LAWA, 1993: Leitlinien zur Durchführung von Kostenvergleichsrechnungen, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
 OECD, 1997: OECD environmental data. Compendium 1997, OECD, Paris
 Stat. BA, 1998: Erneuerbare Energieträger 1991 bis 1996. StBA, Wirtschaft und Statistik 5, 438-443
 Stat. BA, 1997: Abfallbeseitigung im Produzierenden Gewerbe und in Krankenhäusern 1993. Fachserie 19, Reihe 1.2, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart, 252 S.
 Stat. BA, 1996: Öffentliche Abfallbeseitigung 1993. Fachserie 19, Reihe 1.1, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart, 128 S.
 Stat. BA, 1994: Öffentliche Abfallbeseitigung 1990. Fachserie 19, Reihe 1.1, Verlag Metzler-Poeschel, Stuttgart, 112 S.
 TASi, 1993: Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall, TASi). Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz, vom 14. Mai 1993. Bundesanzeiger, 4967ff.
 Stromeinspeisegesetz, 1994: Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisegesetz) vom 7. Dezember 1990, BGBl. I S. 2633; 1994 S. 1618; 1998 S. 730, BGBl. III, 754-9
 VDI 2067, 1999: VDI Richtlinie "Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen – Grundlagen und Kostenberechnung" – Entwurf, Verein deutscher Ingenieure (VDI), Düsseldorf, 30 S.

Kontakt

Dr. Ludwig Leible
 Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
 Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
 Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe
 Tel.: + 49 (0) 7247 - 82 4869
 E-Mail: leible@itas.fzk.de

»

Forschungsthema Abfall – Überblick über die Arbeiten im Forschungszentrum Karlsruhe

von F. Arendt, W. Schmidt, B. Mathes,
 Forschungszentrum Karlsruhe, PSA

Etwa 15% der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Forschungszentrums Karlsruhe befassen sich mit Studien, technischen Entwicklungen und grundlegenden Untersuchungen zur kostengünstigen Bewältigung und zu Sicherheitsfragen des Abfallproblems. Im Mittelpunkt stehen dabei Untersuchungen zur thermischen Behandlung und zur energetischen Verwertung von Siedlungs-, Industrie- und landwirtschaftlichen Abfällen. Weitere Arbeiten befassen sich mit der Wiedergewinnung von Wertstoffen aus der Bau- und Metallindustrie sowie mit der Zerstörung hochtoxischer Stoffe bei niedriger Temperatur und Atmosphärendruck.

Für nukleare Abfälle werden Verglasungsverfahren weiterentwickelt und die Sicherheit und Radionuklidmobilität im Nahbereich eines geologischen Endlagers unter Langzeitaspekten untersucht. Fragen der Langzeitsicherheit spielen auch für die Verwertung und Deponierung der großen Mengen anorganischer Abfälle aus der Energie-, Bau- und Abfallwirtschaft sowie aus Umweltschutzmaßnahmen (Abgas- und Wasserreinigung) eine zunehmende Rolle. Aus Platzgründen kann auf die letztgenannten Arbeiten hier nicht eingegangen werden.

1. Einleitung

Eine der Hauptaufgaben der 16 Institutionen in der Hermann-von-Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) ist die Analyse und Beeinflussung von komplexen Systemen. Beispiele sind die Gesundheits-, Energie- und Atmosphärenforschung. Das Forschungszentrum Karlsruhe widmet den überwiegenden Teil seiner Arbeiten der Weiterentwicklung von komplexen technischen Systemen, die als gesellschaftliche Aufgaben oder wegen ihres vorwettbewerblichen Charakters von der Industrie nicht oder noch nicht umfassend bearbeitet werden. Dazu gehört die Abfallwirtschaft, die große gesellschaftliche Bedeutung hat, weil jeder Bürger und jede Ge-

bietskörperschaft unmittelbar mit ihr befasst ist. Mit einem jährlichen Umsatz von ca. 25 Milliarden DM in Deutschland ist sie zudem ein wichtiger Wirtschaftsfaktor. Ihre komplexe Struktur ist in der stofflichen Vielfalt und in der Wechselwirkung zwischen Vermeidung, Verwertung und Entsorgung einerseits und zwischen Umweltschutzziele und Forderungen nach Wirtschaftlichkeit andererseits begründet.

