



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7123

Abfallwirtschaft in Baden-Württemberg

**Studie zur Bewertung
der Abfallströme Klärschlamm,
Elektronikschrott, Kunststoffe
und der Behandlung von
Siedlungsabfall durch
mechanisch-biologische
Abfallbehandlungsanlagen**

Thomas Kolb (Koordinator)
Institut für Technische Chemie

August 2005

Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7123

Abfallwirtschaft in Baden-Württemberg

Studie zur Bewertung der Abfallströme
Klärschlamm
Elektronikschrott
Kunststoffe
und der Behandlung von Siedlungsabfall durch
mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen

Thomas Kolb (Koordinator)

Institut für Technische Chemie

Auftraggeber:

Nachhaltigkeitsbeirat der Landesregierung Baden-Württemberg

Finanzierung:

Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg

Auftragnehmer:

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
ITC-TAB, ITC-WGT, ITC-ZTS

ERSTELLUNG DER STUDIE**Institut für Technische Chemie
Bereich Thermische Abfallbehandlung ***

Leitung: Prof. Seifert
Mitarbeiter: Prof. Kolb, DI Eberhard,
Dr. Hornung, DI Schöner

THEMEN:

Klärschlamm
WEEE
Verpackungskunststoffe
MBA

**Institut für Technische Chemie
Bereich Wasser und Geotechnologie**

Leitung: Prof. Nüesch
Mitarbeiter: Dr. Weidler

Klärschlamm

**Institut für Technische Chemie
Zentralabteilung Technikbedingte
Stoffströme**

Leitung: Frau Prof. Schebek
Mitarbeiter: DI Buchgeister, Dr. Richers, DI Walk

WEEE
Verpackungskunststoffe
Schredderabfälle

Koordination: Prof. Kolb

* Verantwortliche Leitung

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620
urn:nbn:de:0005-071230

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	v
TEIL A: KLÄRSCHLAMM	1
1. Stand der Verwertung / Beseitigung	1
1.1 Spezifikation	1
1.2 Mengenaufkommen	2
1.3 Wege der Verwertung / Beseitigung	2
1.4 Tendenzen bei Mengen und Zusammensetzung	3
2. Darstellung der Ziel-Vorgaben	4
2.1 Zielvorgaben EU	5
2.2 Zielvorgaben Deutschland	5
2.3 Zielvorgaben Baden-Württemberg	6
3. Beschreibung und Bewertung der Verwertungs- und Beseitigungswege	7
3.1 Direkte Verwertung	7
3.1.1 Deponierung	7
3.1.2 Landwirtschaft	7
3.1.3 Landschaftsbau	8
3.2 Thermische Behandlung	8
3.2.1 Monoverbrennung	9
3.2.2 Mitverbrennung in der Müllverbrennungsanlage MVA	10
3.2.3 Mitverbrennung im Kraftwerk / Heizkraftwerk	11
3.2.4 Mitverbrennung im Zementdrehrohr	12
3.2.5 Vergasungsverfahren	13
3.3 Nassoxidative Verfahren	13
3.3.1 Seaborne-Verfahren	13
3.3.2 Verfahren in der Entwicklung	14
3.4 Bewertung der Schadens- und Nutzungspotentiale der einzelnen Verfahren	15
3.4.1 Schadstoffpotentiale	15
3.4.2 Nutzungspotentiale	16
4. Empfehlungen	17

ANHANG A1: PHOSPHOR-RÜCKGEWINNUNG	20
A1. Ressourcen und Verbrauch	20
A1.1 Weltweite P-Reserven	20
A1.2 Deutschland	20
A1.3 Baden-Württemberg	23
A1.4 Zusammenfassung	23
TEIL B: ELEKTRONIKSCHROTT	26
1. Stand der Verwertung / Beseitigung	26
1.1 Spezifikationen	26
1.1.1 Herkunftsbereich private Haushaltungen	26
1.1.2 Gewerblicher Herkunftsbereich	27
1.2 Mengenaufkommen	27
1.3 Wege der Verwertung / Beseitigung	28
1.4 Tendenzen bei Mengen und Zusammensetzung	28
2. Darstellung der Ziel-Vorgaben	28
2.1 Zielvorgaben EU	28
2.2 Zielvorgaben Deutschland	29
2.3 Zielvorgaben Baden-Württemberg	29
3. Beschreibung und Bewertung der Verwertungs- und Beseitigungswege	30
3.1 Technologische Möglichkeiten und Probleme	30
3.1.1 Stand der Technik	30
3.1.2 Auftretende Probleme durch die WEEE Richtlinie der EU	31
3.2 Neue Technologien und Perspektiven	32
3.3 Verbleib von Schadstoffen	33
3.4 Förderprogramme des Landes Baden-Württemberg	33
4. Empfehlungen	34

TEIL C: KUNSTSTOFF / VERPACKUNGEN	39
1. Stand der Verwertung / Beseitigung	39
1.1 Spezifikation	39
1.2 Mengenaufkommen	40
1.3 Wege der Verwertung / Beseitigung	42
1.4 Tendenzen bei Mengen und Zusammensetzung	43
2. Darstellung der Ziel-Vorgaben	44
3. Beschreibung und Bewertung der Verwertungs- und Beseitigungswege	45
3.1 Überblick	45
3.2 Werkstoffliche Verwertung	46
3.3 Rohstoffliche Verwertung	48
3.4 Energetische Verwertung	48
4. Empfehlungen	49
TEIL D: SCHREDDERRÜCKSTÄNDE	55
1. Stand der Verwertung / Beseitigung	55
1.1 Spezifikation	55
1.2 Mengenaufkommen	57
1.3 Wege der Verwertung / Beseitigung	59
1.4 Tendenzen bei Mengen und Entsorgungswege	59
2. Darstellung der Ziel-Vorgaben	60
3. Beschreibung und Bewertung der Verwertungs- und Beseitigungswege	61
4. Empfehlungen	64

TEIL E: MECHANISCH-BIOLOGISCHE ABFALLBEHANDLUNG MBA	69
1. Mengen und Kapazitäten	69
1.1 Daten für BRD	69
1.2 Daten für Baden-Württemberg	71
2. Rechtliche Vorgaben	73
3. Verfahren zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung	73
3.1 Verfahrensprinzip	73
3.2 Verfahrensbeispiele	74
3.3 Verfahren in Baden-Württemberg	77
4. Bewertung	77
5. Zusammenfassung und Empfehlung	79

Vorwort

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag des Nachhaltigkeitsbeirats Baden-Württemberg durch das Forschungszentrum Karlsruhe angefertigt.

In der Studie soll primär die aktuelle Situation in Baden-Württemberg und deren Entwicklungstendenzen bezüglich der Abfallströme: Klärschlamm, Elektronikschrott und Kunststoffe dargestellt und ihre Behandlungsverfahren hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitstendenzen bewertet werden. Des Weiteren sollen, sofern möglich, Alternativen zur Reduktion der bewerteten Abfallströme vorgestellt werden. Aufgrund unterschiedlicher Umweltrelevanz wurde der Abfallstrom Kunststoffe in Verpackungsabfälle und Autoschredderrückstände aufgeteilt.

Die Studie basiert auf Daten aus der Literatur und auf Ergebnissen eigener Arbeiten auf dem Gebiet der Abfallbehandlung. Für jeden Abfallstrom wurde zunächst die IST-Situation bzgl. Spezifikation und Mengenaufkommen dokumentiert sowie die gesetzlichen Rahmenbedingungen (Europa, Deutschland, Baden-Württemberg) dargestellt. Die heute beschrittenen Verwertungs- und Beseitigungswege wurden beschrieben und der Versuch unternommen, sie unter technischen, ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten zu bewerten. Neue Verfahren und Entwicklungstendenzen wurden aufgezeigt und ihre Potenziale bewertet. Eine umfassende Bewertung unter Berücksichtigung aller Dimensionen der Nachhaltigkeit war auf Basis der vorliegenden Untersuchungen und Informationen nicht möglich.

Aus dem Abgleich der derzeitigen Situation der Abfallwirtschaft und den Vorgaben des Umweltplans Baden-Württemberg 2000 wurden Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Es sollte allerdings beachtet werden, dass hiermit keine detaillierte Analyse und Bewertung spezifischer Umsetzungskonzepte für Baden-Württemberg geleistet werden konnten. Dies würde deutlich umfangreichere Untersuchungen und Datenrecherchen erfordern, wie sie beispielsweise im derzeit laufenden Forschungsvorhaben „Regionales Netzwerk Baden-Württemberg“ im Auftrag des Baden-Württembergischen Ministeriums für Umwelt und Verkehr für den Bereich Elektronikschrott durchgeführt werden.

TEIL A: KLÄRSCHLAMM

1. Stand der Verwertung / Beseitigung

1.1. Spezifikation

Die Behandlung von kommunalen und industriellen Abwässern mit biologischen, physikalischen oder chemischen Reinigungsverfahren führt zur Bildung von Klärschlamm, einer Sammelbezeichnung für die in verschiedenen Stufen der Abwasserbehandlung anfallenden Feststoffe.

In einer biologischen Abwasserbehandlungsanlage, die für die Reinigung kommunaler Abwässer typisch ist, sind verschiedene Schlämme zu unterscheiden. Der Primärschlamm entsteht in der Vorklärung, der ersten Behandlungsstufe nach dem Rechen bzw. Sandfang. Der Belebtschlamm, auch als Sekundärschlamm bezeichnet, wird in der biologischen Behandlungsstufe abgetrennt. Der Tertiärschlamm entsteht in der dritten Behandlungsstufe z.B. in Form von Fällungs- oder Flockungsprodukten. Die im Bereich einer mechanischen Vorklärung mit Rechen oder Sandfängen abgetrennten Abwasserinhaltsstoffe werden von der allgemeinen Definition für Klärschlamm nicht erfasst.

Die Anteile der mineralischen Hauptbestandteile des Klärschlammes und die wichtigste Nährstoffkomponente, Phosphor, sind in Tabelle 1 angegeben.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	P ₂ O ₅
Mittelwert	50,2	15,9	9,8	0,8	12,4	1,8	1,6	5,1
Stdabw	2,1	2,7	5,1	0,1	1,7	0,4	0,4	1,9

Tabelle 1: Durchschnittliche mineralische Bestandteile von bundesdeutschen Klärschlämmen (in Gew.% bezogen auf gegläute Substanz) [BMBF98]

Die Konzentrationen der Schwermetalle in den Klärschlämmen liegen deutlich unter den Grenzwerten für die landwirtschaftliche Nutzung gemäß Klärschlammverordnung AbfKlärV. Die durchschnittlichen Schwermetallgehalte und die entsprechende Ausschöpfung der Grenzwerte nach AbfKlärV sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink
63	1.4	46	274	23	1	809
7%	14%(28%)	5%	34%	11%	12%	32%

Tabelle 2: Durchschnittliche Schwermetallgehalte und Grenzwertausschöpfung der AbfKlärV von bundesdeutschen Klärschlämmen (in mg/kg) [BMU01]

1.2. Mengenaufkommen

Von den ca. 80 Mio. Einwohnern in Deutschland sind mehr als 90% an das System der öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen angeschlossen. Im Rahmen der Abwasserreinigung fallen dabei nach Angaben des statistischen Bundesamtes mehr als 4 Mio. t/a Klärschlamm Trockenmasse an.

Baden-Württemberg besitzt mehr als 1100 kommunale Kläranlagen, die 1991 noch fast 400.000 t/a Klärschlamm produzierten. Das Klärschlamm aufkommen reduzierte sich in 2001 auf etwas unter 300.000 t/a. Aus den Zahlen ist eine differenzierte Unterscheidung der Einleitung von Gewerbe und Haushalten nicht möglich.

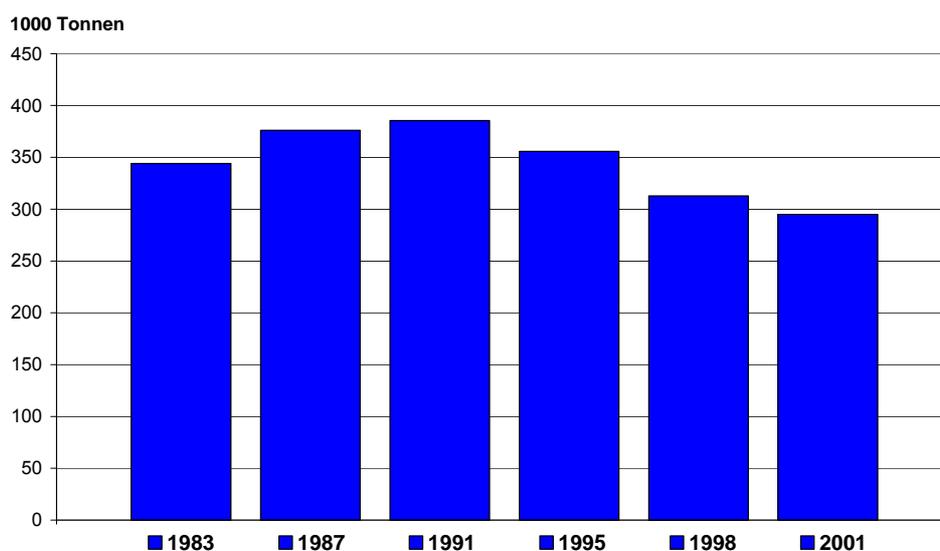


Abb.1: Klärschlamm aufkommen Baden-Württemberg [StaLa04]

1.3 Wege der Verwertung / Beseitigung

Nach Angabe des Statistischen Landesamts [StaLa04] wurde 1983 der Grossteil des Klärschlammes (210.000t/a) auf Deponien aufgebracht (s. Abb. 2). 2001 wurden nur noch knapp 22.400t des Aufkommens deponiert. Im gleichen Zeitraum stieg die verbrannte Menge von 38.100t/a auf 89.100t/a. Die Ausbringung in der Landwirtschaft ging leicht zurück. Die Verwertung im Landschaftsbau einschließlich Kompostierung ist seit 1991 stark angestiegen (ca. 120.000t in 2001). Dieser Anstieg findet sich auch in den exportierten Mengen wieder (zu beachten in Abb.2: exportierte Mengen sind Teilmengen der Entsorgungs-/Verwertungswege). Nach [Rentz97] wurden diese Mengen in den neuen Bundesländern und in Bayern überwiegend der landwirtschaftlichen oder landbaulichen Verwertung zugeführt.

Fazit: Etwa 30 % des Klärschlammes aus Baden-Württemberg wurde von der Beseitigung auf der Deponie in die Verwertung im Landschaftsbau der neuen Bundesländer umgeleitet.

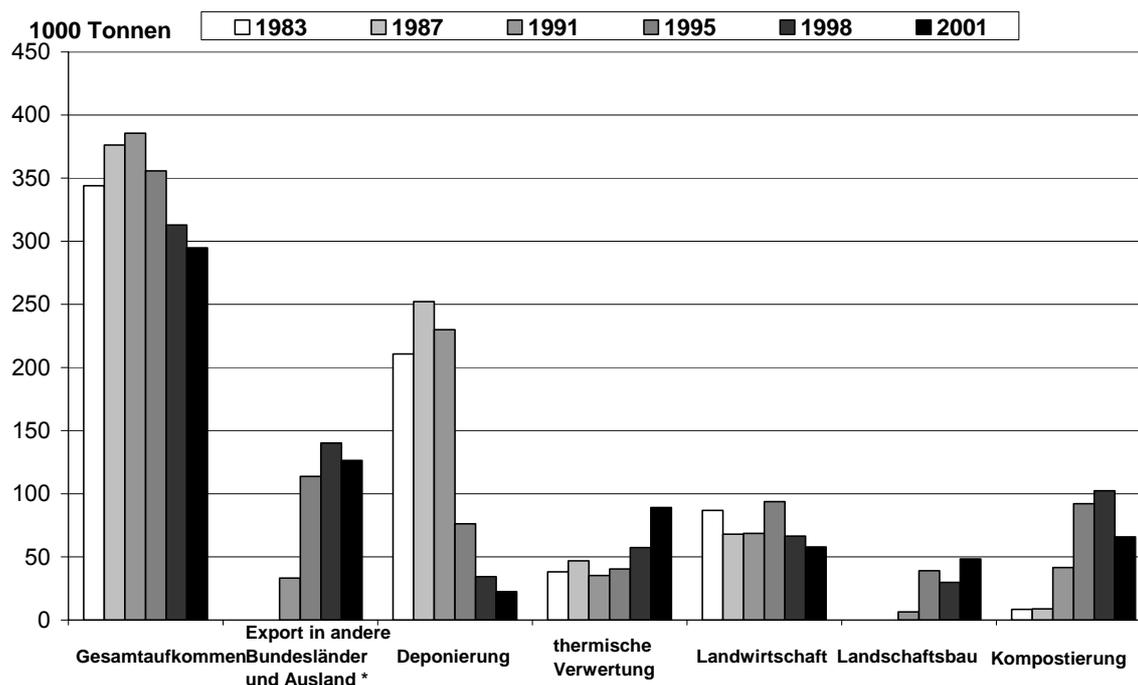


Abb.2: Wege der Klärschlammensorgung und -verwertung in Baden-Württemberg [StLa04]
*exportierte Mengen sind Teilmengen der Entsorgungs-/Verwertungswege

1.4 Tendenzen bei Mengen und Zusammensetzung

Das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg rechnet mit einem langfristig konstanten Klärschlammaufkommen [KE02]. Es wird davon ausgegangen, dass steigende Mengen auf Grund verschärfter Anforderungen an die Abwasserreinigung (zusätzliche Behandlungsstufen in den Kläranlagen) durch verstärkte Anstrengungen zur besseren Abtrennung der Nutstoffe im Klärschlamm oder durch verbesserte Ausfäulung kompensiert werden.

Nachdem in den letzten Jahren die Schwermetallproblematik im Klärschlamm diskutiert wurde, rücken z. Zt. die organischen Schadstoffkomponenten verstärkt in den Blickpunkt [BMU01].

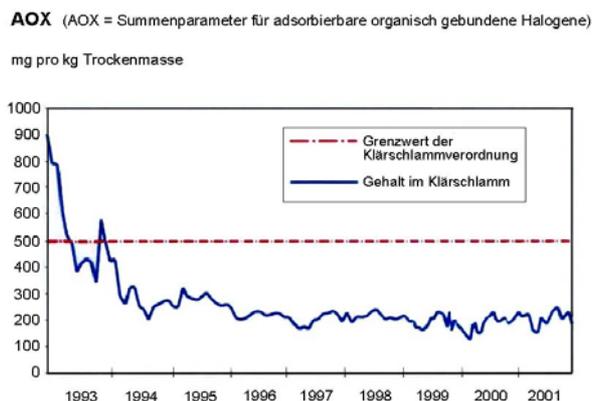


Abb. 3: Konzentration organischer Schadstoffe, AOX
Charakteristischer Verlauf für BaWü [KE02]

Die Konzentration adsorbierbarer organischer Halogenverbindungen AOX in landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämmen Baden-Württembergs zeigt einen starken Rückgang bis 1994 und ist seither konstant bei ca. 200 mg/kg Schlamm Trockensubstanz (Abbildung 3). Mit einer Verminderung wird in den nächsten Jahren nicht gerechnet [KE02]. Dieser Summenwert liegt deutlich unterhalb des Grenzwertes für die landwirtschaftliche Nutzung gemäß Klärschlammverordnung.

In den letzten Jahren wurden Klärschlämme hinsichtlich ihres Gehalts an hochmolekularen organischen Einzelsubstanzen verstärkt analysiert. Dabei wurden Reste von Arzneimitteln (z. B. Antibiotika, empfängnisverhütende, schmerzstillende Medikamente), Industriechemikalien mit östrogenen Wirkung, Flammenschutzmitteln und endokrinen Substanzen nachgewiesen. Die Wirkung dieser diffus in die Umwelt eingetragenen Spurenstoffe ist zum heutigen Zeitpunkt nicht geklärt.

Aus dieser Veränderung der qualitativen Bewertung des Klärschlammes sind entsprechende Konsequenzen für die Entsorgung des Klärschlammes abzuleiten.

2. Darstellung der Ziel-Vorgaben

Folgende gesetzliche Regelungen sind für Klärschlamm relevant:

KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
AbfKlärV	Klärschlammverordnung
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
DüMV / DüV	Düngemittelverordnung/Düngeverordnung
EU Richtlinie 86/278/EWG vom 12. Juni 1986	Schutz der Umwelt insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft
EU Richtlinie 76/116/EWG vom 18. Dezember 1975	Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Düngemittel
TASi	Technische Anleitung Siedlungsabfall
17. BImSchV	17. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes – Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche Brennstoffe

Tabelle 3: Überblick über die für den Klärschlamm relevante Gesetzgebung

2.1 Zielvorgaben EU

Die Richtlinie 86/278/EWG des Rates vom 12.06.1986 über den Schutz der Umwelt insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft bezweckt, die Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft so zu regeln, dass schädliche Auswirkungen auf Böden, Vegetation, Tiere und Menschen verhindert und zugleich eine ordnungsgemäße Verwendung von Klärschlamm gefördert werden. Die Mitgliedstaaten können strengere Bestimmungen, als sie in dieser Richtlinie vorgesehen sind, erlassen. Diese Bestimmungen sind der Kommission mitzuteilen.

Nationale und regionale Alleingänge zum Verbot der KS-Ausbringung sind grundsätzlich zulässig. Jedoch kann die rechtliche und rechtsstaatliche Begründung aufwändig werden angesichts des Widerspruchs zum Willen der EU zur Vereinheitlichung von Richtlinien und Regulierungen. In der Novellierung der KS-Richtlinie sollte darauf hingewirkt werden, dass ein regionales Verwendungsverbot ausdrücklich für zulässig erklärt werden kann [BMU01].

Die Situation in der EU ist sehr heterogen. Während in wenigen Ländern die Debatte beendet und eine Lösung gefunden wurde, ist das Thema der Klärschlammverwertung in anderen Ländern noch nicht thematisiert worden.

wesentlich strenger gefasst als EU-RiLi	Niederlande(1), Dänemark(2), Schweden(3), Finnland(4)
strenger gefasst als EU-RiLi	Belgien: Flandern(1)/Wallonien(4), Österreich(5) Frankreich(4), Deutschland(6)
ähnlich wie EU-RiLi	Vereinigtes Königreich(7), Luxemburg(8), Irland(9), Portugal(9), Italien(10), Griechenland(10), Spanien(10),

- (1) Debatte beendet, KS-Ausbringung untersagt, NL seit 1991, B/FI 1999
 (2) Debatte fast beendet, DK 2000 „kontrollierte“ Ausbringung,
 (3) S 1994 freiwillige Vereinbarung zwischen Umweltamt, Bauernverband, Abwasserverband
 (4) Meinung im Bauernverband gekippt hinzu Verbot der KS-Ausbringung
 (5) verstärkte Verhandlungen
 (6) D keine abschließende Vereinbarungen, Grenzwerte werden weiter gesenkt
 (7) UK 1999, Bauernverbände begrüßen KS-Ausbringung
 (8) Grundsätzliche Ablehnung der KS-Ausbringung
 (9) Bauern unterstützen moderate KS-Ausbringung, Debatte beginnt
 (10) KS-Ausbringung erlaubt, wenn die Grenzwerte der EU Richtlinie 86/278/EWG vom 12. Juni 1986 eingehalten werden

Tabelle 4: Überblick über den Status der europäischen Klärschlammdebatte

2.2 Zielvorgaben Deutschland

Durch das Inkrafttreten des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (1996) und durch die Verabschiedung der TASI (1993) verstärkte sich der Druck auf die Entsorgungs- und Verwertungspraxis beim Klärschlamm. Einerseits tritt der Vorrang der Vermeidung und Verwertung vor der Beseitigung ein und andererseits ist zu berücksichtigen, dass Abfälle mit einem Glühverlust von > 5 Gew-% nur noch bis zum Jahre 2005 deponiert werden dürfen. Dies betrifft auch den Klärschlamm.

Klärschlämme, die auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht werden, unterliegen in Deutschland sowohl dem Abfallrecht (Klärschlammverordnung – AbfKlärV) als auch dem Düngemittelrecht (Düngemittelverordnung – DüMV und Düngerverordnung – DüV). Für Klärschlämme, die im Landschaftsbau eingesetzt werden, muss zusätzlich das Bodenschutzrecht (Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung – BBodSchV) beachtet werden.

Das Abfallrecht regelt dabei die schadstoffseitigen Voraussetzungen für die Verwertung: So werden Bodengrenzwerte und Klärschlammgrenzwerte in der AbfKlärV vorgegeben. Außerdem wird dort die Aufbringungsmenge von Klärschlämmen auf landwirtschaftliche Fläche begrenzt (max. 5 t/ha in 3 Jahren).

Das Düngemittelrecht regelt die nährstoffseitigen Anforderungen einschließlich der düngemittelrechtlichen Zulassung: Der Sekundärrohstoffdünger Klärschlamm muss darüber hinaus als Düngemitteltyp nach Düngemittelverordnung zugelassen sein. Die Düngerverordnung regelt die pflanzenbedarfsgerechte und standortgerechte Aufbringung (gute fachliche Praxis). Eine Überdüngung des Bodens ist dabei zu vermeiden.

Das Bodenschutzrecht regelt über den §12 der BBodSchV den Einsatz von Klärschlämmen im Landschaftsbau und in der Rekultivierung. Dort sind die Anforderungen an das Aufbringen und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden festgelegt. Rechtslücken sind vorhanden für unbekannte oder schwer nachweisbare Stoffe (z.B. endokrin wirksame Stoffe). Eine Harmonisierung von Bioabfall-, Klärschlamm- und Bodenschutzverordnung steht noch aus.

In Deutschland darf Klärschlamm kompostiert werden, wird dadurch aber nicht zum Kompost, er darf auch nicht in irgendeiner Weise Kompost beigemischt werden. Selbst nach einer Kompostierung unterliegt der Klärschlamm weiterhin der AbfKlärV.

Die thermische Behandlung von KS ist nicht in der KS-Verordnung adressiert. Daher kommen in diesem Zusammenhang nur die TASI und das Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchV) zum Tragen.

2.3 Zielvorgaben Baden-Württemberg

Baden-Württemberg strebt eine nachhaltige Abfallwirtschaft an, durch die Ressourcen geschont und Umweltbeeinträchtigungen soweit als möglich vermieden werden. Dies bedingt die Entwicklung einer Ressourcen schonenden und umweltverträglichen Kreislaufwirtschaft, in der Abfälle durch vorausschauende Produktgestaltung und optimierte betriebliche Abläufe vermieden oder aber nutzbringend verwertet werden können, sowie eine langfristig sichere, nachsorgefreie und kostengünstige Restabfallbeseitigung [UP04].

Laut [KE02] wird den Kläranlagenbetreibern, die heute ihren Klärschlamm deponieren oder „im Boden“ verwerten, dringend empfohlen, sich so bald als möglich um ein thermische Entsorgungsmöglichkeit und eine hierzu eventuell notwendige Optimierung der Behandlung ihres Schlammes zu bemühen. In [KE02] und [UP04] werden folgende Empfehlungen ausgesprochen:

- Dokumentation der Menge und Beschaffenheit des KS
- Reduzierung des Klärschlammanfalls
- Einholung von Angeboten zur thermischen Entsorgung von KS
- Abklärung des Bedarfs eines überörtlichen KS-Management
 - Erkundung eines Klärschlamm-Verwertungsmarktes
 - Verbesserung der Überwachung des Klärschlammes
- Optimierung des KS-Behandlung (z.B. Trocknung, Transport)
- Prüfung des Investitionsbedarfs

3. Beschreibung und Bewertung der Verwertungs- und Beseitigungswege

Die Verfahren zur Verwertung und Beseitigung von Klärschlamm werden beschrieben und unter technischen und ökologischen Aspekten bewertet.

3.1 Direkte Verwertung

3.1.1 Deponierung

Die Deponierung von unbehandeltem Klärschlamm ist gemäß TA Siedlungsabfall nach 01.06.2005 verboten. Für verschiedene Deponien wurden bereits Ausnahmegenehmigungen für die Ablagerung von unbehandelten Abfällen (TOC \geq 3 bzw. 5 Gew. %) erteilt. Der politische Wille sowohl der Länder als auch des Bundes ist die Durchsetzung der TAsi ohne Ausnahmen. Ob dies umgesetzt werden wird, kann z. Zt. nicht beurteilt werden.

Eine Deponierung von Klärschlamm ist nach dem 01.06.2005 nicht mehr zulässig.

3.1.2 Landwirtschaft

Die Beibehaltung der derzeitigen Ausbringung von im Rahmen der AbfKlärV und BBodSchV geeigneten Klärschlämmen ist stark abhängig von der derzeitigen Diskussion um die organischen Schadstoffe, besonders Medikamentrückstände und endokrine und antibiotikaresistente Substanzen des Klärschlammes [SCHW04]. Des Weiteren ist Phosphor kein Mangelnährstoff in den Böden Baden-Württembergs, so dass Klärschlamm als Dünger in der Regel nicht erforderlich ist. Die Akzeptanz der Verwendung des KS in der Landwirtschaft ist sehr unterschiedlich. [BMU01].

Zukünftig muss mit weiteren Absenkungen in den Grenzwerten gerechnet werden. Die Einführung von Grenzwerten für organische Schadstoffe ist anzustreben.

Die landwirtschaftliche Nutzung von Klärschlamm ist unter der Vorgabe einer nachhaltigen Abfallwirtschaft nicht akzeptabel.

3.1.3 Landschaftsbau

Kompostierte Klärschlämme sind gemäß der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) oder der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) zu verwerten. Da es außer beim Einsatz in der Landwirtschaft keine Nachweispflichten für kompostierte Klärschlämme beim Einbringen in den Stoffkreislauf gibt, ist zu unterstellen, dass die Produkte i. d. R. in der Rekultivierung und im Landschaftsbau eingesetzt werden. Mit Inkrafttreten der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) sind außerhalb des Regelungsbereiches der Klärschlammverordnung (Landwirtschaft/Gartenbau) die materiellen Anforderungen des Bodenschutzrechtes anzuwenden, hier ist insbesondere der § 12 BBodSchV zu beachten. Bei dem Einsatz von Klärschlämmen im Bereich Rekultivierung/Landschaftsbau sind nicht nur die Schadstoff- sondern auch die Nährstoffgehalte im Hinblick auf eine schadlose und nützliche Verwertung relevant (gute fachliche Praxis) [BMU01].

