7 Zusammenfassung und Empfehlungen

Das heutige Abfallentsorgungssystem und die ihm zugrunde liegenden gesetzlichen Regelungen haben eine lange Vorgeschichte und beruhen auf unterschiedlichen Zielsetzungen. Im Ergebnis haben die daraus folgenden Anforderungen zu teilweise fragwürdigen Entsorgungspfaden, zu einem komplizierten Nebeneinander privater und öffentlich-rechtlicher Entsorger und vor allem zu höheren Müllgebühren für die Bürger geführt.

Ausgehend von den Wirkungen, die mit der Umsetzung der gesetzlichen Regelungen erreicht wurden bzw. in deren Folge eintraten, ist es daher notwendig, nach Wegen zu suchen, die einerseits die zentralen Ziele einer Kreislaufwirtschaft beibehalten und andererseits helfen können, das Abfallentsorgungssystem zu vereinfachen und die Belastungen für die Bürger zu verringern.

Im Hinblick auf die Siedlungsabfälle hat das heutige Entsorgungssystem zu folgenden Konsequenzen geführt:

- Die Verminderung der Abfallmengen und eine erhöhte Abfallverwertung wurden mit der Umsetzung der geltenden gesetzlichen Regelungen erreicht.
- Eine „absolute Abfallvermeidung“ wurde bei den Haushalten nicht erreicht.
- Die Verringerung der Abfallmengen führt zu erhöhten Kosten bei den Entsorgern und Problemen bei der Kostendeckung.
- Mit der Umsetzung der Regelungen zur Abfallentsorgung sind die Müllgebühren für die Bürger deutlich gestiegen.
- Einen hohen Einfluß auf Entsorgungskosten und Müllgebühren haben die Anforderungen an das Getrenntsammeln und die vorhandenen Beseitigungsanlagen.
- Die Getrenntsammlung belastet den Bürger mit zusätzlichen Aufgaben und orientiert sich stark an den Interessen der Entsorger.

Maßnahmen zur Veränderung des bestehenden Abfallentsorgungssystems müssen das Erreichen der zentralen Ziele der Kreislaufwirtschaft,

- das Verringern der endgültig zu beseitigenden Abfallmengen,
- das Sicherstellen einer umweltschonenden Abfallentsorgung und
- die Rückführung eines möglichst hohen Anteils der im Abfall enthaltenen nutzbaren Bestandteile als Sekundärrohstoff oder Energieträger in den Wirtschaftskreislauf,

sicherstellen und sollten dabei auch verstärkt die Bedürfnisse des Endverbrauchers berücksichtigen.

Für den Endverbraucher erstrebenswert wäre eine Vereinfachung der Abfallentsorgung und insbesondere der Getrenntsammlung, die sich als transparente und kostenbewußte Dienstleistung an den Bedürfnissen der Bürger orientieren sollte, die ja bereit sind Abfälle für eine Verwertung zu trennen und zur Abholung bereit zu stellen oder in bestimmten Fällen auch zu einem Sammelplatz zu bringen.
Auf die Ausweitung der separaten Bioabfallsammlung sollte verzichtet werden, während die Getrenntsammlung der mit geringem Aufwand kompostierbaren Grünabfälle beizubehalten ist.

Die Getrenntsammlung von Wertstoffen sollte sich auf solche Stoffe beschränken, die vom Abfallerzeuger eindeutig zuzuordnen und leicht zu sortieren sind und vom Abfallentsorger automatisiert in sortenreine, werkstofflich wiederverwertbare Fraktionen aufgetrennt werden können. Dann sollte es ausreichen, neben der Restabfalltonne eine zusätzliche Wertstofftonne einzurichten, in der alle Wertstoffe erfaßt werden können, unabhängig davon, ob es Verpackungen sind oder nicht. Daneben könnten die bewährten Sammelsysteme wie Sperrmüll-, Grünschnitt- und Bündelsammlung sowie die Erfassung von Glas und Papier mittels Depotcontainer beibehalten werden.

Gleichzeitig sollte bei Vorhandensein einer thermischen Behandlungsanlage – was zukünftig die Regel sein wird – die Problemstoffsammlung vereinfacht und bestimmte Problemstoffe in haushaltsüblichen Kleinmengen (z.B. Farben, Lacke, Lösungsmittel etc.) auch zusammen mit dem Restabfall eingesammelt und verbrannt werden. Viele Problemstoffe werden deshalb getrennt gesammelt, um eine langfristige Gefahr für die Deponie bzw. für das Grundwasser auszuschließen. Durch die zwingend notwendige Behandlung vor einer Deponierung verliert die Getrenntsammlung jedoch für viele sogenannte Problemstoffe an Bedeutung, da sie durch eine thermische Behandlung unschädlich gemacht werden können.

Primär sollte eine Reduzierung der Lasten für die Bürger im Vordergrund stehen. Dazu könnten die folgenden Maßnahmen beitragen:

1. Das Ziel der „absoluten Abfallvermeidung“ sollte als primäres Ziel der Kreislaufwirtschaft aufgegeben werden, da der Umgang mit Abfällen kein geeigneter Ansatzpunkt ist, um Verhaltensweisen der Bürger zu beeinflussen.

2. Die hohen Anforderungen an die getrennte Erfassung von Wertstoffen oder Problemabfällen in Haushalten sollten verringert und an die Möglichkeiten der Sortier- sowie der angestrebten Verwertungsverfahren angepaßt werden.

3. Die getrennte Bioabfallsammlung sollte zugunsten der Erfassung von Grüngut eingeschränkt werden und das generelle Getrenntsammlungsgebot für Bioabfälle im Landesabfallgesetz aufgehoben werden, um die Kostenbelastung der Bürger zu senken.

4. Die Aufgaben privater Entsorger sollten erweitert werden, um durch mehr Konkurrenz geringere Kosten für die Bürger zu erreichen.

5. Für die Abfallverwertung sollten stoffliche und energetische Verwertung gleichrangig zugelassen sein, um fragwürdige und für die Bürger teure stoffliche Verwertungen zu verhindern.

6. Siedlungsabfälle sollten in geeigneten Verwertungsanlagen – auch Müllverbrennungsanlagen – generell energetisch verwertet werden können, um die Kostenbelastungen der Haushalte zu verringern.

7. Die Errichtung neuer Abfallbehandlungs- und Abfallbeseitigungsanlagen muß unter Berücksichtigung der gesamten Kosten für Behandlung und Deponierung erfolgen, um die Kostenbelastung der Bürger möglichst gering zu halten.

8. Die regional stark unterschiedlichen Müllgebühren erfordern zusätzliche Maßnahmen, um ein vergleichbares Gebührenniveau zu erreichen.

Anhang A – Tabellen

Tabelle A–1: Entwicklung der an öffentlichen Entsorgungsanlagen angelieferten Abfallmengen in Baden-Württemberg von 1990 bis 1998

in 1.000 t	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Haus- und Geschäftsmüll	2.309,2	2.117,8	2.038,3	1.814,6	1.705,5	1.583,7	1.525,1	1.491,2	1.396,1
Sperrmüll	309,4	268,9	240,4	228,0	237,8	196,9	201,6	214,0	209,1
Bioabfälle	17,2	27,4	57,3	127,2	178,2	267,8	348,7	367,4	395,9
Grünabfälle	302,7	346,1	441,3	529,7	613,0	626,9	694,6	739,1	776,8
Wertstoffe	849,3	1.093,2	1.224,8	1.422,4	1.506,7	1.542,8	1.555,9	1.599,2	1.654,3
davon									
getrennt erfaßt [1]	572,4	754,9	828,8	1.028,8	1.082,5	1.130,8	1.165,7	1.205,1	1.253,8
Wertstoffgemische aus Haushalten	218,9	233,8	278,6	299,0	324,8	338,8	348,7	364,8	384,9
Wertstoffgemische aus Gewerbebetrieb	58,0	104,5	117,4	94,6	99,4	73,2	41,5	29,3	15,6
kommunale Klärschlämme [2]	735,0	693,2	752,9	763,2	648,3	413,1	133,4 (trocken)	120,5 (trocken)	103,6 (trocken)
Gewerbe- und Baustellenabfälle	2.526,1	2.370,7	1.901,5	1.392,0	1.166,4	870,4	663,3	551,1	533,9
Produktionsspezifische Abfälle [3]	682,9	598,0	452,7	265,9	228,7	204,3	124,0	122,4	151,8
Bauschutt, Straßenaufbruch	5.783,8	6.602,2	6.210,6	3.444,6	2.893,0	2.211,0	1.834,5	1.523,1	1.652,4
Bodenaushub	17.182,2	15.239,6	15.556,3	13.340,9	12.240,9	10.275,3	8.894,2	8.055,7	7.457,8
davon									
verunreinigt	213,0	311,2	199.7	124,9	82,0	126,2	63,6	118,8	430,5
nicht verunreinigt	16.969,2	14.928,4	15.356,6	13.216,0	12.159,9	10.149,1	8.830,6	7.936,9	7.027,3
Sonstige Abfälle [4]	158,5	203,7	168,0	164,6	145,5	142,3	127,2	111,7	96,5
Primärabfälle insgesamt [5]	**30.856,3**	**29.560,8**	**29.044,1**	**23.493,1**	**21.564,0**	**18.334,5**	**16.102,5**	**14.895,4**	**14.428,2**

