.T. mit wenig abfallwirtschaftlicher Sachkenntnis geführt, sodass eine Versachlichung bei breiten Bevölkerungsschichten nicht erreicht wird, weil dann eine Entscheidung für eine Verbrennungsanlage oder eine Deponie gefällt werden müsste. Aber in einem Punkt sind sich die Kritiker der Abfallwirtschaft einig: sie wollen weder eine Deponie noch eine Verbrennungsanlage, vor allem keinen Standort in ihrer Nähe für eines von beiden. Sie wollen aber andererseits selbst nicht auf die weitere Produktion von Abfällen verzichten. Es ist wie mit dem Autoverkehr, alles stöhnt und beklagt sich über die Staus und mangelnde Parkmöglichkeiten, aber fast keiner will auf das Auto verzichten.

Vor diesem Dilemma stehen heute viele Kommunen und Entsorger. Eine Grundvoraussetzung für die Akzeptanz solcher abfallwirtschaftlicher Maßnahmen in der Bevölkerung ist die ehrliche und klare Aussage über Eignung und die konkreten Auswirkungen der geplanten Entsorgungswege auf das Umfeld und die breite Einbeziehung der Bevölkerung .

Den größten Beitrag zur Entsorgung von Abfällen leisten heute thermische Verfahren. Die Errichtung und der Betrieb von Abfallentsorgungsanlagen für die Umsetzung/Behandlung der verschiedensten Abfälle stellt hohe technische und ökologische Anforderungen an diese Verfahren. Vielfältige Gesetze, Verordnungen und Standards sind einzuhalten, um die geforderte

Umweltverträglichkeit der entstehenden gasförmigen, flüssigen und oder festen Reaktionsprodukte zu garantieren. Alle Abfallentsorgungsanlagen unterliegen der Überwachung durch die zuständigen Behörden. Das betrifft die thermischen Verfahren, Deponien, die Kompostierung wie auch alle anderen Anlagen. Abfallentsorgungsanlagen dürfen nur mit abfallrechtlicher Zulassung errichtet und betrieben werden.

Thermische Anlagen werden vor allem durch die Rahmenbedingungen der TA Luft und der 17. BiMSCH und der darin festgelegten Emissions- und Grenzwerte in ihrer technologischen Gestaltung und Leistungsfähigkeit beeinflusst, die vor allem auf die Entwicklung und die Auslegung der den Verbrennungsanlagen nachgeschalteten Gasreinigungsanlagen großen Einfluss haben. Darüber hinaus sind Vorschriften für die Ablagerung von festen Verbrennungsresten und Schlacken für die Ablagerung auf Deponien zu beachten.

Die 17. Bundesimmissionschutzverordnung (BImSchV) enthält die Emissionsgrenzwerte für die verschiedensten Schadstoffe (s. Abb. 4), die von den Erbauern und Betreibern von Abfallbehandlungsverfahren eingehalten werden müssen.

Hohe Anlagensicherheit, strenge Genehmigungsverfahren und Planfeststellungsverfahren sowie Umweltverträglichkeitsprüfungen sind Grundvoraussetzungen für den Bau und den Betrieb von allen Entsorgungsanlagen. Sonderbestimmungen gelten darüber hinaus für die Entsorgung von Sonderabfällen. Welche Vielfalt an Gesetzen, Verordnungen und Standards für die Errichtung und den Betrieb von Abfallbehandlungsanlagen oder der Abfallstoffe zu beachten und einzuhalten sind, zeigt Abb. 5, die die wesentlichsten Grenz- und Richtwerte sowohl für die Luft, das Wasser, den Boden und weitere einzuhaltende Bestimmungen enthält.

Erwähnung verdient auch in diesem Zusammenhang die UNO-Resolution zum Verbot der Herstellung und Anwendung von schwer abbaubaren chemischen Verbindungen, die allerdings erst in 5 Jahren Gesetzeskraft erhalten soll.

Die Fülle der bundeseinheitlichen Gesetze und Verordnungen, die für verschiedene Abfallarten und Anwendungen durch landesspezifische Gesetze ergänzt und erweitert werden, lässt sich im Rahmen dieser Darlegungen nicht annähernd und übersichtlich darstellen oder gar einer ökologisch-ökonomischen Bewertung unterziehen.

Abbildung 4: Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV

Schadstoffe mg/Nm ³	Inhaltsstoffe in ungereinigten Rauchgasen (Bsp. Rost)	Grenzwerte lt. 17 BIm-SchV	in Zukunft erreichbar
Gesamt-Staub	6.000	10	1-3
Schwefeloxide (SO ₂)	300	50	10-30
Anorganische Chlorverb.	1.000	10	3-5
Anorganische Fluorverb.	10	1	0,1
Kohlenmonoxid (CO)		50	10-30
Gesamt-Kohlenstoff		10	gegen 0
Stickoxide (NO _x)	300	200	10-50
Schwermetalle:			
- Cadmium und seine Verbindungen		0,05	0,05
- Quecksilber und seine Verbindungen		0,05	0,05
- Übrige insgesamt		0,5	
PCDD/PCDF ng/Nm ³			
Toxizitäts-Äquivalent		0,1	0,1

Die Einhaltung bzw. Unterschreitung der Grenzwerte der 17. BImSchV kann mit den vorgeschlagenen Rauchgasreinigungsanlagen garantiert werden.

Erwähnung verdient, dass zwischen 1989 und 1994 zum Immissionsschutz 14, zum Bodenschutz 6 und zum allgemeinen Umweltrecht 6 neue Gesetze verabschiedet wurden, was für den schnellen dynamischen Wandel der Abfallwirtschaft typisch ist.

Aus der Fülle der Gesetze sei hier beispielhaft auf die Verwendung von industriellen und kommunalen Klärschlammen und die dafür geltende Klärschlammverordnung erwähnt, die vor allem das Aufbringen des Klärschlammes auf landwirtschaftlich genutzte Böden regelt.