Langfristig muss mit einem Rückgang dieses Entsorgungspfades gerechnet werden, da die Rekultivierung devastierter Flächen im größeren Maßstab in den nächsten Jahren abgeschlossen sein wird und der mengenmäßige Einsatz von Klärschlämmen aufgrund der hohen Nährstoffgehalte durch die BBodSchV limitiert wird.

Die landschaftsbauliche Nutzung von Klärschlamm ist unter der Vorgabe einer nachhaltigen Abfallwirtschaft nicht akzeptabel.

Risikobewertung

Den oben aufgeführten direkten Verwertungsverfahren in Landwirtschaft und Landschaftsbau ist gemeinsam, dass für die organischen Bestandteile, insbesondere Arzneimittelrückstände und endokrine Substanzen keinerlei Risikobewertung existiert [BMU01].

Eine unstrittige Risikobewertung für Klärschlamm im Sinne eines tatsächlichen Risikos ist zurzeit nicht vorhanden. Im Sinne der Vorsorge ist daher angebracht jegliche direkte Verwertung von Klärschlamm bis zur Erstellung einer Risikobewertung zu untersagen.

3.2 Thermische Behandlung

Für die thermische Behandlung von Klärschlamm werden Verbrennungs- oder Vergasungsverfahren eingesetzt. Bei der Verbrennung werden die organischen Anteile (Schlammbiomasse und Schadstoffe) bei Temperaturen größer 850°C mit Luft praktisch vollständig in Kohlendioxid CO₂ und Wasser H₂O umgewandelt, die fühlbare Wärme der Rauchgase wird zur Dampf- und Stromerzeugung genutzt. Die Vergasung führt zu einem heizwerthaltigen Prozessgas (Synthesegas), das in der Regel ebenfalls energetisch verwertet wird. Die inerten Bestandteile des Klärschlammes werden als Asche oder Schlacke (je nach Prozesstemperatur) ausgetragen. Der Kohlenstoffrestgehalt der Aschen / Schlacken liegt in der Regel bei < 3 Gew. %. Die Auslaugbarkeit (Freisetzung von Schadstoffen, z.B. Schwermetalle) wird nach den strengen Vorschriften der LAGA überprüft. Die Schlacken / Aschen werden stofflich verwertet, z.B. als Zuschlagstoffe in der Zementproduktion oder im Straßenbau.

Für die thermische Behandlung ist der untere Heizwert H_u des Klärschlammes das entscheidende Kriterium. Dieser hängt wesentlich vom Wassergehalt bzw. vom Trockensubstanzgehalt TS und somit von der Vorbehandlung des Klärschlammes ab. Nach dem Eindicker werden TS-Gehalte von maximal 10 Gew.% erreicht. Eine mechanische Entwässerung (Zentrifuge, Dekanter, Filterpresse) führt zu TS-Gehalten von 20 – 45 Gew.%. Bei der thermischen Trocknung werden 80 – 95 Gew.% TS erreicht.

Eine selbstgängige Verbrennung (ohne Zufeuerung von Stützbrennstoff) ist ab einem unteren Heizwert H_u von ca. 5 MJ/kg möglich. Dieser Heizwert stellt sich je nach Art des Klärschlammes bei einem TS-Gehalt im Bereich 40 - 70 Gew.% ein. Mechanisch entwässerter Klärschlamm kann daher in der Regel nur mit Stützbrennstoff verbrannt werden.

Die energetische Verwertung von Abfällen ist gemäß Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz nur für Abfälle mit einem Heizwert $H_u > 11$ MJ/kg möglich. Diese Festlegung ist rein politisch motiviert (die energetische Verwertung von unbehandeltem Hausmüll soll nicht zugelassen werden). Vom technisch/wissenschaftlichen Standpunkt können Abfälle mit deutlich geringerem Heizwert energetisch verwertet werden (der Heizwert des Brennstoffs Braunkohle liegt bei ca. $H_u = 8$ MJ/kg).

Die energetische Verwertung von Klärschlamm setzt auf Grund der gesetzlichen Vorgabe damit in der Regel eine thermische Trocknung voraus.

3.2.1 Monoverbrennung

Klärschlämme insbesondere aus der industriellen Produktion werden überwiegend in Wirbelschichtöfen verbrannt. Man unterscheidet stationäre und zirkulierende Wirbelschichten. Der Klärschlamm muss entwässert und eventuell mit einem Heizwertträger (z. B. Ballastkohle) angereichert werden, bevor er in den Wirbelschichtofen eingetragen wird. Moderne stationäre Wirbelschichtanlagen werden heute für Durchsätze bis 50.000 t STS/a (Schlamm-trockensubstanz) gebaut, dies entspricht einer Filterkuchenmenge von ca. 200.000 t/a bzw. einer thermischen Leistung von ca. 25 MW (unterer Heizwert ca. 3.500 kJ/kg). Prinzipiell besteht der Wirbelschichtofen aus einem zylindrischen Schacht mit einem Düsenboden durch den vorgewärmte Verbrennungsluft eingetragen wird. Die Luft durchströmt das Wirbelbett gegen die Schwerkraft und hält es damit in Bewegung. Das Bettmaterial besteht zu ca. 90 % aus Sand oder Schlacke und nur zu ca. 10 % aus Brennstoff. Das Inertmaterial dient als Wärmeträger. Aufgrund der intensiven Durchmischung von Inertmaterial, Brennstoff und Verbrennungsluft, stellen sich im Wirbelbett sehr homogene Temperatur- und Konzentrationsverteilungen ein, so dass heizwertarme Brennstoffe sehr gut ausbrennen. Die Feuerraumtemperatur liegt bei 850 - 950°C. Die fühlbare Wärme der Rauchgase wird zur Dampf- und Stromproduktion genutzt.

Neben der Wirbelschicht ist der Etagenherdofen für industrielle Klärschlämme im Einsatz. Dieses System ist jedoch verfahrenstechnisch sehr anspruchsvoll (drehende Teile im Hochtemperaturprozess) und hat für die Monoverbrennung von Klärschlamm keine Vorteile gegenüber der Wirbelschicht.

In Baden Württemberg werden 2 kommunale Klärschlammverbrennungsanlagen auf Basis der Wirbelschichttechnologie betrieben (Gesamtkapazität 35.000 t STS/a). Eine weitere Anlage in Bayern (10.000 t STS/a) verarbeitet Klärschlamm aus BW. Eine Zyklonverbrennung mit vor geschalteter Wirbelschichttrocknung (2.000t STS/a) ist nicht in Betrieb.

Die Mono-Verbrennung von Klärschlamm im Wirbelschichtofen ist Stand der Technik. Günstigstes Verfahren unter dem Gesichtspunkt Schadstoffsenke (Zerstörung von organischen Schadstoffen und Abscheidung von Schwermetallen). Geringerer elektrischer Wirkungsgrad (< 20%) gegenüber Kraftwerk, hohe Kosten.

Bei der **Mitverbrennung** wird Klärschlamm als Ersatzbrennstoff EBS in Feuerungsanlagen für fossile Brennstoffe (Kohlekraftwerk), in Müllverbrennungsanlagen (Rostofen) oder in Hochtemperaturprozessen der Grundstoffindustrie (Zementdrehrohr) zugefeuert. Diese Anlagen sind verfahrenstechnisch für den Einsatz eines Regelbrennstoffs (z.B. Kohle, Hausmüll) ausgelegt und können daher nur einen begrenzten Anteil dieses Regelbrennstoffs durch Klärschlamm ersetzen.

Beim Einsatz von Klärschlamm als Ersatzbrennstoff muss der Anlagenbetreiber Vorteile und Risiken bewerten. Dabei sind insbesondere folgende Aspekte zu beachten:

- verfahrenstechnische Änderungen, z.B. Beschickung
- prozesstechnische Risiken, z.B. Stillstandszeiten
- Produktqualität, z.B. Schlackeverwertung
- Emissionen, z.B. Quecksilber
- Genehmigung, z.B. nach Abfallrecht
- Ökonomie, z.B. erforderliche Zuzahlung
- Soziale / politische Randbedingungen, z.B. Akzeptanz des Umfeldes

3.2.2 Mitverbrennung in der Müllverbrennungsanlage MVA

Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und spezielle Abfallfraktionen werden überwiegend in Rostöfen bei Temperaturen größer 850 °C verbrannt. Die Anlagen sind für ein breites Abfallspektrum mit einem mittleren Heizwert von 8 – 11 MJ/kg ausgelegt. Die im Brennstoff chemisch gebundene Enthalpie wird zur Dampf- und Stromproduktion genutzt; die Anlagen sind jedoch nur im Ausnahmefall als Anlagen zur energetischen Verwertung genehmigt. Der Inertanteil des Brennstoffs wird als Rostasche ausgetragen und überwiegend im Straßenbau oder als Zuschlagstoff stofflich verwertet. Die gas- und partikelförmigen Schadstoffe werden in einer aufwändigen Rauchgasreinigung auf Emissionswerte gemäß 17. BImSchV gereinigt. Mechanisch entwässerte Klärschlämme können mit einem Anteil von bis zu 20 Gew. % über das Standardbeschickungssystem (Bunker) aufgegeben werden. Für die Anlagenbetreiber ergeben sich Probleme bzgl. Geruchsbelästigung und Hygiene bei Anlieferung und im Bunker (Biostoff-VO). Quecksilber-Emissionen können bei bestimmten Konfigurationen der Rauchgasreinigungssysteme zusätzliche technische Maßnahmen erfordern.

In Baden-Württemberg werden 6 MVAs, davon 5 Rostöfen mit einer Gesamtkapazität von 0,9 Mio. t/a (BRD: 58 Anlagen mit 13 Mio. t/a) betrieben. Die Anlagen sind z.

Zt. überwiegend nicht voll ausgelastet. Nach Inkrafttreten der TA Siedlungsabfall (06/2005) wird die Kapazität der verfügbaren Anlagen durch die gegenwärtig noch deponierten Abfallmengen ausgelastet werden.

2001 wurden in der BRD 12 MVAs mit einer Gesamtmenge von 39.000 t/a (TS) Klärschlamm beschickt. Eine Erhöhung der Mengen auf 63.000 t/a war zu diesem Zeitpunkt geplant [ITAD03]. Diese Mengen entsprechen einem Anteil von ca. 2 % der Gesamt-Klärschlammmenge (kommunal) in der BRD.

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Müllverbrennungsanlagen ist Stand der Technik. Nach Inkrafttreten der TA Siedlungsabfall (06/2005) wird eine Vollauslastung der MVAs durch Hausmüll erwartet. Kapazitäten für die Klärschlammverbrennung sind über Preise geregelt. Ökologie und Ökonomie vergleichbar mit Mono-Verbrennung.

3.2.3 Mitverbrennung im Kraftwerk / Heizkraftwerk

Die in der Kraftwerkstechnik eingesetzten Feuerungssysteme sind Rostfeuerung, Wirbelschicht und Staubfeuerung. Großanlagen werden in der Regel als Staubfeuerungen im Leistungsbereich 300 – 2000 MW thermisch ausgeführt. Als Brennstoff wird sowohl Steinkohle (Hu = 30 MJ/kg, Wassergehalt < 13 Gew.%) als auch Braunkohle (Hu = 8 MJ/kg, Wassergehalt = 50 Gew.%) eingesetzt. Der Abzug der Asche erfolgt schmelzflüssig (Schmelzkammerfeuerung) oder staubförmig (Trockenfeuerung). Die Schlacke wird im Straßenbau oder als Zuschlagstoff stofflich verwertet. Die gas- und partikelförmigen Schadstoffe werden in einer aufwändigen Rauchgasreinigung auf Emissionswerte gemäß 13. BImSchV (Großfeuerungsanlagen Verordnung) gereinigt. Beim Einsatz von Abfall müssen anteilig die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV eingehalten werden. Der elektrische Wirkungsgrad von Kohlekraftwerken liegt bei ca. 40% und damit um den Faktor zwei über den Wirkungsgraden zur Stromerzeugung der Mono- und Müllverbrennungsanlagen.

Wie bei der Müllverbrennung sind auch bei den Kraftwerken hauptsächlich die Verfahrensschritte Anlieferung und Beschickung kritisch. Auf Grund des hohen Wassergehalts muss die Erhöhung der Rauchgasmenge als kapazitätsbegrenzende Größe beachtet werden. Die Einhaltung der Quecksilber-Emissionsgrenzwerte kann ebenfalls die KS-Menge begrenzen [For04].

Mechanisch entwässerter Klärschlamm kann in Braunkohlekraftwerken mit 5% thermischem Anteil eingesetzt werden. In Steinkohle gefeuerten Kraftwerken kann mechanisch entwässerter Klärschlamm bis maximal 1,5 % eingesetzt werden; thermisch getrockneter KS kann mit höherem Anteil zugegeben werden, die Trocknung ist jedoch nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich darstellbar.

Wesentliche Kriterien der Kraftwerksbetreiber bei der Mitverbrennung von Klärschlamm sind:

- keine Beeinträchtigung des Hauptprozesses der Stromerzeugung (bzgl. Anlagenverfügbarkeit, Anlagenkapazität)
- keine Einschränkung der Verwertungsfähigkeit der Produkte (Schlacke, REA-Gips)
- Genehmigung (nach Abfallrecht)
- Akzeptanz der Mitverbrennung im Umfeld (politisch, sozial)

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken ist heute Stand der Technik [IVD00].

Die Kapazitäten der Kohlekraftwerke in der BRD (Steinkohle: 46,5 Mio. t/a SKE, Braunkohle: 45,9 Mio. t/a SKE, Basis 1998) sind theoretisch ausreichend, um bei einem thermischen Anteil von 3 % Klärschlamm das gesamte Klärschlammaufkommen in Braunkohlekraftwerken mit zu verbrennen [Urb04]. In Steinkohlekraftwerken ist die Mitverbrennungskapazität für mechanisch entwässerten KS auf Grund der sehr unterschiedlichen Brennstoff-Spezifikation deutlich geringer.

In einer Studie der Landesanstalt für Umweltschutz [LfU03] wird die genehmigte Kapazität für die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken in Baden-Württemberg mit 40.000 t/a angegeben (Heizkraftwerk Heilbronn). Die tatsächlich verbrannten Mengen lagen 2001 bei 28.000 t.

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken ist Stand der Technik. Die Kapazitäten der Braunkohlekraftwerke sind theoretisch ausreichend, um die Gesamtmenge Klärschlamm in der BRD bei einem Lastanteil von 3 % mit zu verbrennen. Ökonomisch günstigstes Verfahren, ökologisch günstig.

3.2.4 Mitverbrennung im Zementdrehrohr

Zementklinker wird bei Temperaturen von 1200 – 1500°C im Drehrohr aus Kalkstein und Ton/Kalksteinmergel gebrannt. Sekundärrohstoffe wie z.B. Schlämme aus der Wasseraufbereitung, Gießereialtsande und Aschen aus Verbrennungsprozessen ersetzen bis zu 35%, in Ausnahmefällen bis zu 95% der Primärrohstoffe. Stein- und Braunkohle sind die Hauptenergieträger des Hochtemperaturprozesses, bis zu 60 % des Energiebedarfs wird aus Sekundärbrennstoffen (hauptsächlich Reifen, Altöl, aufbereitete Fraktionen aus Haus- und Gewerbemüll) gedeckt.

Klärschlämme können als Sekundärrohstoff (hoher Inertanteil) und Sekundärbrennstoff (Heizwert) im Klinkerbrennprozess fungieren.

Der im Klärschlamm enthaltene Phosphor beeinflusst die Klinkerqualität ab Konzentrationen >2 Gew.% P₂O₅ negativ [Salge73]. Dieser Wert ist aufgrund der Mengenverhältnisse nicht problematisch für den Einsatz von Klärschlamm im Zementprozess.

Grundsätzlich müssen bei der Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementdrehrohren die Schadstoffpfade kritisch betrachtet werden. Organische Schadstoffe werden auf Grund der hohen Temperaturen und Verweilzeiten praktisch vollständig zerstört. Schwermetalle werden entweder im Produkt (Zementklinker) eingebunden und damit über das Baugewerbe diffus in die Umwelt eingebracht oder über das Abgas in die Atmosphäre abgegeben (Zementdrehrohre haben außer der Staubabscheidung keine weiteren Rauchgasreinigungsstufen). Bei den Rauchgasen ist die Einhaltung der Quecksilber-Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV problematisch.

In einer Studie des LfU [LfU03] wird die genehmigte Kapazität für die Mitverbrennung von Klärschlamm in der Zementindustrie in Baden-Württemberg mit 21.000 t/a angegeben (Versuchskapazität in 1 Zementwerk). Diese Kapazität wurde praktisch nicht genutzt. Bundesweit wurden ebenfalls nur verschwindende Mengen an Klärschlamm eingesetzt.

Zurzeit werden, auch auf Initiative der Landesregierung BW, verstärkt Untersuchungen zur Mitverbrennung von Klärschlamm durchgeführt. Dabei werden nach Aussage des Vereins Deutscher Zementwerke überwiegend thermisch getrocknete Klärschlämme eingesetzt. Die Ergebnisse der Untersuchungen insbesondere die ökologische Bewertung müssen abgewartet werden.

Die Einbindung der Schwermetalle in den Baustoff Zement ist entscheidend für die ökologische Bewertung des Verwertungsweges. Die Ergebnisse laufender Untersuchungen müssen abgewartet werden. Hohe verfügbare Kapazitäten, ökonomisch günstig.

3.2.5 Vergasungsverfahren

Verfahren zur Vergasung von Abfällen wurden aus der Kohlevergasung weiterentwickelt. Die Abfälle werden mit einem Vergasungsmittel (Dampf, Sauerstoff, Luft) bei Temperaturen von 1200 – 2000°C teilweise unter erhöhtem Druck (bis 30 bar) in ein heizwertreiches Gas (Synthesegas) umgewandelt. Synthesegas wird dann zur Produktion von Chemierohstoffen (z.B. Methanol) oder zur Stromerzeugung genutzt.

In den Vergasern der SVZ Schwarze Pumpe (Sachsen) wurden 24.000 t thermisch getrockneter und brikettierter Klärschlamm (STS) in 2001 vergast.

Das THERMOSELECT-Verfahren in Karlsruhe wäre technisch in der Lage Klärschlämme zu vergasen, es wurde jedoch keine Genehmigung für Klärschlämme beantragt (Anlage in Karlsruhe geht außer Betrieb). In Baden-Württemberg ist eine Pilotanlage zur Monovergasung von Klärschlamm in Betrieb (1.000t STS/a).

Die Wirtschaftlichkeit des großtechnischen Verfahrens der SVZ ist nicht geklärt, so dass dieses Verfahren z. Zt. keine langfristige Entsorgungssicherheit für Klärschlamm bieten kann.

Die Mit-Vergasung von Klärschlamm in Abfallvergasungsanlagen ist Stand der Technik. Die zukünftige Verfügbarkeit dieser Verfahren ist fraglich, da die Wirtschaftlichkeit nicht geklärt ist. Verfahren ökologisch günstig, hohe Kosten.

3.3 Nassoxidative Verfahren

Eine weitere Möglichkeit der Klärschlammbehandlung sind nassoxidative Verfahren. Mit dem Begriff Nassoxidation wird die flammenlose Oxidation von Substanzen in wässriger Lösung oder dispergiert mit Sauerstoff, Luft oder anderen Oxidationsmittel bei erhöhten Drücken und Temperaturen umschrieben. Stellvertreter hierfür ist als einziges noch verwendetes Verfahren das Seaborne-Verfahren.

3.3.1 Seaborne-Verfahren

Das Seaborne-Verfahren ist ein Verfahren zur Aufbereitung organischer Reststoffe (Klärschlamm, Gülle). Die einzelnen Stufen der Seaborne-Technologie sind grundsätzlich keine neuen Verfahrensschritte. Sie werden in unterschiedlichen Bereichen der Abwasserreinigung oder der chemischen Industrie teilweise seit Jahren verwendet und sind hier zu einem komplexen Gesamtprozess gekoppelt. Seit 2000 ist eine Pilotanlage in Owschlag (Schleswig-Holstein) in Betrieb mit einer Durchsatzleistung

von 4000m³/a (ca. 7-8 m³/d). Der Bau einer Seaborn-Anlage im Klärwerk Gifhorn soll Anfang 2005 beendet sein und Ende 2005 den Betrieb aufnehmen.

Aus der Biomasse werden Schwermetalle mittels einer chemischen Lösung extrahiert und anschließend mit Schwefelwasserstoff, der aus dem Biogas stammt, gefällt. Das aus der Biomasse entstandene und entschwefelte Biogas wird zur energetischen Verwertung zu Methangas aufgearbeitet. Die ausgefaulte Biomasse wird in einem Separator in Fest- und Flüssiganteile getrennt. Die Feststoffe werden getrocknet, pelletiert und können so als Heizmaterial eingesetzt werden. In der nachfolgenden Stickstoff-Wiederaufbereitung werden Pflanzennährstoffe wie N, P, und K durch chemische Fällung aus der flüssigen Phase extrahiert und anschließend zu reinen Nährstoffdüngemitteln (Mineraldünger) zusammengesetzt. Übrig bleiben neben Wasser, das bis zur Vorfluterqualität gereinigt werden kann, mineralische Bestandteile (Silicate) die im Straßenbau eingesetzt werden können.

Ein interessanter Aspekt bei dieser Technologie ist die Möglichkeit der gemeinsamen Behandlung von KS und Gülle, da hier das Rückgewinnungspotential erweitert werden kann [WAR02].

Die Ökobilanz der KS-Entsorgung in Schleswig-Holstein bescheinigt dem Seaborne-Verfahren positive Entwicklungspotenziale, vor allem durch den integrativen Ansatz [IFEU04]. Jedoch ist die Schlammbehandlung nach dem Seaborne-Verfahren mit erheblichen Kostensteigerungen verbunden.

3.3.2 Verfahren in der Entwicklung

Zu den oben genannten nassoxidativen Verfahren und Methoden gibt es eine Vielzahl von Entwicklungen, die sich zum größten Teil noch im Labormaßstab bzw. nur wenige in einer Vorpilothase befinden. Diese fokussieren auf eine Schlammdesintegration noch im Klärwerk, um eine verbesserte Abbaubarkeit und eine verstärkte Überführung von Nährstoffen, wie z.B. Phosphor in die wässrige Phase zur späteren Auskristallisierung, zu erreichen, sowie eine eventuelle Monoverbrennung hinsichtlich der Ascheverwertung zu unterstützen [CEEP01].

Aus den Entwicklungen der vergangenen Jahre hat sich bis heute keine Verfahren als derart wirtschaftlich und ökologisch erwiesen, dass es sich zu einem etablierten Verfahren entwickelt hätte.

3.4 Bewertung der Verfahren

Klärschlämme weisen sowohl Gefährdungspotenziale (organische Spurenschadstoffe, Schwermetalle) als auch Nutzpoteziale (organische Bestandteile, Phosphor) auf. Die beschriebenen Verfahren zur Klärschlammbehandlung werden im Folgenden bzgl. ihrer Eignung zur umweltgerechten Beseitigung bzw. Nutzung dieser Potenziale bewertet. Die folgende Tabelle fasst die Bewertungsergebnisse zusammen, dabei bedeutet (+ / ++), das Verfahren ist gut / sehr gut geeignet und entsprechend (- / --), das Verfahren ist wenig / nicht geeignet das entsprechende Klärschlamm-Potenzial zu beseitigen / nutzen.

Verfahren	Gefährdungspotential		Nutzpotential	
	Organische Schadstoffe	Schwermetalle	Organik	Phosphor
Deponie	-	-	-	-
Landwirtschaft	--	--	+	+
Landschaftsbau	--	--	+	-
NassOx *	+	offen	+	offen
Monoverbrennung	++	++	+	offen
MVA	++	++	+	-
Kraftwerk	++	+	++	-
Vergasung	++	++	++	-
Zement	++	offen	++	-

*Bewertung bezieht sich nur auf das Seaborne-Verfahren.

Tabelle 5: Bewertungstabelle für Verfahren zur Klärschlammentsorgung

3.4.1 Gefährdungspotenzial

Organische Schadstoffe

Bei den thermischen Verfahren zur Klärschlammbehandlung werden alle organischen Schadstoffe (AOX, Medikamentenrückstände,...) auf Grund der hohen Prozesstemperaturen sicher zerstört.

In nassoxidativen Verfahren werden die organischen Schadstoffe zum großen Teil abgebaut bzw. in einer nachgeschalteten thermischen Verfahrensstufe zerstört. Die Vielfalt der Verfahren und deren unterschiedlicher Entwicklungsstand lassen keine abschließende Bewertung zu.

Organische Schadstoffe werden bei der Verwertung von KS in der Landwirtschaft und im Landschaftsbau nicht zerstört. Sie gelangen über den Boden oder das Grundwasser zurück in den Naturkreislauf.

Bei der Deponierung des Klärschlammes ist der Schadstoffaustrag in Grundwasser und Boden gehemmt (Deponieabdichtung), ist aber langfristig unvermeidbar.

Schwermetalle

Bei den thermischen Verfahren werden die Schwermetalle auf verschiedenen Pfaden aus dem Prozess ausgeschleust: Schlacke / Asche aus Feuerraum und Abhitzeessel, bei der Zementproduktion als Produkt (Zementklinker), Stäube / Schlämme aus der Rauchgasreinigung und gasförmig als Rauchgasemission. Eine Quantifizierung der verschiedenen Pfade ist stark von der Spezifikation des Klärschlammes und von der Anlagenstruktur abhängig und somit nur im Einzelfall durchzuführen. Wesentliche Parameter sind die Flüchtigkeit der Schwermetalle und Metallverbindungen, sowie die Prozessparameter und die Art der Rauchgasreinigung.

Allgemein gilt, dass sowohl Monoverbrennungsanlagen als auch Müllverbrennungsanlagen auf Grund ihrer aufwändigen Rauchgasreinigung die höchsten Rückhaltepotenziale für Schwermetalle aufweisen.

Bei Kohlekraftwerken sind ebenfalls sehr hohe Rückhaltepotenziale gegeben, allenfalls leicht flüchtige Metallverbindungen (Hg, Cd) werden geringfügig schlechter als bei den obigen Systemen abgeschieden.

Zementwerke besitzen in der Regel nur eine Staubabscheidung, so dass leicht flüchtige Schwermetalle z. T. über das Abgas emittiert werden. Schwermetalle mit geringerem Siedepunkt werden im Zementklinker eingebunden oder im Zyklon abgeschieden.

Es bleibt fest zu stellen, dass bei der Mitverbrennung in Kraftwerken und Zementdrehrohren anteilig die gleichen Emissionsgrenzwerte (nach 17. BImSchV) wie bei Abfall- und Monoverbrennungsanlagen gelten.

Bei den nassoxidativen Verfahren werden Schwermetalle ausgefällt und als Schlämme entsorgt. Der Abreicherungsgrad kann auf Grund des derzeitigen Entwicklungsstands dieser Verfahren nicht bewertet werden.

Bei der landwirtschaftlichen Ausbringung, im Landschaftsbau und bei der Deponierung werden die Schwermetalle über den Boden oder das Grundwasser in den Naturkreislauf rückgeführt.

3.4.2 Nutzungspotentiale

Organische Substanz

Bei den thermischen Verfahren wird die organische Substanz des Klärschlammes in Dampf / Elektrizität oder Synthesegas umgewandelt. Der untere Heizwert von mechanisch entwässertem Klärschlamm entspricht dem Wert von Rohbraunkohle, d.h. Klärschlamm ist ein wertvoller Brennstoff. Die Mitverbrennung in Kraftwerk und Zementproduktion ist auf Grund der höheren Wirkungsgrade günstiger als die Monoverbrennung und die Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen.

Der Nutzen der organischen Substanz des Klärschlammes in der Landwirtschaft durch Humusbildung ist in Deutschland als gering einzustufen, da in der Regel kein Humusmangel in den deutschen Böden vorliegt.

Die Nutzung der organischen Substanz wird bei den nassoxidativen Verfahren unterschiedlich realisiert, teilweise wird sie als Brennstoff energetisch verwertet.

Bei der Deponierung werden die organischen Substanzen im Klärschlamm in Depo-niegas umgewandelt, das z. T. energetisch verwertet wird, überwiegend werden sie ungenutzt in die Atmosphäre abgegeben und tragen somit zum Treibhaus-Effekt bei.

Phosphor

Bei der landwirtschaftlichen Nutzung von Klärschlamm wird Mineraldünger eingespart, da jedoch die deutschen Böden überwiegend mit Phosphor überlastet sind, ist dieser positive Aspekt der landwirtschaftlichen Verwertung nur lokal begrenzt gültig. Phosphor kann bei der Mono-Verbrennung aus der Asche rück gewonnen werden, gleiches gilt bei der nassoxidativen Oxidation. Die Verfahren zur P-Rückgewinnung sind jedoch sehr aufwändig und z. Zt. im Entwicklungsstadium. Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren ist heute nicht gegeben.

Bei der thermischen Verwertung des Klärschlammes in Mitverbrennungs-Verfahren ist auf Grund der starken Verdünnung eine P-Rückgewinnung aus den Aschen nicht sinnvoll.

Die Ablagerung von Klärschlamm auf der Deponie und die Verwertung im Landschaftsbau erlaubt keine P-Rückgewinnung.

4. Empfehlungen

Entsorgungswege

Direkte Verwertung (Landwirtschaft und Landschaftsbau) unterlassen. Die Folgen des Eintrags von organischen Stoffen (z.B. Medikamente) in den Boden sind nicht geklärt (Vorsorgeprinzip), Schwermetalle werden in den Kreislauf rückgeführt.

Thermische Behandlung

Mitverbrennung von Klärschlamm ist bei allen in Kap. 3 beschriebenen Verfahren großtechnisch erprobt (Stand der Technik).

Mitverbrennung im **Kohlekraftwerk** ist das Verfahren mit dem größten ökologischen und ökonomischen Potenzial, insbesondere bei mit Rohbraunkohle befeuerten Kraftwerken (Einsatz von mech. getrocknetem Schlamm). Kapazitäten der Kraftwerke reichen aus um gesamte Klärschlammmenge mit zu verbrennen (bezogen auf BRD).