[1] mittels Einstoffbehälter, Depotcontainer, zentralen Sammelstellen, Vereinssammlungen, getrennter Anlieferung durch Gewerbebetriebe
[2] einschließlich Sinkkastenschlamm (ab 1996 Mengenangaben in Tonnen Trockenmasse)
[3] einschließlich Produktionsschlämme, Formsande aus Gießereien, Shredderrückstände
[4] Straßenkehricht, Aschen und Schlacken aus Feuerungsanlagen, Abfälle von Stationierungsstreitkräften
[5] alle Siedlungsabfälle (kommunale Abfälle), die den entsorgungspflichtigen Körperschaften zur Entsorgung überlassen wurden

Tabelle A–2: Mengen- und Gebührenentwicklung für Gewerbe- und Baustellenabfälle ausgewählter Stadt- und Landkreise [1)]

		1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Landkreis Böblingen	1.000 t	96,9	91,9	63,1	47,2	34,8	28,5	24,3	24,6	22,2
	kg/B·a	627	570	390	307	240	198	171	173	155
	DM/t	76	111	315	412	691	626	607	370	370
Landkreis Göppingen	1.000 t	50,5	50,4	43,6	41,4	40,2	38,7	28,2	24,5	26,8
	kg/B·a	575	563	486	479	479	462	340	305	338
	DM/t	-	154	154	194	242	293	402	378	-
Rems-Murr-Kreis	1.000 t	84,5	108,0	100,6	94,9	82,8	40,6	28,3	20,1	21,6
	kg/B·a	652	807	736	718	638	317	225	161	173
	DM/t	-	55	70	110	210	310	410	410	360
Main-Tauber-Kreis	1.000 t	27,5	25,2	15,7	14,3	14,5	14,1	10,5	7,8	7,1
	kg/B·a	626	551	342	319	327	318	238	178	162
	DM/t	-	60	60	96	96	140	206	229	-
Neckar-Odenwald-Kreis	1.000 t	27,8	30,6	22,1	19,6	18,6	17,0	17,4	15,5	15,7
	kg/B·a	680	723	518	470	449	411	424	384	393
	DM/t	-	60	60	90	110	110	110	-	-
Ortenaukreis	1.000 t	92,8	83,8	83,7	65,0	59,5	48,9	43,3	32,7	29,5
	kg/B·a	666	579	568	441	416	342	302	232	210
	DM/t	-	80	108	212	216	222	222	248	248
Schwarzwald-Baar-Kreis	1.000 t	52,7	64,1	46,0	43,1	40,5	32,1	29,4	24,3	23,7
	kg/B·a	644	769	548	543	524	421	389	330	319
	DM/t	-	45	57	98	98	92	120	161	-
Stadt Stuttgart	1.000 t	122,5	100,9	95,0	73,9	46,1	34,1	26,9	20,7	17,4
	kg/B·a	323	263	247	200	129	99	79	61	51
	DM/t	-	261	334	507	780	665	687	687	687
Baden-Württemberg	**Mio. t**	**2,58**	**2,49**	**2,00**	**1,48**	**1,25**	**0,93**	**0,73**	**0,63**	**0,605**
	kg/B·a	**667**	**607**	**481**	**362**	**310**	**233**	**179**	**151**	**146**
	kg/E·a	**266**	**252**	**199**	**145**	**121**	**90**	**71**	**60**	**58**

[1)] Gewerbe- und Baustellenabfälle ohne Rückstände aus Sortieranlagen
kg/B·a = Aufkommen in kg pro versicherungspflichtig Beschäftigten Arbeitnehmer am Arbeitsort im Jahr
DM/t = Kosten pro Tonne für die Beseitigung der Abfälle in kommunalen Entsorgungsanlagen des Kreises
kg/E·a = Aufkommen in kg pro Einwohner und Jahr

Tabelle A–3: Abfallmengenprognose Baden-Württemberg für Abfälle aus Haushaltungen, Produktion und Gewerbe bis zum Jahr 2008

in 1.000 t	1994	1995	1996	1997	1998	2005/2008
Haus- und Geschäftsmüll	1.705	1.584	1.525	1.491	1.396	1.070
Sperrmüll [1]	238	193	202	203	209	210
Bioabfälle	178	268	349	367	396	540
Grünabfälle	613	627	695	739	777	1.000
Wertstoffe [2]	1.466	1.490	1.480	1.539	1.599	1.800
davon						
aus Haushalten	1.308	1.355	1.390	1.472	1.529	1.700
aus Gewerbebetrieben	158	135	90	67	70	100
kommunale Klärschlämme [3]	648	413	133 (trocken)	121 (trocken)	104 (trocken)	120 (trocken)
hausmüllähnliche Gewerbeabfälle	926	717	552	470	453	300
Baustellenabfälle	240	153	111	81	80	200
Bauschutt	2.516	1.933	1.576	1.373	1.449	1.250
Straßenaufbruch	378	278	259	151	204	250
Bodenaushub [4]	12.159	10.149	8.831	7.937	7.027	6.000
Rückstände aus Sortieranlagen	120	123	100	116	94	140
Summe [5]	**21.187**	**17.928**	**15.813**	**14.588**	**13.788**	**12.880**

[1] ohne verwertete Sperrmüllmenge
[2] ohne Rückstände aus der Sortierung
[3] einschließlich Sinkkastenschlamm (ab 1996 Mengenangaben in Tonnen Trockenmasse)
[4] ohne verunreinigten Bodenaushub
[5] Siedlungsabfälle, die den entsorgungspflichtigen Körperschaften zur Entsorgung überlassen wurden/werden

Tabelle A–4: Entwicklung der Müllgebühren und der Getrenntsammlung von Abfällen aus Haushalten im Rems-Murr-Kreis von 1990 bis 1998

Abfallmengen	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Haus- und Sperrmüll in kg/E·a	230	-	203	174	171	163	168	170	144
Bio- und Grünabfälle in kg/E·a [1]	16	-	45	70	55	78	82	84	96
Wertstoffe aus Haushalten in kg/E·a [2]	64	-	78	115	121	122	127	125	129
Summe in kg/E·a	310		326	359	347	363	377	379	369
Müllgebühren [3]									
Restmüllabfuhr wöchentlich 14-tägig	85 DM	92 DM	120 DM	130 DM	158 DM 129 DM	188 DM 154 DM	225 DM 190 DM	236 DM 199 DM	246 DM 204 DM
Biomüll [4]	-	-	-	-	-	-	-	20 DM	20 DM
Sperrmüll [5]	-	-	-	-	-	-	-	-	15 DM
4-köpfige Modellfamilie [4]					183 DM	218 DM	255 DM	272 DM	301 DM

[1] ab 1995 separate Bioabfallsammlung in Teilgebiet des Rems-Murr-Kreises, ab 1997 separate Abrechnung
[2] Papier/Pappe, Glas, Metalle, Kunststoffe, Flüssigkartons und Verbunde, Textilien, Holz, Altfette, Kabel (einschl. der über das DSD erfaßten Mengen sowie aus der Sperrmüllsortierung stammende Wertstoffe)
[3] für Zweipersonenhaushalt mit 35 Liter Mülleimer (ab 1993 Grundgebühr plus volumenbezogene Gebührenmarke)
[4] mit wöchentlicher Restmüllabholung (50 l Tonne) und ohne Bioabfalltrennung (incl. einer Sperrmüllabholung)
[4] für 80 l Tonne bei 14-tägiger Leerung (nur Juni bis August wöchentliche Leerung), für Restmüll erfolgt gleichzeitig nur noch eine 14-tägige Abfuhr
[5] ab 1993 Sperrmüll auf Abruf (zweimal im Jahr kostenlos), ab 1998 gegen Gebühr

Tabelle A–5: Entwicklung der Müllgebühren und der Getrenntsammlung von Abfällen aus Haushalten in Stuttgart von 1990 bis 1998

Abfallmengen	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Haus- und Sperrmüll in kg/E·a	298	287	285	280	279	280	276	271	258
Bio- und Grünabfälle in kg/E·a [1]	1	2	3	5	6	6	7	16	23
Wertstoffe aus Haushalten in kg/E·a [2]	87	96	100	110	122	127	134	140	145
Summe in kg/E·a	386	385	388	395	407	413	417	427	426
Müllgebühren									
Restmüllabfuhr [3] wöchentlich 14-tägig (in DM)		399 199,80	456 228	662,40 331,20	763,20 381,60	654,60 360	808,20 444,60	841,20 467,40	841,20 467,40
Biomüll [4] (in DM)	-	-	-	-	-	-	44,40	46,80	46,80
4-köpfige Modellfamilie [5]		399	456	331,20	381,60	360	489	514,20	514,20

[1] ab 1992 probeweise Bioabfallsammlung, 1998 zu ca. 70 % im Stadtgebiet umgesetzt, erst im Jahr 2000 alle Haushalte angeschlossen, für Grüngut jährlich nur 2 Abholtermine aus Haushalten (April und November), ansonsten Anlieferung im Garten- und Friedhofsamt möglich (in der Statistik dann unter kommunale Grünabfälle erfaßt)
[2] Papier, Glas, Schrott, Aluminium, Kunststoffe, Flüssigkartons und Verbunde (einschl. Sammlung mit Gelbem Sack)
[3] für 120 Liter Restmülltonne
[4] für 60 Liter Biotonne bei wöchentliche Leerung (kein Anschlußzwang), für Restmüll erfolgt gleichzeitig nur noch eine 14-tägige Abfuhr
[5] 120 l Tonne (wöchentliche Leerung), ab 1993 mit Bioabfalltonne (60 l) und 14-tägiger Restmüllabholung (120 l Tonne)