Abbildung 5: Umweltrechtliche Bestimmungen mit Wirkung auf Abfallentsorgungsanlagen

Abfallrechtliche Bestimmungen	Wasserrechtliche Bestimmungen	Immissionsrechtliche Bestimmungen	Bodenrechtliche Bestimmungen	Arbeitsrechtliche Bestimmungen	Sonstige Bestimmungen
Abfallgesetze (Bund u. Länder)	Wasserhaushaltsgesetz	Bundesimmissionschutzgesetz	Bundesnaturschutzgesetz	Gewerbeordnung	UVP-Gesetz
AbfttauftrV	Landeswassergesetz	TA-Luft	Baugesetzbuch	Arbeitsstättenverordnung	Umwelthaftungsgesetz
AbfBestV					Umweltrahmengesetz
AbfRestÜberwV	Abwasserabgabengesetz	TA-Lärm	Baunutzungsverordnung	Unfallverhütungsvorschriften	Bundesberggesetz
AbfKlärV					
Altölv					
AltautoV	Indirektleiterverord.	Abstandsregelungen	Raumordnungsgesetz	Chemikaliengesetz	Verwaltungsverfahrensgesetz
ElektronikschrottV					
Schutz des Grundwassers bei der Lagerung und Ablagerung von Abfällen	EU-Richtlinien			GefStoffV	Verordnung über die Zuständigkeit der Behörden
TA-Sonderabfall					Investitions-erleichterungsgesetz
TA-Siedlungsabfall					
EU-Richtlinien					

Die Situation auf dem Gebiet der Klärschlammbehandlung und -entsorgung ist durch einen steigenden Anfall an Klärschlamm gekennzeichnet. Die gegenwärtigen Entsorgungswege sind die Deponie und seine Verwendung als Düngemittel. Gegenwärtig werden etwa 60% deponiert und 30% werden als Dünger in der Landwirtschaft eingesetzt; 10% werden thermisch behandelt. Diese Zahlen sind jedoch regional und von Land zu Land sehr unterschiedlich.

Die Deponierung, ein bisher oft gegangener Weg, ist uneffektiv und teuer, weil einmal immer weniger Fläche für eine Deponierung zur Verfügung steht und zunehmend strengere Umweltstandards hinsichtlich der Konzentra-

tion an organischer Substanz im Klärschlamm auf Deponien die Ablagerung verteuert.

Ein sehr interessanter Weg, den Klärschlamm naturbezogen zu nutzen und zu entsorgen, ist und war seine Verwendung als Dünger in der Landwirtschaft und zur Verbesserung der Bodenstruktur. Diese Verwendung des Klärschlammes als Sekundärrohstoffdünger in der Landwirtschaft trifft allerdings ebenfalls auf Schwierigkeiten hinsichtlich seiner Zusammensetzung.

Die Klärschlammverordnung regelt das Aufbringen von Klärschlamm auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden.

Das Aufbringen von Klärschlamm auf landwirtschaftlich genutzte Böden ist verboten, wenn Schwermetalle oder chlorierte Kohlenwasserstoffe bestimmte Grenzwerte überschreiten. Die Abb. 6 enthält die Grenz- und Richtwerte, die einzuhalten sind.

Abbildung 6: Klärschlammverordnung

Das Aufbringen von Klärschlämmen auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden ist verboten, wenn die Gehalte	
an Schwermetallen mindestens einen der folgenden Werte (Milligramm je Kilogramm Schlamm-trockenmasse für	
Blei	100
Cadmium	1,5
Chrom	100
Kupfer	60
Nickel	50
Quecksilber	1
Zink	200
und für	
- polychlorierte Biphenyle (PCB) jeweils 0,2 Milligramm je Kilogramm Schlamm-trockenmasse und	
- polychlorierte Dibenzodioxine/Dibenzofurane (PCDD/PCDF) 100 Nanogramm TCDD-Toxizitätsäquivalente je Kilogramm Trockenmasse übersteigen.	

Das Aufbringen von Klärschlämmen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte Böden ist verboten, wenn bestimmte Schwermetalle wie Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber oder Zink bestimmte Grenzwerte im Schlamm-trockenrückstand übersteigen. Darüber hinaus gibt es Regelungen für den Klärschlamm-eintrag in Abhängigkeit von der Bodenstruktur, dem pH-Wert sowie jahreszeitliche Festlegungen, wann Klärschlamm generell nicht ausgebracht werden darf.

Den größten Beitrag zur Entsorgung des Klärschlammes müssen daher in Zukunft thermische Verfahren leisten.

Klassische thermische Abfallbehandlungsanlagen

Thermische Verfahren leisten zum gegenwärtigen Zeitpunkt den größten Beitrag zur Beseitigung von festen, flüssigen und gasförmigen Abprodukten. Sie sind der bevorzugte Weg für die Entsorgung von Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, Garten- und Holzabfällen, Rückständen aus der Landwirtschaft, Kompostrückständen sowie einer ganzen Reihe von Sonderabfällen wie z.B. Krankenhausabfällen, Tierkadavern und mit Sicherheit auch für das in der Kritik stehende Tiermehl.

Mit der thermischen Behandlung von Abfällen werden folgende Ziele verfolgt:

- weitgehende Zerstörung, Abtrennung und /oder Immobilisierung von Schadstoffen, die eine Ablagerung auf einer Deponie gestatten,
- erhebliche Volumen- und Mengenreduzierung von etwa 90%, was hinsichtlich knapper und teurer werdenden Deponieflächen von besonderer Bedeutung ist und
- die Nutzbarmachung der im Abfall enthaltenen Energie oder auch die Wiedergewinnung von Ausgangsprodukten für eine stoffliche Nutzung.