Mitverbrennung im **Zementdrehrohr** ist ökonomisch günstig. Große Kapazitäten sind verfügbar. Die Bewertung der Einbindung der im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle in den Klinker ist offen, deshalb ist keine abschließende ökologische Bewertung möglich.

Freie Kapazitäten in **Monoverbrennungsanlagen** und **MVAs** sollten genutzt werden.

Vergasungsverfahren sind auch mittelfristig aus wirtschaftlichen Gründen keine Optionen.

Nassoxidative Verfahren im Entwicklungsstadium. Mittelfristig keine wesentlichen Impulse für Baden-Württemberg zu erwarten.

Forschung und Entwicklung

Zur abschließenden Bewertung der Nachhaltigkeit der oben beschriebenen Entsorgungswege ist auf folgenden Gebieten F&E-Bedarf gegeben:

- Wirkungsweise / Abbau der organischen Schadstoffe (z.B. Medikamentenrückstände) im System Boden
- Einbindung von Schwermetallen aus der Klärschlamm-Mitverbrennung im Zementklinker
- Ökoeffizienzbewertungen der Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm / Klärschlammasche vor dem Hintergrund der P-Flüsse in Deutschland und Baden-Württemberg.

	Deponie	Landwirtschaft	Land-schaftsbau	NassOx	Monoverbrennung	MVA	Kraftwerk	Vergasung	Zement
Schadstoffe Probleme	Schwermetalle (SM); Organik (Org) z.B. Dioxine, PCB, Medikamente, Flammenschutzmittel, endokrine Substanzen								
Verbleib der Schadstoffe	Luft Boden Grundwasser	Boden Pflanzen/ Nahrungsmittel	Boden Pflanzen Grundwasser	SM: Salze Org: zerstört	SM: Schlacke und Flugstaub Org.: zerstört			SM: Luft, Zement Org.: zerstört	
Wertstoffe Nutzen Produkt		Dünger organ. Sub- stanz	Dünger organ. Sub- stanz	Dünger Biogas Baustoff	Baustoff f. Straßenbau		Ersatzbrennstoff höherwertige Baustoffe		Ersatzbrennstoff Zement
					Dampf und Strom				
Rechtliche Rahmenbedingungen	AbfAbIV TASi <i>Verbot ab 06/2005</i>	AbfKlärV BBodSchV DüMV <i>weitere Ab- senkung der Grenzwerte zu erwarten</i>	AbfKlärV BBodSchV DüMV <i>Grenzwert- Diskussion bzgl. Nähr- stoffeintrag</i>	AbfKlärV BBodSchV DüMV	17. BImSchV				
Technische Bewertung	nicht relevant TASi			Pilotanlage: Seaborne	Stand der Technik				
					keine freien Kapazitäten	vermutlich keine freien Kapazitäten (TASi)	verfügbare Kapazität für 100 % STS in BRD	geringe freie Kapazitäten	hohe verfügbare Kapazitäten
Ökologische/ Ökonomische Bewertung	nicht relevant TASi	ökologisch: fragwürdig wg. Verbleib der organi- schen Spu- renschadstof- fe ökonomisch: günstig	ökologisch: fragwürdig wg. Verbleib der organi- schen Spu- renschadstof- fe ökonomisch: günstig	ökologisch: Seaborne als günstig be- wertet	ökologisch: mittel, Wärmenutzung ökonomisch: mittel (Invest in neue Anlagen)	ökologisch: mittel, Wärmenut- zung ökonomisch: nicht zu be- werten, TASi	ökologisch: günstig insbes. Braunkohle- KW ökonomisch: günstig insbes. Braunkohle- KW	ökologisch: günstig ökonomisch; ungünstig	ökologisch: offen wg. Einbindung der Schwermetalle ökonomisch: güns- tig

Anhang A 1

Phosphor-Rückgewinnung

In diesem Kapitel sollen die relevanten Quellen einer Phosphor-Rückgewinnung identifiziert werden. Dazu werden dem Phosphor-Potential im Klärschlamm die anderen P-Quellen aus Landwirtschaft und Abfall entgegengestellt. Zusätzlich werden die so ermittelten P-Potentiale mit dem P-Bedarf in der Landwirtschaft verglichen, denn die Düngemittelindustrie nimmt ca. 80% des erzeugten Rohphosphates auf. Die Bedeutung anderer Verwendungen, wie Futterphosphate (11%) und Waschmittel (7%) ist gering [WAR02].

A1 Ressourcen und Verbrauch

A1.1 Weltweite P-Reserven

Laut United States Geological Survey betragen die abbauwürdigen P-Reserven weltweit ca. 12 Milliarden Tonnen marktfähiges Rohphosphaterz (ca. 1,6 Milliarden Tonnen P) und die weiterreichenden Reserven ca. 47 Milliarden Tonnen marktfähiges Rohphosphaterz (ca. 6,2 Mrd. Tonnen P).

Eine Prognose über den Erschöpfungszeitpunkt der Phosphatreserven ist u. a. wegen der Unsicherheiten bezüglich der Entwicklungen im Bereich der Fördertechnologie und des weltweiten Bedarfs sehr schwierig. Aus den obigen Zahlen ergibt sich, dass die Reserven noch ca. 100 Jahre und die Reservepotenziale zusätzlich ca. 370 Jahre reichen. Es sei angemerkt, dass die Schätzungen in einem weiten Bereich schwanken [ATV2003].

A1.2 Deutschland

P-Verbrauch

Abgeleitet vom jetzigen Produktionsniveau wird durch die Primärproduktion der deutschen Landwirtschaft den Böden jährlich etwa 560.000 t P entzogen. Diese Menge kann als geschätzter Düngerbedarf des Landes gelten, allerdings unter der Prämisse, dass in der Düngung ausschließlich wasserlösliche P-Verbindungen auf physikalisch, chemisch und biologisch intakten Böden eingesetzt werden [Schnugg et al. in ISA/UBA03].

Im Jahr 2002 wurden als Mineraldünger 136.000 t P ausgebracht. In den letzten Jahren ist eine stete Abnahme des Düngemittelverbrauchs zu beobachten.

P-Pfade

Landwirtschaft

In Abbildung 1 sind die Phosphorflüsse im wichtigsten Verbrauchsbereich, der Landwirtschaft im Jahr 2000, dargestellt. Dabei werden die Bilanzkreise Pflanzenproduktion und Tierproduktion unterschieden.

Die größten Zufuhrflüsse zur Pflanzenproduktion sind der Mineraldüngereinsatz mit 154.000 t P und der Wirtschaftsdünger (Gülle) mit 218.000 t P. Der größte Abfluss

geht als Futtermittel zurück in die Tierproduktion. In der Tierproduktion entsteht ein Überschuss an P von 168.000 t, der hauptsächlich der Gülle zu zuschreiben ist. Trotz Verwendung von beträchtlichen Anteilen von Gülle und somit einer Substitution von zu importierten Rohphosphat ist die P-Bilanz der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion nicht ausgeglichen.

Ein Ausgleich könnte stattfinden, indem der Gülleüberschuss von 168.000 t/a P in Form von Feststoffdünger zur Verteilung kommt. Dies scheitert jedoch an nicht vorhanden wirtschaftlichen Verfahren zur Gülle-Feststoffdüngerherstellung. Gleichzeitig kommt es in den Gebieten in Deutschland, in der die Masse an Wirtschaftsdüngern anfällt zur erheblichen P-Überdüngung der jeweiligen Böden.

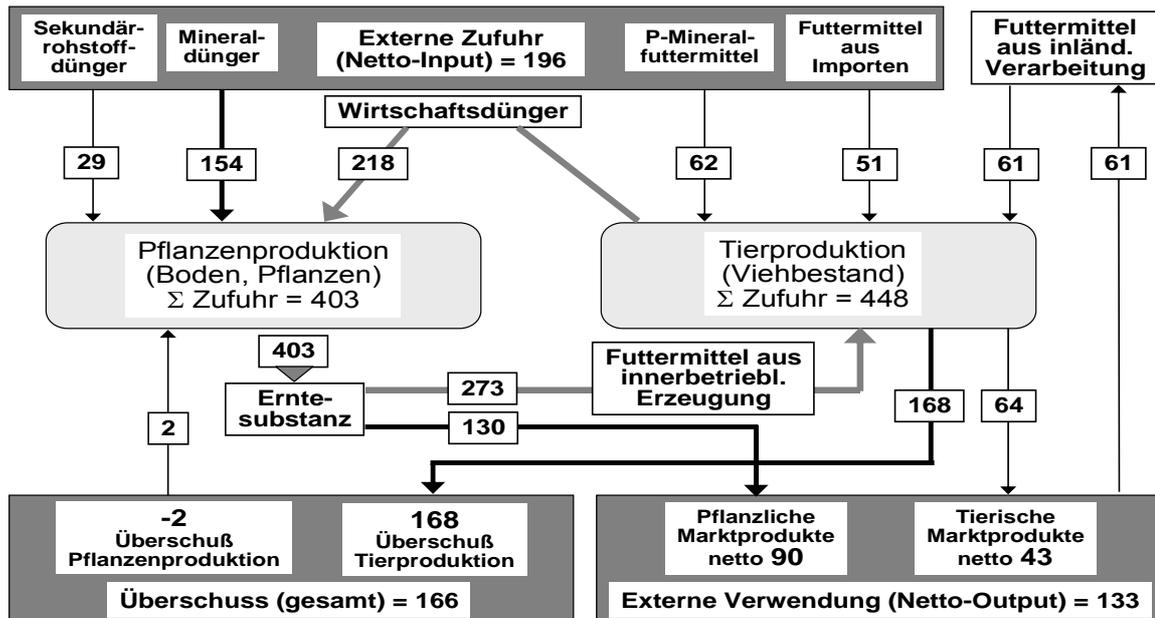


Abb. 1.: Phosphorflüsse in der Landwirtschaft für die Bundesrepublik Deutschland 2000; Angaben in 1000 t P [Frede et al. in ISA/UBA03]

Besonders davon betroffen sind die Regierungsbezirke Münster in Nordrhein-Westfalen und der Regierungsbezirk Weser-Ems in Niedersachsen (Abb. 2.).

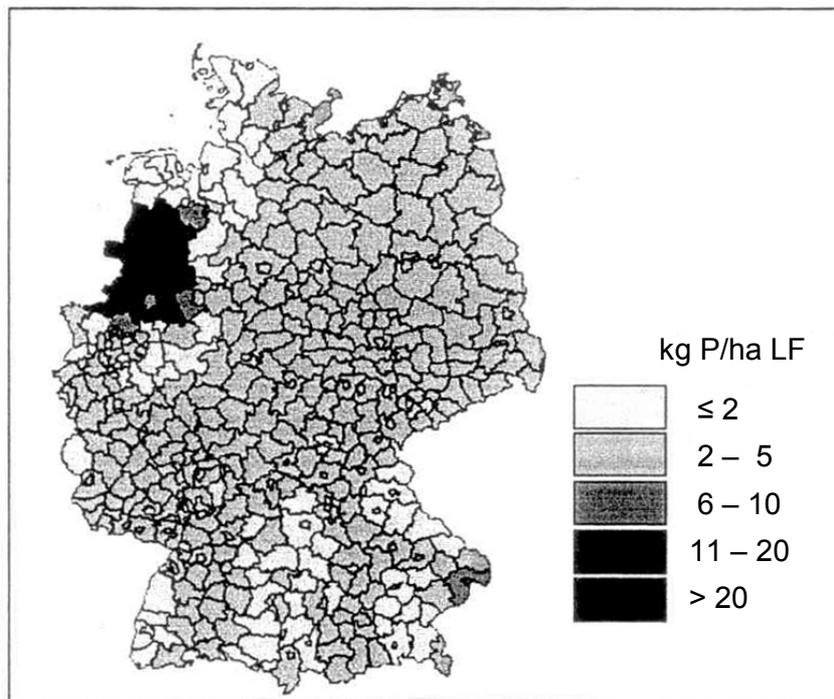


Abb. 2.: Regionale P-Überschüsse je Landwirtschaftsfläche (LF) in der Landwirtschaft für die einzelnen Landkreise in der Bundesrepublik Deutschland, (2000).
[Frede et al. in ISA/UBA03]

Die eventuelle Einschränkung der Gülle als Wirtschaftdünger aufgrund von Arzneimittelrückständen und deren Wirkung im Boden ist ungeklärt und könnte zukünftig den Nutzen von Gülle als P-Quelle für Mineraldünger limitieren. Des Weiteren ist Abbildung 2 zu entnehmen, dass in den meisten Kreisen kein Mangel an P vorhanden ist.

P-Potenzial aus Abwasser / Klärschlamm

Das P-Potenzial im Abwasser lässt sich aus den Zulaufwerten abschätzen. Jardin [ISA/UBA03] ermittelt für 1998 Zulaufwerte von 72.000 t P/a. Davon sind gesetzlich als Ablauf 12.600 t P/a erlaubt. Das Potenzial einer P-Rückgewinnung im Klärwerk ist dagegen unterschiedlich je nach dem Einsatzort. So sind theoretisch folgende Rückgewinnungspotentiale möglich (bezogen auf P Konzentration im Zulauf, P_{zu}):

aus der wässrigen Phase:	bis zu 42% P_{zu}
aus dem Klärschlamm:	bis zu 90% P_{zu}

Somit ergibt sich ein theoretisches P-Rückgewinnungspotenzial aus Klärschlamm von maximal 53.000 t P/a. Dieses Potenzial wäre nur dann auszuschöpfen, wenn die gesamte in der BRD anfallende Klärschlammmenge in Monoverbrennungsanlagen thermisch verwertet würde und die dabei anfallende Asche vollständig aufgearbeitet würde. Verfahren, die Phosphor aus der wässrigen Phase abscheiden haben den Vorteil, dass direkt P-Dünger bzw. Rohphosphat-Substitut ausgefällt werden kann, das Rückgewinnungspotenzial beträgt bei diesen Verfahren jedoch maximal 40%.

A1.3 Baden-Württemberg

P-Pfade

Da die bundesweiten wichtigsten Pfade die Landwirtschaft und das Abwasser/Klärschlamm sind, beschränkt sich die Beschreibung für Baden-Württemberg auf diese beiden Pfade.

Landwirtschaft

Im Jahr 2000/2001 wurden in Baden-Württemberg ein Überschuss von 7 kg P/ha LF in die Böden eingebracht, was allerdings unter dem bundesdeutschen Mittelwert von 10 kg P/ha LF liegt.

Für das ganze Bundesland berechnet sich daraus ein Überschuss von 10.200 t P/a, was ca. 6.1 % des Gesamt-P-Überschusses von 166.000 t P des Jahres 2000 für Deutschland darstellt. Insgesamt wurden 16.610 t P/a als Mineraldünger ausgebracht (12.2% des Gesamtverbrauchs in Deutschland). Als Wirtschaftsdünger fielen ca. 11.000 t P an.

P-Potenzial aus Abwasser / Klärschlamm

2001 wurden den Klärwerken 13.660 t P zugeleitet, davon wurden 1.444 t P den Vorflutern zugeführt. Aus der verbleibende Menge von 12.200 t P können unter der Bedingung der vollständigen thermischen Verwertung in Monoverbrennungsanlagen maximal 11.000 t P rück gewonnen werden.

A1.4 Zusammenfassung

Deutschland ist kein Mangelland hinsichtlich der P-Versorgung der Böden. Innerhalb der Landwirtschaft besteht zurzeit ein Überschuss an P in Form von Wirtschaftsdünger (Gülle). Die P-Bilanz in der Landwirtschaft könnte indessen ausgeglichen werden, den 166.000 t P Überschuss aus der Tierproduktion (als Gülle) stehen 154.000 t P Mineraldüngereinsatz in der Pflanzenproduktion entgegen.

Wirtschaftliche Verfahren zur Erzeugung von Mineraldünger aus Gülle sind jedoch mittelfristig nicht zu erwarten. Der direkten Ausbringung der Gülle steht die räumliche Konzentration des Überschusses (Transport) sowie die Frage nach dem Verbleib der Schadstoffe aus der Gülle (z. B. Medikamentenrückstände) entgegen.

Dem theoretischen P-Potential aus Klärschlamm von maximal 54.000 t P/a (bei vollständiger Monoverbrennung) steht allerdings mittelfristig nur eine Monoverbrennungskapazität von maximal 50% zur Verfügung, damit könnten ca. 20% des derzeitigen Mineraldüngereinsatzes in Deutschland substituiert werden. Die Wirtschaftlichkeit der P-Rückgewinnung aus Klärschlamm ist heute nicht gegeben, der ökologische Gesamtnutzen, d.h. die Bewertung der Verfahren unter Berücksichtigung von Energieeinsatz und Ressourcenverbrauch steht noch aus.

Literatur:

- [ATV2003] Bericht der ATV-DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.1 „Phosphorrückgewinnung“, KA – Abwasser, Abfall 2003 (50), Nr. 6, S. 805-814. 2003
- [BAM04] Kley G., Köcher P., Brenneis R., Pelinski B. (2004), Möglichkeiten der Nutzbarmachung von Phosphat aus Klärschlammmaschen durch thermochemische Behandlung – Ergebnis experimenteller Untersuchungen; VDI-Seminar 43-36-25, München, 12.-14.02.2004
- [BMBF98] BMBF-Statusseminar Stoffliche Verwertung von Klärschlämmen und Aschen aus der Klärschlammverbrennung als Baustoff, ISAH Heft 107, ISBN 3-921421-36-5. 1998
- [BMU01] Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm, Gülle und anderen Düngern unter Berücksichtigung der Umwelt- und Verbraucherschutzes; BMU/BMVEL; Wissenschaftliche Anhörung 25.-26. Oktober 2001 in Bonn; KTBL-Schrift 404, ISBN 3-7843-2138-0. 2001
- [CEEP01] <http://www.nhm.ac.uk/mineralogy/phos/conferencesummary.pdf>.
- [ECDG02] Disposal and Recycling Routes for Sewage Sludge – Synthesis report 22.02.2002; SEDE – Arthur Andersen for European Commission DG Environment–B/2; http://europa.eu.int/comm/environment/waste/sludge/sludge_disposal.htm
- [Eck04] Eckardt S., Albers H., Schirmer M., Bilitewski B.; Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Industrieanlagen Potenziale und wirtschaftliche Aspekte; 9. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung; Kassel 2004
- [For04] Forkert J., Mielke F., Kappa S.; Betriebserfahrungen bei der thermischen Verwertung von Sekundärbrennstoff im Braunkohlekraftwerk; 9. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung; Kassel 2004
- [IFEU04] Ökobilanzielle Betrachtung von Entsorgungsoptionen für Klärschlamm im Land Schleswig-Holstein; Ifeu; April 2002
- [ITAD03] Klärschlammentsorgung und Mitverbrennung von Klärschlamm in thermischen Abfallbehandlungen; ITAD-Arbeitsgruppe Klärschlamm; 2003
- [ISA/UBA03] *Rückgewinnung von Phosphor in der Landwirtschaft und aus Abwasser und Abfall*, Tagungsband zum Symposium im Hotel Kempinski Bristol Berlin am 06.-07. Februar 2003; UBA und Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen. 2003
- [IVD00] Scheurer W., Richers U.; Untersuchungen zum Stand der Mitverbrennung von Klärschlamm, Hausmüll und Biomasse in Kohlekraftwerken; IVD Stuttgart FZ Karlsruhe; 2000
- [KE02] Klärschlammentsorgung; Veröffentlichung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, 2002
- [LfU03] Mitverbrennung von Abfällen in Zement- und Kohlekraftwerken in Baden-Württemberg (Kurzfassung); Landesanstalt für Umweltschutz; Karlsruhe 2003
- [Rentz97] Rentz, O. Sasse, H.; Karl, U.; Lonjaret, J.-P. ; « Klärschlammentsorgung in Baden-Württemberg ». Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Verkehr. Baden-Württemberg. 1997.

- [Salge73] Salge H., Thormann, P, Über den Einfluss von P_2O_5 auf die Konstitution von Portlandzementklinker, ZKG INTERN. 26 No11, 532-539. 1973
- [SCHW04] Schwartz, T., Volkmann H. und Obst U. Antibiotikaresistenzen in Abwasser, Oberflächenwasser und Trinkwasser. In Track, T. und Kreysa, G.(Ed.) Spurenstoffe in Gewässern. Pharmazeutische Reststoffe und endokrin wirksame Substanzen, 256 Seiten, Wiley-VCH, Weinheim, ISBN 3-527-31017-7, 2003
- [StaLa04] Statistisches Landesamt Baden Württemberg
<http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/UmweltVerkehr/Landesdaten/> 2004
- [UP04] Umweltplan; Veröffentlichung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg;
<http://www.umweltplan.baden-wuerttemberg.de/> ; 2004
- [Urb04] Urban A. I., Bilitewski B., Faulstich M.; Prognosen zu Abfallmengen und Behandlungskapazitäten für die thermische Behandlung von Abfällen; 9. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung; Kassel 2004
- [WAR02] Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlamm- asche 66. Darmstädter Seminar –Abwassertechnik- Schriftenreihe WAR 147, Institut WAR, TU Darmstadt, ISBN 3-932518-43-8, 2002

TEIL B: ELEKTRONIKSCHROTT

1. Stand der Verwertung / Beseitigung

1.1 Spezifikationen

1.1.1. Herkunftsbereich private Haushaltungen

Die Abfallgruppe der Elektro- und Elektronik-Altgeräte (EAG) umfasst eine Vielzahl unterschiedlichster Gerätearten, die sich nicht nur nach Funktion, sondern auch wesentlich in ihrer stofflichen Zusammensetzung und dem Materialverbund unterscheiden. In der Sammelpraxis hat sich folgende Fraktionierung etabliert:

- **Kältegeräte:** Insbesondere wegen der FCKW-Problematik werden Kühl- und Gefriergeräte gesondert erfasst und behandelt. Des Weiteren folgt der PU-Isolierschaum einem gesonderten stofflichen Entsorgungsweg.
- Als **Weißer Ware** werden alle Haushaltsgroßgeräte außer Kältegeräten bezeichnet, also beispielsweise Elektroherde, Spül- und Waschmaschinen oder Wäschetrockner. Diese Geräte zeichnen sich durch einen hohen Eisenmetallgehalt aus. Über 70 Gew.-% der demontierten Geräte kann nach Stand der Technik alleine durch das Stahl-Recycling stofflich verwertet werden [Salhofer99]. Häufig wird Weißer Ware gemeinsam mit anderem Stahl- und Eisenschrott erfasst, zumindest jedoch gemeinsam verwertet.
- Die derzeit als Abfall anfallenden **Bildschirmgeräte** sind nahezu ausschließlich Röhrengeräte und keine LCD. Die evakuierte Kathodenstrahlröhre bedingt wegen Implosionsgefahr besonderen Umgang bei Transport und Behandlung. Gewichtsmäßig entfällt etwa die Hälfte der Geräte auf Glas, in das u.a. Barium, Strontium und Blei in großen Anteilen eingebunden ist.
- Mitunter werden „wertstoffreiche“ Geräte separat erfasst. Dazu zählen vor allem Geräte aus dem Bereich **Informations- und Telekommunikationstechnologie („Graue Ware“)**, die einen vergleichsweise hohen Kupfer- und Edelmetallgehalt aufweisen und aus wirtschaftlichen Interessen getrennt gehalten werden.
- **Leuchtstoffröhren** werden einer gesonderten Behandlung zugeführt.
- Alle anderen Gerätearten werden als **sonstige EAG** gefasst. Typischerweise finden sich darunter beispielsweise Küchenkleingeräte, elektrische Spielzeug oder elektrische Werkzeuge.
- Der Begriff **„Braune Ware“** steht für Unterhaltungselektronik. Je nach Gerät, wird diese Gerätekategorie unterschiedlich erfasst: Beispielsweise sind HiFi-Anlagen tendenziell wertstoffreich im Gegensatz zu Radiorekordern. Fernsehgeräte fallen selbstverständlich in die Sammelfraktion der Bildschirmgeräte.

Die europäische Richtlinie über EAG unterteilt abweichend in zehn Gerätekategorien [RL 2002/96/EG]. Diese Einteilung orientiert sich am Gebrauchszweck der Geräte, nicht an der Entsorgungspraxis.

1.1.2 Gewerblicher Herkunftsbereich

Im Gegensatz zu den privaten Haushaltungen, in denen ein buntes Gemisch an elektrischen und elektronischen Geräten anfällt, sind beim gewerblichen Abfall mitunter größere Chargen identischer Geräte zu finden. Hierzu zählen nicht nur Elektro(nik)geräte aus gewerblicher Nutzung, sondern beispielsweise auch Rücklauf aus dem Leih- und Leasingbereich sowie Produktionsrückstände und Ausschussware. Außerdem bieten manche Hersteller bzw. Händler Entsorgungsleistungen im gewerblichen Bereich als Service an, beispielsweise Tausch von Alt- gegen Neugeräte beim Kunden. Die hier anfallenden Mengen sind i.d.R. in der Abfallstatistik nicht erfasst.

Des Weiteren werden mache „Abfallströme“ wie z.B. Geräte aus der Steuerungs- und Regeltechnik oder aus anderen gewerblichen Bereichen nicht direkt der Verwertung bzw. dem Recycling zugeführt. Hier wird in der Regel ein firmeninterner Demontage- oder Zerstörungsschritt vorgeschaltet um zu verhindern, dass Konkurrenten aus dem Abfall die firmeneigene Technologie entnehmen können. Gewisse Gerätearten fallen ausschließlich im gewerblichen Bereich an, z.B. Getränkeautomaten, Spielautomaten oder medizinisches Gerät.

Für die zukünftigen Sammel- und Verwertungsstrategien des Landes Baden-Württemberg spielen die Altgeräte aus dem gewerblichen Bereich keine Rolle, da in Zukunft die Hersteller nicht nur für die Entsorgung, sondern auch die Erfassung direkt verantwortlich sind. Diese Geräte werden somit nicht dem öffentlichen Sammelsystem zugeführt.

1.2 Mengenaufkommen

Das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (UVM) fragt durch Erhebungsbögen alljährlich die Mengen an EAG ab, die von den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern (örE) gesammelt wurden. Die in den Erhebungsbögen vorgegebene Fraktionierung entspricht jedoch nicht vollständig der gängigen Sammelpraxis, sodass die Aussagekraft der Daten teilweise eingeschränkt ist. Andere fortlaufend erfasste und konsistente Daten für das gesamte Bundesland existieren nicht.

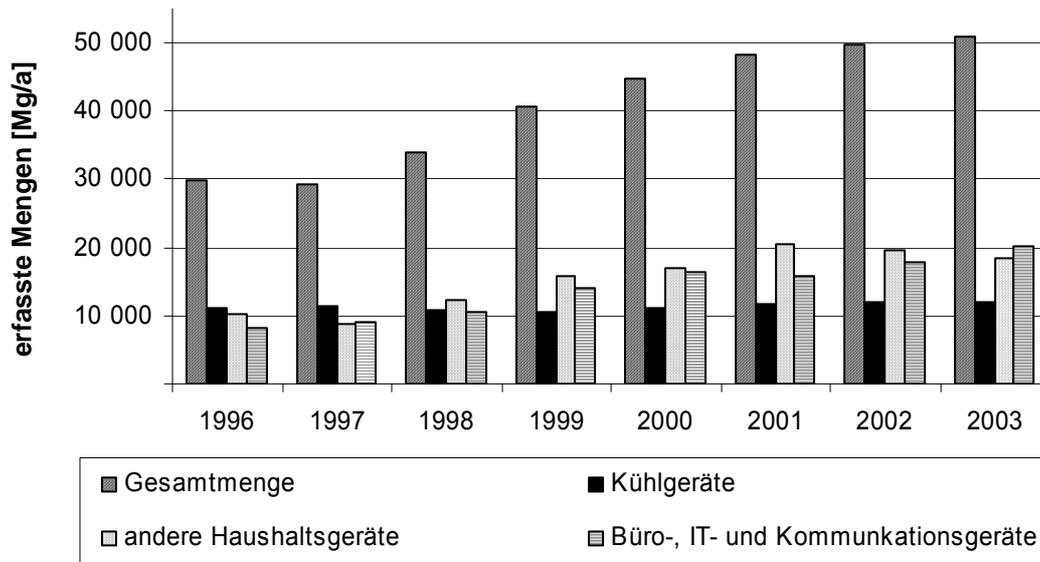


Abb. 1: Statistisch erfasste Mengen an Elektronikschrott von 1996 bis 2003 [StatistikBW03]

1.3 Wege der Verwertung / Beseitigung

Über die momentanen Verwertungs- und Beseitigungswege sind keine Daten vorhanden. Eine Aussage ist daher an dieser Stelle nicht möglich.

1.4 Tendenzen bei Mengen und Zusammensetzung

Für das Gebiet der EU wird mit einem jährlichen Wachstum von 3 % bis 5 % in den nächsten Jahren gerechnet, so dass sich in etwa zwölf Jahren der Anfall an EAG verdoppelt haben wird [Crowe03].

Gegenläufig zu erhöhten Stückzahlen laufen Tendenzen zur Gewichtsreduzierung und Verkleinerung. Dies wird sich zukünftig möglicherweise auch in einer veränderten stofflichen Zusammensetzung (Kunststoffe statt Metalle) und engerem Materialverbund (höhere Funktionsdichte je Baugruppe) widerspiegeln.

2. Darstellung der Ziel-Vorgaben

2.1 Zielvorgaben EU

Anfang 2003 haben die Europäische Kommission und der Rat zwei Richtlinien erlassen. Zum einen setzt die Elektro(nik)-Altgeräte-Richtlinie Standards für die Entsorgung [RL 2002/96/EG], zum anderen wird mit der RoHS-Richtlinie der Einsatz bestimmter schädlicher Substanzen in Neugeräten eingeschränkt [RL 2002/95/EG]. Daraus ergeben sich Ziele, die konkreter sind als die momentanen Vorgaben auf Landesebene:

- (Z 1) Als Sammelziel sollen 4kg pro Einwohner und Jahr bis 31. Dezember 2006 erreicht werden [RL 2002/96/EG].