Dieser Beitrag beschreibt die laufenden Entwicklungsarbeiten des Zentrums. Sie sind im Heft 1/2000 der Zeitschrift "FZK-Nachrichten" ausführlich dargestellt.

2. Thermische Behandlung und energetische Verwertung

2.1 Abfallverbrennung

In Deutschland werden heute jährlich ca. 10 Mio. t Hausmüll in Müllverbrennungsanlagen (MVA) entsorgt. Etwa die doppelte Menge von zu beseitigenden Abfällen wird immer noch deponiert. Gesetze und ihre Ausführungsbestimmungen, die Technischen Anleitungen Abfall und Siedlungsabfall, fordern jedoch für die Zukunft eine weitgehende Inertisierung der zu deponierenden Abfälle, so dass auch für diese eine thermische Behandlung erforderlich erscheint. Damit ergibt sich für die Forschung zur Müllverbrennung die Herausforderung, unter Wahrung der folgenden Randbedingungen kostengünstige Lösungen für Anlagen und Betrieb zu entwickeln: Einhaltung der strengen Emissionsbeschränkungen der 17. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (17. BImSchV); Überführung der Rückstände in eine deponietaugliche Form; Abtrennung von verwertbaren Reststoffen; möglichst hoher energetischer Wirkungsgrad.

Das für die thermische Behandlung von Hausmüll eingeführte Standardverfahren ist die Verbrennung in Rostfeuerungsanlagen, im allgemeinen mit anschließender Wärmenutzung durch Dampferzeugung in einem Kessel sowie einer Folge von Rauchgasreinigungsstufen zur Entstaubung, HCl-, Hg- und SO₂-Abscheidung, zur Zerstörung von Stickoxiden und zur Rückhaltung von Spuren organischer Schadstoffverbindungen. Der hierbei erreichte Stand der Technik erlaubt eine sichere Einhaltung der 17. BImSchV und gewährleistet damit einen Betrieb ohne merkliche Umweltbelastungen, ist

jedoch durch hohen technischen Aufwand und hohe Kosten gekennzeichnet.

Prozessintegrierter Umweltschutz bei MVA und das Streben nach mehr Wirtschaftlichkeit bedeuten eine Verlagerung der Umweltschutzmaßnahmen in den Feuerraum. Dessen Auslegung und die optimale Steuerung des Verbrennungsprozesses sollen gewährleisten, dass die anfallenden Umsetzungsprodukte keine oder nur ein Minimum an nachfolgenden Reinigungsschritten erfordern. Dazu müssen die maßgeblichen Reaktionsabläufe, die zu einer Schadstoffbildung oder -freisetzung im Feuerraum führen, sowie ihre Abhängigkeit von der Müllzusammensetzung und den Verbrennungsparametern erforscht und in Modelle für die Ofenauslegung und Prozesssteuerung eingebracht werden. Sofern auf eine Rauchgasreinigung trotzdem nicht verzichtet werden kann, ist ein möglichst einfaches Gesamtkonzept notwendig. In einem Vorhaben des HGF-Strategiefonds wird gegenwärtig mit anderen Forschungszentren, Universitäten und Firmen angestrebt, die Bildung von Stickoxiden im Feuerraum unterhalb der Grenze von 200 mg NO₂/Nm³ zu halten und damit eine entsprechende Reinigungsstufe zu vermeiden. Die am Beispiel der Stickoxide entwickelten Modelle, Messtechniken und Prozesssteuerungsstrategien werden als Basis angesehen, um auch andere Schadstoffe bereits im Feuerraum zu minimieren.