Zum Stand der thermischen Abfallbehandlung gehören vor allem die folgenden Verfahren:

- die Hochtemperaturverbrennung mit vielfältigen technologischen Varianten,
- plasmachemische Verfahren,
- die Pyrolyse und Verschwelung,
- die Hydrierung und Vergasung,
- sowie zahlreiche Verfahren die mit Katalysatoren arbeiten.

Diese Technologien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer konstruktiven Gestaltung, durch die angewandten Reaktionsbedingungen und der entstehenden Reaktionsprodukte (s. Abb. 7). In Abhängigkeit vom angewandten Verfahrensprinzip und den Reaktionsbedingungen entstehen sehr unterschiedliche Reaktionsprodukte. Während die Hauptreaktionsprodukte der Verbrennung CO_2 und H_2O sowie Stick- und Schwefeloxyside sind, entstehen bei der Vergasung neben niedermolekularen Kohlenwasserstoffen vor allem CO und H_2 , die als Brenn- oder Synthesegas genutzt werden können. Die Pyrolyse, die generell in Abwesenheit von Sauerstoff arbeitet, führt vor allem zu niedermolekularen Schwelgasen. Sauerstoffhaltige Reaktionsprodukte werden nur in dem Maße gebildet, wie Sauerstoff in den zu wandelnden Schadstoffen enthalten ist, so dass aufwendige Gastrennungen weitgehend entfallen können.

Für die Verbrennung haben sich eine ganze Reihe von Verfahren etabliert, die sich hinsichtlich ihrer Anlagenkonfiguration und konstruktiven Gestaltung stark unterscheiden und die auf die Umsetzung von verschiedenen Abfallstoffen spezialisiert sind.

Abbildung 7: Thermische Behandlung – Verfahren –

Verfahren	Reaktionsbedingungen	Reaktionsprodukte
Verbrennung	Temperatur > 850 °C Sauerstoffüberschuß	CO_2 , H_2O Schlacke
Entgasung (Pyrolyse)	Temperatur > 450–700 °C Sauerstoffausschluß	Schwelgase: C_nH_m , CO , H_2 , CH_4 Pyrolysekoks
Vergasung	Temperatur > 800 °C Sauerstoffmangel	Synthesegas: CO , H_2 , CH_4 , CO_2 Schlacke
Naßoxidation (bisher nur Schlämme)	Temperatur > 150–300 °C Druck 5–15 Mpa Sauerstoffzufuhr	CO_2 , H_2O , in Spuren: C_nH_m , CO mineralisierter Feststoff

Klassische Abfallverbrennungsanlagen sind vor allem

- Anlagen mit Rostfeuerung,
- der Drehrohrreaktor,
- die Wirbelschicht,
- das Schwel-Brennverfahren, eine Kombination von Schwelung mit nachfolgender Verbrennung der Schwelprodukte und
- das Thermoselectverfahren.

Alle Verfahren besitzen Vorzüge wie Schwachstellen. Das betrifft sowohl den erreichten Stand der Entwicklung und die Entsorgungssicherheit in Bezug auf die entstehenden Reaktionsprodukte.

Die bevorzugten Anwendungsbereiche der genannten Verbrennungsverfahren für die Umsetzung der verschiedensten Abfallprodukte illustriert die Abb. 8.

Der Drehrohrreaktor gehört nicht nur zu den ausgereiftesten Technologien, da sich diese Technologie seit vielen Jahren für die Herstellung von Zement bewährt hat, sondern ist auch in der Lage, eine breite Palette von

Abbildung 8: Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Verbrennungssysteme

Verbrennungssystem Abfallart	Drehrohr	Rost	Wirbelschicht	Etagenofen	Brennkammer
• Gase	+	—	+	—	++
• flüssige Abfälle (z.B. Lösemittel, belastetes Wasser, öhlhaltige Rückstände)	++	—	+	—	++
• pastöse Abfälle	++	—	+	—	—
• Schlämme (z.B. Klärschlamm)	++	—	++	++	—
• feste Abfälle					
- organisch	+	—	+	—	—
- körnig, stückig (aschereich)	+	—	++	+	—
- sperrig	+	++	—	—	—
++ = gut geeignet	+	++ = bedingt geeignet	— = nicht geeignet		

Abprodukten zu verarbeiten. In den Anfängen der Abfallbeseitigung wurde in Zementfabriken der Drehrohrreaktor auch für die Mitverbrennung von z.B. Altreifen und anderen organischen Abprodukten genutzt.

Für die Entsorgung von Hausmüll und Siedlungsabfällen oder sperrigen Gegenständen hat sich vor allem die Rostfeuerung empfohlen. Sie ist heute die bestimmende Technologie für die Müllverbrennung. Ein Prinzipschema dieser Technologie zeigt die Abb. 9. Bei der Rostfeuerung werden die Abfälle im Feuerungsraum durch ein System von beweglichen Rosten transportiert und vermischt, die in der Regel absteigend angeordnet sind. Im ersten Teil wird der Abfall getrocknet, das enthaltene Wasser wird verdampft. Im nächsten Schritt entzünden sich die leicht brennbaren Bestandteile des Abfalls. Im hinteren Rostbereich erfolgt dann der Ausbrand der Schlacke. Die Reaktionstemperaturen betragen bei der Rostfeuerung 850° – 1050°C . Anlagen werden in Nenngrößen zwischen 75.000–190.000 t gebaut und betrieben.