- (Z 2) Die in untenstehender Tabelle 1 vorgegebenen Verwertungs- und Recyclingquoten müssen ebenfalls bis Ende 2006 nachgewiesen werden [RL 2002/96/EG]. Die Recyclingquote schließt Wiederverwendung von Bauteilen und Baugruppen sowie stoffliche Verwertung ein. Zur Verwertungsquote trägt jede Art von Verwertung bei, nicht jedoch die direkte Weiternutzung der Altgeräte.

Gerätekategorie	Verwertungsquote	Wiederverwendungs- und Recyclingquote
1 Haushaltsgroßgeräte	80 %	75 %
2 Automatische Ausgabegeräte		
3 Haushaltskleingeräte	70 %	50 %
4 Lampen und Leuchtmittel		
5 Elektrische- und elektronische Werkzeuge		
6 Spielzeug		
7 Mess- und Kontrollinstrumente		
8 IT- und Telekommunikationsgeräte	75 %	65 %
9 Unterhaltungselektronik		
10 Gasentladungslampen		80 %

Tabelle 1: Recycling- und Verwertungsquoten nach Richtlinie 2002/96/EG

- (Z 3) Aufgegeben ist auch eine für den privaten Endverbraucher unentgeltliche Sammlung [RL 2002/96/EG].

2.2 Zielvorgaben Deutschland

Die nationale Implementierung der genannten europäischen Richtlinien erfolgt als Elektro- und Elektronikgerätegesetz [ElektroG]. Die europäischen Zielvorgaben wurden übernommen. Ausgestaltungsspielräume auf nationaler Ebene beziehen sich vor allem auf die technische und organisatorische Ausgestaltung der Mengennachweise und die Kontrolle der Herstellerpflichten. Das Rücknahmesystem wird ebenfalls national geregelt. In Deutschland werden die öRE verpflichtet, Rücknahmesystem einzurichten. Da die europäische Elektro(nik)-Altgeräte Richtlinie eine unentgeltliche Entsorgung für den Letztutzer vorschreibt, sind die öRE gezwungen den finanziellen Erfassungsaufwand auf die allgemeine Entsorgungsgebühr umzulegen. Dies ist abfallrechtlich umstitten [Bäumer04]. Ein solches Gebührenmodell konterkariert zudem das Verursacherprinzip. Eine Überarbeitung des ElektroG mit einer Prüfung des Erfassungssystems ist bis spätestens 2008 vorgesehen [ElektroG, §1 Abs.2].

2.3 Zielvorgaben Baden-Württemberg

Keine der im Umweltplan Baden-Württemberg formulierten Maßnahmen trifft den Bereich der EAG-Entsorgung explizit [Umweltplan00]. Mittelbar lässt sich die allgemeine Zielformulierungen auf den speziellen Entsorgungsbereich anwenden:

(Z 4) Ziel ist die Verringerung der zu beseitigenden Abfallmengen aus privaten Haushaltungen und sonstigen Herkunftsbereichen [Umweltplan00].

Diese allgemeine Vorgabe geht konkret in den europäischen Vorgaben auf.

3. Beschreibung und Bewertung der Verwertungs- und Beseitigungswege

3.1 Technologische Möglichkeiten und Probleme

Bei der Beschreibung des Standes der Technik ist eine Beschränkung auf Baden-Württemberg nicht sinnvoll, da viele Stoffströme Baden-Württemberg verlassen und in anderen Bundesländern oder sogar in anderen Staaten der EU behandelt werden. Zwei Technologien sind wesentlich für das Recycling von EAG: dies sind die mechanische Aufbereitung und der Kupferschmelzprozess. Ein Demontageschritt ist üblicherweise vorgeschaltet.

Bei der Demontage werden in erster Linie Schadstoffe (z.B. quecksilber- und PCB-haltige Bauteile) und Störstoffe (z.B. lange externe Kabel) entfernt. Teilweise werden dabei große stofflich homogene Bauteile separiert (z.B. Gehäuseteile). Die Entnahme von Bauteilen oder Baugruppen zur Wiederverwendung findet nur in Einzelfällen statt, insbesondere wenn Hersteller über ein Rücknahmesystem eigene Geräte entsorgen.

Die mechanische Aufbereitung trennt Stoffverbunde und sortiert nach unterschiedlichen Materialeigenschaften (z.B. Dichte, Korngröße, Magnetismus). Je nach Aufgabebetrag und Marktlage variiert die Anlagenführung. Metallreiche Fraktionen werden den entsprechenden Hüttenprozessen zugeführt (Stahl, Kupfer/Blei, Aluminium). Eine Verwertung der Mischkunststofffraktion findet i.A. nicht statt, weil diese häufig mit belastenden bromierten Flammschutzmitteln und vielfältigen Additiven versetzt sind. Gängig ist die Beseitigung durch Deponierung oder die Verbrennung.

Hochwertige Fraktionen, z. B. mit einem hohen Anteil an Kupfer und/oder Edelmetallen werden direkt in den Kupferschmelzprozess gegeben. Hier werden über mehrere Verfahrensschritte sowohl Kupfer als auch andere Metalle wie Pb, Ni, usw. und die Edelmetalle zurück gewonnen. Aluminium- und Eisenmetallanteile gehen dabei allerdings für eine hochwertige werkstoffliche Verwertung verloren.

3.1.1 Stand der Technik

- **Kältegeräte:** Das Kältemittel wird gezielt abgesaugt und das Gerät trockengelegt. Einerseits ist PU-Isoliermaterial teilweise mit CKW aufgeschäumt, andererseits ist die stoffliche Verwertung des Kunststoffs etabliert, so dass i.d.R. eine Separierung und gesonderte Behandlung stattfindet. **Eine Behandlung der Kältegeräte gemäß der Elektro(nik)-Altgeräte-Richtlinie der EU stellt kein Problem dar.**
- **Weißer Ware:** Die Demontage konzentriert sich im Wesentlichen auf eine Störstoffentnahme (Betongewichte aus Waschmaschinen, externes Kabel). Eine Verwertung findet als Stahlschrott statt (Autoshredder in Kombination mit Stahlhütte).

Auch hier ist in Bezug auf die Elektro(nik)-Altgeräte-Richtlinie kein Handlungsbedarf gegeben, da der Stand der Technik die Anforderungen erfüllt.

- **Bildschirmgeräte:** Die evakuierte Kathodenstrahlröhre stellt arbeitstechnisch ein Sicherheitsrisiko dar. Diese wird zunächst entfernt und belüftet. Schirm- und Konusglas sowie Metallteile werden getrennt verwertet, die Leuchtschicht muss beseitigt werden. Holz kommt teilweise als Gehäusewerkstoff zum Einsatz. Als problematischer Stoffstrom fallen hier **Gehäusefraktionen (Kunststoffe)** und Leiterplatten an, die zum Erreichen der vorgegebenen Verwertungsquoten (für TV Geräte 75 %) **behandelt werden müssen** und nicht weiter, wie zurzeit üblich, beseitigt werden dürfen.
- **Braune Ware** (ausgenommen Bildschirmgeräte) wird zunächst ebenfalls der **Demontage** zugeführt. Es müssen hier genau wie bei IT Ware schadstoffhaltige Komponenten wie Hg-Schalter, Batterien oder schwermetallhaltige Kondensatoren entfernt werden. Der Rest wird dem **mechanischen Recycling** zugeführt. Das **Metall** wird stofflich **wiederverwertet**, der **Kunststoff geht auf die Deponie oder in die Verbrennung**. Auch hier stellt sich das Problem des Erreichens der Verwertungs- und Recyclingquote.
- **Graue Ware (IT Ware)** kann nach der **Demontage** (s.o.) auf zwei unterschiedlichen Wegen behandelt werden. Es besteht zum einen der Weg des **mechanischen Recyclings**. Hier werden über mehrere Stufen der mechanischen Verfahrenstechnik Metalle von Kunststoffen getrennt. Die **Metalle** (bei IT Ware liegt das Hauptaugenmerk vor allem auf Kupfer und Edelmetallen) werden **zurück gewonnen**, die **Kunststoffe** müssen wiederum **deponiert oder verbrannt** werden. Der andere Weg ist der unmittelbare Einsatz im **Kupferschmelzprozess**. Hier werden ganze Platinen (mit Kunststoff) in den Hochofen gegeben. Die **Metalle** werden **zurück gewonnen**, der **Kunststoff** dient als **Reduktionsmittel**.
- **Leuchtstoffröhren:** In speziellen Aufbereitungsanlagen werden Leuchtschicht, Quecksilber und Glas getrennt und weiter verwertet.

3.1.2 Auftretende Probleme durch die Elektro(nik)-Altgeräte-Richtlinie der EU

Bei der gegebenen Darstellung handelt es sich um den derzeitigen Stand der Technik. Die dort beschriebenen Methoden sind in Zukunft nicht mehr uneingeschränkt möglich (vgl. Tabelle 2). Die europäische Richtlinie schreibt Sammel- und Recyclingquoten vor und macht somit indirekt auch Vorgaben in Hinblick auf die Technologien, denn unter Beachtung der Recyclingquoten zeigt sich, dass diese nur erreicht werden können, wenn zusätzlich zu den Metallen auch eine Wiederverwertungsmöglichkeit für die Kunststoffe besteht.

Mechanische Verfahren vollziehen weitgehend die Trennung der Stoffverbunde und bieten somit eine Basis für die separate Verwertung einzelner Stoffgruppen. Die dabei generierten Mischkunststoffe werden derzeit entweder thermisch behandelt oder deponiert. In Hinblick auf die Verwertungs- und Recyclingquoten, die in der europäischen Elektro(nik)-Altgeräte-Richtlinie der EU vorgegeben sind, ist aber eine (Teil-)Verwertung der Kunststoffe **zwingend erforderlich**. In [Menad98] und [Schebek03] ist gezeigt, dass die Kunststoffe einen Anteil von 30% - 35% ausmachen. Somit ist eine Verwertungsquote von 75% nicht zu erreichen, wenn nach me-

chanischen Verfahren lediglich eine Verwertung der Metalle durchgeführt wird. Eine Deponierung der Kunststoffe ist aufgrund der aktuellen Gesetzeslage in Deutschland zukünftig ausgeschlossen, womit nur noch der Weg in die Verbrennung bleibt. Dass dies grundsätzlich möglich ist, wurde in verschiedenen Untersuchungen gezeigt [Vehlow02 und Vehlow03]. Hierbei sind jedoch verschiedene Gesichtspunkte zu beachten. Auf der einen Seite muss die Verbrennungsanlage mit der notwendigen Technologie zur Rauchgasreinigung ausgerüstet sein um die vorgegebenen Grenzwerte einzuhalten (was i. d. R. kein Problem darstellt), auf der anderen Seite ist neben der Verwertungsquote auch die Quote zum stofflichen Recycling zu beachten.

Der **Kupferschmelzprozess** ohne vorherige Separierung stellt unter gewissen Rahmenbedingungen nach wie vor eine Alternative zur Kombination mit mechanischen Prozessen dar. Im Gegensatz zur mechanischen Zerlegung wird hier nicht nur das Metall stofflich wiederverwertet, sondern - zumindest zum Teil - auch der Kunststoff. Dieser dient als Reduktionsmittel. Des Weiteren werden auch die inerten Anteile wie z.B. die Glasfaseranteile der Leiterplatten stofflich verwertet, da diese als Schlackebildner und somit zur Schonung natürlicher Ressourcen dienen. Probleme kann u. U. jedoch das als Flammenschutzmittel enthaltene Brom bereiten, da auf der einen Seite sichergestellt sein muss, dass die notwendige Emissionsminderungstechnologie auf der Abgasseite vorhanden ist, zum anderen ist eine Wiederverwertung des Broms nur durch aufwendige nach geschaltete Prozesse möglich, die einen Anstieg der Kosten verursachen.

Bei oxidativen Prozessen besteht grundsätzlich die Gefahr der Neubildung von Dioxinen und Furanen, woraus sich Anforderungen an Anlagen und Anlagenführung bei Verbrennung und Kupferverhüttung ergeben. Ungelöst ist bislang die Verwertung der Mischkunststoffe aus Elektronikschrott. Diese sind mit bromhaltigen Flammenschutzmitteln versehen und auch durch sonstige vielfältige Additive auf einen bestimmten Einsatzzweck zugeschnitten. Dies erschwert eine stoffliche Verwertung. **Es ist also eine Vorbehandlungsstufe notwendig.**

3.2 Neue Technologien und Perspektiven

Wie gezeigt gibt es etablierte Wege der Verwertung von Elektronikschrott. Kritische Punkte sind einerseits die zeit- und kostenintensive händische Demontage, andererseits fehlende stoffliche Verwertungsmöglichkeiten für schadstoffbelastete Mischkunststoffe.

Demontage stellt keine eigenständige Entsorgungstechnologie dar, ist aber entsprechend der europäischen Richtlinie zukünftig für viele Geräte unerlässlich. Voll- oder teilautomatisierte Demontageeinrichtungen stehen teilweise an der Schwelle zur praktischen Anwendbarkeit. Beispielhaft seien hier für Mobiltelefone die Projekte ReMobile [Başdere03] und ReUse [Kopacek02] genannt.

- Ein Ansatz zur Verwertung problematischer Mischkunststoffe ist die Solvolyse. Dabei werden die Kunststoffe in speziellen Lösungsmittelgemischen gelöst und anschließend selektiv zur stofflichen Verwertung ausgefällt. Als erstes deutsches Unternehmen hat Firma Bigat (Berlin) dieses Verfahren umgesetzt, konnte sich jedoch nicht auf dem Markt behaupten und hat ihre Aktivitäten daher eingestellt.

- Eine andere Möglichkeit zur Behandlung halogenbelasteter Mischkunststoffe bietet die Pyrolyse. Der Haloclean Prozess, eine zweistufige Niedertemperaturpyrolyse, bietet die Möglichkeit, die Kunststoffe zu zersetzen und in die Gasphase zu überführen. Hierbei geht auch das Brom in die Gasphase über und kann mit Hilfe einer Nachbehandlung in Form von Bromwasserstoff als Wertstoff wiedergewonnen werden. Auch das debromierte Pyrolyseöl kann der stofflichen Verwertung zugeführt werden. Der Pyrolysekoks steht für das Metallrecycling zur Verfügung, das durch diese Vorbehandlung effektiver gestaltet werden kann [Hornung03].
- Bei der Verbrennung/Co-Verbrennung ist zu beachten, dass eine Rückgewinnung von Brom in konventionellen Rostfeuerungen (z.B. Hausmüllverbrennung) nur dann möglich ist, wenn diese mit entsprechenden Abscheideeinrichtungen betrieben werden [Vehlow02]. Entsprechend der europäischen Elektro(nik)-Altgeräte-Richtlinie steht jedoch der thermische Weg nur einer Teilfraktion offen – je nach Geräteart zwischen 25 Gew.% und 50 Gew.%. Die Kombination der stofflichen Verwertung der Metalle und des Broms mit der thermischen Verwertung der Kunststoffe erfüllt i. d. R. nur bei Weißer Ware die geforderten Quoten [Schebek03].

3.3 Verbleib von Schadstoffen

Durch händische Demontage werden insbesondere PCB-haltige Kondensatoren und quecksilberhaltige Bauteile separiert. Erstere werden meist durch Untertage-Deponierung beseitigt, letztere werden gesonderten Prozessen zur Rückgewinnung des Schwermetalls zugeführt. Stäube aus Aufbereitungsanlagen werden zum großen Teil abgesaugt und thermisch behandelt.

Organische Schadstoffe werden bei den in Hüttenprozessen herrschenden Temperaturen zerstört, jedoch kann im Rauchgasstrom eine Neubildung von z. B. PCDD/F erfolgen. Durch die Separierung und Verwertung von Halogenen leistet der Haloclean-Prozess sowohl einen Beitrag zur Erhöhung der Recyclingquoten, als auch zur Darstellung einer Senke für reine Kunststofffraktionen aus vorgelagerten mechanischen Aufbereitungen. Gewisse luftseitige Emissionen sind auch mit moderner Technik nicht vollständig vermeidbar, hier sind insbesondere Stickoxide und Kohlenmonoxid zu nennen, ferner werden auch u. a. Blei, Arsen und Kupfer emittiert [BREF-NE].

Die Mitverbrennung von EAG in Hausmüllverbrennungsanlagen stellt eine Alternative für geringe bzw. diffuse Massenströme dar, wobei Bromgehalte von max. 1 Gew.% Brom im Gesamtfeed nicht überschritten werden sollten.

3.4 Förderprogramme des Landes Baden-Württemberg

- Mit dem Vorhaben **RegioPlast** fördert die Landesregierung den Einsatz von gebrauchten Kunststoffen aus Elektroaltgeräten, die nicht belastet sind. So konnte das Pilotprojekt zur Serienreife gebracht werden. In diesem Fall funktioniert die werkstoffliche Verwertung großteiliger Kunststoffbauteile eines Herstellers wirtschaftlich und technisch, wobei allerdings der Aufwand für Rückführlogistik und Demontageleistung vom Hersteller getragen wird [UVM02]. Aus technischen Gründen kann **Material aus öffentlicher Sammlung nur zu einem marginalen Anteil** zum Einsatz kommen. Derartige Einzellösungen bieten gegenseitige Vor-

teile und sind weiterhin förderungswürdig, sind jedoch aufgrund der engen Randbedingungen **nicht auf die Hauptmengen der EAG übertragbar.**

- Durch die Förderung des Projektes „**Rohstoffliche Verwertung belasteter Kunststoffe aus der Demontage von Elektro- und Elektronikaltgeräten - Halocleanapplication**“ (**Regionales Netzwerk Baden-Württemberg**) unterstützt das Ministerium für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg die Entwicklung einer Technologie, die zusätzlich eine rohstoffliche Verwertung problematischer, halogenhaltiger Mischkunststoffe bietet. Das Verfahren stellt **keine besonderen technischen Anforderungen** an das Aufgabegut, die über die rechtlich gebotene Demontageschritte hinausgehen, bietet aber im Gegensatz zur Verbrennung die Möglichkeit einer **stofflichen Verwertung der Kunststoffe und des Broms**. Diese Technologie ist zur Zeit noch in der Entwicklung und befindet sich in der Umsetzung vom Pilotmaßstab in den technischen Maßstab. Eine erste „technische“ Anlage wurde, im Rahmen des vom Land unterstützten Projektes, in diesem Jahr in Baden-Württemberg (Eppingen) installiert. Aufgrund der Prozessführung kann dies sowohl für die Verbrennung als auch für den Kupferschmelzprozess eine Vorstufe darstellen, um eine Schadstoffentfrachtung und eine Wiederverwertung der Kunststoffe zu ermöglichen. Sind die Rückstände für eine Metallverwertung nicht interessant, wie dies z.B. bei Fernsehgeräten der Fall sein kann, dann haben sie dennoch einen Heizwert der sie für eine energetische Nutzung interessant macht.

4. Empfehlungen

- Die **Datenlage** für EAG aus dem gewerblichen Bereich ist ungenügend und für den privaten Bereich lückenhaft. Eine einfache Maßnahme zur Verbesserung der Informationslage in Baden-Württemberg wäre die **Anpassung der UVM-Erhebungsbögen an die derzeitige Entsorgungspraxis**. Dabei entsteht für die öRE kein wesentlich erhöhter Arbeitsaufwand.
- Durch Wieder- und **Weiterverwendung** von Altgeräten kann einerseits die Nutzungsphase verlängert werden, andererseits kommt es teilweise zur **Verschleppung der Entsorgungsproblematik in das außereuropäische Ausland**. Hier bedarf es eines **Bewertungsprozesses**, unter welchen Randbedingungen andere Verwertungsmöglichkeiten zu bevorzugen sind. Für die Vermeidung problematischer Kunststofffraktionen ist die Verwendung der Schadstoffe bei der Produktion (z. B. bromierte Flammschutzmittel) zu vermeiden (siehe RoHS-Richtlinie).. Für die gegenwärtige bzw. mittelfristige Strategie der Verwertung bzw. Entsorgung sind aber diese Problemstoffe zu berücksichtigen. Für die gegenwärtige bzw. mittelfristige Strategie der Verwertung bzw. Entsorgung sind aber diese Problemstoffe zu berücksichtigen. Mit der Umsetzung der Herstellerproduktverantwortung im Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) obliegt es den Herstellern, Art und Weise einer weiteren Nutzung ihrer Altgeräte zu steuern.
- **Mechanische Recycling-Verfahren** stellen für die Wiedergewinnung der Metalle eine gute und kostengünstige Möglichkeit dar. In Bezug auf die Verwertungs- und Recyclingquoten ist jedoch Handlungsbedarf gegeben, um ein **Einbeziehen der Kunststoffe in den Recyclingprozess** zu erreichen.

- Die **energetische Verwertung** sollte belasteten Kunststoffen vorbehalten bleiben. Hier tritt jedoch ebenfalls das **Problem des Erreichens der Verwertungs- und Recyclingquoten** auf.
- Das **Haloclean Verfahren** stellt im Gegensatz zu gängigen Verfahren eine Alternative dar, die die Wiederverwendungs- und Recyclingquoten der europäischen Elektro(nik)-Altgeräte-Richtlinie erfüllen und die **Rückgewinnung des Broms und der Kunststoffe** als Einsatzstoff für die Methanolsynthese ermöglichen kann.
- Der **Abschluss der industriellen Testläufe des Haloclean-Prozesses** (Eppingen und Volpiano, Italien) und der laufenden Studie des UVM in Baden-Württemberg sind vor einer Markteinführung **abzuwarten**.
- Mit den **beiden** in Abschnitt 3.4 **genannten Projekten fördert das Land Baden-Württemberg** unterschiedliche Aktivitäten im Bereich des **Recyclings von Elektro- und Elektronikaltgeräten**. Diese Förderung wird als sehr positiv beurteilt und eine weitere Beobachtung der Entwicklung wird empfohlen.
- Das ElektroG schreibt vor, dass "die Anzahl der Sammelstellen oder die Kombination mit Holsystemen [...] unter Berücksichtigung der jeweiligen Bevölkerungsdichte, den örtlichen Gegebenheiten und der abfallwirtschaftlichen Ziele" festzulegen sei (ElektroG §9). Den öRE fehlen bislang konkrete Vorgaben, die beispielsweise aus einer **systematischen Untersuchung von Sammelsystemen und –kosten** abgeleitet sind. Eine solche Untersuchung wäre auch ein Informationsgewinn für die Überarbeitung des ElektroG, was spätestens für 2008 vorgesehen ist (ElektroG §1, Abs. 2).

		Wiederverwendung	stoffliche Verwertung			Verbrennung	Beseitigung Deponie
			Mechanisches Recycling	Kupferschmelz-Prozess	Haloclean Verfahren		
Schadstoffe Probleme		Als Schadstoffkomponenten sind in der WEEE Richtlinie der EU genannt: Blei, Cadmium, Quecksilber, Sechswertiges Chrom (Chrom VI), bromhaltige Flammschutzmittel Des weiteren sind FCKWs, PCBs und PBB als Schadstoffe zu beachten					
Verbleib der Schadstoffe		Filterstaub, Luft, Boden (Deponie)	Filterstaub, Luft, Boden (lokale Immissionen)	Pyrolyseöl/-Rückstand	Luft, Filterstaub, Schlacke	Boden, Grundwasser, Luft	
Wertstoffe Nutzen Produkt		Für die wieder verwendeten Teile vollständig	Eisenmetalle, NE-Metalle, Edelmetalle	Kupfer, Blei, Edelmetalle, Kunststoffe (energetisch)	Fe- und NE-Metalle Edelmetalle, Kunststoffe (stofflich als Pyrolyseöl), Brom (HBr)	Kunststoffe (energetisch) u.U. Fe-Metalle u.U. verwertbare Schlacke	
Rechtliche Rahmenbedingungen	Abfalltyp	Elektro(nik)-Altgeräte-Richtlinie der EU					
	Verfahren		Einzelfallgenehmigung	17 BImSchV	wird noch geklärt Genehmigung läuft	17 BImSchV	AbfAbIV ElektroV
Technischer Umsetzungsgrad		Stand der Technik	Stand der Technik	Stand der Technik	In der Entwicklung Umsetzung Pilotmaßstab zu technischem Maßstab	Stand der Technik	
Technische Bewertung		keine Einschränkung	Zum Erreichen der vorgegebenen Recyclingquoten ist eine Behandlung des Kunststoffs notwendig	Beim Einsatz bromhaltiger Kunststoffe ist ein Dioxinbildungspotential vorhanden	stoffliches Recycling der Kunststoffe Abtrennung und Verwertung von Brom → keine Einschränkung	Beim Einsatz bromhaltiger Kunststoffe ist ein Dioxinbildungspotential vorhanden	zukünftig untersagt
Ökologische/ Ökonomische Bewertung		Problematisch: ggf. Verlagerung des Entsorgungsproblems in das außereurop. Ausland	Gegenstand laufender Untersuchung	Problem des Erreichens der Verwertungs- und Recyclingquoten	Gegenstand laufender Untersuchung	Problem des Erreichens der Verwertungs- und Recyclingquoten	nicht relevant

Literatur:

- [Başdere03] Başdere, Bahadır; Franke, Carsten: *Recycling von Mobiltelefonen*. UmweltMagazin 33 (2003) Nr. 10/11. Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf
vgl. auch: <http://www.mf.tu-berlin.de/remobile/>
- [Bäumer04] Bäumer, H.; Berner, H.-J.; Paschlau, H.: *Elektro-Verordnung auf dem Prüfstand. Nationale Umsetzung der WEEE umstritten*. Teil I in : Müll und Abfall Nr. 3/2004, S.111ff.
- [BREF-NE] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques in the Non Ferrous Metals Industries. European Commission 2001
- [BMU03] Eckpunkte künftiger Rechtsvorschriften zu Elektro- und Elektronik-Altgeräten in Deutschland. Bundesumweltministerium, Berlin (2003).
http://www.bmu.de/de/800/js/download/b_altgeraete-eckpunkte/
- [BMU04] Diskussionspapier des Bundesumweltministeriums vom 25.02.2004 zu einer Elektro- und Elektronikgeräteverordnung (ElektroV)
- [Crowe03] Crowe, M. et al.: Waste from electrical and electronic equipment (WEEE) – quantities, dangerous substances and treatment methods. ETW report. European Environment Agency, Kopenhagen (2003)
- [Hieber02] Hieber, M.; Hornberger, M.: *Verwertung von Elektronik-Altgeräten*. Fortschreibung der „Handlungshilfen für Kommunen zur Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten“. Hrsg.: Ministerium für Umwelt- und Verkehr Baden-Württemberg. Reihe Abfall, Heft 71 (2002)
- [Hornung03] Hornung, A. et al: *Haloclean/ Pydra – Thermal-Chemical Recycling of WEEE*. Proceedings of the Workshop on the Recycling of Polymeric Materials MoDeSt, Karlsruhe (2003)
- [Kopacek02] Kopacek, P.; Kopacek, B.: *State of the art and future trends in intelligent disassembly*. Proceedings. Going Green – CARE INNOVATION. Wien (2002)
vgl. auch: <http://www.re-use.net>
- [Menad98] Menad, N., Björkmann, Bo., Allain, Eric G.: Combustion of plastics contained in electric and electronic scrap, Resources, Conservation and Recycling 24 (1998), p. 65-85
- [RL 2002/95/EG] Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 27.01.2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union L 37 (2003)
- [RL 2002/96/EG] Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rats vom 27.01.2003 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union L 37 (2003)

- [Salhofer99] Salhofer, S. et al.: *Mechanische Aufbereitung von Elektroaltgeräten*. Republik Österreich, Schriftenreihe des Bundesministeriums für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Band 7/2000
- [StatistikBW03] <http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/UmweltVerkehr/Landesdaten/#a>
- [Schebek03] Disposal of electronic scrap in Baden-Württemberg: Life-Cycle view on future recycling options – outline of a study, Proceedings of the Workshop on Recycling of Polymeric Materials, Juli 2003, Karlsruhe
- [Umweltplan00] *Umweltplan Baden-Württemberg*. Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2000)
- [UVM02] Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.): *Perspektiven für die Verwertung von Kunststoffen aus Elektronik-Altgeräten*. Tagungsband. Reihe Abfall, Heft 67 (2002)
- [Vehlow02] Vehlow, J. et al, Recycling of bromine from plastics containing brominated flame retardants in state-of-the-art combustion facilities. APME, 2002
- [Vehlow03] Vehlow, J., Mark, F. E.: Energy and material recovery by co-combustion of WEEE and MSW, Proceedings of the Workshop on Recycling of Polymeric Materials, Juli 2003, Karlsruhe
- [Wilkinson01] Wilkinson, S.; Duffy, N.; Crowe, M.: Waste from Electrical and Electronic Equipment in Ireland: A status report. EPA topic report (2001)

Teil C: Kunststoff / Verpackungen

1. Stand der Verwertung / Beseitigung

1.1. Spezifikation

Kunststoffe werden nach ihren stofflichen bzw. werkstofflichen Eigenschaften in drei Klassen eingeteilt:

- Thermoplaste gehen beim Erwärmen reversibel in einen plastischen Zustand über und behalten ihre Form nach dem Erkalten bei.
- Duroplaste sind nicht aufschmelzbare und in Lösungsmitteln unlösliche Kunststoffe, deren mechanische Eigenschaften bis zur Zersetzungstemperatur nahezu konstant bleiben.
- Elastomere sind nicht aufschmelzbare und in Lösungsmitteln unlösliche Polymere mit hoher Elastizität in einem breiten Temperaturbereich.

Im Jahr 2001 wurden 10,3 Mio. t Kunststoffe in Deutschland produziert, die sich auf vier große industrielle Einsatzbereiche aufteilen. Hierbei stellt die Verpackungsindustrie mit 3,04 Mio. t den größten Einsatzbereich dar. Als weitere wichtige Bereiche sind die Bau-, Fahrzeug- und Elektro-/Elektronikindustrie zu nennen, wie die folgende Abbildung zeigt [Con02]. Im weiteren Verlauf liegt der Schwerpunkt der Untersuchung auf den Bereichen der Kunststoffverpackungen. Kunststoffe aus den Bereichen der Elektro-/Elektronik- und der Fahrzeugindustrie werden in den Kapiteln B und D dieser Studie behandelt.