Als wichtigstes Forschungsinstrument zur Hausmüllverbrennung verfügt das Forschungszentrum Karlsruhe über die Pilot-Versuchsanlage TAMARA (Abb. 1) mit einem Durchsatz von ca. 200 kg/h. Die Anlage ist seit 1986 in Betrieb. Zu den wichtigsten Ergebnissen gehören die Aufklärung der Dioxinbildung und Vorschläge zu ihrer Vermeidung, die Entwicklung von Verfahren zur Abscheidung von Quecksilber und zu dessen online-Überwachung, die Bereitstellung von wirtschaftlich arbeitenden Filtern auch für sehr feine Staubpartikel sowie Untersuchungen über die Einflüsse verschiedener Abfallfraktionen (Shredder-Leichtfraktion aus der Altautoverwertung, Elektronikschrott, unterschiedliche Kunststoffe) auf die Verbrennung, die Gasreinigung und die Eigenschaften der Reststoffe.

Abb. 1: Fließband der Rostverbrennungsanlage TAMARA

Die an TAMARA gewonnenen Ergebnisse werden im allgemeinen an Großanlagen verifiziert.

Eine weitere halbtechnische Versuchsanlage THERESA zur thermischen Entsorgung spezieller Abfälle (z. B. Produktionsabfälle der Industrie, verbrauchte Produkte, sehr energiereicher kommunaler Restmüll, Bauschuttfraktionen, Rückstände aus der Altlastensanierung) ist als Drehrohrföfen mit Nachbrennkammer ausgeführt und stellt damit auch anlagentechnisch eine wichtige Erweiterung zur Rostverbrennung in der TAMARA dar. Die Anlage mit einem Durchsatz von ca. 250 kg/h und einer thermischen Leistung von bis zu 2,5 MW wurde Anfang 2000 fertiggestellt. Insgesamt sollen auch mit Hilfe dieses Forschungsinstruments die spezifischen Kosten für die Entsorgung von Industrieabfällen unter Beibehaltung der erreichten Umweltschutzziele deutlich gesenkt werden.

Das THERESA-Konzept sieht vor, den Energiebedarf insbesondere für die Nachbrennkammer durch energiereiches Pyrolysegas bereitzustellen. Hierzu ist die Ankoppelung einer bereits verfügbaren Pyrolyseanlage für Einsatzstoffe wie Elektronikschrott an die THERESA vorgesehen.

Die halbtechnischen Versuchsanlagen werden durch mehrere Laboranlagen ergänzt, in denen thermische Prozesse grundlegend untersucht werden. Die Ergebnisse fließen bei-

spielsweise in die Computermodelle ein, die die Basis der Prozesssteuerung bilden.

2.2 Vergasung von Biomasse

Ziel ist die Erschließung des Potenzials von nicht holartigen biologischen Rest- und Abfallstoffen und industriellen Abfällen für die Energiegewinnung. Als erfolgversprechender Weg dazu wurde die Vergasung von Biomasse gewählt. Das erzeugte Gas soll für den Betrieb von Gasmotoren, Turbinen oder Brennstoffzellen zur Stromerzeugung genutzt werden, so dass im Vergleich zur Verbrennung höhere Wirkungsgrade erreicht werden können.

Für die Biomasse-Vergasung werden, abhängig von der Art der zur Verfügung stehenden Brennstoffe, zwei Wege verfolgt:

- Die Vergasung von halmartigen, in großen Mengen in der Landwirtschaft anfallenden Reststoffen (z.B. Stroh) in Wirbelschichtvergäsern mit vorausgehender Pyrolyse;
- Die Vergasung von Biomassen mit hohem Wassergehalten, z. B. Lebensmittelreste, in heißem Hochdruckwasser.

Bei dem ersten Verfahren wird die Pyrolyse und Vergasung von heizwertreichen Abfällen und Abfallbiomasse in Wirbelschichtapparaturen im Labormaßstab untersucht. Qualität und Ausbeute der flüchtigen Produkte und Restkok-

se werden im Detail charakterisiert. Die Daten dienen als Grundlage für die Planung einer zweistufigen Anlage. Zur Gasreinigung soll dabei eine Filterkombination aus regenerierbarem Partikelabscheider und Katalysator entwickelt werden.