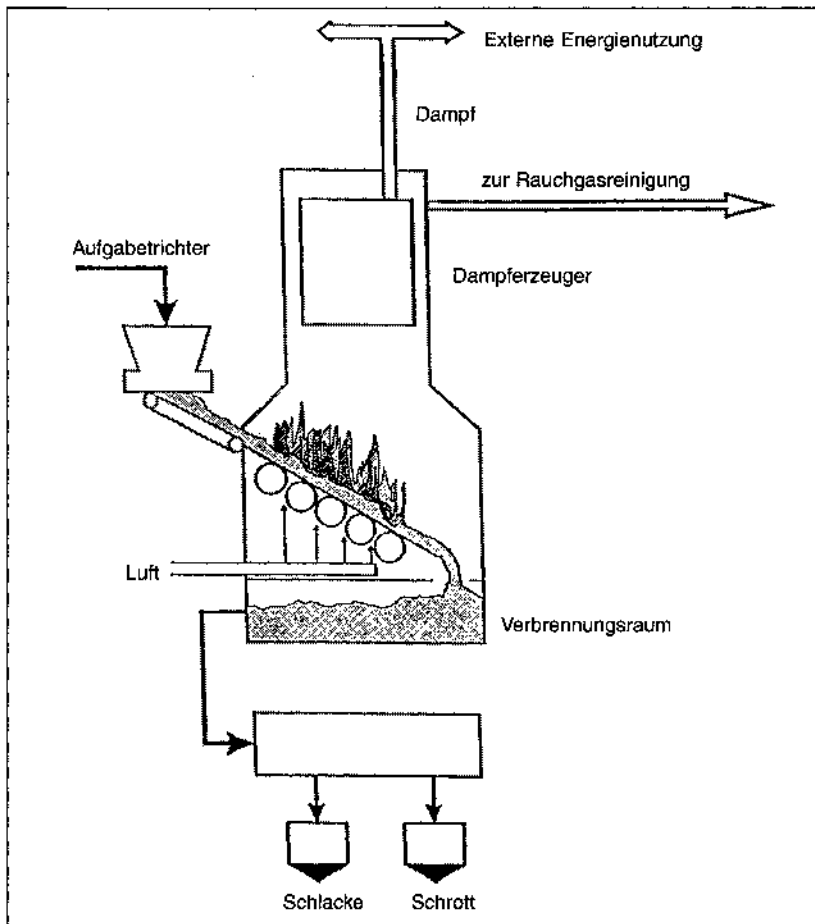
Die Wirbelschicht, eine Entwicklung der LURGI für die Vergasung der Kohle zu Synthesegas, hat sich besonders für die Umsetzung von Klärschlämmen oder pastösen Abfällen bewährt und spielt bei der Beseitigung von Schadstoffen eine bedeutende Rolle.

Bei der Wirbelschichtfeuerung (s. Abb. 10) werden die zu behandelnden Abfälle in einem heißen wirbelnden Sandbett oder einem Bett aus inerten Materialien verbrannt. Die Schüttung aus körnigem Material und der Abfallstoff wird in einem Reaktor mit Düsenboden durch Luft entgegen der Schwerkraft so angeströmt, dass sie in einen aufgewirbelten, schwebenähnlichen Zustand gebracht wird. Das Sandbett sorgt dafür, dass der Abfall gleichmäßig durchmischt und zerrieben wird und aufgrund der guten Wärmeleitung des Sandes schnell und gleichmäßig verbrennt.

Ein Verfahren, das in den letzten Jahren in den Mittelpunkt des Interesses der Abfallwirtschaft gerückt ist, ist das Thermoselect-Verfahren (s. Abb. 11).

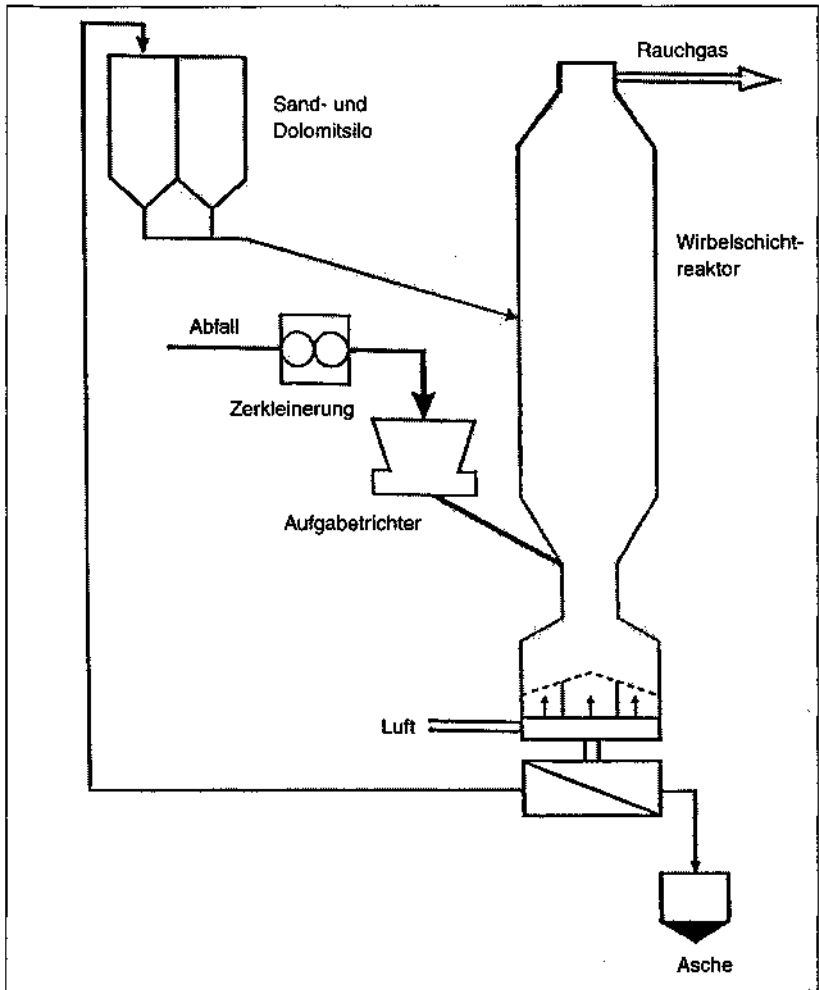
Das Thermoselect-Verfahren besteht aus einem Vergasungskanal und einem Hochtemperaturvergasungsreaktor. Die Abfälle werden verdichtet und im Entgasungskanal unter Luftabschluss entgast. Das dabei entstehende Prozessgas und die Feststofffraktion werden in einen Hochtemperaturreaktor eingebracht, in dem die organischen Bestandteile mit reinem Sauerstoff vergast werden. Es entstehen eine schmelzflüssige Schlacke und ein heizwertreiches Synthesegas. Die dort angewandten hohen Reaktionstemperaturen von 1200°