Tabelle A–6: Verbrauch und Verwertung von Verkaufsverpackungen aus Privathaushalten und Kleingewerbe in Deutschland

in 1.000 t	1991 [1]	1993	1994	1995	1996	1997	1998 [2]
Glas	3.812,8	3.585,7	3.504,1	3.289,4	3.148,7	3.087,4	2.965,6
davon DSD verwertet	-	67 %	71 %	78 %	85 %	89 %	91 %
Papier, Pappe, Karton	1.728,2	1.609,2	1608,5	1.449,4	1.402,3	1.480,8	843,1
davon DSD verwertet	-	60 %	73 %	87 %	94 %	93 %	168 %
Kunststoffe	955,3	856,7	875,9	875,0	791,8	822,2	516,9
davon DSD verwertet	-	33 %	53 %	58 %	68 %	69 %	116 %
Weißblech	703,4	638,4	641,2	426,6	374,6	369,6	324,9
davon DSD verwertet	-	39 %	55 %	61 %	81 %	84 %	115 %
Verbunde [3]	198,2	203,5	201,5	604,7	560,9	540,2	575,5
davon DSD verwertet	-	25 %	39 %	49 %	79 %	78 %	60 %
Aluminium	129,4	67,9	69,3	47,2	44,4	46,2	37,5
davon DSD verwertet	-	13 %	42 %	67 %	81 %	86 %	116 %
Summe	**7.527,3**	**6.961,4**	**6.900,5**	**6.692,3**	**6.322,7**	**6.346,4**	**5.263,4**
davon DSD verwertet	**-**	**52 %**	**66 %**	**77 %**	**84 %**	**86 %**	**104 %**

[1] Verpackungsverordnung tritt am 1. Dezember 1991 in Kraft
[2] ab 1998 nur vom DSD lizenzierte Menge
[3] 1991 bis 1994 nur Getränkeverbunde, ab 1995 alle Verbunde mit einem Hauptmaterialanteil < 95 %

Tabelle A–7: Entsorgungswege der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger in Baden-Württemberg

in 1.000 t	1980	1984	1987	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
Primärabfälle insgesamt [1)]	21.372,9	22.275,7	27.557,3	30.856,3	29.560,8	29.044,1	23.493,1	21.564	18.334,5	16.102,5	14.895,4	14.428,2
Stoffliche Verwertung [2)]	k. A.	k. A.	1.465,5	2.881,6	5.419,2	5.707,5	4.404,2	4.674,7	3.957,8	3.813,5	5.330,5	5.022,3
Biologische Behandlung	58,8	136,8	124,8	419,2	470,8	553,2	645,2	773,5	807,4	878,6	964,7	1009,0
Thermische Behandlung	599,0	659,1	664,7	632,1	577,8	740,1	802,9	742,5	643,9	532,9	626,4	633,9
Deponierung	20.565,0	21.265,8	24.947,4	26.286,9	21.770,1	20.677,0	17.259,8	14.942,7	12.554,3	10.516,6	7.582,8	7.344,5
Sonstige Entsorgung [3)]	150,1	214,0	354,9	636,5	1.322,9	1.366,3	381,0	430,6	371,1	360,9	391,0	418,5
Sekundär-rückstände [4)]	232,0	243,8	279,3	430,8	503,2	431,8	382,4	367,9	345,5	368,8	306,9	299,7

1) alle Siedlungsabfälle, die den entsorgungspflichtigen Körperschaften zur Entsorgung überlassen wurden (ohne Sekundärrückstände)
2) Erfassung mittels Einstoffbehälter, Depotcontainer, zentralen Sammelstellen und durch Vereinssammlungen
3) z.B. Problemabfälle, Abfälle die außerhalb Baden-Württembergs entsorgt werden etc.
4) aus der stofflichen Verwertung bzw. Sortierung, der biologischen und der thermischen Behandlung

Tabelle A–8: Siedlungsabfallentsorgung in Baden-Württemberg (gerundet, Stand 1996)

Herkunft der Abfälle	Im Vorspann definierte Abfallsorten	In der Statistik verwendete Abfallsorten	In 1.000 t	Stoffliche Verwertung [1]	Biologische Behandlung	Thermische Behandlung	Hausmüll-deponie	Bodenaushub-deponie	Sonstige Entsorgung [2]
Abfälle aus Haushalten	Hausmüll (incl. Geschäftsmüll)	Hausmüll	1.525			333	1.158		34
	Sperrmüll	Sperrmüll	202	24		45	131		2
	Bioabfälle, Gartenabfälle	Bioabfälle	349		220		14		115
	Wertstoffe	Wertstoffe getrennt erfaßt	1.166	1.166					
		Wertstoffe als Gemisch	349	349					
	Problemabfälle [3]	Problemstoffe	9						9
		Summe	**3.600**	**1.539**	**220**	**378**	**1.303**		**160**
Kommunale Abfälle	Straßenkehricht	Straßenkehricht	88			10	75		3
	Grün-, Marktabfälle	Grünabfälle	660	1	619		16		24
	Klärschlamm	kommun. Klärschlamm	133	2	7	33	56		35
	Krankenhausabfälle	nicht separat ausgewiesen [4]							
		Summe	**881**	**3**	**626**	**43**	**147**		**62**
Abfälle aus dem Gewerbe	Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle	Gewerbeabfälle, Baustellenabfälle	663	31		95	528	2	7
	Baustellenabfälle	Wertstoffe aus Gewerbe	41	42					
	Grünabfälle	Grünabfälle	35		33		1		1
	Produktionsabfälle	produktionsspez. Abfälle	124	30			86	8	
	Sekundärrückstände	Aschen, Stäube, Schlakken aus Feuerungsanlag.	17				17		
	Bodenaushub	Bodenaushub und	8.831	1.237		1	288	7.167	138
		Bodenaushub verunrein.	64	1			60	3	
	Straßenaufbruch	Straßenaufbruch	259	121			36	102	
	Bauschutt	Bauschutt	1.575	812			85	677	2
		Summe	**11.611**	**2.274**	**33**	**96**	**1.101**	**7.959**	**148**
Sonstige Abfälle		incl. Abfälle der Stationierungsstreitkräfte	22			15	8		
Siedlungsabfälle [3]		**Insgesamt**	**16.113**	**3.816**	**879**	**532**	**2.559**	**7.959**	**370**

[1] einschließlich Behandlung in Sortieranlagen
[2] z.B. Export außerhalb Baden-Württemberg, Sonderabfallentsorgung etc.
[3] einschließlich Problemabfälle (normalerweise nicht in Statistik für Siedlungsabfälle enthalten)
[4] abhängig vom Entsorgungsweg als Hausmüll oder Gewerbeabfall erfaßt

Tabelle A–9: Schwermetallgehalte von Regel- und Ersatzbrennstoffen sowie Übergangs- und Emissionsraten in Zementklinker

Element	Regelbrennstoffe max. [mg/MJ]	Richtwerte [1)] für Ersatzbrennstoffe max. [mg/MJ]	Übergang [2)] in Klinker [%]	Emission [2)] [mg/t Klinker]
Arsen	1,9	25	83-91	0-5
Antimon	0,07	10	83-91	k. A.
Beryllium	0,13	3	ca. 99	k. A.
Blei	10	80	72-96	0-33
Cadmium	0,3	6	74-88	0-1
Chrom	3,7	60	91-97	10-11
Kobalt	1,2	20	ca. 93	k. A.
Kupfer	3,7	80	ca. 88	k. A.
Nickel	3,5	40	83-97	3-20
Quecksilber	0,06	0,6	0-40	k. A.
Selen	0,2	2	ca. 0	k. A.
Tellur	0,04	2,5	ca. 80	k. A.
Thallium	0,15	5	0	0-228
Vanadium	6,7	70	90-95	1-20
Zinn	0,4	30	ca. 80	k. A.
Zink	8,0	800	80-99	3-47
Schwefel Chlor Fluor	740 60 14	1.500 2.500 2.500	67-94 14-33 88-95	k. A.