Das zweite Verfahren beruht auf Erfahrungen, die bei der Oxidation von organischen Schadstoffen im überkritischen Wasser ($T > 374\text{ °C}$, $p > 221\text{ bar}$) gewonnen wurden. Je nach Sauerstoffgehalt werden die Kohlenwasserstoffe bei diesem Hochdruckprozess vollständig oxidiert oder zu brennbaren Gasen umgewandelt. Die Bedeutung von Katalysatoren auf Basis von Alkalimetallen muss noch vollständig aufgeklärt werden.

Je nach Temperatur entsteht dabei bevorzugt Wasserstoff oder Methan. Der besondere Vorteil des Verfahrens liegt im Wegfall der Vortrocknung der Biomassen, den niedrigen Reaktionstemperaturen, der Vermeidung der Koksbildung und der vergleichsweise geringen CO-Bildung.

Gegenwärtig wird eine Versuchsanlage aufgebaut. Im Beitrag von Leible et al. (in diesem Heft) wird ausführlicher auf die energetische Nutzung biogener Abfälle (Biomasse) und dessen Potenzial eingegangen.

3. Stoffrecycling durch Verwertung von Abfällen

3.1 Betonabfälle

Pro Kopf der Bevölkerung wird in Deutschland jährlich etwa 1 m^3 Beton verbaut. Die Rohstoffe Kies, Sand und Zement werden, wie seit alters her, fast vollständig natürlichen Lagerstätten entnommen; ein echtes Recycling war bisher kaum möglich. Nach der Nutzung wird Altbeton gebrochen und im Straßenbau bzw. als Schüttgut wiederverwendet. Eine Verwertung im standsicherheitsrelevanten Bereich ist gesetzlich nur in Ausnahmefällen zugelassen.

Beton ist ein kompositer Werkstoff aus Kies und Sand (ca. 85%) und Zementstein (ca. 15%). Im Forschungszentrum Karlsruhe wird eine Verfahrenskombination im halbtechnischen Maßstab mit dem Ziel entwickelt, die Rohstoffe Kies, Sand und Zement aus Altbeton vollständig zurückzugewinnen. Kernstück des Verfahrens ist eine Anlage zur Fragmentierung

mit Hilfe von elektrischen Pulsentladungen (FRANKA). Die neu entwickelte, patentierte Technik soll integraler Bestandteil einer Aufbereitungsanlage für Altbeton werden. Mit einer Modellanlage wird die technische Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bei großtechnischem Einsatz untersucht.

Das FRANKA Verfahren beruht auf der Sprengwirkung gepulster Hochspannungsentladungen in Feststoffen. Der Beton befindet sich dabei in einem mit Wasser gefüllten Reaktionsgefäß. Bei genügender Flankensteilheit des Hochspannungsimpulses wird der Fokusschlag im Festkörper induziert und dieser durch den entstehenden Druckimpuls zerlegt. Die Trennung erfolgt dabei überwiegend entlang der Materialgefügegrenzen und bietet daher gute Voraussetzungen für die vollständige Wiederverwertung der Komponenten. Das Verfahren arbeitet ohne bewegliche Teile und ist daher verschleißarm.

Aufbereiteter Kies und Sand besitzt die gleiche Qualität wie die ursprünglichen Zuschläge. Das Zementmehl lässt sich als Rohstoff für die Zementproduktion verwerten. Damit werden die natürlichen Rohstoffe Ton und Kalk eingespart. Außerdem wird die CO_2 -Emission des Zementbrennprozesses reduziert. Etwa 40% des CO_2 -Ausstoßes und etwa 10% des Energieeinsatzes der Zementproduktion könnten bei Ersatz von 50% des Rohmehls durch Zementpulver aus einer FRANKA-Anlage eingespart werden.