Abbildung 9: Rostfeuerung, Verfahrensschema



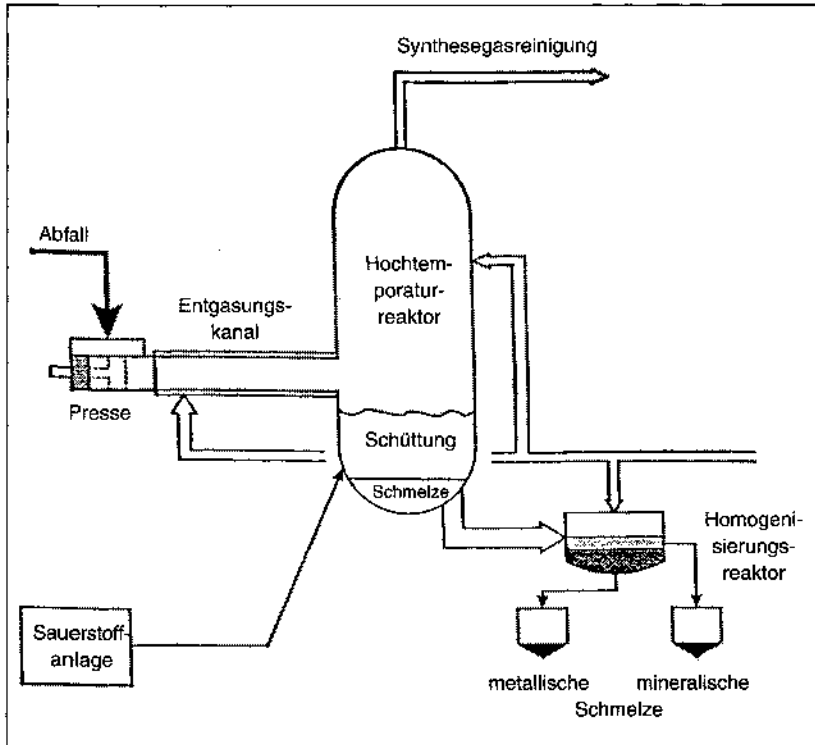
-2000°C, verbunden mit hohen Verweilzeiten sowie die Anwendung von Sauerstoff anstelle Luft, erlauben die Umsetzung von heterogenen festen Abfällen mit einem hohen Umwandlungsgrad in Synthesegas, das als Energieträger oder auch als Ausgangsprodukt für die Synthese von Methanol oder anderen Kohlenwasserstoffen eingesetzt werden kann. Die extrem hohen Reaktionsbedingungen führen auch dazu, dass alle organischen Verbindun-

Abbildung 10: Wirbelschichtfeuerung, Verfahrensschema



gen vollständig zerstört werden. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens besteht auch darin, dass durch die Anwendung von reinem Sauerstoff das entstehende Reaktionsgas kein NO_x enthält, das in Verbrennungsanlagen, die mit Luft arbeiten, mit hohem technischen Aufwand entfernt werden muss.

Abbildung 11: Thermoslect, Verfahrensschema



Ein weiterer Vorzug besteht auch darin, dass nicht vergasungsfähige Anteile in eine Mineralstoff- bzw. Metallschmelze überführt werden, die als inertes Material abgelagert bzw. deponiert werden kann.

Ungeachtet dieser Vorzüge, hat sich dieses Verfahrensprinzip insbesondere auch wegen der hohen technischen Aufwendungen bisher noch keine großen Marktanteile erobern können. Eine Prototypanlage arbeitet gegenwärtig in Norditalien. Großanlagen in Deutschland warten noch immer auf eine Bau- und Betriebserlaubnis.

Zur Rauchgasreinigung

Ungeachtet der erzielten Fortschritte bei den vorgestellten Verbrennungsverfahren, haben diese Technologien vor allem ein Problem zu lösen. Das ist die Aufbereitung und Entsorgung der entstehenden Rauchgase, die neben Staub vor allem erhebliche Anteile an NO_x und SO_x und auch hochtoxische Stoffe wie Dioxine und Furane enthalten, wobei sich die letzteren insbesondere bei der Abkühlung des Rauchgases in den Filtersystemen wieder bilden können und so zu der in Fachkreisen gut bekannten sogenannten De Novo-Synthese führen. Rauchgase enthalten vor allem CO/CO_2 , Wasser, Stickoxyde, SO_2 , Halogenkohlenwasserstoffe und Staub.

Die Abtrennung von NO_x und SO_x , Halogenkohlenwasserstoffen sowie die sichere Eliminierung der Dioxine und Furane, die ja bekanntermaßen ein erhöhtes Krebsrisiko darstellen, aus Rauchgasen, ist technisch wie ökonomisch sehr aufwendig.

Die Technologien für die Rauchgasreinigung sind für alle Verbrennungsanlagen weitgehend identisch. Ein Prinzipschema mit den wesentlichsten Verfahrenselementen einer Rauchgasreinigungsanlage zeigt die Abb. 12. Das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas durchströmt zunächst einen Staubfilter, wo der Staub vor einer Weiterbehandlung des Rauchgases abgeschieden wird. In einer nachfolgenden zweistufigen Wäsche werden dann vor allem Halogenkohlenwasserstoffe wie z.B. Chlor, Schwefelverbindungen und auch die Schwermetalle entfernt (s. Abb. 12).