1) Richtwerte des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen (LUA) für die energetische Verwertung von Abfällen in Zementwerken (Jahresbericht LUA 1995)

2) für Zementwerke mit Zyklonvorwärmeröfen

Tabelle A–10: Vergleich der Emissionsgrenzwerte der TA Luft, der 13. BImSchV und der 17. BImSchV

Emissionsgrenzwerte [1] in mg/m³	**TA Luft 1986** genehmigungsbedürftige Anlagen		**13. BImSchV 1983** Großfeuerungsanlagen		**17. BImSchV 1990** Abfallverbrennungsanlagen	
	Hochöfen	**Zementwerke**	**Holz oder Kohle**	**andere feste Brennstoffe**	**Mitverbrennung** [2]	**MVA etc.**
Staub	50	50	50	50	Mischgrenzwert	10
Kohlenmonoxid (CO)	-	-	250	250	Misch(grenz)wert	50
Chlorwasserstoff (HCl)	30	30	100 (200) [4]	100 (200) [4]	Mischgrenzwert	10
Fluorwasserstoff (HF)	5	5	15 (30) [4]	15 (30) [4]	Mischgrenzwert	1
Schwefeldioxid u. -trioxid (als SO_2)	500	400	400 / 650 [5] (2000) [4]	400 / 650 [5]	Mischgrenzwert	50
Stickstoffmonoxid u. -dioxid (als NO_2)	500	500 / 800 [3]	800 / 1800 [6]	800	Mischgrenzwert	200
org. Stoffe (als Gesamtkohlenstoff)	150	150	-	-	Misch(grenz)wert	10
Dioxine und Furane (PCDD, PCDF)	-	-	-	-	Mischwert	insg. 0,1 ng TE [7]
Schwermetalle	Cd, Hg, Tl insg. 0,2		-	As, Cd, Co, Cr, Ni, Pb insg. 0,5	Misch(grenz)wert	Hg 0,03
	As, Co, Ni, Se, Te insg. 1,0				Misch(grenz)wert	Cd, Tl insg. 0,05
	Cr, Cu, Mn, Pb, Pd, Pt, Rh, Sb, Sn, V insg. 5,0				Misch(grenz)wert	As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, V insg. 0,5

[1] Tagesmittelwerte bezogen auf 11 Vol.-% O_2 (17. BImSchV) bzw. 7 Vol.-% O_2 (13. BImSchV) und Abgas im Normzustand (0 °C, 1013 mbar)
[2] in Feuerungsanlagen (13. BImSchV) oder sonstigen genehmigungsbedürftigen Anlagen (TA-Luft)
[3] Neufestlegung nach Stand der Technik durch LAI: Neuanlagen bzw. Altanlagen (bezogen auf 10 Vol.-% O_2)
[4] Feuerungsanlagen für Kohle mit einer Feuerungswärmeleistung bis einschließlich 300 MW
[5] beim Einsatz von Brennstoffen mit besonders hohem oder stark schwankendem Schwefelgehalt
[6] Feuerungsanlagen mit Staubfeuerungen für Steinkohle und flüssigem Ascheabzug (Schmelzkammerfeuerung)
[7] Summenwert der toxischen Äquivalenzwerte (I-TE), Äquivalenzfaktoren im Anhang der 17. BImSchV

Tabelle A–11: Emissionswerte des Steinkohlekraftwerkes Walheim bei der Verbrennung von Kohle bzw. Kohle/Klärschlamm-Gemischen

	Klärschlamm [1]	Emissionen Rohgas [mg/m³]		Emissionen Abgas [mg/m³]	
	[mg/kg]	ohne KS	mit SK/KS [2]	ohne KS	mit SK/KS [2]
C_{gesamt}	k. A.	k. A.	k. A.	0,4	0,6
Benzol	k. A.	k. A.	k. A.	< 0,003	< 0,003
PCB	0,57-1,74	k. A.	k. A.	9,8 ng/m³	8,25 ng/m³
PCDD/F (i-TE)	0,004-0,009 µg/kg	k. A.	k. A.	0,002 ng/m³	< 0,001 ng/m³
Chlor bzw. HCl	819-1.0383	k. A.	k. A.	4,5	4,5
Fluor bzw. HF	326-388	k. A.	k. A.	< 0,02	< 0,02
Schwefel bzw. SO_2	8.700-9.300	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Staub	-	19,9	13,2	1,5	1,0
Antimon	0,149-0,227	0,00097	0,00114	0,00002	< 0,00003
Arsen	0,04-0,12	0,02494	0,01704	0,00006	< 0,00003
Blei	51,7-63,2	0,02716	0,02520	0,00003	0,00003
Cadmium	1,12-1,33	0,00034	0,00037	< 0,00001	< 0,00001
Chrom	45,8-59,4	0,00986	0,01117	0,00068	0,00031
Kobalt	6,06-7,96	0,00382	0,00216	0,00005	0,00003
Kupfer	249-303	0,01330	0,01429	0,00043	0,00023
Mangan	40,3-51,0	0,02191	0,01296	0,00201	0,00140
Nickel	17,9-21,4	0,00802	0,00479	0,00033	0,00015
Quecksilber	0,404-0,566	0,00930	0,01296	0,00814	0,00861
Thallium	0,030-0,034	0,00008	0,00002	< 0,00003	< 0,00003
Vanadium	21,9-25,7	0,02337	0,00954	0,00137	0,00076
Zinn	0,297-0,346	< 0,00002	0,00007	< 0,00002	< 0,00002
Zink	799-1.015	0,04252	0,05758	0,00215	0,00140

Emissionswerte sind Mittelwerte einer 3-tägigen Versuchsreihe (bezogen auf 5 % Sauerstoffgehalt)

[1] Klärschlamm (KS) mit mittlerem Gehalt an organischem Kohlenstoff von 54,9 %, Wassergehalt 10,3 %

[2] SK/KS = Steinkohle/Klärschlammgemisch mit einem Klärschlammanteil von 4,9 % an der Feuerungswärmeleistung

Tabelle A–12: Genehmigungssituation für die Ablagerung nichtthermisch behandelter Abfälle über das Jahr 2005 hinaus (Stand 1998)

Land		Begründung	Genehmigung bis
	Genehmigung liegt vor		
Nds	Landkreis Lüneburg	TASi 1.2 (Forschung)	2020
Nds	Landkreis Diepholz (Bassum)	TASi 1.2 (Forschung)	2020
Nds	Landkreis Friesland/Wittmund	TASi 1.2 (Forschung)	2020
Nds	Landkreis Ammerland	TASi 12 (Übergang)	2020
Nds	Landkreis Grafschaft Bentheim	TASi 12 (Übergang)	2020
Nds	Stadt Hannover	TASi 12 (Übergang)	2020
Nds	Landkreis Cloppenburg	TASi 12 (Übergang)	2020
Nds	Stadt Oldenburg	?	2011
RP	Rhein-Lahn-Kreis	TASi 2.4 (Gleichwertigkeit)	2010
RP	Lkr. Altenkirchen/Neuwied	TASi 12 (Übergang)	2007
Bb	KAEV Niederlausitz	TASi 2.4 (Gleichwertigkeit)	2055
	Genehmigung im Antragsverfahren		
NRW	Landkreis Düren	TASi 2.4 (Gleichwertigkeit)	
Bb	Märkische Entsorgungsanlagen-betriebsgesellschaft (MEAB)	TASi 2.4 (Gleichwertigkeit)	
RP	Lkr. Altenkirchen/Neuwied	TASi 2.4 (Gleichwertigkeit)	

Tabelle A–13: Vergleich der Emissionswerte und -frachten der MBA- und MVA-Abluft mit den Grenzwerten der 17. BImSchV

Parameter	17. BImSchV		MBA mit Biofilter		MVA (Rostfeuerung)	
	Konzentration [mg/m³]	Fracht [1)] [g/t]	Konzentration [mg/m³]	Fracht [g/t]	Konzentration [mg/m³]	Fracht [g/t]
Gesamtstaub	10	55	<< 20	gering	0,2-1,1	ca. 5,5
TOC	10	55	20-60	ca. 300	< 1	ca. 5,5
davon						
TA Luft Klasse I	-	-	*2-6*	*ca. 30*	*k. A.*	*k. A.*
TA Luft Klasse II	-	-	*12-36*	*ca. 180*	*k. A.*	*k. A.*
TA Luft Klasse III	-	-	*6-18*	*ca. 90*	*k. A.*	*k. A.*
Methan	-	-	*10-20*	*ca. 150*	*k. A.*	*k. A.*
Dioxine u. Furane	0,1 ng/m³	550 ng/m³	ca. 0,001 ng/m³	ca. 1,3 ng/m³	ca. 0,01 ng/m³	ca. 55 ng/m³
HCl	10	55	k. A.	k. A.	1-6	ca. 1,1
HF	1	5,5	k. A.	k. A.	< 0,2	ca. 16,5
SO_2	50	275	k. A.	k. A.	0,5-13	ca. 33
NO_2	200	1.100	< 8	< 160	60-180	ca. 550
NH_3-N, org-N	-	-	*5-20*	*ca. 150*	*1-10*	*ca. 22*
Schwermetalle						
Summe Cd, Tl	0,05	0,275	n. b.	n. b.	0,001-0,004	ca. 0,014
Hg	0,05	0,275	< 0,001	n. b.	0,001-0,005	ca. 0,016
Summe As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, V	0,5	2,75	n. b.	n. b.	0,001-0,065	ca. 0,180

kursiv = kein Parameter der 17. BImSchV (n. b. = nicht bestimmbar, da unterhalb der Nachweisgrenze)

1) bezogen auf 5.500 m³ gereinigtes Abgas pro Tonne behandelter Restabfall und Tagesmittelwerte

Tabelle A–14: Vergleich der Eigenschaften und möglichen Emissionen von MBA-Rückständen und MVA-Schlacken mit den Zuordnungskriterien der TA Siedlungsabfall

Parameter	TA Siedlungsabfall	Rückstand aus MBA		MVA-Schlacke
	Deponieklasse II	zur Ablagerung	stoffstromspez.	
Glühverlust	5 %	40-60 %	30 %	1,3-5,2 %
TOC (Feststoff)	3 %	30-42 %	18 %	0,4-1,7 %
TOC (Eluat)	100 mg/l	100 mg/l	250 mg/l	10-25 mg/l
AT_4	-	5 mg O_2/g	5 mg O_2/g	0,5 mg O_2/g
GB_{21}	-	10-20 ml/g	10-20 ml/g	überwiegend H_2, keine Mengenangabe
Gasbildungs-potential	max. 53 m^3/t	15-45 m^3/t	15-45 m^3/t	3-12 m^3/t