3.2 Reststoffe und Produkte der Metallbearbeitung

Bei der Metallbearbeitung fallen in Deutschland neben groben Spänen schätzungsweise 150 000 bis 200 000 Tonnen Schleifschlämme an, davon rund 78 000 t aus Bearbeitungsprozessen mit nichtwassermischbaren Kühlschmierstoffen und sonstigen Verunreinigungen.

Derzeitig bestehen Entsorgungswege vor allem durch Deponierung und thermische Behandlung, z. B. den Einsatz als Zuschlagsstoff in der Zementindustrie. Im Hinblick auf die Kreislaufwirtschaft ist jedoch eine stoffliche Verwertung anzustreben. In den Fällen, in denen Öle als Kühlschmiermittel eingesetzt werden – und das ist in sehr vielen Betrieben der Fall –, ist eine direkte Wiedergewinnung des

Öls aus dem Schleifschlamm wirtschaftlich interessant.

In der Lebensmittel- und Pharmaindustrie werden überkritische Fluide (komprimierte Gase), bereits seit Jahren zur Extraktion von Ölen, Fetten und anderen Inhaltsstoffen aus Naturprodukten eingesetzt. Der Umgang mit komprimierten Gasen ist in diesem Industriezweig somit Stand der Technik. Am häufigsten wird Kohlendioxid (CO_2) eingesetzt, das sich durch gute Verfügbarkeit und die problemlose Handhabung aufgrund seiner Nichtbrennbarkeit und Ungiftigkeit auszeichnet. Über Druck und Temperatur können die physikalisch-chemischen Eigenschaften den Erfordernissen für die Stofftrennung einfach angepasst werden.

Durch Druckabsenkung besteht im Gegensatz zu organischen Lösungsmitteln die Möglichkeit der vollständigen Abtrennung des Extraktionsmittels CO_2 als Gas vom Extrakt. Auf diese Weise werden die abgetrennten Stoffe und der verbleibende Rückstand lösungsmittelfrei erhalten, während das als Gas abgezogene CO_2 wieder in den Prozess zurückgeführt werden kann.

Die untersuchten Materialien umfassen die ganze Bandbreite der für die verschiedenen Bearbeitungsmaschinen verwendeten Öle. Für jeden Rückstand wurden die spezifischen Prozessparameter, das sind der Extraktionsdruck, die Temperatur und die für die Entfernung des Öls notwendige Menge CO_2 , ermittelt.

Die Übertragung des Verfahrens in den technischen Maßstab wurde in einer kommerziell betriebenen Extraktionsanlage erfolgreich demonstriert. Basierend auf dieser Technik wird ein Duschverfahren für die Teilereinigung entwickelt, das statt der heute üblichen wässrigen oder organischen Lösemittel die Lösekraft von komprimiertem Kohlendioxid zur Reinigung von Metalloberflächen von Fetten und Ölen ausnutzt.

Die Teilereinigung ist ein Prozessschritt, bei dem metallische Kleinteile nach ihrer Fertigung und vor ihrer Weiterverarbeitung bzw. Nutzung von anhaftenden Kühlschmierstoff- und Schmutzresten anderer Art befreit werden. Entsprechend der Vielfalt verschiedener Bearbeitungsverfahren wie Drehen, Tiefziehen oder Stanzen variieren auch Menge, Art und Zusammensetzung der Verunreinigungen. Dies sind neben Feststoffen wie Spänen und Abrieb

vor allem Bearbeitungshilfsmittel (Fette und Kühlschmierstoffe). Der Verwendungszweck und die nachfolgenden Bearbeitungsschritte bestimmen die Reinheitsanforderung an die Teile bzw. den Reinigungsprozess. Im Gegensatz zu den heute gängigen Reinigungsmethoden mit Chlorkohlenwasserstoffen und wässrigen Reinigern mit Additiven ist bei dem Kohlendioxidverfahren keine aufwendige Aufbereitung des Reinigungsmediums notwendig bzw. es sind keine Sekundärabfälle zu entsorgen.