Die Verfahren der Rauchgasentschwefelung wurden in den 70er Jahren in Japan vor allem für ölbefeuerte Kraftwerke entwickelt und eingesetzt. 1983 wurde die Rauchgasentschwefelung für Großfeuerungsanlagen auch in der Bundesrepublik vorgeschrieben. Heute gibt es in der Bundesrepublik keine Verbrennungsanlage mehr, die über keine Rauchgasentschwefelung verfügt.

Großtechnisch haben sich vor allem Absorptionsverfahren mit einer Kalksteinsuspension oder Natronlauge als Waschlösung durchgesetzt, wobei gleichzeitig Gips ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), auch bekannt als Reha-Gips, abgeschieden wird. Der Aktivkohlefilter, der in Deutschland auch als sogenannter Polizeifilter bezeichnet wird, hat die Aufgabe, die im Restgas verbliebenen Schadstoffe zu adsorbieren.

Im sogenannten DENOX-Reaktor werden die Stickoxyde mit Ammoniak oder auch mit anderen Alkalien in Stickstoff und Wasser umgesetzt. Die

bestehen vor allem in einer hohen NO_x/SO_x -Bildung und der technologisch wie ökonomisch aufwendigen Entsorgung der entstehenden Rauchgase, insbesondere auch von hochtoxischen Stoffen wie Dioxinen und Furanen. Die sichere Einhaltung der vom Gesetzgeber geforderten Grenzwerte erfordert teure multifunktionelle Reinigungsstufen. Insbesondere die sogenannte De Novo-Synthese, die durch nicht vollständig abgebaute und teiloxydierte Kohlenwasserstoffe hervorgerufen wird, belasten Verbrennungsanlagen und haben in manchen Fällen auch zu Stilllegungen von Verbrennungsanlagen wie auch zu Akzeptanzproblemen in der Bevölkerung geführt. Große Anstrengungen wurden und werden daher in die Entwicklung alternativer Verfahren für die Beseitigung von Schadstoffen unternommen. Bekannt sind vor allem katalytische Verfahren, wie die bereits erwähnte Abgasreinigung in Kraftfahrzeugen oder der Einsatz von heterogenen Katalysatoren für die Umsetzung von Abgasen aus z.B. Feuerungsanlagen oder Abprodukten aus unterschiedlichen Produktionsbereichen. Viele dieser Katalysatoren sind an enge Einsatzgrenzen und Randbedingungen wie Höhe der Reaktionstemperatur oder an die Zusammensetzung des zu beseitigenden Abproduktes (schwefel- und stickstoffhaltige Verbindungen, Halogene, Staub oder Ruß) gebunden. Insbesondere reagieren Edelmetallkatalysatoren negativ auf diese Komponenten und führen daher zu einer ungenügenden Langzeitstabilität. Probleme bereitet oftmals auch eine ungenügende Thermostabilität, die zu einem schnellen Verlust der Aktivität führt.

Aufbauend auf langjährigen Erfahrungen mit heterogenen Katalysatoren und deren Einsatz in der Petrochemie zur Erzeugung niederer Olefine, wie Ethylen, Propylen u.a., aus hochsiedenden Erdölfraktionen im Zentralinstitut für Organische Chemie der ehemaligen Akademie der Wissenschaften der DDR, wurden im Institut für Technische Chemie und Umweltschutz GmbH, eine Neugründung nach der Abwicklung der Akademieinstitute, neue leistungsfähige Katalysatoren entwickelt, die in der Lage sind, komplexe organische Schadstoffgemische und auch solche kritischen Komponenten wie Dioxine, Furane, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, schwefel- und stickstoffhaltige Verbindungen in kleine, einfache Moleküle umzusetzen. Diese Katalysatoren bestehen aus oxydischen Calcium-Aluminat-Verbindungen, die durch Dotierungen mit Metallen wie Nickel, Vanadin, Mangan oder Molybdän an den spezifischen Entsorgungsfall optimiert und angepasst werden. Die entwickelten Katalysatoren zeichnen sich durch folgende Eigenschaften aus:

- hohe mechanische und thermische Stabilität (bis ca. 1300°C),
- hohe Spaltaktivität gegenüber C-C-, C-H-, C-S-, C-N-, und C-O-Bindungen,
- Resistenz gegenüber Heteroelementverbindungen, die Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff enthalten,
- Stabilität gegenüber Wasserdampf,
- hohe Langzeitstabilität.

Das Reaktionsprinzip beruht auf der Spaltung der C-C-, C-H-Bindungen und der gleichzeitigen Accelerierung der Wassergasreaktion nach der Gleichung $C + H_2O \rightarrow CO_x + H_2$

Die Umsetzung erfolgt im Temperaturbereich 700°–1000°C in Gegenwart von Wasserdampf zu CO/CO₂ und Wasserstoff, der hydrierend in die Reaktion eingreift und die im Abgas enthaltenen schwefel-, stickstoff- und sauerstoffhaltigen Verbindungen in ihre Hydride bzw. Wasser überführt, sodass in den Reaktionsprodukten keine toxischen Verbindungen mehr vorhanden sind. Gleichzeitig wird durch die bei hoher Temperatur ablaufende Wassergasreaktion ein kompletter Abbau von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen und teerhaltigen Produkten erreicht, die bei vielen Katalysatoren zu einem schnellen Verlust der Aktivität führen. Die geschilderten Eigenschaften des Katalysators erlauben daher eine Umsetzung einer breiten Palette von organischen Materialien wie z.B. Altölen, Lösungsmitteln, organischen Rückständen, Abgasen unterschiedlicher Herkunft in interessante Endprodukte. In Abhängigkeit von der Katalysatorzusammensetzung können aus den o.g. Abfallprodukten entweder Brenngase, die für einen Einsatz in Gasmotoren geeignet sind bzw. Synthesegase für die Herstellung von Methanol oder auch organische Grundstoffe wie Ethylen, Propylen u.a. erzeugt werden. Typische Beispiele der Umsetzung von Modellkohlenwasserstoffgemischen an zwei unterschiedlich zusammengesetzten Katalysatoren vermitteln die Tabellen 1 und 2.