Tabelle A–15: Erforderliches Deponievolumen für die Ablagerung der Behandlungsrückstände aus MBA und MVA

	Stoffstromspezifische MBA	MVA (Rostfeuerung)
Behandlungsrückstand	ca. 340 kg	Schlacke ca. 250 kg RGR-Rückstande ca. 30 kg
Dichte	ca. 1,6 t/m^3	ca. 2,0 t/m^3
Rückstandsvolumen	ca. 0,25 m^3	Schlacke ca. 0,13 m^3 RGR-Rückstande ca. 0,03 m^3
Verwertung	keine	Schlacke ca. 60-80 % RGR-Rückstande keine
Deponievolumen	ca. 0,25 m^3 (Deponieklasse II)	Schlacke ca. 0,03-0,05 m^3 RGR-Rückstande (Untertagedeponie) ca. 0,03 m^3

Angaben pro Tonne behandelten Restabfall (RGR = Rauchgasreinigung)

Tabelle A–16: Großtechnisch betriebene, mechanisch-biologische Restabfallbehandlungsanlagen in Deutschland (Stand 1/1998)

Standorte	Inbetrieb-nahme	Kapazität [t/a]	MBA-Ziel	Technische Details
Baden-Württemberg				
Hasenbühl/Schwäbisch Hall	1976	42.000	A	offenes Kaminzugverfahren
Waldorf/Lkr. Calw	1994	40.000	A	offenes Kaminzugverfahren
Ochsenhausen/Lkr. Biberach	1998	40.000	B	Rotteboxen (Biodegma), Einhausung
Bayern				
Quarzbichl/Eurasburg, Lkr. Bad Tölz-Wolfratshausen	1995	35.000	B	Einhausung, Rottetrommel, überdachte Intensiv- (Druckbel.) und Nachrotte
Erbenschwang/Ingenried, Lkr. Weilheim-Schongau	1997	22.000	B	Gekapselte Tunnelintensivrotte mit Saugbel. (Sutco), Wäscher/Biofilter
Hessen				
Aßlar/Lahn-Dill-Kreis	1997	120.000	C	Gekapselte Rotteboxen (Herhof) mit Biofilter, Kreislaufführung der Abluft
Niedersachsen				
Oldenburg	1975 Umbau 1998	86.000	A	Einhausung, überdachte Intensivrotte mit Saugbelüftung
Wilhelmshafen	1993	72.000	A	offenes Kaminzugverfahren
Sedelsberg/Lkr. Cloppenburg	1995	60.000	A	offenes Kaminzugverfahren
Lüneburg	1996	29.000	B	Gekapselte Tafelmietenkompostierung mit Saug-/Druckbel., Wäscher/Biofilter
Piesberg/Osnabrück	1996	65.000	A	offenes Kaminzugverfahren
Bassum/Lkr. Diepholz	1997	65.000	B	Gekapselte Tafelmietenkompostierung mit Saug-/Druckbel., Wäscher/Biofilter
Wiefels/Wangerland, ZVA Friesland-Wittmund	1997	61.000	A	Gekapselte Tafelmietenkompostierung mit Saugbel., Wäscher/Biofilter
Nordrhein-Westfalen				
Neuss	1982	77.000	A	offene Tunnelrotte
Haus Forst/Kerpen, Erftkreis	1986 Umbau 1997	115.000	A	Tunnelrotte, Einhausung
Horm/Lkr. Düren	1995	150.000	A	Gekapselte Tunnelintensivrotte mit Druckbel., Biofilter, offene Nachrotte
Rheinland-Pfalz				
Meisenheim/Lkr. Bad Kreuznach	1994	53.000	A	offenes Kaminzugverfahren
Kirchberg/Rhein-Hunsrück-Kreis	1995	40.000	A	offenes Kaminzugverfahren
Schleswig-Holstein				
Flensburg	1973 Umbau 1998	100.000	A (B) [2]	Gekapselte Tafelmietenkompostierung mit Saugbel., Tropfkörperwäscher

[1] A = MBA zur Deponierung, B = Stoffstromspezifische MBA, C = MBA zur Heizwertsteigerung
[2] nach Umbau: Kapazität 130.000 t/a, Ausschleusung einer heizwertreichen Fraktion

Tabelle A–17: Spezifische Kosten der MBA (mit Erlösen für Metalle, ohne energetische Verwertung oder Deponierung) in Abhängigkeit von der Verfahrensvariante und der Anlagengröße

Mechanisch-biologische Behandlung	50.000 t/a	100.000 t/a	200.000 t/a
MBE (Endrotte für Deponie)	103 DM/t	80 DM/t	62 DM/t
MBA (Splitting in heizwertreich und heizwertarm)	103 DM/t	80 DM/t	62 DM/t
Trockenstabilat (biologische Trocknung)	95 DM/t	70 DM/t	54 DM/t

Anhang B – Verfahren zur Abfallbehandlung

Energetische Abfallverwertung im Hochofen: Beim Einsatz von Abfällen im Hochofen kann die Zugabe mit dem Erz von oben oder direkt in die Vergasungszone erfolgen (s. Abb. B–1). Während bei der Zugabe von oben die Gefahr einer unvollständigen Verbrennung besteht, sind bei der Einbringung in die Vergasungszone keine Probleme zu erwarten [1]. Prinzipiell könnten synthetisch reine Kohlenwasserstoffe das häufig verwendete Schweröl im Verhältnis 1:1 ersetzen, allerdings sind beispielsweise Kunststoffe in der Regel verunreinigt und mit Additiven versetzt. Während der größte Teil der Verschmutzungen durch einfaches Waschen entfernt werden kann, sind Additive im Kunststoff selbst enthalten und beeinflussen dadurch die Produktqualität und auch die Verwertbarkeit [2].

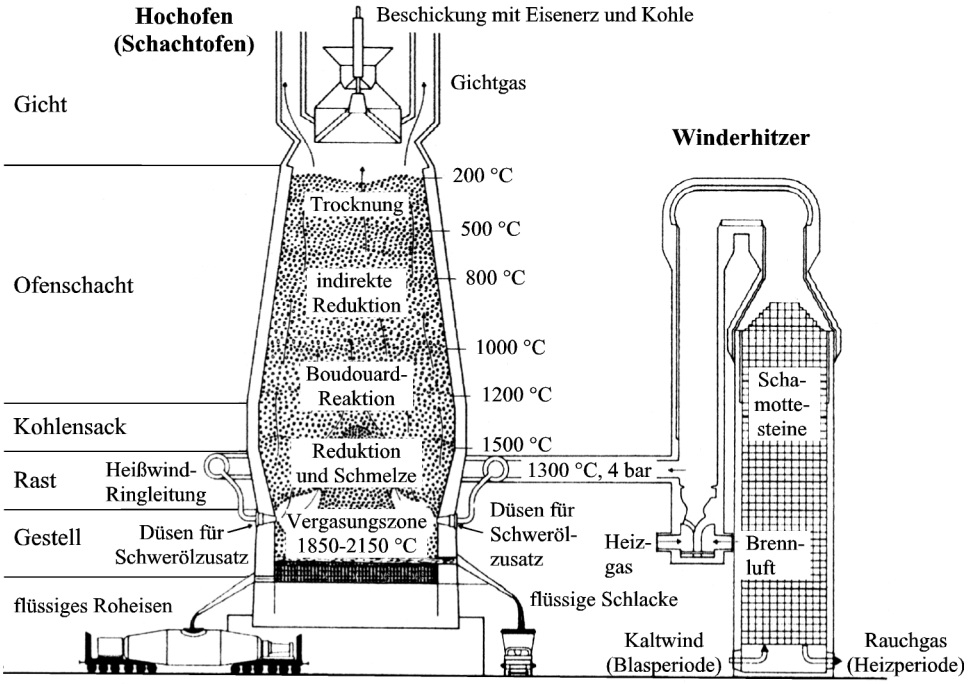

Abb. B–1 Querschnitt durch einen Schachtofen mit Winderhitzer nach [3]

Der Hochofenprozeß ist vergleichsweise empfindlich gegenüber dem Eintrag bestimmter Schadstoffe (z.B. Chlor, Kupfer, Blei, Zink [4]), weshalb auch der Chloreintrag zur Vermeidung von Salzsäure- und Dioxinemissionen für das Stahlwerk Bremen (hauptsächlich stoffliche Verwertung von Kunststoffen als Reduktionsmittel) behördlicherseits auf 1,5 % begrenzt wurde [5][3].

PCDD/F-Messungen im Abgas der Winderhitzeranlage ergaben ohne bzw. mit Kunststoffeinsatz im Mittel Werte von < 0,0005 ng/m^3 bzw. 0,0012 ng/m^3 I-TE (i. N.[1]). Bei Erhöhung des Chloreintrags steigen zugleich die Emissionen von Salzsäure, Blei und Cadmium an [3], da die Gichtgasreinigung keinen besonders hohen Wirkungsgrad zur Rückhaltung von Säurebildnern (insbesondere Schwefel) und leichtflüchtigen Verbindungen aufweist.