Es zeigt sich, dass Kleinteile aus der industriellen Fertigung, die mit nichtwassermischbaren Kühlschmierstoffen bearbeitet wurden, mit komprimiertem Kohlendioxid ebenso gut gereinigt wurden wie dies in konventioneller Weise möglich ist. Eine zusätzliche Trocknung ist nicht notwendig, da das Kohlendioxid als Gas rückstandsfrei entfernt wird.

4. Behandlung persistenter hochtoxischer Organika durch elektrische Mediatoren

Als Alternative zur umstrittenen klassischen Verbrennung toxischer organischer Abfälle wie z. B. hochchlorierte Kohlenwasserstoffe, Pestizide und chemische Kampfstoffe ist die indirekte Elektrooxidation im geschlossenen Kreislauf eine Möglichkeit zur Beseitigung.

Das Prinzip der indirekten Elektrooxidation beruht auf einem einfachen Kreisprozess. Ein in einem wässrigen Elektrolyten gelöstes Metallion der Übergangsreihe mit der Oxidationsstufe n (+) wird anodisch zu einer reaktiven Zwischenstufe $(n+1)$ (+) oxidiert, gelangt durch Diffusion und Konvektion in das Lösungsinere und kann einen dort gelösten oder dispergierten organischen Schadstoff bis zum CO_2 oxidieren. Das dabei reduzierte Metallion wird an der Anode erneut oxidiert, und damit ein geschlossener Reaktionskreislauf realisiert.

Das Verfahren wird unter moderaten Reaktionsbedingungen (Normaldruck, Temperaturen von 20 bis 90 °C) betrieben und arbeitet auch zuverlässig, wenn das System Elektrolyt/Schadstoff aus zweiphasigen Gemischen wie flüssig/flüssig, flüssig/fest oder flüssig/gasförmig besteht.

Es liegt auf der Hand, dass insbesondere toxische und/oder chlorierte Abfälle, deren Entsorgung auf andere Weise problematisch

und teuer ist, mit diesem Verfahren vorteilhaft behandelt werden können. Ein sehr großes Potenzial für dieses Verfahren liegt bei der Entsorgung von polychlorierten Biphenylen (PCBs), Pestiziden und chemischen Kampfstoffen. Als Mediatoren werden vorzugsweise Redoxpaare, die ein hohes Standardpotenzial aufweisen, eingesetzt. Neben Co(III)/Co(II) wurde insbesondere das Redoxpaar Ag(II)/Ag(I), das mit 1,98 V ein sehr hohes elektrochemisches Potenzial aufweist, untersucht. Die Reaktionsgleichung für die Zerstörung chlorhaltiger organischer Stoffe kann, am Beispiel von Lindan, wie folgt formuliert werden:

Die Abbauprobe mit verschiedenen Modellsubstanzen und realen Abfällen werden in einer Laboranlage zum indirekten Schadstoffabbau und einer Pilotanlage zur elektrischen Schadstoffoxidation durchgeführt.

Kontakt

Dipl.-Phys. Friedrich Arendt
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Technik und Umwelt
Projekt Schadstoff- und Abfallarme Verfahren (PSA)
Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe
Tel.: + 49 (0) 7247 - 82 2703
E-Mail: friedrich.arendt@psa.fzk.de

« »

Hinweis der Redaktion

Ein weiterer Beitrag zu der Abfallthematik findet sich in der Rubrik "TA-Projekte". Karl-Werner Brand berichtet in seinem Beitrag "Nachhaltigkeit und abfallpolitische Steuerung" über ein gerade abgeschlossenes interdisziplinäres Projekt, dessen Ziel eine am Leitbild der Nachhaltigkeit orientierte Wirkungs- und Schwachstellenanalyse der Verpackungsverordnung am Beispiel des Umgangs mit Kunststoffabfällen war.