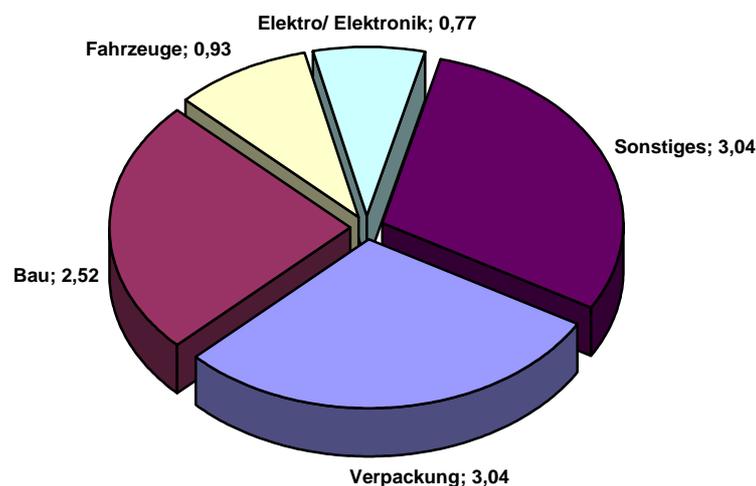


Abb.1: Einsatzbereiche von Kunststoffen in Deutschland in 2001 [Con02] Angabe in Mio. t/a.

Unter Berücksichtigung der jeweiligen Export/Import-Überhänge, die insbesondere in den Einsatzgebieten der Verpackungs- und Fahrzeugindustrie einen Export von über 35 % ergeben, verbleiben in Deutschland 8,9 Mio. t/a an Kunststoffen beim Endverbraucher [VKE04].

In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen, für Verpackungen relevanten Kunststoffsorten aufgeführt. Die Prozentzahlen geben die Anteile der Kunststoffsorten an der produzierten Gesamtkunststoffmenge für Verpackungen an.

Kunststoffarten	Insgesamt	Verpackungen	
	in 1000 t	in 1000 t	Anteile
PE-LD/LLD	1.450	990	68,3 %
PE-HD	1.100	575	52,3 %
PP	1.570	805	51,3 %
PS	420	200	47,6 %
EPS	220	35	15,9 %
PVC	1.510	150	9,9 %
PA	290	45	15,5 %
PET	300	220	73,3 %
Sonst. technische Thermoplaste	270	10	3,7 %
Sonstige	3170	10	0,3 %
Gesamt	10.300	3.040	29,3 %

Tabelle 1: Kunststoffsorten, -mengen und -anteile an den Verpackungen [Con02]

Durch den Export von 35 % verbleiben in Deutschland von der produzierten Menge an Kunststoffverpackungen nur etwa 1,92 Mio. t/a beim Endverbraucher [VKE04].

1.2. Mengenaufkommen

Für das Jahr 2001 ergab sich eine Abfallmenge an Kunststoffen von rund 3,9 Mio. t. Hiervon entfielen 2,9 Mio. t auf die Endverbraucher und ca. 0,9 Mio. t auf Produktions- und Verarbeitungsabfälle. Der größte Anteil der Kunststoffabfälle stammt mit etwa 1,25 Mio. t aus dem Einsatzgebiet der Verpackungen, das gemäß der Verwendung eher eine kurze Gebrauchsdauer repräsentiert [VKE04].

Der Hauptanteil mit 688.000 t der Verpackungsabfälle entstammt dem Dualen System Deutschland (DSD). Hierbei ist die Erfassungsmenge für Leichtverpackungen aufgrund der veränderten Marktsituation weiter gestiegen, insbesondere die PET-Menge nimmt weiter stark zu. Von anderen Sammelsystemen sowie aus speziellen gewerblichen Sammelsystemen (z.B. Interseroh, Rigk etc.) werden nochmals etwa 0,2 Mio. t Kunststoffabfälle einer Verwertung zugeführt. Die restlichen Verpackungsabfälle von ca. 0,35 Mio. t werden beseitigt [VKE04].

Abb. 2 zeigt die Aufteilung der vom DSD verwerteten Verpackungsfraktionen im Jahr 2002. Die Gesamtmenge an verwerteten Kunststoffen bezieht sich auf 642.000 t, da die Menge an Verbundstoffen des DSD von 46.000 t nicht einbezogen wurden [DSD02].

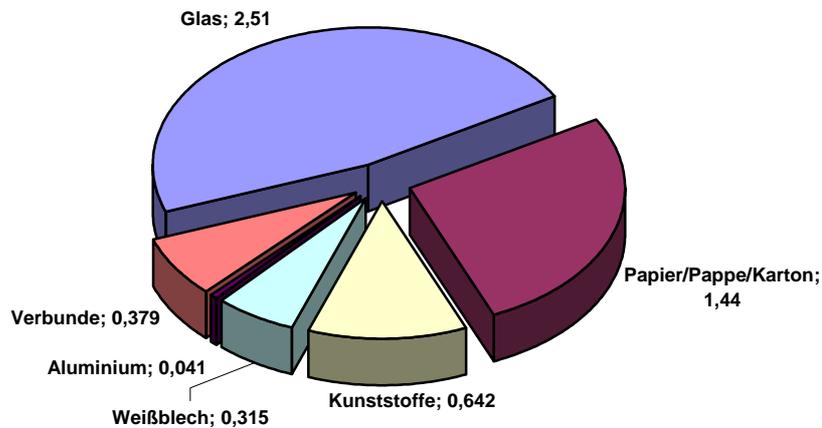


Abb. 2: Verwertung der vom DSD eingesammelten Verkaufsverpackungen in der BRD 2002 [DSD02]. Angaben in Mio. t.

Für 2002 errechnet sich für das DSD eine Verwertungsquote für die Fraktion der Kunststoffe von 87%. Die gesetzlich vorgeschriebene Verwertungsquote liegt bei 60 % [Ver98]. Allerdings wird diese Quote nicht aus der Menge an verwerteten Kunststoffen im Verhältnis zu den eingesammelten Kunststoffabfällen (1,25 Mio. t in 2001) ermittelt, sondern auf Basis der DSD-lizenzierten Menge an Kunststoffverpackungen. Die im Jahr 2002 für das DSD-lizenzierte Kunststoffverpackungsmenge betrug 736.000 t [DSD02].

Die für Baden-Württemberg erhobenen Daten des Kunststoffabfallaufkommens beruhen auf Angaben des Statistischen Landesamtes, welche auch vom Ministerium für Umwelt und Verkehr im Abfallbericht 2002 publiziert wurden. In die Abfallbilanz gehen die von den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern selbst oder im Auftrag durch Dritte und die vom DSD erfassten Mengen ein.

Das gesammelte Mengenaufkommen an Kunststoffen ist wie das gesamte Wertstoffaufkommen in den letzten Jahren stetig gewachsen. Da mit der Steigerung des Wertstoffaufkommens ein Rückgang des Restmüllaufkommens einhergeht, ist diese Entwicklung auf eine Verbesserung der getrennten Abfallerfassung zurückzuführen.

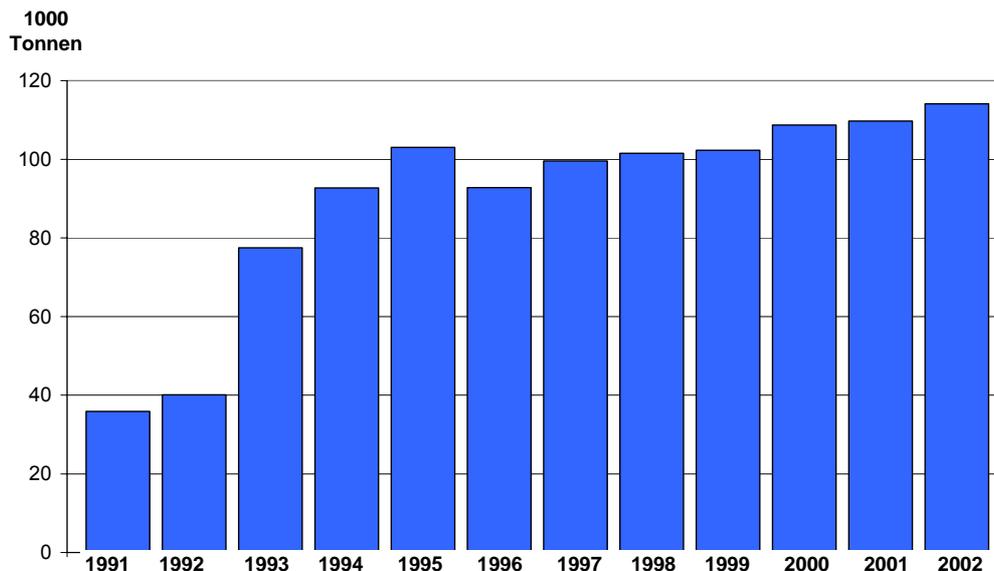


Abb. 3: Menge der eingesammelten Kunststoffe in Baden-Württemberg von 1991-2002 [StaLa]

Abb. 3 stellt diese Entwicklung seit 1991 dar. Seit dem Jahr 1993 sammelt die Duales System Deutschland AG die Verpackungsmaterialien in allen Kreisen. Dadurch lässt sich der sprunghafte Anstieg im gesammelten Kunststoffaufkommen in diesem Jahr erklären. Im Jahr 2002 betrug die Menge an eingesammelten Kunststoffen 114.000 t, von denen etwas mehr als 104.000 t vom DSD erfasst wurden. Diese Menge entspricht einem Anteil von 92%.

1.3 Wege der Verwertung / Beseitigung

Die Deutsche Gesellschaft für Kunststoffrecycling (DKR) gibt an, in 2002 eine vom DSD bezogene Kunststoffmenge von 688.000 t der Verwertung zugeführt zu haben [DKR02]. Der Unterschied zu den oben aufgeführten 642.000 t an verwerteten Kunststoffen rührt von einer miteinbezogenen Menge Kunststoffe aus den Verbundstoffen des DSD her.

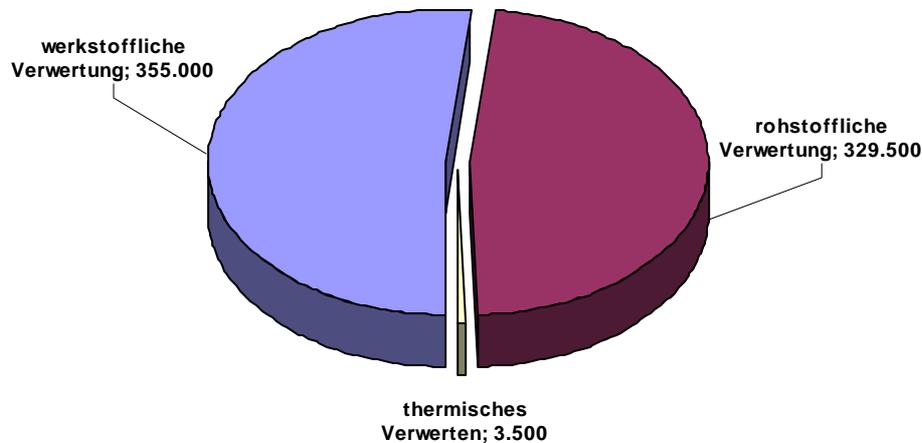


Abb.4: Vom DKR verwertete DSD Verpackungskunststoffe [DKR02]

Von den 688.000 t/a wurden 355.000 t/a dem werkstofflichen Recycling, 329.500 t/a dem rohstofflichen Recycling in der Stahl- und Methanolproduktion zugeführt. 3.500 t/a wurden von der DKR genutzt, um thermische Verwertungsverfahren zu testen [DKR02].

Das Statistische Landesamt in Baden-Württemberg gibt bei den Entsorgungswegen für Kunststoffe eine Gesamtmenge von 51.799 t in 2001 an, davon wurden 29.053 t in Sortiereinrichtungen und 22.576 t an Verwertungsbetriebe weitergegeben. Diese Daten lassen sich nicht mit den eingesammelten Mengen aus der Abfallbilanz des Landes Baden-Württemberg in Beziehung setzen. Sie werden aus einer bundesweiten Erhebung bei den Verwertungs- und Sortierbetrieben gewonnen, bei der nach Aussage des Statistischen Landesamtes nicht alle Betriebe in die Erfassung mit eingehen. Außerdem wird bei dieser Erhebung nicht nach der Verwertungsart der Kunststoffe unterschieden. Durch eine landesweite Datenerhebung bei allen Sortier- und Verwertungsbetrieben ließe sich die Datenlage deutlich verbessern.

1.4 Tendenzen bei Mengen und Zusammensetzung

In der Literatur wird angegeben, dass mit einem steigenden Aufkommen der Kunststoffabfälle insbesondere im Endverbraucherbereich zu rechnen ist. Nach Schätzungen soll das Aufkommen im Endverbraucherbereich bundesweit von 2,9 Mio. t in 2001 kontinuierlich mit 3,5% pro Jahr auf ca. 4,4 Mio. t in 2010 ansteigen. Dies wird hauptsächlich auf den weiterhin steigenden Kunststoffverbrauch sowie den zunehmenden Rücklauf aus langlebigen Kunststoffprodukten zurückgeführt. Dabei wird deutlich gemacht, dass kein lineares Abhängigkeitsverhältnis zwischen Verbrauchsentwicklung und Abfallaufkommen besteht [Lind01].

Ob der Anteil der Getränkeverpackungen am geschätzten steigenden Aufkommen an Kunststoffabfällen ebenfalls zunehmen wird, darüber herrscht Unsicherheit.

Wie im folgenden Kapitel beschrieben, wurde die Verpackungsverordnung durch eine Nacherhebung erweitert und durch die Einführung der Dosenpfandregelung nochmals novelliert.

Es besteht die Möglichkeit, dass das Kunststoffabfallaufkommen durch diese Änderung der Gesetzeslage leicht sinkt, und mittels einer verbesserten Erfassung von sortenreinen Einwegpfandverpackungen die Verwertungsquote steigt.

Für das Jahr 2003 hat der VKE eine weitere Erhebung über Erzeugung, Verbrauch und Verwertung von Kunststoffen in Auftrag gegeben [EUWID04].

2. Darstellung der Ziel-Vorgaben

Die aktuellen Vorgaben für die Entsorgung von Verpackungskunststoffen ergeben sich sowohl aus europäischen Richtlinien als auch aus nationalen Vorgaben. Die wichtigsten rechtlichen Vorschriften sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Europa	Deutschland
EU-Verpackungsrichtlinie	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW-/AbfG]
	Verpackungsverordnung (VerpackV)

Tabelle 2: Wichtige Vorschriften für die Entsorgung von Verpackungskunststoffen

Derzeit wird in Brüssel die Änderung der EU-Verpackungsrichtlinie diskutiert. Nach den Vorstellungen der Kommission sollen neue Verwertungsquoten für Verpackungen mit Mindestquoten und Obergrenzen festgelegt werden, die in den Mitgliedstaaten bis 2006 oder bis 2008 erreicht werden sollen. Die Kommission spricht von Verwertungsquoten zwischen 60 und 75 %, wobei davon die Recyclingquote allein 55 - 70 % betragen soll; dies heißt, dass für die energetische Verwertung nur eine geringe Marge zugelassen werden soll. Zusätzlich sollen materialspezifische Quoten für die Verwertung von Glas (60 %), von Papier/Pappe/Karton (55 %), für Metallverpackungen (50 %) sowie für Kunststoffverpackungen (20 %) festgelegt werden. Bei der Kunststoffverwertung schlug die Kommission eine Unterscheidung zwischen mechanischer, chemischer, rohstofflicher und energetischer Verwertung vor. Die Quoten für die materialspezifische Verwertung von Kunststoffverpackungen von 20 % sollen allerdings über mechanisches oder chemisches Recycling erzielt werden. Demgegenüber ergab die bisherige Beratung im Europäischen Parlament die Forderung, auf Obergrenzen zu verzichten und nur Mindestquoten festzulegen, wobei die Mindestanforderungen erhöht werden sollen.

Die seitens des Europäischen Parlaments gewünschten Verwertungsquoten dürften hierzulande keine Probleme aufwerfen, wobei zu beachten ist, dass die Vorgaben in der EU-Verpackungsrichtlinie sich auf sämtliche Verpackungen beziehen, die in Deutschland erreichten Verwertungsquoten dagegen meist nur den Bereich der Verkaufsverpackungen über das Duale System darstellen.

Jedenfalls scheint die Novelle der Europäischen Verpackungsrichtlinie nicht sehr kurzfristig zur Entscheidung zu gelangen. Eine Änderung der Deutschen Verpackungsverordnung zur Anpassung an geänderte europäische Vorgaben ist daher kurzfristig nicht erforderlich [Schnurer02].

In Deutschland ist die rechtliche Lage im Verpackungsbereich bisher noch durch die Verpackungsverordnung (VerpackV) von 1998 geregelt. Danach müssen Kunststoffverpackungen ab 1. Januar 1990 mindestens zu 60 % einer Verwertung zugeführt werden.

Dabei sind mindestens 60 % dieser Verwertungsquote durch werkstoffliche Verfahren zu realisieren. [Ver98]

Die Nacherhebung von Januar 1999 bis Januar 2000 bestätigte die Unterschreitung der Mehrwegquoten des Jahres 1997. Die spätere Nacherhebung von Mai 2000 bis April 2001 ergab so gar nur noch eine Mehrwegquote von 63,81 %. Die neuen Teilergebnisse für das Jahr 2000 zeigen Rückgänge in allen Getränkeparten, besonders gravierend bei Bier, Mineralwasser und CO₂-haltigen Erfrischungsgetränken. Hierdurch war die Bundesregierung aufgefordert, die Nacherhebungsergebnisse im Juli 2002 im Bundesanzeiger zu veröffentlichen, womit die Pfandpflicht für Einwegverpackungen bei den Füllgütern Bier, Mineralwasser und CO₂-haltige Erfrischungsgetränke ab 1.1.2003 ausgelöst wurde [Schnurer02].

Über die Auswirkungen der eingeführten Pfandpflicht auf die Werkstoffwahl und auf das bevorzugte Verkaufssystem (Mehrweg oder Einweg) liegen bislang noch keine Untersuchungen vor.

Die politischen Bestrebungen innerhalb Baden-Württembergs im Umweltbereich sind im Umweltplan formuliert. Laut Umweltplan hat sich das werkstoffliche Recycling konsolidiert. Es stellt sich aber die Frage, ob die hohen Kosten des Dualen Systems zu rechtfertigen sind, die sich im Jahre 1999 bundesweit auf 1,85 Mrd. Euro belaufen [UP04].

3. Beschreibung und Bewertung der Verwertungs- und Beseitigungswege

3.1 Übersicht

Kunststoffe sind grundsätzlich auf drei verschiedenen Wegen zu verwerten:

- Bei der werkstofflichen Verwertung werden die gebrauchten Kunststoffe mechanisch aufbereitet. Dabei bleibt die chemische Struktur der Kunststoffe unverändert. Die Altteile werden zerkleinert, gereinigt und nach Sorten getrennt. Dies ist sinnvoll, wenn Altteile sauber und sortenrein erfasst werden können und das Rezyklat Neuware im Verhältnis eins zu eins ersetzt.
- Bei der rohstofflichen Verwertung werden die Polymerketten z.B. durch Einwirkung von Wärme gespaltet. Die Produkte sind Monomere oder petrochemische Grundstoffe wie Öle und Gase, die zur Herstellung neuer Kunststoffe eingesetzt werden können. Das Rohstoff-Recycling ist für vermischte und für verschmutzte Kunststofffraktionen geeignet.
- Bei der energetischen Verwertung wird die in den Kunststoffen chemisch gebundene Energie durch Verbrennung bei gleichzeitiger Nutzung dieser Energie zur Erzeugung von Strom und/oder Dampf bzw. Bereitstellung von Prozesswärme genutzt. Die energetische Verwertung ist für vermischte und für verschmutzte, insbesondere für schadstoffbelastete Kunststofffraktionen geeignet.

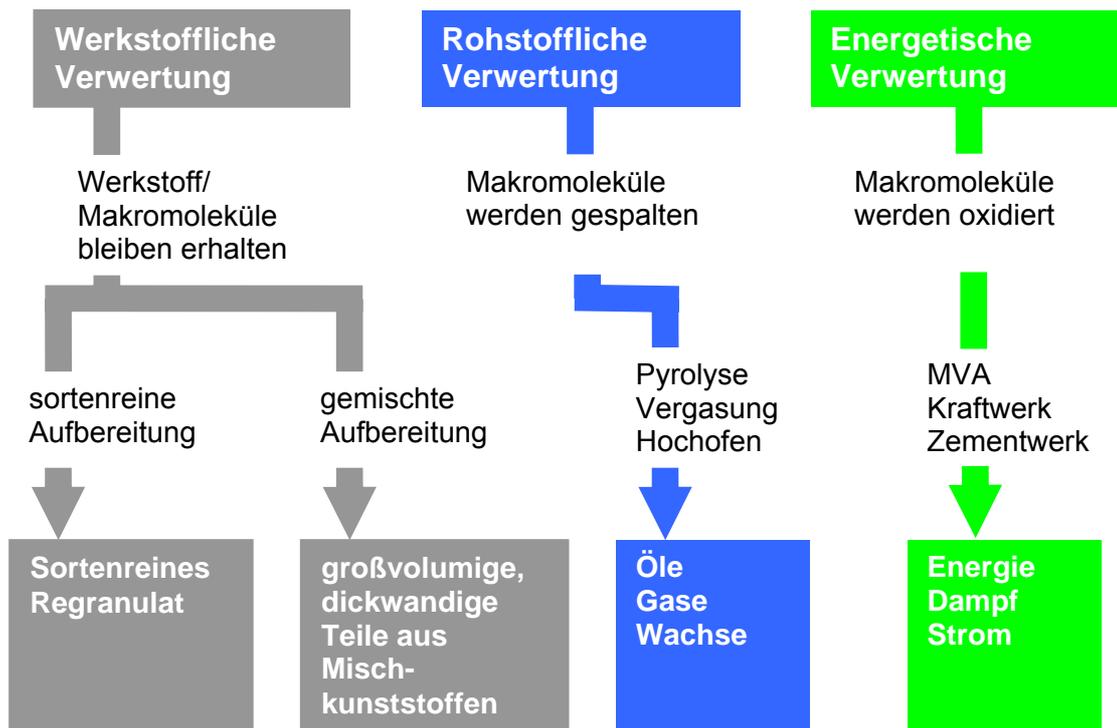


Abb. 5.: Verwertungswege für Kunststoffe [VKE]

Beispiele von Verwertungsverfahren

Die meisten Verwertungsverfahren wurden schon in den vorhergehenden Teilen der Studie behandelt. Deshalb sollen hier nur noch die bisher nicht erwähnten Verfahren erläutert werden. Auf die spezifischen Eigenheiten der anderen Verfahren in Bezug auf die Kunststoffverwertung wird nur noch kurz eingegangen.

3.2 Werkstoffliche Verwertung

Bei der werkstofflichen Verwertung unterscheiden verschiedene Studien im Allgemeinen nach dem Automatisierungsgrad der Sortierung und nach der aussortierten Menge gegenüber der Restfraktion, sowie nach der Sortenreinheit.

Die einfachsten und ältesten Verfahren arbeiten mit einer manuellen Sortierung, der sich meist eine Magnetabscheidung anschließt. Die Aluminiumfraktion wird entweder über Windsichter oder ebenfalls manuell abgetrennt. Die Bedeutung solcher Anlagen geht immer weiter zurück. Sie werden durch halbautomatische Anlagen ersetzt, bei denen sich die manuelle Tätigkeit auf eine Kontrollsortierung konzentriert.

Die hier aussortierten Fraktionen sind: Folien, Weißblech, Mischkunststoff (flächig), Mischkunststoff (körperförmig), Flüssigkeitskartons, Aluminium, Kunststoffflaschen und Verbunde aus Papier, Pappe und Karton (PPK-Verbunde). Neuere Anlagen verwenden eine weiter entwickelte NIR (Near Infrared) –Trenntechnik, die es ermöglicht, die Kunststoffverpackungen in PE, PP, PET und PS-Artikel auf zu trennen. Der Sor-

tierung schließt sich eine Veredelung und Verwertung der einzelnen Fraktionen an. In Deutschland sind laut Aussage des DSD 210 Sortieranlagen in Betrieb. Die Reststoffe der werkstofflichen Verwertungen gehen in die rohstoffliche oder energetische Verwertung.

Verwertung durch sortenreine Sortierung (SORTEC 3.1)

Die von der SYSTEC, einer Tochtergesellschaft des Dualen Systems Deutschland, in Hannover errichtete Sortieranlage - genannt SORTEC 3.0 - hat ihre Testphase erfolgreich absolviert. Der innovative Charakter des zugrunde liegenden Verfahrenskonzeptes liegt in der Abkehr von der manuellen Artikelsortierung. Die Bestandteile des Gelben Sackes können nun automatisch nach ihren Materialeigenschaften separiert und als hochreine Sekundärrohstoffe zurückgewonnen werden. Hierzu ist ein komplexer Prozess entwickelt worden. Die Leichtverpackungsabfälle werden zunächst einer Gebindeöffnerstufe aufgegeben. Mittels Siebung wird der Materialstrom sodann in mehrere Korngrößenklassen aufgeteilt. Windsichter trennen Kunststofffolien und Papier ab. Dieses Leichtgut gelangt direkt in einen Stofflöser (Pulper). Die Schwerfraktionen werden nun zu Magnetabscheidern geleitet, die Weißblechdosen und andere Fe-Bestandteile als Endprodukt aussortieren. Danach erfolgt die Abscheidung von PET-Flaschen und Getränkekartons mittels zweier Klaubegeräte. Das restliche Material wird den Pulpern zugeführt. Diese lösen das Papier in seine Faserstoffbestandteile auf. In der Waschstufe werden Papierfasern und Schmutzteilchen abgetrennt. Aluminium wird mit einem Wirbelstromabscheider sortenrein zurückgewonnen. Nach Durchlaufen einer Schwergutfalle sind praktisch nur noch Kunststoffe enthalten. Diese werden nach ihrer Dichte getrennt. Die weitgehend sortenreinen Produkte bestehen aus Polyethylen, Polystyrol und Polyolefinen. Die Kunststofffraktionen werden noch mittels Extrudern und Agglomeratoren verdichtet. Hieraus resultieren gut marktfähige Granulate.

Zur Erfassung der Leichtverpackungsabfälle wurden auf der EXPO Sammelbehälter aufgestellt. Dabei fielen pro Tag ca. 8,3 t an, die in der SORTEC 3.0-Anlage verarbeitet wurden. Zurzeit dient die Anlage, die es auf einen Jahresdurchsatz von 25.000 t bringt, zur Aufbereitung der Gelben Säcke von 1,1 Millionen Einwohnern des Großraums Hannover. [Jul04]

Der Vorteil dieser Anlage besteht in der Zusammenführung von bisher separierten Anlagentypen. Materialverluste an den Schnittstellen entfallen, was zu einer höheren Wertstoffgewinnung führt. Die ökologischen Vorteile ergeben sich durch eine hohe Sortenreinheit. Laut DSD ist der Anlagentyp kosteneffizienter als herkömmliche Sortierung und Verwertung.

3.3 Rohstoffliche Verwertung

Hochofen

Im Hochofen werden die im Eisenerz enthaltenen Eisenoxide durch Kohlenstoff reduziert und in flüssiges Roheisen umgewandelt. Ein Hochofen ist ein kontinuierlich arbeitender Schachtofen in den am unteren Teil 1000-1350 °C heiße Luft eingeblasen wird. Das Gichtgas, welches bei der Reduktion entsteht, strömt von unten durch die Eisenerzschichten nach oben. Das Hauptreduktionsmittel ist Kokskohle.

Es werden Anstrengungen unternommen die Koksmenge zu reduzieren und durch andere Reduktionsmittel wie Schweröl, welches unten mit der heißen Luft eingeblasen wird, zu ersetzen.

Da der Kunststoffabfall praktisch die gleiche chemische Struktur besitzt wie das Schweröl, wird er ebenfalls als Ersatz für die Kokskohle eingesetzt. Aufgrund des etwas höheren Ascheanteils des Kunststoffes wird eine geringfügig höhere Menge an Kunststoff benötigt, um das Schweröl zu ersetzen. [MCM00]

Das Bundesministerium erkennt das Verfahren als rohstoffliche Verwertung von Kunststoffen an [UMW95].

Die Verwendung von Kunststoffabfällen im Hochofenprozess ist Stand der Technik und wurde als ökologisch günstig bewertet [Heyde99] [Lah03].

3.4 Energetische Verwertung

Die ökologische Bewertung eines Verfahrens zur energetischen Verwertung ist stark vom energetischen Wirkungsgrad des Verfahrens abhängig. Je vollständiger die energetische Nutzung der im Abfall chemisch gebundenen Enthalpie ist, umso höher wird der ökologische Nutzen des Verfahrens eingestuft. Bei dieser Bewertung ist zu beachten, dass das Produkt der energetischen Nutzung sowohl Wärme (Dampf, Fernwärme) als auch elektrischer Strom oder eine Kombination aus Wärme und Strom sein kann. Es ist somit, streng zu unterscheiden, zwischen dem **energetischen Wirkungsgrad** (Produkt: Dampf oder Fernwärme) und dem **elektrischen Wirkungsgrad** (Produkt: Strom).

Mitverbrennung

Kunststoffe werden in folgenden Verfahren zur Mitverbrennung eingesetzt:

- Müllverbrennungsanlage
- Kraftwerk
- Vergasungsverfahren
- Zementdrehrohr

Für die Mitverbrennung von Kunststoffabfällen in Baden-Württemberg liegen Daten von Zementwerken und einem Kohlekraftwerk vor. Die gesamte genehmigte Kapazität für Kunststoffabfall in diesen beiden Anlagentypen betrug laut Landesamt für Umweltschutz 21.000 t/a. Die tatsächlich mitverbrannten Abfälle beliefen sich im Jahr 2000 nur auf 9.954 t und in 2001 auf 7.865 t [LfU03]. Allerdings werden keine Angaben gemacht, aus welcher Quelle diese Kunststoffe stammen.