Bei der Mitverbrennung von entsprechend schadstoffhaltigen Abfällen ist daher mit höheren Emissionen von Salzsäure, Schwefeldioxid/-trioxid und auch von leichtflüchtigen Schwermetallen (u.a. Quecksilber) zu rechnen. Die Abscheideleistung für den gesamten Hochofenprozeß liegt für Zink bei ca. 97 %. Während für Cadmium vergleichbare Werte anzunehmen sind, dürfte die Abscheideleistung für Quecksilber oberhalb von 90 % liegen. Wie bei Zementwerken gilt auch hier, daß für die Mitverbrennung von Abfällen im Hochofen die Datenlage bezüglich der entstehenden Emissionen eher als dürftig anzusehen ist [1]. *(s. auch Stoffliche Verwertung von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen)*

Energetische Abfallverwertung in Kraftwerken: Kohlekraftwerke besitzen einen Feuerungswirkungsgrad von > 90 % und sind damit nach § 6 KrW-/AbfG als Verwertungsanlage zugelassen [6]. Die Rostfeuerung kommt nur noch in wenigen Einzelfällen bzw. Altanlagen (Industriekraftwerke, Fernwärmeheizwerke) zum Einsatz, eignet sich aber insbesondere für die Verbrennung von Altholz. Bei neueren Kraftwerken mit Wirbelschichtverbrennung und insbesondere mit Schmelzkammer- bzw. Staubfeuerung muß ein relativ großer Aufwand für die Konditionierung der Abfälle betrieben werden, damit diese bei hinreichender Anlagenverfügbarkeit einsetzbar sind [7][1].

Durch den Einsatz des Klärschlamms, mit einem Anteil von 5-25 % an der Feuerungswärmeleistung erhöht sich der Ascheanfall um das zwei bis fünffache, wobei die Qualität der anfallenden Aschen nicht nachteilig beeinflußt werden [8]. Vergleichsmessungen in Steinkohlekraftwerken (Düsseldorf Lauswald [9], Walheim bei Heilbronn [10]) ergaben, daß bei der Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken mit Schmelzkammerfeuerung mit einem Anteil von 5 bis 10 % an der Feuerungswärmeleistung – trotz zum Teil erhöhter Schwermetallgehalte gegenüber der Kohle – bei Verwendung einer modernen Rauchgasreinigung[2] keine signifikant erhöhten Schwermetallemissionen auftreten.

Energetische Abfallverwertung in Zementwerken: Zementwerke besitzen einen Feuerungswirkungsgrad von 80-90 % [11] und sind damit nach § 6 KrW-/AbfG als Ver-

[1] i. N. = im Normzustand bzw. bei 0 °C (273 K) und 1013 hPa im trockenen Zustand

[2] Elektrofilter, Rauchgasentschwefelung mit einer Kalksteinsuspension, katalytische Entstickung

wertungsanlage zugelassen. Zement[3] besteht aus feingemahlenen anorganischen Verbindungen und ist ein hydraulisches Bindemittel, das mit Wasser sowohl an der Luft als auch unter Wasser selbstständig erhärtet und dauerhaft fest bleibt. Das Zwischenprodukt Zementklinker, das durch Brennen bzw. Sintern eines Rohstoffgemisches aus Kalk, Ton, Mergel und ggf. Sekundärrohstoffen bei über 1400 °C entsteht, besteht hauptsächlich aus Calciumoxid (CaO), Siliciumdioxid (SiO_2), Aluminiumoxid (Al_2O_3), Eisenoxid (Fe_2O_3) und geringen Mengen von Magnesiumoxid (MgO) [12]. Als Regelbrennstoffe werden dabei überwiegend Stein- (ca. 50 %) und Braunkohle (ca. 32 %) und in geringen Mengen auch Heizöl (ca. 5 %) und Erdgas (< 1 %) verwendet, den restlichen Anteil von ca. 13 % stellen Ersatzbrennstoffe dar [11].

Die Zementproduktion ist ein Stoffumwandlungsverfahren, das keine festen Rückstände aufweist. Alle festen Bestandteile dieses Prozesses werden in das Zwischenprodukt Zementklinker mit eingebunden und tragen zu seinen wertgebenden Eigenschaften bei. Auch die Aschen der Primär- und Sekundärbrennstoffe werden nach ihrem Ausbrand in das Produkt mit eingebunden. Damit der Zement der Zementnorm (DIN 1164) entspricht, darf die Rohmaterialzusammensetzung (einschließlich der verwendeten Brennstoffe) nur geringe Schwankungen aufweisen [11].

Zementklinker werden heute überwiegend nach dem Trockenverfahren in Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern (sog. Wärmetauscheröfen) gebrannt [11]. Der energieintensive Zementbrennprozeß erfolgt dabei in zwei Stufen (s. Abb. B–2):

- Die Entsäuerung (Calcinierung) des Kalks zu Calciumoxid bzw. das Austreiben von Kohlendioxid im Calcinator bei ca. 850 °C (Sekundärfeuerung) und
- die Sinterung des Klinkers im Drehrohrofen bei Temperaturen um 1450 °C (Primärfeuerung),

wobei – je nach Anlage – bis zu 60 % des gesamten Brennstoffenergiebedarfs für die Sekundärfeuerung verbraucht wird [11].

Die Rauchgasreinigung selbst erfolgt in einem Zementwerk im Prozeß durch den Kontakt der Rauchgase mit dem Rohmehl, wobei saure Gasbestandteile und weniger flüchtige Schwermetalle angelagert und zum größten Teil in den Zement eingebunden werden, sowie durch einen nachgeschalteten Elektrofilter zur Staubabscheidung [13]. Der Filterstaub enthält ebenfalls angelagerte Reststoffkomponenten (allerdings auch Schadstoffe insbesondere Schwermetalle) und wird dem Rohmehl oder dem Zementklinker bei der Mahlung zugemischt.

[3] In Deutschland sind derzeit 12 Zementarten zugelassen; der am häufigsten verwendete Zement ist der sog. Portlandzement (4-8% Al_2O_3, 61-69 % CaO, 1-8 % Fe_2O_3, < 5 % MgO, 18-24 % SiO_2) [12]

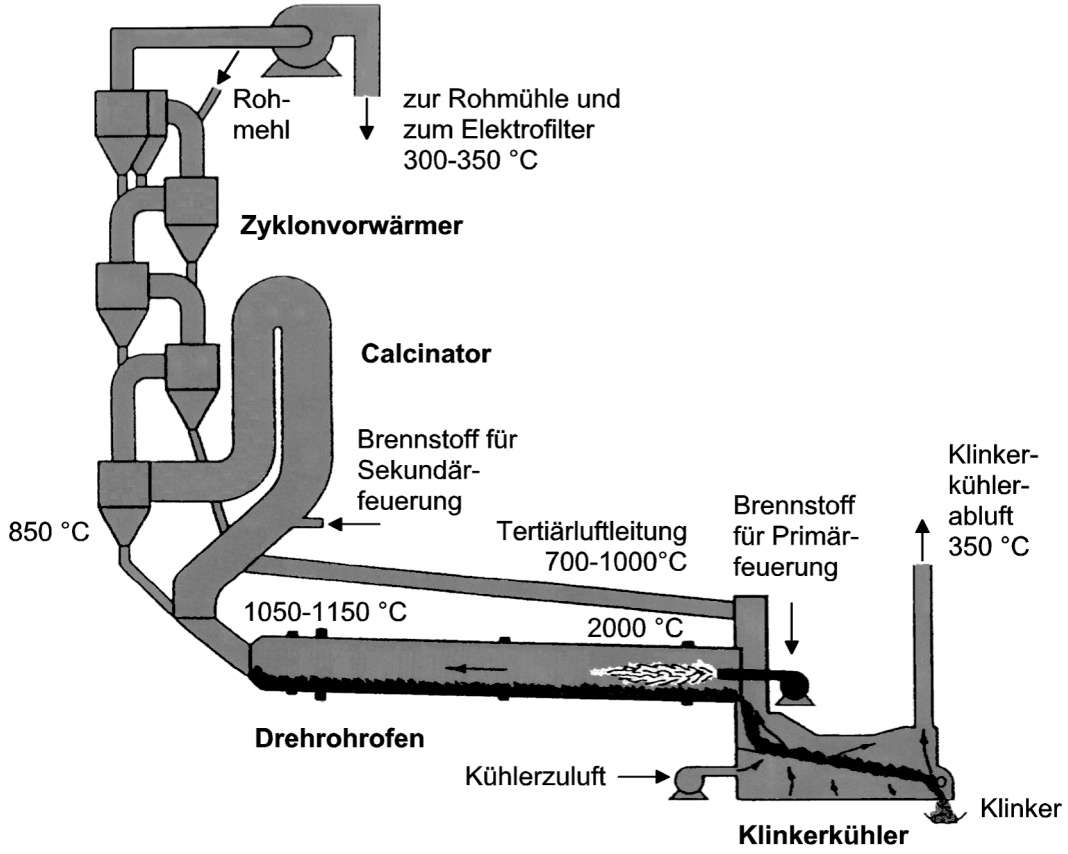

Abb. B–2: Zementherstellung im Drehrohrofen mit Zyklonvorwärmer und Vorcalciniereinrichtung nach [11]

Bei den weniger flüchtigen Schwermetallen kommt es bei der Mitverbrennung bzw. energetischen Verwertung zur weitgehenden Verlagerung ins Produkt. Es ist daher zu prüfen, ob diese Verlagerung eine Anreicherung im Produkt bedeutet und daraus humantoxikologische oder ökologische Risiken entstehen könnten. So hat bereits ein erhöhter Gehalt von Chrom, das im Zement als Chromat vorliegt, in Verbindung mit der stark alkalischen Wirkung von Zement in der Vergangenheit unter Maurern und Betonwerkern die anerkannte Berufskrankheit „Maurerekzem“ hervorgerufen. Trotz eines Vorsorgewertes von 2 mg Chromat pro Kilogramm Zement übersteigt die Mehrzahl der in Deutschland erhältlichen Portlandzemente diesen Wert zum Teil erheblich [1]. Neben Chrom zählen auch Kobalt, Nickel, Mangan und Kupfer zu den möglichen Auslösern einer Zementdermatitis, wobei Kobalt möglicherweise einen sensibilisierenden Faktor darstellt [12].