Die thermokatalytische Umsetzung in Gegenwart von Wasserdampf besitzt nicht nur bedeutende Vorzüge hinsichtlich der Verarbeitung unterschiedlicher Abprodukte, sondern vor allem durch die flexible Gestaltung der gewünschten Endprodukte. Dieses Reaktionsprinzip erfüllt damit die Forderung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes nach möglichst stofflicher Verwertung der Abprodukte in hohem Maße.

Tabelle 1: Umsetzung von Kohlenwasserstoffen und heterocyclischen Verbindungen mit Wasserdampf

Einsatz	n-Hexan + 10% Chlorbenzol	n-Hexan + 20% Pyridin	n-Hexan + 3% Thiophen	n-Hexan + 20% Nitrobenzol
Verweilzeit: ca. 0,5 s				
Reaktionstemperatur: 850°C				
Katalysator I a				
Reaktionsprodukte (Ma. %)				
H ₂	5,7	6,6	7,7	7,9
CO	15,6	9,7	11,1	13,5
CO ₂	23,7	52,2	54,2	118,2
CH ₄	20,4	32,5	32,0	23,7
C ₂ H ₆	1,6	1,3	1,0	1,0
C ₂ H ₄	46,1	49,9	28,3	35,5
C ₃ -C ₆	1,0	3,0	2,6	1,7

Tabelle 2: Umsetzung von Kohlenwasserstoffen und heterocyclischen Verbindungen mit Wasserdampf

Einsatz	Organische Verbindungen mit Wasser im Verhältnis 1:3			
	Benzol	n-Hexan + 20% Pyridin	n-Hexan + 10% Thiophen	n-Hexan + 40% Nitrobenzol
Verweilzeit: ca. 0,5 s				
Katalysator I b				
Reaktionsprodukte (Vol. %)				
H ₂	58,2	58,3	44,1	57,0
CO	23,2	18,0	9,6	18,5
CO ₂	11,6	9,2	12,0	10,5
CH ₄	-	3,6	6,3	2,8
C ₂ H ₄	-	0,5	-	-
C ₃ -H ₆	-	5,0	-	-
Bemerkung	100%	N als NH ₃	S als H ₂ S	N als N ₂ (34%) N als NH ₃ (66%)

Ein bemerkenswerter Vorzug der thermokatalytischen Spaltung gegenüber der Verbrennung besteht auch darin, dass keine sauerstoffhaltigen Reaktionsprodukte entstehen, die Neubildung von Dioxinen und Furanen vermieden wird und dass die entstehenden Gasmengen im Vergleich zur Verbrennung auf 1 Zehntel bis 1 Zwanzigstel reduziert werden. Die Aufbereitung der entstehenden Gase ist darüber hinaus technologisch einfacher und damit auch kostengünstiger.

Die genannten Eigenschaften der Katalysatoren, insbesondere die hohe Thermostabilität bis 1300 °C und die Resistenz gegenüber Heteroelementverbindungen, die Schwefel und Stickstoff enthalten, erlauben deren unmittelbaren Einsatz im Rauchgasstrom in Verbrennungsprozessen.

Für diesen Anwendungszweck wurde neben den klassischen Katalysatorformlingen, wie Zylinder, Raschigringen, Kugeln unterschiedlicher Dimension ein Wabenformkörper mit 5 x 5 mm Kanälen mit dem Keramischen Werk in Klosterveilsdorf entwickelt, der unmittelbar in den Rauchgasstrom einer Verbrennungsanlage eingebracht werden kann.

Vielfältige Untersuchungen zur Oxydation von komplexen organischen Kohlenwasserstoffgemischen mit den entwickelten Calcium-Aluminat-Katalysatoren belegen ihre hohe Funktionstätigkeit.

Die Oxydation eines Gemisches aus Acetonitril, Benzen, Chlorbenzen, Naphthalen und n-Hexan bei 850 °C im Luftstrom an einem promotierten Calcium-Aluminat-Katalysator zeigt die Tabelle 3.

Der oxydative Abbau des Acetonitrils erfolgt bereits vollständig bei 750 °C; bei 850 °C werden alle untersuchten Kohlenwasserstoffe, auch Naphthalen, das am beständigsten ist, zu über 99,9% abgebaut. Dioxine und Furane, die in Verbrennungsanlagen auftreten, wurden nicht nachgewiesen, wobei die Nachweisgrenze bei 10 pg lag.

Der Sauerstoffumsatz und die Kohlendioxydbildung entsprechen bei einer Reaktionstemperatur von 800–850 °C der vollständigen oxydativen Umsetzung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die von der 17. BImSCHV geforderten Grenzwerte sicher erreicht und unterboten werden.

Da Benzol von allen Kohlenwasserstoffen am schwersten zu oxydieren ist, wurde die Umsetzung von Benzol mit Luft bei unterschiedlichen stöchiometrischen Verhältnissen von Luft: Benzol und verschiedenen Temperaturen durch-

Tabelle 3:

Temperatur °C	Umsatz			(mg/m ³)
	750	800	850	
Acetonitril	99,6	100,0	100,0	-
Benzen	95,9	100,0	100,0	Spuren
Cl-Benzen	79,6	99,2	99,9	3,6
Naphthalen	96,8	98,9	99,5	11,3
n-Hexan	100,0	100,0	100,0	

geführt. Oberhalb 850 °C beträgt die Benzolabreicherung im Gasstrom <0,001 %, was für die hohe Aktivität der Calcium-Aluminat-Katalysatoren spricht.

Die Katalysatoren haben ihre Eignung auch bei der Reinigung des Rauchgases bei der Klärschlammverbrennung und bei der Oxydation von Abgasen aus Warmluftgeräten, die auf Basis von Heizöl arbeiten, und bei der Nutzung von Recycling – Ölen unter Beweis gestellt.