Es zeigt sich, dass momentan nur ein Teil des theoretischen Potentials energetischer Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Baden-Württemberg genutzt wird. Um neue Verwertungswege zu erschließen und Ersatzbrennstoffe als gleichwertigen Brennstoff neben Kohle, Öl und Gas zu etablieren, bestehen seit einigen Jahren europaweit Bestrebungen Gütekriterien und Qualitätssicherungsmaßnahmen zu definieren, um eine umweltentlastende Verwertung sicherzustellen.

4. Empfehlungen

Datenlage

- Harmonisierung der Abfallbilanz des Landes mit den bundesweiten Angaben zu den behandelten Mengen der Verwertungs- und Sortierbetriebe
- Verbesserung der Datenlage bezüglich der in der Mitverbrennung zu verwendenden Kapazitäten

Technologie

Eine allgemeine Empfehlung bezüglich eines Verwertungsweges für gebrauchte Kunststoffe kann nicht angegeben werden, da die einzelnen Verwertungswege für spezifische Kunststoffe bzw. unter spezifischen Randbedingungen sowohl ökologisch als auch ökonomisch Vorteile gegenüber dem jeweiligen anderen Verwertungsweg besitzen können. Dieses muss fallspezifisch über den gesamten Lebensweg betrachtet werden, wie es bereits in zahlreichen Studien entweder für Verkaufsverpackungen oder spezifische Kunststoffprodukte untersucht wurde [Schmitz95, Motz96, Dinkel96, Plinke00a, Plinke00b, Schonert01, Heyde 99, Deh99, Janz00, Wol00, Chr01, Lahl02, Nür02, Jen03].

Ergebnisse zur ökologischen Bewertung aus den Studien:

- **Die stoffliche Verwertung von Kunststoffflaschen und Folien größer DIN A4 weisen einen ökologischen Vorteil gegenüber der energetischen Verwertung auf.**
- **Für die Fraktionen kleinere Folien, Kunststoffverbunde und sonstige Kunststoffverpackungen ist die energetische Verwertung günstiger.**
- **Je höher der energetische Wirkungsgrad der Anlagen bei einer thermischen Verwertung ist, umso umweltentlastender ist der Verwertungsweg. Da die Mehrzahl an Müllverbrennungsanlagen keine günstigen Wirkungsgrade aufweisen, ist der Einsatz im Zement- oder Kraftwerk vorzuziehen.**

Ergebnisse zur ökonomischen Bewertung aus den Studien:

Der Kostenaufwand zur Verwertung von Kunststoffabfällen ist im Vergleich zu Metallen oder Glas deutlich höher. Die Werte schwanken je nach Studie und Randbedingungen bei der Sortiertechnik und den Transportwegen zwischen 400 und 1000 €/t. Dabei ist der Aufwand für die großvolumigen Teile wie Flaschen und Folien am geringsten.

Die Frage, ob ein größerer Anteil an Kunststoffverpackungen, insbesondere die kleinteiligen, verschmutzten Kunststoffteile werkstofflich oder energetisch verwertet werden sollen, ist eine Frage der Ökonomie als auch der Ökologie. Im Umweltgutachten 2000 des Sachverständigenrats für Umweltfragen (SRU) wird die Forderung aufgestellt eine „Begrenzung der getrennten Erfassung und (stofflichen) Verwertung von Kunststoffverpackungen auf die Teilmenge der großvolumigen, gering verschmutzten und weitgehend sortenreinen Hohlkörper (vor allem Flaschen) und Folien“ vorzunehmen [SRU00]. Diese Aussage wird von den Autoren dieser Studie unterstützt.

	Beseitigung		Energetische Verwertung		Rohstoffliche Verwertung		Werkstoffliche Verwertung	
	Deponie	MVA	Kraftwerk	Zement	Hochofen	Vergasung	Sortenreine Aufbereitung	Gemischstoffliche Aufbereitung
Schadstoffe /Probleme	organische Schadstoffe, Chlor							
Verbleib der Schadstoffe	Boden Grundwasser	Luft Rückstände d. Rauchgasreinigung	Luft Rückstände d. Rauchgasreinigung	Luft Zement	Luft	Rückstände d. Gasreinigung	Feste Rückstände zur Beseitigung (Schwer- und Feinfraktion)	Feste Rückstände zur Beseitigung (Schwer- und Feinfraktion)
Wertstoffe Nutzen Produkt		Dampf/Strom	Ersatzbrennstoff Dampf/Strom	Ersatzbrennstoff	Ersatz fossiler Reduktionsmittel	Methanol Dampf/Strom	Gleichwertige Kunststoffe	Minderwertige Kunststoffe
Rechtliche Rahmenbedingungen	KrW-/AbfG VerpackV	KrW-/AbfG VerpackV	KrW-/AbfG VerpackV	KrW-/AbfG VerpackV	KrW-/AbfG VerpackV	KrW-/AbfG VerpackV	KrW-/AbfG VerpackV	KrW-/AbfG VerpackV
	AbfAbIV TAsi Verbot ab 2005	17. BImSchV	17. BImSchV	17. BImSchV	TA Luft	17. BImSchV		
Technische Bewertung		Stand der Technik Beschränkte Kapazitäten ab 2005	Stand der Technik	Stand der Technik	Stand der Technik	Stand der Technik	Stand der Technik Neuere Anlagen erreichen höhere Sortenreinheit	
Ökologisch/ Ökonomische Bewertung	nicht relevant TAsi	Ökologisch mittel (Wärmenutzung), ökonomisch günstig	Ökologisch besser als MVA (Wärmenutzung), ökonomisch günstig	Ökologisch besser als MVA (Wärmenutzung), ökonomisch günstig	Ökologisch besser als MVA, ökonomisch mittel (Feedkonditionierung)	Ökologisch besser als MVA ökonomisch mittel (Feedkonditionierung)	Bietet ökologische Vorteile ökonomisch ungünstig	Ökologische Vorteile gering da hoher Aufwand ökonomisch ungünstig

Literatur:

- [Abf02] Abfallbilanz 2002; Veröffentlichung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg; <http://www.uvm.baden-wuerttemberg.de/>
- [Bez00] Bez, J.; Kremer, M.: Verwertung von Kunststoffabfällen aus Sammlungen des Dualen Systems im Verfahren des Sekundärrohstoff-Verwertungszentrums Schwarze Pumpe. Fraunhofer IVV, Freising 2000
- [Chr01] Christiani, J.; Griepentrog, U.; Weber, H.: Grundlagen für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung von Verkaufsverpackungen. FKZ 298 337 19. im Auftrag des UBA, Berlin 2001
- [Con02] CONSULTIC Studie; Produktions- und Verbrauchsdaten für Kunststoffe in Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung 2001; Verband Kunststofferzeugende Industrie e.V. (VKE)
- [Deh99] Dehoust, G. et al.: Vergleich der rohstofflichen und energetischen Verwertung von Verpackungskunststoffen. Studie im Auftrag der Arbeitsgemeinschaft Verpackung und Umwelt (AGVU), Darmstadt, Essen 1999.
- [Dinkel96] Dinkel, F., Pohl, C.; Ros, M.: "Ökobilanz stärkehaltiger Kunststoffe : Bewertung mit überarbeiteter wirkungsorientierter Methodik". Schweiz / Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt; 271/1, 1996.
- [DKR02] Homepage der Deutschen Gesellschaft für Kunststoffrecycling <http://www.dkr.de/de/oekoeffizienz/200.htm>
- [DSD02] <http://www.gruener-punkt.de/Mengenstrom.97+B6Jkw9.0.html>
- [EUWID04] N.N: Neue Studie über Kunststoffverwertung. EUWID Nr. 16 v. 14.04.04, S.2
- [Heyde99] Heyde, M.; Kremer, M.: Recycling on Coverly of Plastics from packagings in Domestic Waste – LCA-type Analysis of different Strategies. LCA Documents. Eco-informa-press, 1999
- [Janz00] Janz, J.: Kunststoffverwertung im Hochofen. In: Urban, Bilitewski, Faulstich: Thermische Abfallbehandlung. Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik der Universität Gh Kassel, 2000
- [Jen03] Jenseit, W.; Stahl, H.; Wollny, V.; Wittlinger, R.: Recovery Options for Plastic Parts from End-of-Live Vehicles: an Eco-Efficiency Assessment. APME, Brüssel 2003
- [Jul04] Julius J.; Air; Hauszeitung der Aachener Institute für Rohstofftechnik; http://www.rwth-aachen.de/air/airmail/archiv/mai01/recycling_expo.html
- [KiP04] Vortrag im Rahmen des Arbeitskreises „Kunststoffe in der Pfalz“ 10.02.2004; Die Verwertung kunststoffreicher Abfallfraktionen von S.Grutke, BASF AG
- [Lah01] Lahl U.; Aus den bisherigen Untersuchungen zur Ökologie der Verpackungsverwertung lassen sich Defizite aufdecken; Müllmagazin 2/2001
- [Lahl02] Zeschmar-Lahl, B.; Lahl, U.: Rohstoffliche Verwertung von getrennt erfassten Verpackungen oder Mitbenutzung in der Restmülltonne?

- Ökobilanzieller Vergleich verschiedener Verwertungswege unter Berücksichtigung öffentlich-rechtlicher Entsorgungsinfrastrukturen. Im Auftrag der Landbell AG, Oyten 2002
- [LfU03] Mitverbrennung von Abfällen in Zement- und Kohlekraftwerken in Baden-Württemberg (Kurzfassung); Landesamt für Umweltschutz; Karlsruhe 2003
- [Lind01] Lindner, Ch.; Feldmann, H.: Kunststoffabfälle – Ist-Situation und Ausblick bei Produktion und Entsorgung. S. 158-167. In Faulstich, M.; Urban, A.; Bilitewski, B.: 6. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung, Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft Nr.162, Technische Universität München, 2001
- [MCM] McMullan J. T., Romey I.; Energy recovery from plastic waste; Journal of the Institut of Energy; March 2000; 73; pp 56-64
- [Motz96] Motz, G.; Plinke, E.; Kämpf, K.: "Grenzen und Potenziale der Verwertung von gebrauchten Verpackungen durch Stoffstrommanagement mittels österreichischer VerpackVO". Prognos AG, 1996.
- [Nür02] Nürrenbach, T.; Menner, M.; Ramsel, F.; Weber-Blaschke, G.; Faulstich, M.: Energetische Verwertung von Mischkunststoffen in bayrischen Müllverbrennungsanlagen: Ökologischer und ökonomischer Vergleich mit Verfahren zur stofflichen Verwertung. Müll und Abfall 10/2002, S. 651-658
- [Plinke00a] Plinke, E.; Schonert, M.; Meckel, H. et al.: "Ökobilanz für Getränkeverpackungen II - Hauptteil". Im Auftrag des Umweltbundesamts Texte Nr. 37/2000.
- [Plinke00b] Plinke, E.; Schonert, M.; Meckel, H. et al.: "Ökobilanz für Getränkeverpackungen II - Materialsammlung". Im Auftrag des Umweltbundesamts Texte Nr. 38/2000
- [Pro00] PROGNOSE; Branchen-Report Entsorgungswirtschaft, Der Markt der Entsorgungsleistungen bis zum Jahr 2010; Mai 2000
- [SRU00] Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU): Umweltgutachten 2000; Schritte ins nächste Jahrtausend; Deutscher Bundestag Drucksache 14/3363; 2000
- [Schmitz95] Schmitz, S.; Oels, H.-J.; Tiedemann, A.: Ökobilanz für Getränkeverpackung. Im Auftrag des Umweltbundesamts Texte 52/95, Berlin 1995
- [Schnurer02] Schnurer, H.: Ausblick auf die künftige Verpackungsabfallentsorgung aus nationaler und europäischer Sicht. Vortrag auf dem 14. Kasseler Abfallforum Bio- und Restabfallbehandlung 23.-25. April 2002
- [Schonert02] Schonert, M. et al: "Ökobilanz für Getränkeverpackungen II / Phase 2". Im Auftrag des Umweltbundesamts Texte Nr. 51/2002
- [StaLa] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg;
<http://www.statistik.baden-wuerttemberg.de/UmweltVerkehr/Landesdaten/#a2a>
- [UBA02] UBA Presse-Information 32/02: Mit Mehrweg im Umweltschutz immer auf der sicheren Seite. Umweltbundesamt hält Pfandpflicht für Einweg-Getränkeverpackungen für notwendig. Berlin 11.09.02

- [BA04] Umweltbundesamt; Homepage;
<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/kunststoffabfaelle.htm>; Stand 21.02.04
- [UMW95] Kunststoffe im Hochofen entsorgen; UMWELT Bd. 25 (1995) Nr. 11/12
- [UP04] Umweltplan; Veröffentlichung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg; <http://www.umweltplan.baden-wuerttemberg.de/> ; Download 02.02.2004
- [Ver98] Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen; VerpackV – Verpackungsverordnung; 1998
- [VKE] Verband der Kunststoffherstellenden Industrie
<http://www.vke.de/de/umwelt/verwertung/index.php?PHPS ESSID=b208b364781899a12aedbd3dad90d756>
- [VKE04] Verband der Kunststoffherstellenden Industrie: Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen. Stand 15.01.04. Download
<http://www.vke.de/de/infomaterial/download/download.php?ctop=1>
- [Wol00] Wollny, V.; Schmied, M.: Assessment of Plastic Recovery. European Environmental Bureau (EEB), Brüssel 2000

TEIL D: SCHREDDERRÜCKSTÄNDE

1. Stand der Verwertung / Beseitigung

1.1 Spezifikation

Im Rahmen der Diskussionen um die Entsorgung von einzelnen Abfallfraktionen, insbesondere der Kunststoffabfälle, kommt der Entsorgung von Altfahrzeugen und in diesem Zusammenhang der Problematik der so genannten Schredderrückstände eine wachsende Bedeutung zu. Die Altfahrzeugentsorgung beginnt mit der Entnahme der restlichen Betriebsmittel (Kraftstoff, Öle usw.) und dem Ausbau von Batterien und pyrotechnischen Bauteilen aus Airbags. Anschließend werden verwertbare Komponenten (Motor, Getriebe usw.) demontiert. Die zurückbleibenden Restkarossen werden gemeinsam mit anderem Schrott in Schredderanlagen zerkleinert. Der Anteil der Restkarossen am Inputmaterial für den Zerkleinerungsprozess beträgt etwa 30 %.

Der Zerkleinerungsprozess mit anschließender Trennung führt zu insgesamt drei Fraktionen: Fe-Schrott, NE-Schrott und Schredderrückstände. Die Metallfraktionen können problemlos verwertet werden, die Schredderrückstände müssen als Abfall entsorgt werden. Etwa 25 bis 28 Gew.% einer zugeführten Restkarosse gelangen in die Schredderrückstände, so dass aus den Restkarossen ein überproportional hoher Anteil als Schredderrückstand anfällt.

Die Zusammensetzung und folglich auch die mechanische bzw. chemisch-physikalische Beschaffenheit der Schredderrückstände wird entscheidend durch den Input (Schreddervormaterial) bestimmt. Allgemein können Schredderrückstände als eine sehr inhomogene Abfallmischung beschrieben werden, die zu großen Anteilen aus vermischten und verschmutzten Kunststoffen, Textilien, Holz, Papier und anorganischen Materialien wie Metallen, Glas und Sand besteht. Der Feinkornanteil mit Partikelgrößen unter 10 mm beträgt rund 50 %, der mittlere Heizwert kann mit ca. 14.000 kJ/kg angegeben werden. Die Zusammensetzung und folglich alle anderen Eigenschaften variieren, wie den Tabelle 1 und Tabelle 2 zu entnehmen ist, in relativ großen Bandbreiten.

Stoffgruppe	Anteile bzw. Bandbreiten (Gew.-%)				
	[Thomé-K.]	[Goldmann]	[Schenk]	[Spanke]	[Orth]
chlorfreie Thermoplaste (Formteile, Folien, Styropor, u.a.)	13	32	30 – 48	21 - 63	32
PVC (Folien, Kunstleder, Unterbodenschutz, Kabel- isolation)	6				
andere Thermo- und Du- roplaste	3				
Schaumstoff (Polyurethan)	7				
Elastomere (Gummi)	23	23	10 – 32		25
Holz / Zellulose (Holz, Pap- pe, Papier)	4	10	4 – 26	2 – 13	8
Faser- und Bezugsstoffe (Textilfasern, Glasfaser, Leder, u.a.)	6			4 – 29	
Eisen	13	13	0,5 – 20	1 – 23	2
Kupfer	1	4			
Aluminium	3				
Lackbestandteile	3	18	3 – 10	<1 – 15	4
Glas und Keramik	13		3 – 16	1 – 16	29
Andere Bestandteile und Fremdstoffe (Sand, Rost, Blei, Zink)	5		10 – 32	5 - 19	

Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung der Schredderrückstände

		[Spanke]		[BMU 1]	[Mark]
Anorganika:		Mittelwert	Wertespanne	Wertespanne	Wertespanne
Al	g/kg	20,0	10 – 25	10 – 22	7 – 30
As	mg/kg	28,5	20 – 35		20 – 50
Ca	g/kg	40,3	30 – 60	34 – 44	
Cd	mg/kg	61,2	40 – 80		2 – 85
Co	mg/kg	100	25 – 160		13 – 33
Cr	g/kg	1,2	0,34 – 1,3		1,0 – 1,8
Cu	g/kg	11,4	3,3 – 30	15 – 42	3,7 – 26,3
Fe	g/kg	141	50 – 240	57 – 210	33 – 180
Hg	mg/kg	2,1	1 – 3		1 – 49
K	g/kg	2,7	1,5 – 3		
Mn	g/kg	1,0	0,4 – 1,4		0,4 – 1,1
Mg	g/kg	8,7	8 – 10	5 – 8	0,5 – 8
Na	g/kg	7,1	1 – 12	28 – 31	
Ni	g/kg	1,2	0,4 – 2,8		0,4 – 1,5
Pb	g/kg	5,1	0,3 – 14	3 – 16	1,1 – 11,0
Si	g/kg	76,5	45 – 110	57 – 110	
Sn	mg/kg	66,7	25 – 90		130 – 400
Ti	mg/kg	0,06	0,01 – 0,1		
Zn	g/kg	9,0	2 – 13	5 - 18	4,6 – 20,0
Organika:					
PCB	mg/kg	9,7	5 – 14		
KW	mg/kg	16,3	10 – 28		

Tabelle 2: Elementinhaltsstoffe von Schredderrückständen

1.2 Mengenaufkommen

Für die anfallenden Mengen der Schredderrückstände gibt es sowohl für Baden-Württemberg als auch für die Bundesrepublik keine aktuellen Zahlen, die systematisch analysiert werden könnten. In der Abfallbilanz 2002 für Baden-Württemberg [AbfallbilanzBW] werden Schredderabfälle gemeinsam mit anderen Abfällen als "sonstige Abfälle" zusammengefasst. Allgemein ist davon auszugehen, dass 450.000 bis 460.000 t pro Jahr in Deutschland anfallen [Kuchta] [Reinhardt]. Daten über Anfall der Schredderrückstände in den vergangenen Jahren liegen nicht vor. Ältere Informationen über den Anfall in den einzelnen Bundesländern enthält Abbildung 1.

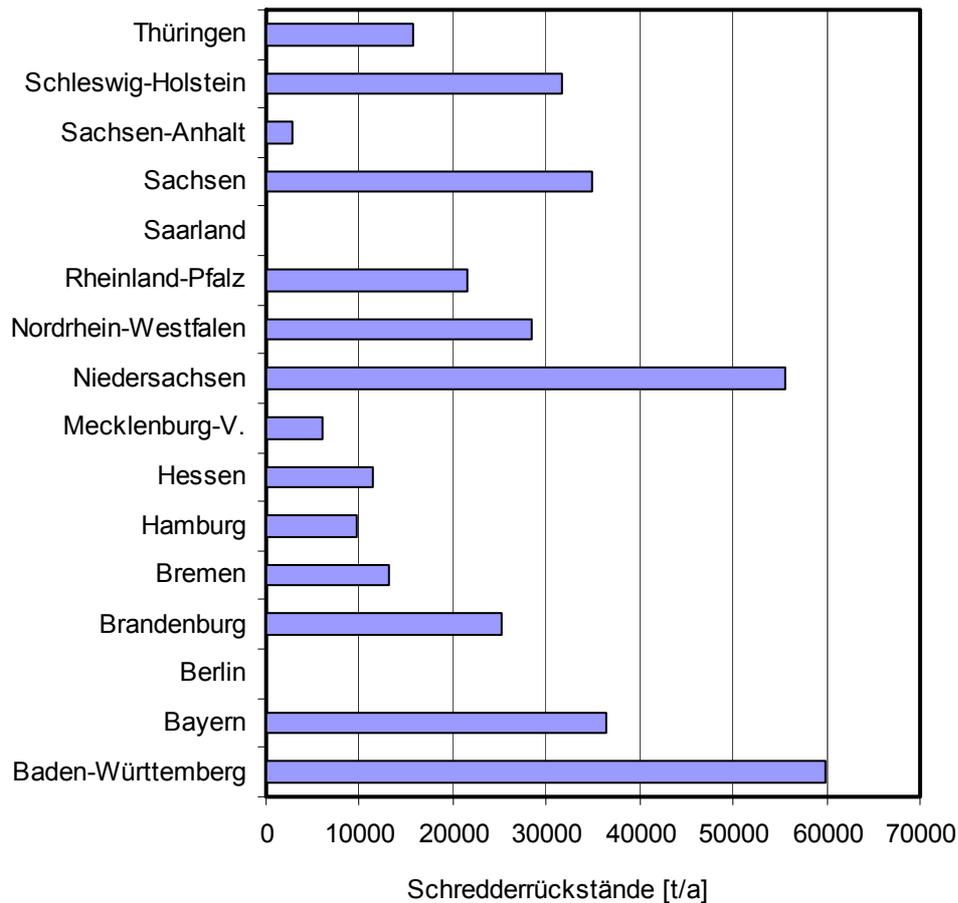


Abb. 1: Anfall von Schredderrückstandsmengen in den Bundesländern 1997 [Prognos-SA]

Als Summe der Angaben in Abbildung 1 ergibt sich für 1997 ein Gesamtaufkommen von insgesamt 353.000 t [Prognos-SA], das ca. um 100.000 t unter den Angaben oben im Text liegt. Die für Nordrhein-Westfalen ausgewiesenen Mengen, ca. 30.000 t, erscheinen im Vergleich zu den Zahlen der anderen Bundesländer als zu gering.

Eine mögliche Ursache für die Unterschiede könnten die Datenquellen sein, denn die Angabe von ca. 455.000 t beruht auf aktuellen Angaben der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV). Die Daten zur Abbildung 1 basieren auf der Auswertung der Begleitscheine. Außerdem ist die geänderte Systematik der Sonderabfallererfassung durch Einführung des Europäischen Abfallkataloges zum Januar 1999 und dessen Erweiterung drei Jahre später zu beachten.

Eine Abschätzung der in Baden-Württemberg anfallenden Schredderrückstandsmengen mit Hilfe von statistischen Daten über die stillgelegten Kraftfahrzeuge wird als nicht sinnvoll beurteilt, denn über 50 % dieser Kraftfahrzeuge werden exportiert [Clüsserath]. Als weitere Möglichkeit bleibt noch eine Abschätzung mit Hilfe der oben angeführten Gesamtmenge an Schredderrückständen im Bundesgebiet und den Einwohnerzahlen. Mit den Einwohnerzahlen des statistischen Bundesamtes [Destatis] für Baden-Württemberg (10.661.000) und für das Bundesgebiet (82.537.000) ergibt sich aus der im Bundesgebiet anfallenden Gesamtmenge der Schredder-

rückstände (455.000 t) für Baden-Württemberg ein jährliches Aufkommen an Schredderrückständen in der Größenordnung von 59.000 t.

Dieser Wert stimmt überraschend gut mit den Daten in Abbildung 1 überein. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Datenbasis und Berechnungsmethode kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass die jährliche Menge 60.000 t für Baden-Württemberg korrekt ist. Das Ergebnis beschreibt lediglich die Größenordnung.

1.3 Wege der Verwertung / Beseitigung

Die Entsorgung der in Deutschland anfallenden Schredderrückstände erfolgt in der Regel durch Ablagerung auf Deponien [Selinger]. In der Abfallbilanz für Baden-Württemberg [AbfallbilanzBW] erscheinen Schredderrückstände kumuliert mit anderen Abfällen als "Sonstige Abfälle". Aufgrund der angegebenen Arten der Entsorgungswege und der Ablagerungsmengen auf Deponien ist davon auszugehen, dass die Schredderrückstände auch in Baden-Württemberg auf Deponien abgelagert werden. Über die genauen Mengen liegen allerdings keine Informationen vor.

1.4 Tendenzen bei Mengen und Entsorgungswege

In der Zukunft werden sich die Entsorgungsmengen, die Zusammensetzung und auch die Entsorgungswege der Schredderrückstände verändern. Die Entsorgungsmengen und die Zusammensetzung der Schredderrückstände, maßgeblich durch die Restkarossen der Altfahrzeuge beeinflusst, werden sich aufgrund verschiedener Ursachen ändern, die in Tabelle 3 zusammengefasst sind.

<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkter Einsatz von Aluminium, anderen Leichtmetallen und Kunststoffen in Neufahrzeugen
<ul style="list-style-type: none"> • Steigender Einsatz elektronischer Ausrüstung wie z.B. Navigationssysteme, Klimaanlage
<ul style="list-style-type: none"> • Umstellung der Fahrzeugbedienung von Mechanik auf Elektronik (Sitzverstellung, Fensterheber, Bremssystem)
<ul style="list-style-type: none"> • Schnellere Umsetzung technischer Änderungen aufgrund schnellerer Modellwechsel
<ul style="list-style-type: none"> • Finanzielle Anreize für schadstoffärmere Fahrzeuge verkürzen die Nutzungsdauer im Inland (verstärkter Altfahrzeugexport).
<ul style="list-style-type: none"> • Nachholbedarf bei der Motorisierung in Afrika und Osteuropa (Verstärkte Exportnachfrage)

Tabelle 3: Gründe für Veränderungen bei Zusammensetzung und Entsorgungsmengen der Schredderrückstände

Die in Tabelle 3 angeführten Gründe sind nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Konkrete Daten über die zu erwartenden Veränderungen sind nicht verfügbar. Außerdem werden sich neue rechtliche Vorschriften (Siehe Abschnitt 2) auf das Aufkommen von Schredderrückstände auswirken. Folglich ist eine gesicherte Prognose über die zukünftigen Mengen und Zusammensetzung der anfallenden Schredderrückstände nicht möglich.

2. Darstellung der Ziel-Vorgaben

Die aktuellen Ziel-Vorgaben für die Entsorgung von Schredderrückständen ergeben sich aus europäischen Richtlinien und deren Umsetzung in deutsches Recht. Die wichtigsten Vorschriften sind in der Tabelle 4 aufgeführt.

Europa	Deutschland
Abfallrahmenrichtlinie [75/442/EWG]	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW-/AbfG]
Richtlinie über Altfahrzeuge (Altauto-RL) [2000/53/EG]	Altfahrzeugverordnung [AltfahrzeugV]
	Ablagerungsverordnung [AbfAbIV]

Tabelle 4: Wichtige Vorschriften für die Entsorgung der Schredderrückstände

In diesem Zusammenhang kommt zunächst der Abfall-Ablagerungsverordnung AbfAbIV [AbfAbIV] eine besondere Bedeutung zu, denn entsprechend dieser Verordnung müssen ab 2005 bestimmte Zuordnungskriterien bei der Ablagerung von Abfällen eingehalten werden. Die wichtigsten Kriterien bezüglich der Ablagerung der Schredderrückstände enthält Tabelle 5.

Organischer Anteil des Trockenrückstandes der Originalsubstanz für	Deponieklasse I	Deponieklasse II
bestimmt als Glühverlust	≤ 3 Masse-%	≤ 5 Masse-%
bestimmt als TOC	≤ 1 Masse-%	≤ 3 Masse-%

Tabelle 5: Zuordnungskriterien für Deponien nach [AbfAbIV] (Auswahl, nicht für mechanisch-biologisch vorbehandelte Abfälle)

Aufgrund der Eigenschaften der Schredderrückstände und der Anforderungen der AbfAbIV ist eine Ablagerung der Schredderrückstände auf Deponien ab 2005 nicht mehr möglich.

Allerdings ist die Anwendung von einem Entsorgungsweg, der nur die Anforderungen der AbfAbIV erfüllt, nicht Ziel führend. Aufgrund europäischer Vorgaben für Altfahrzeuge [2000/53/EG] werden, neben Änderungen der Zuständigkeiten bei der Altfahrzeugentsorgung, bestimmte Verwertungsquoten gefordert. Diese Anforderungen wurden in Deutschland durch das Altfahrzeug-Gesetz [AltfahrzeugG] und die Altfahrzeugverordnung [AltfahrzeugV] umgesetzt. Die Altfahrzeugverordnung enthält Vorgaben für die Rückgabe, Überlassung und Entsorgung von Altfahrzeugen sowie für technische und organisatorische Anforderungen für die beteiligten Betriebe.

Entsprechend der Entsorgungspflichten, die in § 5 der Altfahrzeugverordnung aufgeführt sind, müssen

1. spätestens ab 1. Januar 2006

Wiederverwendung und Verwertung mindestens 85 Gewichtsprozent,

Wiederverwendung und stoffliche Verwertung mindestens 80 Gewichtsprozent

und

2. spätestens ab 1. Januar 2015

Wiederverwendung und Verwertung mindestens 95 Gewichtsprozent,
Wiederverwendung und stoffliche Verwertung mindestens 85 Gewichtsprozent

erreicht werden. Zusätzlich enthält der Anhang der Altfahrzeugverordnung Anforderungen an die Schredderbetriebe. Entsprechend dieser Vorgaben müssen ab dem 1. Januar 2006 5 Gew.-% einer Verwertung und ab dem 1. Januar 2015 5 Gew.-% einer stofflichen Verwertung und weitere 10 Gew.-% einer Verwertung zugeführt werden.