Festbettvergasung zu Synthesegas bzw. Methanol: Im Sekundärrohstoff-Verwertungszentrum (SVZ) Schwarze Pumpe/Niederlausitz werden brikettierte[4] Kunststoffabfälle gemeinsam mit Braunkohle unter Zugabe von Sauerstoff und Wasserdampf im Festbett bei 800-1.300 °C und einem Druck von 25 bar vergast. Das entstehende Synthesegas, das vorwiegend Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan und Wasserstoff aber auch Teere, Mittel- und Leichtöl enthält, wird schockartig abgekühlt (Quenche) und kann in einem weiteren Prozeßschritt zu Methanol verarbeitet oder energetisch zur Erzeugung von Strom und Wärme genutzt werden. Die nicht umsetzbaren, mineralischen Bestandteile werden zu einer glasartigen Schlacke geschmolzen, die im Straßenbau eingesetzt werden kann [14].

Hydrierung von Kunststoff zu Syntheseöl und Synthesegas: Dazu wurde die Sumpfphasenhydrierung, die für den Einsatz von Kohle und Schweröl konzipiert wurde, 1993 durch eine vorgeschaltete Depolymerisationsstufe erweitert, um auch Kunststoffe in der Kohleöl-Anlage der Veba Oel AG in Bottrop verarbeiten zu können.
In der Hydrieranlage werden agglomerierte Mischkunststoffe erhitzt, bis sie bei über 400 °C schmelzen und mittels Hochdruckpumpen auf einen Druck von 150-200 bar verdichtet werden können. Zuvor werden Feststoffe und aus PVC entstehender Chlorwasserstoff (HCl) abgetrennt; der Chlorwasserstoff wird zurückgewonnen und evtl. noch vorhandene Chloranteile zu Calciumchlorid ($CaCl_2$) umgesetzt und entfernt [15]. Bei einer Reaktionstemperatur von 440-480 °C brechen die Molekülstrukturen der Kunststoffe auseinander (Depolymerisierung). Die entstehenden, gasförmigen Kohlenwasserstoffbruchstücke werden in einer weiteren Stufe mit Wasserstoff und einem Katalysator in Verbindung gebracht (Hydrierung), wobei sich Wasserstoff an die Bruchstellen anlagert. Die erhaltenen Produkte werden abgekühlt, auf Normaldruck entspannt und feste Bestandteile abgetrennt. Aus einer Tonne Kunststoffagglomerat werden so 800 kg synthetisches Rohöl (Syncrude) gewonnen. Als Nebenprodukte entstehen Hydrierbitumen, das in der Kokerei als Bindemittel verwendet wird, und ein heizwertreiches Gasgemisch aus Methan, Ethan, Propan, Butan, Pentan und Hexan, das energetisch verwertet wird.
Die Kohleöl-Anlage in Bottrop wurde Ende 1999 stillgelegt, nachdem die Duales System Deutschland AG den Vertrag aus Wirtschaftlichkeitsgründen gekündigt hatte [16].

KAKTUS-Verfahren: Dabei wird der Inhalt der gelben Säcke nach der Gebindeöffnung über einen Magnetscheider in einen Pulper bzw. Stofflöser gegeben, der zusammen mit der Reinigungsstufe das Herzstück der Anlage bildet. Die so gewonnenen Produkte sind gewaschene Kunststoffe vermischt mit Vollaluminium bzw. Alumini-

[4] Kunststoffbriketts werden aus Mischkunststoffen durch Pressen hergestellt, weisen Korngrößen von 2 bis 8 cm und finden ausschließlich Verwendung zur Vergasung bzw. Methanolerzeugung

um/Kunststoff-Verbunden, eine wäßrige Papierfasersuspension, die getrennt erfaßt und getrocknet wird, und sogenannte Schwerstoffe, das sind nichtmetallische Verunreinigungen, die sich am Boden absetzen und entfernt werden müssen [17]. Die Kunststoffe und das Aluminium werden zerkleinert und einer Trennzentrifuge zugeführt. Dort wird der PE/PP-Anteil (Polyolefine) vom Rest getrennt. Durch Wirbelstromabscheidung wird das Vollaluminium und der Aluminium/Kunststoffverbund separiert. Abschließend werden die schweren Kunststoffe mittels einer elektrostatischen Scheidung vom PVC befreit, so daß als Reststoffe des Systems nur noch der Schlamm aus der Brauchwasseraufbereitung und nichtmetallische Anteile aus dem Pulper-Schwergut übrig bleiben.

KERIUM-Anlage: Dabei wird im ersten Schritt der komplette gelbe Sack geshreddert, um danach über eine Sortiertrommel organische Stoffe, Sand, und Glasbruch auszusortieren. Mit Hilfe eines Fallstromwindsichters wird in eine leichtere und schwerere Fraktion unterschieden [18]. Die Leichtfraktion wird trocken weiterverarbeitet und enthält überwiegend Folien und einen geringen Papieranteil, die gemeinsam zermahlen und in einem Abscheidezyklon zu PE-Agglomerat und Papier getrennt werden. Die Schwerfraktion passiert einen Überband-Magnetscheider und durchläuft eine Naßschneidmühle, einen Wirbelstromabscheider für die Aluminiumgewinnung und einen Friktionswäscher zur Trennung von Papier und Aluminium in Getränkeverbunden. Anschließend werden die verbleibenden Stoffe noch durch drei Hydrozyklone geschleust und dabei die Kunststoffe PVC, PET, PA, PC und PS durch Zentrifugalkräfte abgetrennt. Übrig bleibt ein PE-/PP-Gemisch, das in werkstofflichen Verfahren weiterverwendet werden kann.

Kompostierung (Aerobe Verfahren): Aerobe Verfahren zur biologischen Abfallbehandlung stellen ein 3-Phasen-System dar, in dem die abbaubare Organik, Wasser und Sauerstoff in geeigneter Zusammensetzung vorliegen müssen, um optimale Lebensbedingungen für die Mikroorganismen (chemotrophe-, chemoorganoheterotrophe Organismen) zu schaffen, die am Abbau des Substrates teilnehmen. Bei der Kompostierung werden die abbaubaren organischen Bestandteile der Trockensubstanz (oTS) mit Hilfe von Sauerstoff vollständig in Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) umgewandelt, gleichzeitig wird Wärme freigesetzt (ca. 33–41 kJ/g Kohlenstoff), die sich als Selbsterhitzung bemerkbar macht [19].

Da der zu kompostierende Abfall neben der oTS auch mineralische Anteile enthält, muß der Biomüll vor der Rotte von Störstoffen befreit, zerkleinert und homogenisiert werden, damit die Mikroorganismen die organischen Bestandteile möglichst gut erreichen können. Für den Rottevorgang selbst müssen ein ausreichender Wassergehalt (40–65 %) und ein ausreichendes Luftporenvolumen (ca. 30 %) vorhanden sein, da die Mikroorganismen ihre Nährstoffe nur in gelöster Form aufnehmen können und ausreichend mit Sauerstoff versorgt sein müssen. Voraussetzung für einen guten Abbau der organischen Substanz ist ein ausgewogenes Nährstoffverhältnis im Substrat; besonders wichtig ist

das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N-Verhältnis), das zu Anfang bei ca. 30-35 zu 1 liegen und nach der Rotte einen den Kulturböden entsprechenden Wert von ca. 15-20 zu 1 aufweisen sollte [20]. Da die verschiedenen Abfälle jeweils unterschiedliche C/N-Verhältnisse besitzen, kann durch geeignete Mischung von Abfällen (Altpapier C/N=300, Küchenabfälle C/N=25, Klärschlamm C/N=15, Weizenstroh C/N=128, Sägemehl C/N=500) ein Rottegut vorbereitet werden, das ein optimales C/N-Verhältnis aufweist.

Der Sauerstoffbedarf für die ablaufenden biochemischen Reaktionen beträgt ca. 4 l O_2/g abbaubare Substanz. Um ausreichend Sauerstoff zur Verfügung zu stellen, dürfen unbelüftete Mieten nicht zu hoch aufgeschüttet werden (die Eindringtiefe von Sauerstoff durch Diffusion beträgt ca. 70 cm) oder die Mieten müssen belüftet werden, andernfalls kann es zu Faul- und Gärungsprozessen mit Geruchs- und Methanemissionen kommen.