Die Oxydationskatalysatoren sind daher gut einsetzbar für die Reinigung von Rauchgasen aus der Verbrennung unterschiedlicher Schadstoffe wie Müll, Krankenhausabfällen, Klärschlamm, organische Extrakte aus kontaminierten Böden oder Abgasen aus Räumereien u.a. artverwandten Betrieben, bei denen die Gefahr der Dioxinrückbildung bei unvollständiger Verbrennung besteht.

Ein neues Anwendungsgebiet für die Katalysatoren wurde auch bei der Gewinnung von Wärme durch katalytische Verbrennung in Kleinf Feueranlagen erschlossen. Durch die mit Hilfe der Katalysatoren erreichte Absenkung der Temperatur in Kleinf Feueranlagen, ergeben sich sehr gute Möglichkeiten zur Senkung der NO_x-Emissionen in kommunalen und privaten Heizanlagen.

Die thermokatalytische Umsetzung eröffnet daher neue, interessante Wege zur Beseitigung und Umsetzung von organischen Schad- und Reststoffen und ist daher eine gute Alternative und Ergänzung zu den klassischen Abfallentsorgungsanlagen. Der Vorteil des katalytischen Reaktionsprinzips besteht in seinem universellen Einsatz bei der Umsetzung einer breiten Palette von Schadstoffgemischen, dem simultanen Abbau von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen, von S-, N- und O-haltigen wie Halogenverbindungen.

dungen in einfache Verbindungen, die in Abhängigkeit vom Katalysator und vom zu wandelnden Gemisch entweder Brenngase oder organische Grundstoffe darstellen und einer energetischen oder stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Der Einsatz der entwickelten Wabenformkörper in den Rauchgasstrom von Verbrennungsanlagen zur Umsetzung von Restkohlenwasserstoffen führt zur Verhinderung der Neubildung von Dioxinen und Furanen und trägt damit zur größeren Sicherheit von Verbrennungsanlagen und zum Schutz der Umwelt bei.

Schlussbemerkungen

Oberstes Ziel in der Abfallwirtschaft ist und bleibt die Vermeidung bzw. die Verwertung von nicht vermeidbaren Abfällen. Eine moderne Abfallwirtschaft erfordert daher Verfahren und Technologien, die den Schutz der Umwelt und der Menschen gewährleisten. Die Verfahren müssen den sich ständig ändernden Rahmenbedingungen und gesetzlichen Grundlagen der Abfallbehandlung und -entsorgung angepasst und weiterentwickelt werden. Hier ergibt sich für Wissenschaft und Technik ein breites Betätigungsfeld, um neue Verfahrens- und Wirkprinzipien, wie auch zuverlässige Analysenmethoden für einen sicheren Umweltschutz zu entwickeln, aber auch Einfluss auf die Gestaltung und Verabschiedung von Umweltgesetzen sowie sachbezogener Richt- und Grenzwerte für die Schutzgüter Luft, Wasser und den Boden zu nehmen.

Die Aufklärung von Wirkungsmechanismen über den Einfluss von Emitenten und Abprodukten auf die Umwelt ist daher eine prioritäre Aufgabe von Forschung und Entwicklung. Die Wissenschaft ist aufgefordert, durch eine sachlich fundierte Einschätzung und Beurteilung von potentiellen Gefahren oder Risiken durch Schadstoffe und Abprodukte dazu beizutragen, die oft emotional geführten Diskussionen um das Für oder Wider von vorgesehenen Umweltschutzmaßnahmen in der Bevölkerung zu versachlichen, sich aber auch klar und unmissverständlich gegenüber Entscheidungsträgern zu artikulieren, wenn Gefahren verschleiert und notwendige Entscheidungen, aus welchen Gründen auch immer, verschleppt oder gar verhindert werden.

Leider ist das Vertrauen der Menschen durch Horrormeldungen in Medien oder durch selbsternannte „Umweltschützer“, aber auch durch zu späte oder nicht erlassene Verbote und Verordnungen durch die verantwortlichen Behör-

den und Politiker stark erschüttert worden, wie das am Beispiel der heute allgegenwärtigen BSE-Diskussion deutlich wird.

Umweltschutz geht alle an und jeder kann in seinem Umfeld und Verantwortungsbereich durch sein Verhalten mit dazu beitragen, Abfälle zu vermeiden oder zu vermindern und durch abfallbewußtes Handeln unsere Umwelt schützen und erhalten.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Kreislaufwirtschaft – Sammelsysteme
- Abb. 2 Verwertung von Altreifen
- Abb. 3 Umweltauswirkungen von Deponien
- Abb. 4 Emissionsgrenzwerte der 17.BImSchV
- Abb. 5 Umweltrechtliche Bestimmungen
- Abb. 6 Grenzwerte der Klärschlammverordnung
- Abb. 7 Thermische Behandlungsverfahren
- Abb. 8 Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Verbrennungssysteme
- Abb. 9 Rostfeuerung
- Abb. 10 Wirbelschichtverfahren
- Abb. 11 Thermoselect-Verfahren
- Abb. 12 Prinzipschema der Rauchgasreinigung

Verwendete Literatur

1. Chemie Ingenieur Technik 72 (2001) S. 1430
2. Neues Deutschland, Januar 2001
3. Materialien zur Industrieabfallwirtschaft der Industrieabfall-Koordinierungsstelle Sachsen, 3(1998)
4. Leifaden Abfallrecht 1991, Erich Schmidt Verlag
5. Abfallwirtschaft im Land Brandenburg, 1995 Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung
6. Abfallwirtschaftskonzept des Landes Brandenburg für die Jahre 2001–05
7. Interne Arbeiten der UVE (Umwelt-Verkehr-Energie) GmbH und des Instituts für Technische Chemie und Umweltschutz GmbH zu Fragen der Abfallbehandlung und der thermisch katalytischen Spaltung von Organischen Grundstoffen.