Die aktuellen Sollvorgaben in der Abfallwirtschaft von Baden-Württemberg beruhen auf dem Umweltplan [Umweltplan], der am 12. Dezember 2000 vom Parlament beschlossen worden ist. Im Umweltplan wird im Rahmen der Trends bei der Abfallwirtschaft davon ausgegangen, dass sich aufgrund der 1998 in Kraft getretenen Altfahrzeugverordnung die Mengenentwicklung bei den Beseitigungsabfällen verändern wird. Diese Verordnung wurde in der Zwischenzeit durch die Altfahrzeugverordnung ersetzt, so dass der Umweltplan die aktuellen, oben im Text beschriebenen Vorgaben nicht erfasst.

Mit der Altfahrzeugverordnung wurde auf Bundesebene eine Vorschrift erlassen, die ein wesentliches Ziel aus dem Umweltplan Baden-Württembergs für die Abfallwirtschaft, der zukünftigen Verringerung der zu beseitigenden Abfallmengen, unterstützt. Die weiteren Ziele des Umweltplans betreffen die Organisation der Abfallentsorgung und die Sicherstellung einer umweltverträglichen und kostengünstigen Restabfallbeseitigung.

Die Einhaltung der neuen Vorschriften für die Entsorgung von Altfahrzeugen wird durch die zuständigen Überwachungsbehörden sichergestellt. Folglich ergibt sich für die Entsorgung der Schredderrückstände auf der Basis des Umweltplans für die Landesregierung zurzeit kein direkter Handlungsbedarf.

3. Beschreibung und Bewertung der Verwertungs- und Beseitigungswege

Aufgrund der geänderten rechtlichen Rahmenbedingungen dürfen Schredderrückstände nicht mehr, wie in der Vergangenheit üblich, auf Deponien abgelagert werden. Es müssen Entsorgungswege und entsprechende technische Verfahren etabliert werden. Insbesondere für die Einhaltung der Auflagen aus der Altfahrzeugverordnung müssen Verfahren gefunden werden, die eine Einhaltung der geforderten Recyclingquoten ermöglichen. Aufgrund der Eigenschaften der Schredderrückstände ist eine direkte stoffliche Verwertung, Erzeugung von Recyclingkunststoffgranulat oder ähnlichen Produkten, nicht möglich.

Für die Entsorgung der Schredderrückstände sind mechanische Aufbereitungsverfahren und thermische Verfahren zu unterscheiden, die zusätzlich kombiniert werden können. Der folgende Text enthält kurze Beschreibungen von Verfahren, die im technischen Maßstab etabliert sind oder deren technische Umsetzung angestrebt wird. Eine umfassende Betrachtung aller Verfahren ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich.

Als ein zukünftiger Entsorgungsweg bietet sich die gemeinsame Verbrennung mit Restmüll in Anfallverbrennungsanlagen (MVA) an. Die Mitverbrennung der Schredderrückstände wird in Deutschland im technischen Maßstab durchgeführt und wurde durch wissenschaftliche Untersuchungen begleitet [Mark]

Von Mitsui Babcock Energy wird mit dem R21 Pyrolyse Prozess ein zweistufiges thermisches Abfallbehandlungsverfahren angeboten, dessen Entwicklung auf dem Schwel-Brenn-Verfahren der Firma Siemens beruht. In einer ersten Stufe werden die Abfälle in einem Pyrolysedrehrohr bei ca. 450 °C pyrolysiert. Als Produkte entstehen eine Pyrolysegas und ein Pyrolyserückstand. Das Pyrolysegas wird direkt der zweiten Stufe, einer Hochtemperaturbrennkammer zugeführt. Aus dem Pyrolyserückstand werden Fe- und NE-Metalle abgetrennt. Der verbleibende Rest wird nach Zerkleinerung in der Hochtemperaturbrennkammer verbrannt. Die entstehenden Rauchgase durchströmen einen Abhitzekessel zur Wärmenutzung und anschließend eine Rauchgasreinigungsanlage.

Über die Mitverbrennung in anderen Industrieanlagen liegen keine Informationen vor. Aufgrund der schwankenden Zusammensetzung und der zu erwartenden Schadstoffgehalte sind Schredderrückstände für die Mitverbrennung in Kraftwerken oder Anlagen zur Zementherstellung weniger geeignet. Eine Ausnahme stellt das Kraftwerk Westfalen in Hamm dar. Hier wurde der Kraftwerkskessel durch ein Pyrolysedrehrohr (ConTherm-Anlage) ergänzt. Diese Anlage wurde für die thermische Behandlung von DSD-Sortierresten, MBA-Leichtfraktionen, Gewerbeabfall und Schredderrückständen ausgelegt. Zurzeit werden entgegen der ursprünglichen Auslegung aus genehmigungstechnischen Gründen keine Schredderrückstände eingesetzt.

Ein weiteres thermisches Behandlungsverfahren stellt die TwinRec-Technologie der japanischen Firma Ebara dar. Dieses Verfahren ist eine Kombination aus einer Wirbelschicht mit einer nachgeschalteten Brennkammer. Die Abfälle werden in der Wirbelschicht vergast und das entstehende Gas in der Brennkammer verbrannt. Die Rauchgasreinigung entspricht im Aufbau der Rauchgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen. In Europa ist eine Anlage in Betrieb, am Standort Amori in Japan werden seit ca. 4 Jahren Schredderrückstände und andere Abfälle mit dieser Technologie thermisch behandelt.

Im Zusammenhang mit der Entsorgung von Schredderrückständen wird auch das Thermoselect-Verfahren genannt. Es existieren in Japan zwei und am Standort Karlsruhe in Baden-Württemberg eine großtechnische Anlage, deren Stilllegung allerdings beschlossen wurde. Das Thermoselect-Verfahren ist eine Kombination aus Vergasung und Verbrennung. Die zugeführten Abfälle werden zunächst über einen Kanal dem Hochtemperaturreaktor zur Vergasung zugeführt. Das entstehende Synthesegas wird nach entsprechender Aufbereitung zur Energieerzeugung verbrannt. Die gemeinsame Behandlung der Schredderleichtfraktion mit Restabfällen konnte in einem Großversuch im November 2002 erfolgreich demonstriert werden.

Die thermische Behandlung von Abfällen im "Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe" (SVZ) ist eine weitere Möglichkeit für die thermische Behandlung von Abfällen. Am Standort stehen zwei Flugstromvergaser und sechs Festbettvergaser im Verbund mit verschiedenen Abfallaufbereitungsanlagen zur Verfügung. Im Vergleich zu anderen Vergasungsverfahren existiert ein entscheidender Unterschied, denn als Endprodukt der Vergasungsprozesse entsteht neben (elektrischer) Energie auch Methanol. Aus diesem Grund ist das SVZ allgemein als Anlage zur stofflichen

Verwertung anerkannt. Für die stoffliche Verwertung der Schredderrückstände liegt entsprechende eine Genehmigung vor. Die wirtschaftliche Situation der Anlage wird als äußerst schwierig eingeschätzt.

Das Reshment-Verfahren wurde u.a. von der Conzepte Technik Umwelt AG (CTU) in Winterthur (Schweiz) als spezielle Lösung für Entsorgungsprobleme in der Schweiz entwickelt. Das Verfahren beruht auf einem zweistufigen Prozess, der aus einer mechanischen Vorbehandlung und einer thermischen Behandlungsstufe besteht. In der mechanischen Vorbehandlung werden die Schredderrückstände zerkleinert und teilweise Metalle abgetrennt. Die zerkleinerten Schredderrückstände werden anschließend gemeinsam mit anderen Abfällen einem Schmelzzyklon zugeführt. Es entsteht eine Kupfer/Eisenlegierung, ein Schmelzgranulat und ein Rauchgas, das in einer Abgasreinigungsanlage von Schadstoffen befreit werden muss.

Im Zusammenhang mit der Entsorgung von Schredderrückständen wird in Deutschland auch das SiCon-Verfahren genannt, an dessen Entwicklung u.a. die Volkswagen AG und die Salzgitter AG beteiligt sind. Dieses patentierte Verfahren stellt eine Kombination von verschiedenen Zerkleinerungs- und Trennverfahren dar. Neben einer Fe-Metallfraktion und einer NE-Metallfraktion entstehen Fraktionen, die als Reduktionsmittel in Hochöfen oder bei der Aufbereitung von Klärschlamm stofflich verwertet werden sollen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegen über die Leistungsfähigkeit des Verfahrens keine belastbaren Daten vor.

Die Tabelle 6 enthält einen zusammenfassenden Verfahrensvergleich, der auch eine Gegenüberstellung zum Verbleib der Schadstoffe enthält. Es ist davon auszugehen, dass im Fall der thermischen Verfahren die organischen Schadstoffe in den unterschiedlichen Prozessen zerstört werden. Die Schwermetalle werden in den Rückstand der thermischen Behandlungsstufe oder den Rauchgasreinigungsrückstand überführt.

Der Verbleib der Schwermetalle und die Gewinnung von möglichen Wertstoffen wird von den ausgewählten thermischen Prozessen, deren Betriebsbedingungen und durch den Aufbau der Rauchgasreinigung beeinflusst. Ein gezielte Ausschleusung von Schwermetallen aus dem Wertstoffkreislauf ist z.B. durch die untertägige Deposition bestimmter Rauchgasreinigungsrückstände möglich.

Zusätzlich ist durch eine ergänzende mechanische Aufbereitung der Schredderrückstände eine verbesserte Wertstoffqualität u.a. bei der Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen erreichbar.

Im Fall einer mechanischen Aufbereitung nach dem SiCon-Verfahren gestatten die vorliegenden Informationen keine gesicherten Aussagen zum Verbleib der Schadstoffe. Es ist davon auszugehen, dass keine Zerstörung der organischen Schadstoffe oder Ausschleusung von Schwermetallen stattfindet. Diese Schadstoffe gelangen in die nachgeschalteten Prozesse, in denen die Produkte aus dem SiCon-Verfahren eingesetzt werden.

4. Empfehlungen

- Für eine zukünftige Überprüfung, ob die erwartete Verringerung der zu beseitigenden Abfallmengen durch die Umsetzung der Altfahrzeugverordnung eingetreten ist, muss eine entsprechende Datenbasis vorliegen. Entsprechende Daten zur Prüfung der Entsorgungswege für Schredderrückstände sollten separat erfasst und ausgewiesen werden. Eine sinnvolle Überprüfung ist aufgrund der vorgegebenen Termine erst nach Abschluss der Abfallbilanz für das Jahr 2006 möglich.
- Über die Anwendung von Verfahren zur Entsorgung der Schredderrückstände wird diskutiert, aber es zeichnet sich zurzeit keine Entscheidung ab. In diesem Zusammenhang kommt auch der Diskussion um zwei Urteile des Europäischen Gerichtshofs eine Bedeutung zu. Neuere Verfahrensvergleiche fehlen, ein Grund ist auch die unterschiedliche technische Reife, so dass eine abschließende Beurteilung nicht möglich ist

Die Mitverbrennung der Schredderrückstände in Abfallverbrennungsanlagen, Stand der Technik und in Baden-Württemberg verfügbar, wird zurzeit nur eingeschränkt als Verwertungsverfahren anerkannt. Aktivitäten zur Anerkennung der Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen sollten eingeleitet werden.

- Problematisch wäre ein Alleingang von Baden-Württemberg, kostenintensive Verfahren mit einer höheren stofflichen Verwertungsquote zu fordern. Einerseits liegt die Altfahrzeugentsorgung in der Hand der Wirtschaftsbeteiligten (Hersteller, Importeure Entsorgungswirtschaft), andererseits dürfen demontierte Restkarossen frei gehandelt werden. Die Altfahrzeugentsorgung muss europäisch gesehen werden.

		Mitverbrennung MVA	ConTherm Anlage	Mitsui R21	EBARA Twinrec	Thermoselect
		thermisch Verbrennung	thermisch Pyrolyse / Verbrennung	thermisch Pyrolyse / Verbrennung	thermisch Pyrolyse / Verbrennung	thermisch Vergasung / Verbrennung
Schadstoffe Probleme		Schwermetallbelastung, organische Schadstoffe inhomogenes Material, variierende Zusammensetzungen				
Verbleib der Schadstoffe		Rostasche, Rückstand Rauchgasreinigung, Luft	Rückstand Rauchgasreinigung, Luft	Granulat, Rückstand Rauchgasreinigung, Luft	Bettasche, Rückstand Rauchgasreinigung, Luft	Granulat, Rückstand Rauchgasreinigung, Luft
Wertstoffe Nutzen Produkt		Dampf / Strom Fe- und NE-Metalle Baustoff Straßenbau	Dampf / Strom Fe- und NE-Metalle Baustoff Straßenbau	Dampf / Strom Fe- und NE-Metalle Baustoff Straßenbau	Dampf / Strom Fe- und NE-Metalle Baustoff Straßenbau	Dampf / Strom Metallmischfraktion Baustoff Straßenbau
Rechtliche Rahmen-Bedingungen	Abfall	AltfahrzeugV	AltfahrzeugV	AltfahrzeugV	AltfahrzeugV	AltfahrzeugV
	Verfahren	17. BImSchV	17. BImSchV	17. BImSchV	17. BImSchV	17. BImSchV
Technische Bewertung		im technischen Maßstab erprobte Technologie	im technischen Maßstab erprobte Technologie	im Ausland großtechnisch im Einsatz	im Ausland großtechnisch im Einsatz	im technischen Maßstab erprobte Technologie
Ökologische / Ökonomische Bewertung		gute Wertstoffgewinnung (Schlackeanhaftung an Metallen) relativ geringe Preise	sehr gute Wertstoffgewinnung, Behandlungspreise unbekannt	sehr gute Wertstoffgewinnung hohe Preise	sehr gute Wertstoffgewinnung hohe Preise	im Vergleich schlechtere Wertstoffgewinnung wirtschaftliche Probleme

		SVZ	Reshment	SiCon	Deponie
		thermisch Vergasung	mech. / thermisch Verbrennung	mech.	
Schadstoffe Probleme		Schwermetallbelastung, organische Schadstoffe inhomogenes Material, variierende Zusammensetzungen			
Verbleib der Schadstoffe		Schlacke, Luft Rückstand Gasreini- gung	Filterstaub, Luft Cu/Fe-Granulat Rück- stand Rauchgasreini- gung	unbekannt	Grundwasser, Boden Luft
Wertstoffe Nutzen Produkt		Dampf / Strom, vermutlich Fe- und NE-Metalle, Baustoff Straßenbau	Dampf / Strom, Fe- und NE-Metalle, Baustoff Straßenbau, eventuell weitere Fraktionen	keine Informationen stoffliche Verwertung angestrebt	
Rechtliche Rahmen- Bedingungen	Abfall	AltfahrzeugV	AltfahrzeugV	AltfahrzeugV	nicht zulässig
	Verfahren	17. BImSchV	17. BImSchV		durch AbfAbIV bzw. TA Si untersagt
Technische Bewertung		im technischen Maßstab erprobte Technologie	großtechnischer Ein- satz vorgesehen spezielle für die Schweiz entwickelt	Versuchsanlage im Bau	
Ökologische / Ökonomische Bewertung		stoffliche Verwer- tung relativ geringe Prei- se, aber wirtschaftliche Situa- tion unbekannt	sehr gute Wertstoff- gewinnung Behandlungskosten unbekannt	keine Aussage mög- lich	nicht relevant TASi

Literatur:

- [2000/53/EG] Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge. ABl. Nr. L 269. 21.10.2000 S. 34.
- [75/442/EWG] Richtlinie des Rates 75/442/EWG vom 15. Juli 1975 über Abfälle . ABl. Nr. L 194 vom 25.07. 1975 S. 39.
- [AltfahrzeugG] Gesetz über die Entsorgung von Altfahrzeugen - Altfahrzeug-Gesetz (AltfahrzeugG). 21. Juni 2002.
- [AltfahrzeugV] Verordnung über die Überlassung und umweltgerechte Entsorgung von Altfahrzeugen - Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV). 21. Juni .2002
- [AbfAbIV] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen - Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV). 20. Februar 2001.
- [AbfallbilanzBW] Ministerium für Umwelt und Verkehr (Hrsg.): "Abfallbilanz 2002". Stand: Juli 2003.
- [Clüsserath] Clüsserath, C; et al.: "Konzepte zur Reduzierung und Verwertung". Recycling –Magazin 56 (2001) Ausgabe 19, S. 8 – 11.
- [Destatis] Statistisches Bundesamt: "Fläche und Bevölkerung." <http://www.destatis.de/jahrbuch/jahrtab1.htm>
- [Goldmann] Goldmann, D.: "Mechanische Trennung der Shredder-Leichtmüllfraktion als Vorstufe zur thermischen Verwertung". In: Schmidt, J.; Leithner, R. (Hrsg.): "Automobilrecycling". Springer-Verlag. Berlin 1995. S. 165 – 174.
- [KrW-/AbfG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. KrW-/AbfG - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. 27. September 1994.
- [Kuchta] Kuchta, K.: "Energetische und stoffliche Verwertung von Schredderrückständen". VDI Wissensforum. "Stoffliche und energetische Verwertung von Shredderrückständen". Dortmund, 20.-21. Nov. 2003.
- [Orth] Orth, P.: "Lösungsansätze für die Verwertung der Shredderleichtfraktion". VKE, Mainz, 05. September 2002.
- [Mark] Mark, F. E.; Fisher, M.M.; Smith, K.A.: "Energy recovery from automotive shredder residue through co-combustion with municipal solid waste". Association of plastics manufacturers in Europe (APME). September 1998.
- [Prognos-SA] PrognosAG: "Der Markt für Entsorgungsdienstleistungen bis zum Jahr 2010. Teilreport B: Sonderabfälle". Bern Berlin Köln. Juli 2000.
- [Reinhardt] Reinhardt, T.; Richers, U.: "Entsorgung von Schredderrückständen - ein aktueller Überblick". Forschungszentrum Karlsruhe. Wissenschaftliche Berichte. FZKA 6940. Januar 2004.
- [Schenk] Schenk, M.: "Shredderleichtfraktion – Aufkommen und Entsorgung". 3. Euroforum-Fachtagung. Die Zukunft von Waste-to-Energy. Köln, 09.-10. November 1999.

- [Selinger] Selinger, A.; Steiner, C.; Shin, K.: "TwinRec - Bridging the Gap of Car Recycling in Europe". International Automobile Recycling Congress. 12.-14. März 2003. Genf, Schweiz.
- [Spanke] Spanke, V.: "Aufbereitung der Shredderleichtfraktion aus der Altautoverwertung". EntsorgungsPraxis 16 (1998) Heft 5. S. 26 - 34
- [Thomé-K.] Thomé-Kozmiensky, K.-J.: "Kreislaufwirtschaft". EF-Verlag Berlin, 1994.
- [Umweltplan] Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Hrsg.): "Umweltplan Baden-Württemberg". Dezember 2000.

TEIL E: MECHANISCH-BIOLOGISCHE ABFALLBEHANDLUNG MBA

1. Mengen und Kapazitäten

Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle werden in der BRD heute überwiegend deponiert oder in Müllverbrennungsanlagen (MVA) thermisch behandelt bzw. energetisch verwertet. Die Deponierung unbehandelter Abfälle ist gemäß TAsi [TAS] nach dem 01.06.2005 nicht mehr zulässig. Verfahren zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) werden als zusätzliche Option für die Entsorgung / Verwertung dieser Abfallströme diskutiert und z. T. bereits eingesetzt.

Bei der Betrachtung von Abfallmengen und Entsorgungs-/Verwertungs-Kapazitäten müssen daher die beiden Systeme MVA und MBA berücksichtigt werden.

Es liegen verschiedene aktuelle und umfassende Studien [LAGA] [PROG] [DPU] vor, in denen bundesweite Abfallmengen und Anlagenkapazitäten vor dem Hintergrund der Entsorgungssicherheit nach dem 01.06.2005 bewertet werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse der LAGA- und der prognos-Studie dargestellt.

1.1 Daten für BRD

Die Daten des LAGA-Berichts basieren auf einer Abfrage der Bundesländer. Für 2005 wird bundesweit mit folgenden **Abfallmengen** gerechnet:

graue Tonne mit Sperrmüll	16,2 Mio t
Gewerbeabfall zur Beseitigung	4,2 Mio t
Gesamt	20,4 Mio t
Restabfall aus Behandlungsanlagen	4,1 Mio t
Gesamt-Menge BRD, LAGA	24,5 Mio t

Die Daten im prognos-Bericht basieren auf einer **Abfallmengenprognose** für alle Kreise und kreisfreien Städte in Deutschland:

überlassungspflichtige Abfälle zur Beseitigung	20,5 Mio t
thermisch zu behandelnde Gewerbe- und Sekundärabfälle sowie Sortierreste	6,1 Mio t
Ersatzbrennstoffe für die energetische Verwertung	2,9 Mio t
Gesamt-Menge BRD, prognos	29,5 Mio t

Die bundesweit in 2005 als verfügbar angenommenen **Kapazitäten** von Abfallbehandlungsanlagen sind in beiden Studien praktisch identisch. Nachfolgend sind die LAGA-Daten genannt:

Müllverbrennungsanlagen MVA	16,3 Mio t/a
Mechanisch-biologische Abfallbeh. MBA	6,2 Mio t/a
Gesamt	22,5 Mio t/a
Mitverbrennung in Kraftwerken und Industrie	3,5 Mio t/a
Gesamt-Kapazität BRD, LAGA	26,0 Mio t/a

Die LAGA-Studie berücksichtigt neben den oben genannten **Kapazitäten** weitere geplante und im Bau befindliche Kapazitäten, so dass dadurch die nach 2005 verfügbaren Kapazitäten wie folgt angenommen werden:

Müllverbrennungsanlagen MVA	17,9 Mio t/a
Mechanisch-biologische Abfallbeh. MBA	7,1 Mio t/a
Gesamt	25,0 Mio t/a
Mitverbrennung in Kraftwerken und Industrie	3,5 Mio t/a
Gesamt-Kapazität BRD, LAGA	28,5 Mio t/a

Die bundesweit verfügbaren Kapazitäten in Anlagen außerhalb der BRD sind nach prognos mit 0,1 Mio t/a vernachlässigbar.

Zu den genannten Kapazitäten der MBA ist anzumerken, dass laut [LAGA] mit Stand 08/2004 von den insgesamt genannten 66 Standorten noch 42 Standorte im Status „geplant“, „in Genehmigung“ oder „im Bau“ sind, so dass die für 2005 angenommenen MBA-Kapazitäten als sehr optimistisch angesehen werden.

Auf Basis der oben genannten Daten kommen die beiden Studien zu unterschiedlichen Einschätzungen der Entsorgungssicherheit nach dem 01.06.2005.

Die prognos-Studie sieht ausgehend von 20,5 Mio. t/a überlassungspflichtiger Abfälle und einer Behandlungskapazität (MBA und MVA) von rund 22,3 Mio. t/a ausreichende Kapazitäten. Da aber nach Abschätzung von prognos weitere 6,1 Mio. t/a an frei handelbaren Sekundärabfällen thermisch in MVA zu behandeln sind, fehlen für das Jahr 2006 zusätzliche Behandlungskapazitäten von rund 4,3 Mio. t. Berücksichtigt man hierbei noch die zum Teil deutlich höheren Heizwerte der Sekundärabfälle (Faktor 1,5 – 2), so fehlen ca. 6,8 Mio. t Behandlungskapazität in 2006.

In der LAGA-Studie stehen dem Gesamtaufkommen an Abfällen aus Haushalten von 16,2 Mio. t in 2005 rechnerisch ausreichende Behandlungskapazitäten in MVA und MBA gegenüber (22,5 Mio. t). Auch unter Einbeziehung von hausmüllartigen Gewer-

beabfällen zur Beseitigung ergibt sich noch ein Kapazitätsüberschuss. Werden zusätzlich Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen (MBA) berücksichtigt, so kann der Bedarf an thermischer Behandlungskapazität nicht gedeckt werden. Auch die thermische Verwertung von Gewerbeabfällen zur Verwertung, die in der LAGA-Studie wegen großer Unsicherheiten nicht quantifiziert wird, kann nach Einschätzung der LAGA nur teilweise durch die verfügbaren Mitverbrennungskapazitäten gedeckt werden. Somit kommt die LAGA-Studie zu dem Ergebnis, dass ein Bedarf an zusätzlicher thermischer Behandlungskapazität nach 2005 besteht und dass zusätzlich weitere Mitverbrennungskapazitäten zu erschließen sind.

In beiden Studien wird darauf hingewiesen, dass die Gegenüberstellung der bundesweiten Abfallmengen und Kapazitäten und damit die Bewertung der Entsorgungssicherheit stark von einer lokalen Betrachtung (z. B. Bundesland oder Kreis) abweichen kann, deshalb werden im Folgenden die Abfallmengen und Behandlungskapazitäten in Baden-Württemberg gegenübergestellt.

1.2 Daten für Baden Württemberg

Für Baden-Württemberg ergeben sich nach LAGA folgende Abfallmengen für 2005:

graue Tonne mit Sperrmüll	1 500 000 t
Gewerbeabfall zur Beseitigung	400 000 t
Gesamt	1 900 000 t
Restabfall aus Behandlungsanlagen ¹	275 840 t
Gesamt-Menge BW, LAGA	2 175 840 t

Nach LAGA sind für Baden-Württemberg folgende Kapazitäten nach 2005 verfügbar:

Müllverbrennungsanlagen MVA in BW	1 346 000 t/a
MVA außerhalb BW	229 500 t/a
Mechanisch- biologische Abfallbeh. MBA in BW	339 600 t/a
Gesamt-Kapazität BW, LAGA	1 915 100 t/a

Kapazitäten zur Mitverbrennung in Industrieanlagen werden von BW nach 2005 nicht angegeben.

Tabelle 1 zeigt die in Baden-Württemberg zum Stichtag 01.06.2005 und gemäß derzeitigem Wissensstand zu einem späteren Zeitpunkt verfügbaren Behandlungskapazitäten nach Anlagenstandort. Die beiden ersten Spalten enthalten die Angaben gemäß Bericht der LAGA zur 63. Umweltministerkonferenz (Stand 31.08.2004) [LAGA], in der dritten Spalte sind aktualisierte Daten (Auskunft UVM, Stand 02/2005) aufgeführt.

¹ enthält auch heizwertreiche Restfraktion

Im Vergleich zu den LAGA-Daten wurden bei der Aktualisierung die Kapazitäten, der MBA Kahlenberg (verspäteter Baubeginn) korrigiert. Weiterhin ist zu beachten, dass die genannten Kapazitäten aller MBA (339 000 t/a) z. Zt. noch im Bau sind, so dass bei diesen Anlagen nicht sichergestellt ist, dass die geplante Entsorgungskapazität zum Stichtag erbracht werden kann [MUV].

Auf Basis der aktualisierten Daten ist ein Kapazitätsdefizit zum Stichtag 01.06.2005 von mindestens 510 000 t/a für die Entsorgung der in BW anfallenden Abfälle zur Behandlung in MVA und MBA zu erwarten. Nach Realisierung aller geplanten Kapazitäten und unter der Voraussetzung, dass alle Anlagen ihre Nennkapazitäten im technischen Betrieb erreichen, wird zu einem späteren Zeitpunkt immer noch ein Kapazitätsdefizit von ca. 200 000 t/a bestehen.

Dies bedeutet, dass sowohl kurz- als auch mittelfristig zusätzliche Kapazitäten für Abfälle aus Baden-Württemberg verfügbar gemacht werden müssen.

Anlagen	LAGA-Bericht v. 31.08.04		aktualisierte Daten	
	Kapazitäten zum 01.06.05	Kapazitäten nach 01.06.05	Kapazitäten zum 01.06.05	Kapazitäten nach 01.06.05
HMV Stuttgart	250.000	420.000	250.000	420.000
HMV Mannheim	380.000	380.000	380.000	450.000
HMV Göppingen	140.000	140.000	140.000	140.000
HMV Ulm	116.000	116.000	116.000	116.000
HMV Böblingen	140.000	140.000	140.000	140.000
HMV Eschbach	150.000	150.000	150.000	150.000
Zwischensumme MVA	1.176.000	1.346.000	1.176.000	1.416.000
HMV Kempten Bayern	33.000	33.000	33.000	33.000
HMV Schweinfurt Bayern	25.000	25.000	25.000	25.000
HMV Würzburg Bayern	28.000	28.000	28.000	28.000
KVA Turgi, Buchs, Oftringen, Zürich	55.000	55.000	55.000	55.000
KVA Basel	49.500	49.500	49.500	49.500
KVA Weinfelden	70.000	39.000	70.000	39.000
Zwischensumme Export	260.500	229.500	260.500	229.500
MBA Buchen	151.000	151.000	151.000	151.000
MBA Kahlenberg	100.000	100.000	0 ¹⁾	100.000
MBA Heilbronn	88.600	88.600	88.600	88.600
Zwischensumme MBA	339.600	339.600	239.600	339.600
Summe gesamt	1.776.100	1.915.100	1.676.100	1.985.100

¹⁾Verspäteter Baubeginn (MUV)

Tabelle 1: Behandlungskapazitäten Baden-Württemberg zum Stichtag 01.06.2005 und nach Stichtag, Daten nach [LAGA] Stand 08.2004 und aktualisiert

2. Rechtliche Vorgaben

Die Errichtung, die Beschaffenheit und der Betrieb von mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen MBA sind in der **Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen (30. BImSchV)** geregelt.

Zusätzlich sind bei Errichtung und Betrieb einer MBA folgende Regelwerke zu beachten:

Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) mit
Grenzwerten für organischen Anteil des Trockenrückstandes
Eluatkriterien

Anhang 23 der Abwasserverordnung (AwV) mit
Grenzwerten für Abwasserqualität

Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft) mit
Baulichen Anforderungen
Grenzwerten

3. Verfahren zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung

3.1 Verfahrensprinzip

In Abb. 1 ist das Verfahrensprinzip der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung MBA schematisch dargestellt. Durch den gezielten Einsatz von mechanischen und biologischen Behandlungsstufen wird der Abfall so konditioniert, dass er entweder zur Ablagerung auf der Deponie oder als Ersatzbrennstoff zur energetischen bzw. stofflichen Verwertung geeignet ist.

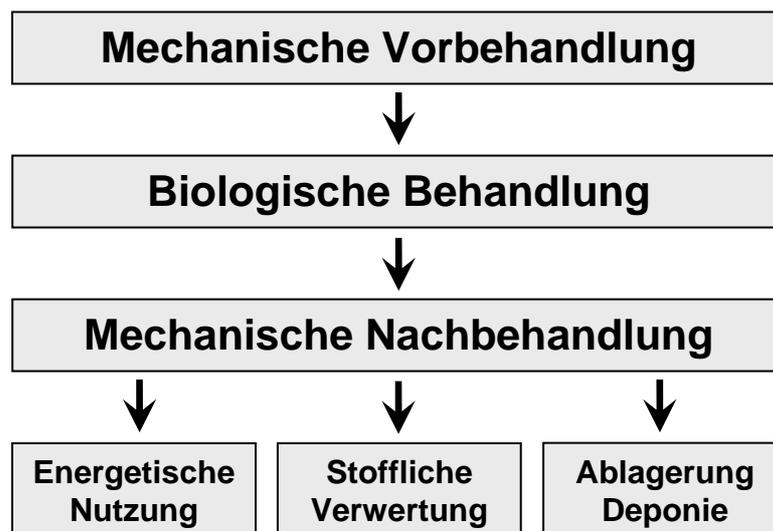


Abb. 1 Verfahrensprinzip der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung

Bei der Entwicklung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung haben sich 2 Verfahrensvarianten herauskristallisiert, die sich im Verfahrensablauf und bzgl. der erzeugten Stoffströme unterscheiden. Die Bezeichnung der Verfahrensprinzipien ist in der Literatur nicht eindeutig, im Folgenden wurden die Bezeichnungen nach UBA verwendet.

Hauptziel der **Stoffstromtrenn-Verfahren** ist die Vorbehandlung der Abfälle für eine umweltverträgliche Ablagerung auf der Deponie. Um biologische Abbauprozesse und die damit verbundenen Emissionen im Deponiekörper zu begrenzen, wird bei der Vorbehandlung ein weitgehender biologischer Abbau der organischen Abfallbestandteile angestrebt. In einer mechanischen Behandlungsstufe werden heizwertreiche Fraktionen für eine energetische Nutzung und Metalle für die stoffliche Verwertung abgetrennt. Die biologische Behandlung erfolgt mittels aerober Rotte, anaerober Vergärung oder kombinierter Verfahren. Beim Einsatz anaerober Verfahren wird Biogas erzeugt, das einer energetischen Nutzung zugeführt werden kann.

Behandlungsziel der **Stabilatanlagen** ist ein weitgehender Erhalt der biogenen Bestandteile im heizwertreichen Stabilat und die Gewinnung weiterer verwertbarer Fraktionen. Zur Verbesserung der Aufbereitungseigenschaften werden die Abfälle biologisch getrocknet. In der vorgeschalteten Aufbereitungsstufe erfolgt meist nur eine Konditionierung (Zerkleinerung) für die nachfolgende Trocknung. Der biologischen Trocknung wird in der Regel der gesamte Abfallstrom zugeführt, um bei möglichst geringem Abbau der Organik vorrangig die Feuchte in den Abfällen zu reduzieren. Dabei wird die bei der Selbsterhitzung der organischen Abfallbestandteile freiwerdende Wärme zur Verdampfung der Abfallfeuchte genutzt. In der abschließenden trocken-mechanischen Aufbereitung werden die getrockneten Abfällen nach Abtrennung von Metall, Inert- und Störstoffen in eine oder mehrere heizwertreiche Abfallfraktionen unterschiedlicher Qualität aufgeteilt. Es verbleibt in der Regel eine niederkalorische Abfallfraktion, die einer thermischen Nachbehandlung z.B. in einer Müllverbrennungsanlage MVA unterzogen werden muss.

Alle Anlagen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung müssen gemäß gesetzlicher Vorgaben eingehaust betrieben werden. Zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach 30. BImSchV wird die gesamte Abluft erfasst und einer Abluftreinigung zugeführt. Diese besteht bei neuen Anlagen überwiegend aus den Verfahrensschritten saure Wäsche und regenerative thermische Oxidation RTO. Für schwach belastete Abgasströme werden teilweise Biofilter eingesetzt [Doed].

3.2 Verfahrensbeispiele

Aus der Vielzahl der auf dem Markt angebotenen Verfahren sollen beispielhaft 2 in der Literatur ausführlich beschriebene Verfahren vorgestellt werden, die im Praxis-einsatz bzw. in der Erprobung sind. Die im jeweiligen Verfahrensschema angegebenen Massenanteile der einzelnen Stoffströme sind als Auslegungswerte anzusehen. Das Erreichen dieser Werte im Praxisbetrieb ist in der Literatur bisher nicht berichtet. Insbesondere bei den Stabilat-Verfahren, die auf eine maximale energetische oder stoffliche Verwertung des Abfalls ausgerichtet sind, fallen Reststoffströme an, die nicht mit vertretbarem Aufwand so aufzubereiten sind, dass sie einer Verwertung zugeführt werden können und daher in der Regel thermisch nachbehandelt werden müssen (MVA).

Herhof-Trockenstabilat-Verfahren

Beim Herhof-Trockenstabilat-Verfahren (siehe Abb. 2) wird der Restmüll nach Zerkleinerung und Eisenmetallabscheidung einer ca. 6 Tage dauernden biologischen Trocknung in einer Rottebox unterzogen. Die Trocknung dient der besseren Trennfähigkeit und der Anhebung des Heizwertes der Abfälle. Laut Betreiber sollen Restwassergehalte von 15% erreicht werden.

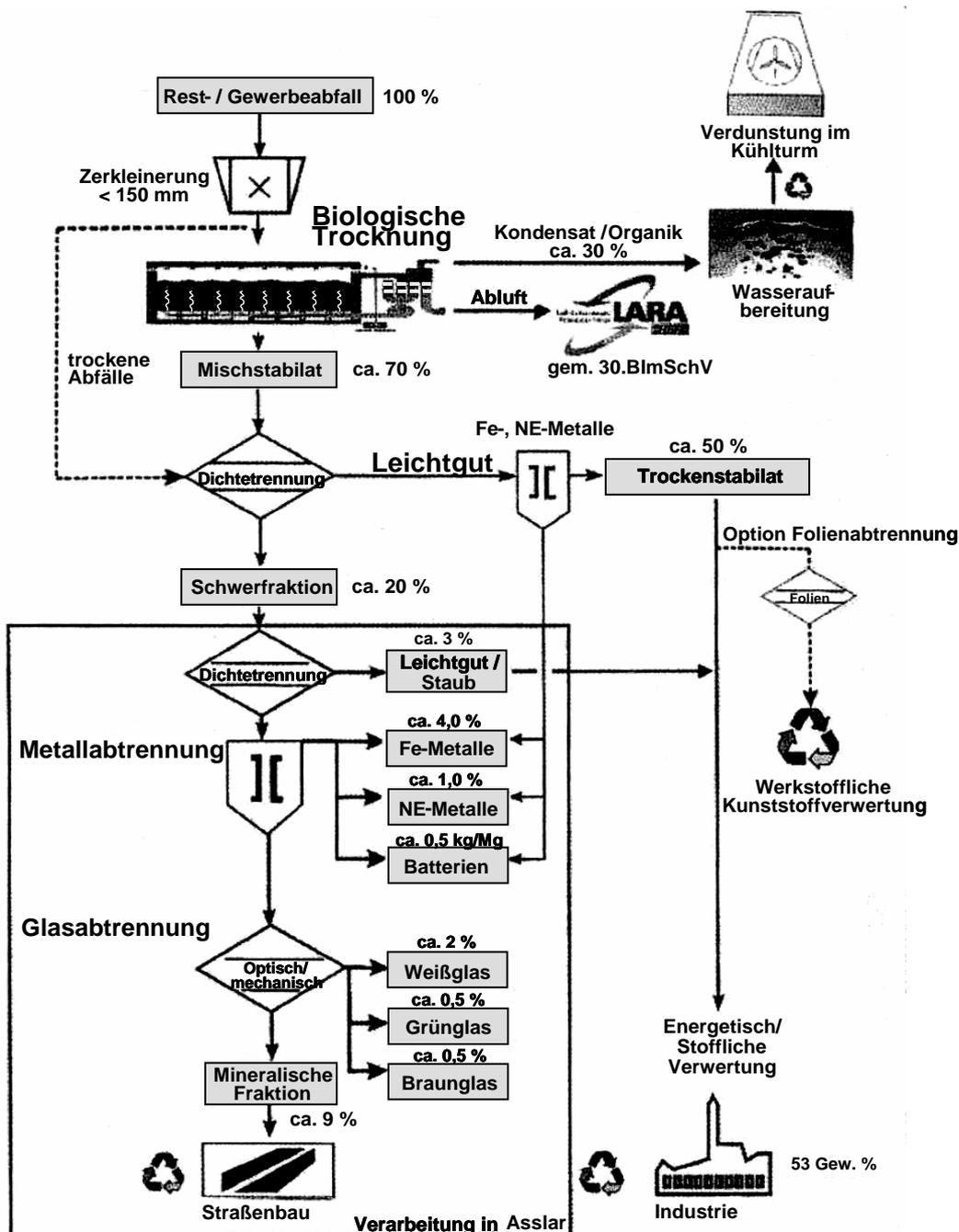


Abb. 2 Schema des Herhof-Trockenstabilat-Verfahrens

Im Anschluss an die Trocknung erfolgt eine Sortierung, welche sich an der Gewinnung energetisch oder stofflich verwertbarer Einzelfractionen orientiert. Folgende Einzelfractionen werden getrennt:

- Brennstoff Trockenstabilat®
- Mischkunststoff-Fraktion (optional)
- Wertstoff (Fe- und NE-Metalle, Glas, Mineralfraktion)

Die Trockenstabilisierung und Abtrennung der unbrennbaren Heizwertfraktion führt nach Aussagen der Betreiber zu einer Heizwertsteigerung auf 15-18 MJ/kg, was etwa dem Heizwert von Braunkohle entspricht. Die Qualität des Trockenstabilats® erfüllt laut [Nel] die Anforderungen der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe. Nach [Her] sind in Deutschland derzeit 3 Anlagen nach dem Herhof-Verfahren in Betrieb und 5 weitere im Bau oder in der Genehmigung.

ISKA®-Verfahren

Beim ISKA-Verfahren [Iska][Seif] erfolgt nach der Abfallannahme die mechanische Aufbereitung, welche aus einer Absiebung des hochkalorischen Überkorns und einer Magnetabscheidung der eisenhaltigen Metalle besteht. Das Überkorn geht entweder direkt in die energetische Verwertung / thermische Behandlung (MVA) oder nach einer mechanischen Nachbehandlung (Trennung, Pelletierung) als Ersatzbrennstoff ins Kraftwerk/Zementwerk.

Das Unterkorn wird in der Perkolation weiter bearbeitet. Der Perkulator ist ein liegender zylindrischer Behälter mit einem horizontal angeordneten Rührwerk zur Durchmischung und damit zum Aufschließen des Abfalls. Über Düsen an der Behälterdecke wird der Abfall mit dem im Kreislauf geführten Perkulationswasser diskontinuierlich beaufschlagt. Das Perkulationswasser durchdringt den Abfall und trägt über den Siebboden des Behälters die löslichen organischen Bestandteile sowie feinkörnige Mineralien aus. Durch Druckluftstöße wird sichergestellt, dass der Abfall im Perkulator ausreichend durchlüftet wird.

In einem zweiten Schritt wird unter Luftabschluss das organisch belastete Perkulationswasser in einem Fermenter zu Biogas vergoren und darüber hinaus ein großer Anteil an mineralischen Bestandteilen ausgesiebt und als Baustoff wieder verwertet. Das Biogas wird in einem Blockheizkraftwerk BHKW in Strom und nutzbare Wärme umgewandelt.

Der perkolierte Feststoff wird in der Nachbehandlung je nach Verwendungszweck nochmals mechanisch getrennt und im Falle einer Deponierung, zum Erreichen der Kriterien der Abfallablagereverordnung AbfAbIV, einer Nachrotte zugeführt.

Für diese als Typ 1 bezeichnete Verfahrensvariante ist in Abb. 3 ein Stoffstromdiagramm dargestellt. Die beiden zusätzlich angebotenen Verfahrensvarianten sollen eine optimale Nutzung von MVA-Kapazitäten (Typ 2) oder eine maximale Verwertung in industriellen Verfahren der Grundstoffindustrie oder Stromerzeugung (Typ 3) ermöglichen.

Stabilisierung des Abfalls zur umweltverträglichen Ablagerung auf Deponie.

→ Nachrotte erforderlich

Ziel:

- Nutzung vorhandener Deponiekapazitäten
- Müllreduktion

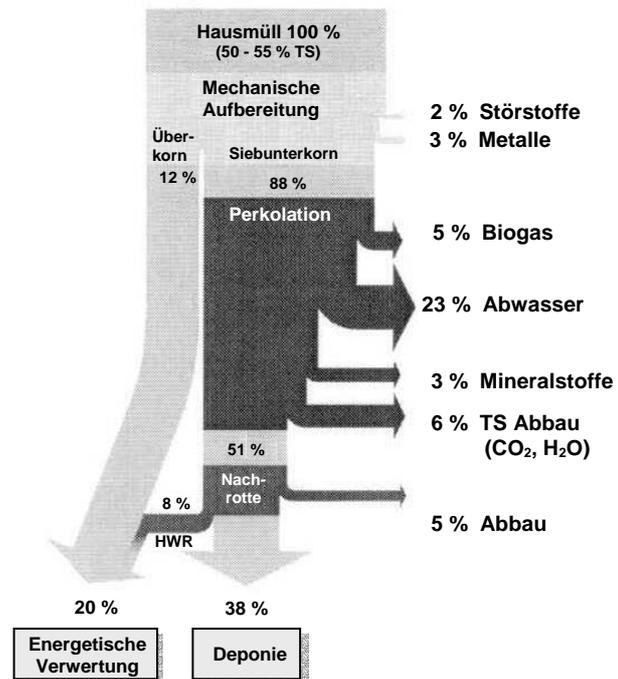


Abb. 3 ISKA-Verfahren Typ 1 zur Nutzung von Deponiekapazitäten

3.3 Verfahren in Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg gibt es 3 Standorte mit mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen. Sie befinden sich z. Zt. in der Versuchs- oder Erweiterungsphase.

Die Anlagen in Buchen, Heilbronn und Kahlenberg arbeiten alle nach dem Perkolations-Verfahren. Buchen und Heilbronn werden nach dem ISKA®-Verfahren der Firma U-Plus gebaut, mit der Zielsetzungen Deponiematerial herzustellen (Typ 1). Das BIOPERCOLAT®-Verfahren [Weh] [Schal] der Firma Wehrle-Werk AG wird in Kahlenberg umgesetzt.

4. Bewertung

Ein Vergleich der Verfahren zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung MBA mit dem Rostofenverfahren der Müllverbrennungsanlagen MVA ist wegen des stark unterschiedlichen Entwicklungsstandes der beiden Verfahren nicht Ziel führend [Tho2]. Es wird deshalb im Folgenden nur der Versuch unternommen, die in Bezug auf Entsorgungssicherheit und Entsorgungskosten wesentlichen Fragen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung zu diskutieren.

Anlagentechnik:

Nach LAGA sind 6,2 Mio. t/a MBA-Kapazitäten in der BRD im Jahr 2005 verfügbar. Von den insgesamt genannten 66 Standorten sind mit Stand 08/2005 noch 42 Standorte im Status „geplant“, „in Genehmigung“ oder „im Bau“, d.h. es werden z. Zt. sehr große MBA-Kapazitäten realisiert oder nachgerüstet, ohne dass ausreichende Erfahrungen mit Anlagen vorliegen, die nach 30. BImSchV betrieben werden und die ablagerungsfähige Stoffströme gemäß AbfAbIV oder marktfähige Ersatzbrennstoffe

erzeugen. In [Doed] wird diese Einschätzung bestätigt und ergänzt durch die Aussage, dass dieser Umstand zu einer für Betreiber, Planer und Ausrüster teuren Wiederholung von Fehlern führen kann.

Offene Punkte in Bezug auf die Anlagentechnik sind z. B.:

- die erforderlichen Rottezeiten zur Erreichung der nach AbfAbIV geforderten Parameter in Abhängigkeit von Abfallspezifikation und eingesetztem Rotteverfahren.

Anmerkung: Die Rottezeiten sind direkt proportional zum Durchsatz der MBA, so dass die 2005 tatsächlich verfügbaren MBA-Kapazitäten unsicher sind.

- das Abgasmanagement für die sehr großen Umluftströme, die bei aeroben Prozessen verfahrensbedingt auftreten und die gemäß 30. BImSchV unter Vermeidung von diffusen Emissionen in einer eingehausten Anlage zu führen sind.

Stoffströme:

Die mit MBA-Verfahren aus Abfall erzeugten Stoffströme sollen entweder direkt deponiert werden oder als Ersatzbrennstoff in energieintensiven Prozessen der Energie- und Grundstoffindustrie eingesetzt werden. In beiden Fällen müssen diese Stoffströme vorgegebene Qualitätskriterien erfüllen.

Die Kriterien der Deponierung sind in der AbfAbIV festgeschrieben, die Ersatzbrennstoff-Spezifikation wird mit dem Verwerter gemäß der technischen und rechtlichen Randbedingungen der Verwertungsanlage vertraglich festgelegt.

Können die geforderten Kriterien nicht sicher eingehalten werden, bleibt für den MBA-Betreiber in der Regel nur die nachträgliche thermische Behandlung in einer Müllverbrennungsanlage MVA.

Insbesondere bei den Stabilat-Verfahren, die auf eine maximale energetische oder stoffliche Verwertung des Abfalls ausgerichtet sind, fallen Reststoffströme an, die nicht mit vertretbarem Aufwand so aufzubereiten sind, dass sie einer Verwertung zugeführt werden können und daher in der Regel thermisch nachbehandelt werden müssen (MVA).

Die Sinnhaftigkeit der Auslegung einer MBA als Vorstufe zur MVA muss im Einzelfall geprüft werden, da durch die MBA zwar die Abfallmenge reduziert wird, die Spezifikation der Abfälle aus der MBA jedoch in der Regel außerhalb der Auslegungsspezifikation der MVA liegt, so dass die Verbrennungskapazität der MVA durch den Einsatz des MBA-Materials reduziert wird.

Die nach 06/2005 erforderlichen zusätzlichen MVA-Kapazitäten für nicht verwertbare oder nicht ablagerungsfähige MBA-Stoffströme und damit die Preise für die thermische Nachbehandlung dieser Stoffströme sind heute nicht belastbar abzuschätzen. Ebenso sind Aussagen über 2005 verfügbare Verwertungskapazitäten für Ersatzbrennstoffe aus der MBA unsicher, da die Qualität der Ersatzbrennstoffe nicht bewertet werden kann.

Emissionen, Schadstoffe:

Belastbare Untersuchungen zum Verbleib organischer und anorganischer Schadstoffe bei mechanisch-biologischen Verfahren sind nicht publiziert. Über die Aufteilung der verschiedenen Schadstoff-Gruppen auf die Prozessströme Abgas, Abwasser und Feststoffe zur Verwertung bzw. Ablagerung fehlen Untersuchungen, wie sie für Müllverbrennungsanlagen sehr detailliert vorliegen [Bru] [Cha]. Diese Untersuchungen zeigen, dass die MVA eine Senke sowohl für organische als auch für anorganische

Schadstoffe ist. Während die organischen Schadstoffe praktisch vollständig bei den hohen Prozesstemperaturen zerstört werden, werden die leichtflüchtigen und partikelgebundenen anorganischen Schadstoffe in der Rauchgasreinigung abgeschieden und die Komponenten mit hohem Dampfdruck in der Rostasche eingebunden. Dieses für die Bewertung eines Verfahrens unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit wesentliche Kriterium der Schadstoffsenke kann für die mechanisch-biologischen Verfahren wegen fehlender Daten nicht beurteilt werden.

Die MBA-Anlagen müssen gemäß 30. BImSchV eingehaust werden, um diffuse Emissionen zu vermeiden. Die Abgase werden in der Regel über eine saure Wäsche und eine thermische Stufe nachbehandelt, so dass organische Schadstoffe zerstört und flüchtige Schwermetalle überwiegend abgeschieden werden.

Das Abwasser muss Einleitbedingungen nach Anhang 23 der Abwasserverordnung AwV einhalten. Die Schadstoffe werden in der nachgeschalteten Kläranlage im Klärschlamm eingebunden (siehe Kap. 1 der Studie, Klärschlamm).

Schadstoffe, die in der Fraktion der Ersatzbrennstoffe enthalten sind, werden industriellen Hochtemperaturprozessen zugeführt. Die Qualitätskriterien der Anlagenbetreiber legen Grenzwerte für Schadstoffgehalte fest. Bei den hohen Prozesstemperaturen werden die organischen Schadstoffe abgebaut, der Verbleib der Schwermetalle ist in der Diskussion (z.B. Zementproduktion).

Die zu deponierende Fraktion muss Kriterien zur biologischen Abbaubarkeit, zum Elutionsverhalten und zum organischen Anteil des Trockenrückstandes einhalten. Dieser als TOC zu bestimmende Wert ist mit 18 Gew. % wesentlich höher als der Wert nach TASI mit 1 bzw. 3 Gew. % je nach Deponieklasse. Eine schlüssige Begründung für diesen erhöhten Grenzwert findet sich in der Literatur nicht. Die Konsequenzen aus den hohen TOC-Werten z. B. bzgl. der Entwicklung von Treibhausgasen sind offen. Auch die mechanische Stabilität des Deponiekörpers bei der Ablagerung von MBA-Fraktionen ist nicht abschließend geklärt.

Kosten der Abfallbehandlung:

Nach [Tho2] sind signifikante Unterschiede in den Kosten für MBA und MVA (ca. 120 €/t) noch nicht erkennbar. Dies liegt in erster Linie an der Unsicherheit bzgl. der tatsächlichen Gesamtkosten der MBA.

Die Kosten der Abfallbehandlung in einer MBA hängen außer von Kapital- und Betriebskosten in erster Linie von den Kosten für die Deponierung, von Logistikkosten und vom Erlös bzw. von der Höhe der Zuzahlung für die energetisch und stofflich verwertbaren Stoffströme ab.

Damit sind die Gesamtkosten stark von der Qualität der erzeugten Stoffströme abhängig. Müssen nicht spezifikationsgerecht erzeugte Ersatzbrennstoffe für industrielle Prozesse oder nicht gemäß AbfAbIV deponierbare Reststofffraktionen einer thermischen Nachbehandlung in einer MVA unterzogen werden, oder müssen Ersatzbrennstoffe wegen fehlender Abnahmekapazitäten zwischengelagert werden, steigen die Kosten für die MBA erheblich.

5. Zusammenfassung und Empfehlungen

Es gibt zwei prinzipiell unterschiedliche Verfahrensziele der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung MBA. Die Verfahren sind entweder ausgerichtet auf die Vorbehandlung der Abfälle zur Ablagerung auf der Deponie oder auf die Erzeugung eines heizwertreichen Stoffstroms zur energetischen oder stofflichen Verwertung in Pro-

zessen der Grundstoffindustrie oder im Kraftwerk. Bei der zuletzt genannten Variante fällt i. d. R. auch ein Stoffstrom an, der in einer MVA thermisch nachbehandelt werden muss.

2005 sollen in der BRD 66 Anlagen mit einer Gesamtkapazität von ca. 6,2 Mio. t/a für die mechanisch-biologische Abfallbehandlung verfügbar sein. Mit Stand 08/2004 sind noch 42 Standorte im Status „geplant“, „in Genehmigung“ oder „im Bau“ [LAGA]. Für Baden-Württemberg sind 3 Anlagen mit einer Gesamtkapazität von 339 600 t/a z. Zt. im Bau bzw. in der Nachrüstung.

Langzeit-Betriebserfahrungen mit MBA-Anlagen die gemäß der ab 06/2005 geltenden gesetzlichen Vorgaben (30. BImSchV, AbfAbIV) betrieben werden sind bisher nicht bekannt gemacht. Daher können die wesentlichen Faktoren Anlagenverfügbarkeit, Durchsatz der Anlage, Qualität der Stoffströme (Deponiematerial oder Ersatzbrennstoff) z. Zt. nicht belastbar beurteilt werden. Da auch der Betrieb von mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen einer Lernkurve unterliegt, ist davon aus zu gehen, dass die für 2005 angekündigten MBA-Kapazitäten – unter der Maßgabe der Einhaltung der Produktqualität – zum Stichtag 01.06.2005 voraussichtlich nicht erreicht werden.

Die Entsorgungssicherheit für Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle in der BRD wird ab 2005 wesentlich von den tatsächlich verfügbaren MBA-Kapazitäten abhängen. Werden die geplanten Durchsätze nicht erreicht oder die geforderten Qualitäten der erzeugten Stoffströme (Deponiematerial und Ersatzbrennstoff) nicht eingehalten, so müssen diese Stoffströme in einer MVA thermisch nachbehandelt werden. Freie MVA-Kapazitäten werden ab 2005 jedoch nicht verfügbar sein. Damit ist auch eine belastbare Aussage bzgl. der Entsorgungskosten für Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle in der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung MBA z. Zt. nicht möglich. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Kosten zumindest in den ersten Jahren nach 2005 auf Grund der Unsicherheiten im Betriebsverhalten der Anlagen und wegen Kapazitätsengpässen in Anlagen zur energetischen und stofflichen Verwertung deutlich über den heutigen Werten liegen werden.

Empfehlungen:

Es wird empfohlen z. Zt. in Baden-Württemberg nicht in weitere MBA-Kapazitäten zu investieren. Vielmehr sollten die Betriebserfahrungen mit den ab 06/2005 betriebenen Anlagen zur mechanisch-biologischen Abfallbehandlung abgewartet und die noch offenen Fragen geklärt werden:

- Durchsatz der Anlagen
- Qualität der Stoffströme zur Ablagerung / Verwertung
- Verwertung der erzeugten Ersatzbrennstoffe (Abnehmer, Kapazitäten, Kosten)
- Verbleib der im Abfall enthaltenen Schadstoffe

Dazu werden folgende, den Betrieb der MBA begleitende F&E-Aktivitäten empfohlen:

- Verfahrensoptimierung sowohl der mechanischen als auch der biologischen Verfahrensstufen im Hinblick auf Anlagenkapazität und Stoffstromqualität

- Bewertung der Qualität der Ersatzbrennstoffe zur Sicherung der Verwertbarkeit, insbesondere Charakterisierung der Verbrennungseigenschaften im Vergleich zu fossilen Brennstoffen
- Bewertung der MBA als Schadstoffsенke unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit, Verbleib der organischen und anorganischen Schadstoffe

Treten Kapazitätsengpässe bei der Entsorgung von Hausmüll und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen auf, kann zum heutigen Zeitpunkt nur die Schaffung zusätzlicher Kapazitäten durch Müllverbrennungsanlagen MVA nach dem Rostofen-System, für die langjährige Betriebserfahrungen vorliegen, empfohlen werden.

Literatur:

- [Bru] Brunner, H.P.; Beckmann, M.; Born, M.; Merrilot, J.-M.; Vehlow J (2002) Research Needs for Waste Management. The Future of Waste Management in Europe, Strasbourg, October 7-9, 2002, Düsseldorf:VDI-GVC,2002, S. 118 – 127
- [Cha] International Ash Working Group (IAWG): Chandler A.J., Eighmy T.T., Hartlén J., Hjelmar O., Kosson D.S., Sawell S.E., van der Sloot H.A. & Vehlow J. (1997) Municipal Solid Waste Incinerator Residues. Amsterdam, NL: Elsevier
- [Doed] Stand der technischen Entwicklung der MBA; Countdown 2005-Chancen, H. Doedens; Risiken und Möglichkeiten der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung; 5. ASA-Abfalltage; 19/20.2.2004
- [DPU] Keine Entsorgungssicherheit in Deutschland ab 2005. Deutsche Projekt Union GmbH, Juli 2003
- [Her] Quelle: <http://www.herhof.de/inhalt/2400.htm> Download: 04.09.2004
- [Iska] Quelle: <http://www.iska-gmbh.de/html/referenzbuchen.htm> Download: 4.8.2004
- [LAGA] Bericht der LAGA zur 63. Umweltministerkonferenz; Umsetzung der Abfallablagerungsverordnung -3. Fortschreibung- Stand 31.08.04
- [Lor] Deponie-Langzeitverhalten der MBA-Schwerfraktion; K.E. Lorber, J. Novak, P. Müller; Ersatzbrennstoffe 3;TK Verlag 2003
- [MUV] Ministerium für Umwelt und Verkehr: Größte Herausforderung in der Abfallwirtschaft seit 30 Jahren; Quelle: http://www.baden-wuerttemberg.de/sixcms/detail.php?id=59358&template=4_1_pressemit_detail Download: 20.08.2004
- [Nel] Stand und Technik der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung; M.Nelles, S. Gehring, A. Neff; Bio- und Restabfallbehandlung 6; Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie;2002
- [PROG] Abfallströme nach 2005 für die thermische Abfallbehandlung und energetische Verwertung; H. Alwast, J. Hoffmeister; Prognos AG
- [Rot] Lohnt sich die anaerobe Stufe bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung?; Susanne Rotter; Ersatzbrennstoffe 3;TK Verlag 2003
- [Sab] Modell zur Vorkalkulation von mechanisch-biologischen Restabfallbehandlungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen; F. Sabery; TU Berlin 2004
- [Schal] Das BIOPERCOLAT®-Verfahren in der Restabfallbehandlung; P. Schalk; Bio- und Restabfallbehandlung 6; Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie;2002
- [Seif] MBA ISKA®-Buchen mit Perkolation; Th. Seifermann; Bio- und Restabfallbehandlung 6; Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie;2002
- [TAS] TA Siedlungsabfall; Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen; Mai

- 1993
- [Tho1] Abfallbehandlung mit Verbrennung und mit mechanisch-biologischen Verfahren; K.J. Thome-Kozmiensky; Optimierung der Abfallverbrennung 1; TK Verlag 2004
- [Tho2] Stellung, Möglichkeiten und Probleme der MBA in der Abfallwirtschaft; Countdown 2005-Chancen, K. J. Thomé-Kozmiensky; Risiken und Möglichkeiten der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung; 5. ASA-Abfalltage; 19./20.2.2004
- [Weh] Quelle: http://www.wehrle-werk.de/html/body_news.cfm#A4 Download: 4.8.2004