Die höchste Umsetzungsrate im Rottegut wird bei einer Temperatur von ca. 60 °C erreicht. Wenn die Temperatur von > 55 °C über einen Zeitraum von ein bis drei Wochen gehalten wird, gilt der Kompost als hygienisiert. Oberhalb einer Temperatur von 75 °C kann es zu einer Sterilisierung des Kompostes kommen, so daß die Umsetzung der organischen Substanz unterbunden wird. Die Temperatur der Rotte muß daher durch verfahrenstechnische Maßnahmen (Isolierung, Belüftungssteuerung, Abdeckung usw.) kontrolliert bzw. beeinflußt werden.

MBA zur Ablagerung: Mit der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung zur Ablagerung sollen der organische Kohlenstoff im Abfall weitgehend abgebaut, das Abfallvolumen reduziert und der Abfall biologisch so stabilisiert werden, daß der verbleibende Rest umweltverträglich abgelagert werden kann.

In diesen Anlagen wird eine mehrstufige Vor- und Nachzerkleinerung mit Siebung, Fe-Abscheidung und Homogenisierung durchgeführt [21]. Durch diese Aufbereitungsschritte wird sichergestellt, daß in der Rotte eine weitgehende biologische Umsetzung erfolgen kann, um die auf der Deponie zu erwartenden Emissionen auf ein mit biologischen Mitteln zu erreichendes Minimum beschränken zu können.

Nach der biologischen Behandlung (über einen Zeitraum von mehr als 3 Monaten) kann der dann nicht weiter abbaubare Rotterückstand in der Regel die Parameter der TA Siedlungsabfall – bis auf TOC und Glühverlust – einhalten und ist somit bedeutend reaktionsträger als unbehandelter Abfall. Die zu erwartenden Gasemissionen weisen ein Restpotential von ca. 10 % oder 5-50 m³/t TS auf [22]. Das Sickerwasser wird ebenfalls von organischen Bestandteilen entfrachtet und durch hochverdichteten Einbau mengenmäßig verringert. Trotzdem kommt es bei MBA-Rückständen zu nicht vernachlässigbaren Emissionen an Deponiegas- und Sickerwasser.

MBA zur Heizwertsteigerung und energetischen Verwertung: Das Konzept der biologischen Trocknung bzw. Trockenstabilisierung von Restabfällen entspringt der speziellen Anforderung des KrW-/AbfG an den Mindestheizwert zur energetischen Verwertung von Abfällen. Ziel dieser Konzepte ist es, durch biologische Abbauprozesse eine Reduzierung des Wassergehaltes auf < 15 % Restfeuchtegehalt (ohne wesentlichen Abbau organischen Materials) zu erzielen, um den Heizwert von Restabfällen auf über 11.000 kJ/kg zu steigern und diese einer energetischen Verwertung zuführen zu können.

Durch eine einwöchige biologische Vorbehandlung bei gleichzeitigem Wasseraustrag (ca. 25 % Gewichtsreduzierung) und anschließender Absiebung der Leicht- bzw. Grobfraktion läßt sich Brennstoff aus Müll (BRAM) bzw. das sogenannte Trockenstabilat erzeugen, der einen Heizwert von bis zu 18.000 kJ/kg besitzt [23].

Nach Abtrennung von Metallen und mineralischen Bestandteilen kann der biologisch stabilisierte Abfall zwischengelagert und nach Bedarf in einer eigenen Verbrennungsanlage oder in Industriefeuerungen verbrannt werden. Das Brandverhalten der vorbehandelten Abfälle ist als gut zu bewerten [24]. Bei bestehenden Müllheizkraftwerken müssen Anpassungen in der Verfahrenstechnik, vor allem bei den Aufgabetrichtern und den zulässigen Heizwerten, vorgenommen werden [24].

MBA zur stoffstromspezifischen Behandlung: Bei der stoffstromspezifischen Restabfallbehandlung soll durch mechanische Aufbereitung und Abtrennung einer Grobfraktion zur stofflichen bzw. energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung die Menge und das Volumen des Restabfalls reduziert und für einen nachfolgenden biologischen Abbau homogenisiert werden. Die sich anschließende biologische Behandlung kann aerob – eine Fraktion < 40 mm kann auch anaerob in einer Vergärungsanlage [21] – durchgeführt werden und erreicht eine Gewichtsreduktion von ca. 25-40 % (insbesondere Wasserverlust) innerhalb ca. 3 bis 6 Wochen, wobei gleichzeitig eine biologische Stabilisierung des Restabfalls stattfindet. Nach Bedarf kann nach der Rotte nochmals eine mechanische Aufbereitung erfolgen, bei der nochmals eine heizwertreiche Grobfraktion zur energetischen Verwertung oder thermischen Behandlung abgetrennt werden kann.

Dieses Konzept wird häufig in Regionen mit geringem Müllaufkommen in Verbindung mit einer dezentralen Abfallbehandlung diskutiert, da es einen flexiblen Einsatz und Betrieb erlaubt und – entweder durch thermische Behandlung des mengenmäßig reduzierten Rotterückstandes oder mit der in Aussicht gestellten Änderung der TA Siedlungsabfall bzw. in Verbindung mit einem Gleichwertigkeitsnachweis – einen regulären Weiterbetrieb der Anlage auch über das Jahr 2005 hinaus ermöglicht.

Müllverbrennung in der Wirbelschicht: Die Wirbelschichttechnik kommt seit vielen Jahren bei chemischen Prozessen zum Einsatz und hat sich im Bereich der Feuerungs-

technik bewährt. In neuerer Zeit wird sie auch zur Hausmüllverbrennung insbesondere in Japan (> 60 Anlagen) eingesetzt. In Europa arbeiten derzeit 6 Anlagen mit Wirbelschichttechnik (Lindköpping, Göteborg und Östersund (Schweden), Amsterdam/Niederlande, Macomer/Italien und bei Oslo/Norwegen). In Deutschland wird die Wirbelschichttechnik auf dem Gebiet der Reststoffbehandlung für Spezialanwendungen wie die Verbrennung von kontaminiertem Holz und Böden sowie bei der Klärschlammverbrennung angewandt. Im September 1998 nahm in Österreich die erste privat betriebene Wirbelschichtverbrennungsanlage (ZWS der Lurgi AG) zur Abfall- und Reststoffverwertung ihren Probebetrieb auf, die alle österreichischen Grenzwerte für Müllverbrennungsanlagen (LRV-K) einhält. Der Probebetrieb erstreckt sich – gemäß österreichischem Abfallwirtschaftsgesetz unter laufender Überwachung durch die Behörde und Fachleute – über drei Jahre [25].

Müllverbrennung mit Rostfeuerung: Die Verbrennung auf dem Rost ist derzeit das Standardverfahren, das sich in Deutschland an 58 Standorten bewährt hat. Weltweit werden mindestens 500 Anlagen mit Rostfeuerung betrieben.

Paraffin aus Kunststoff (PARAK-Verfahren): Das PARAK-Verfahren, das in der Anlage des Paraffinwerks Webau entwickelt wurde, beruht auf einer Pyrolyse von Kunststoffen (Cracken). Dazu werden gesäuberte und zerkleinerte Folienkunststoffe bei Temperaturen von 350-390 °C (unter Luftabschluß) verflüssigt und anschließend einem kombinierten Spalt- und Destillationsprozeß bei 420-430 °C unterworfen. Aus dem Destillat erhält man neben der gewünschten Paraffinfraktion, eine flüssige, leichtsiedende Fraktion, die in Raffinerien zu Schmieröl weiterverarbeitet wird. Darüber hinaus entstehen sogenannte Spaltgase, die prozeßintern zur Wärmeerzeugung energetisch genutzt werden. Die Paraffinfraktion wird unter Zusatz von Lösungsmitteln gereinigt. Das abgetrennte, schwefelfreie Öl kann in Raffinerien zu Benzin und Heizöl weiterverarbeitet und das verwendete Lösungsmittel redestilliert und erneut eingesetzt werden. Zurück bleibt ein Gemisch aus Paraffin und Wachs[5] mit einer Ausbeute von ca. 50 %.

RCP-Verfahren: Das RCP-Verfahren (Recycled Clean Products) ist ein neuartiges Kombinationsverfahren zur Behandlung von Haus- und Gewerbemüll, bestehend aus Pyrolyse, Schmelzreaktor und Gas/Sand-Wirbelschicht [26]. Das Verfahren besteht aus Komponenten des Duotherm- und Holderbank-Schmelz-Redox-Verfahrens (beide Von Roll), die zu einem neuartigen Abfallverwertungsverfahren kombiniert wurden [27]. 1995 wurde mit dem Betreiber der Müllverbrennungsanlage Bremerhaven ein Vertrag zur Integration des RCP-Verfahrens als zusätzliche Linie mit einem Durchsatz von 6 t/h

[5] Paraffin ist ein Gemisch aus gesättigten, aliphatischen Kohlenwasserstoffen mit flüssiger, wachsartiger oder fester Konsistenz; Wachse sind Verbindungen aus Fettsäuren und langkettigen Alkoholen.

bzw. 45.000 t/a in die bestehende MVA unterzeichnet. Diese Linie hat 1997 den Probebetrieb aufgenommen und im März 1998 die Genehmigung zum Dauerbetrieb erhalten. Ziel des RCP-Verfahrens ist es, Restabfälle weitgehend rückstandsfrei in direkt verwertbare Produkte unter Nutzung der freiwerdenden Energie umzuwandeln.

Schwel-Brenn-Verfahren: Das Schwel-Brenn-Verfahren der Firma Siemens stellt eine Kombination von Pyrolyse und anschließender Hochtemperaturverbrennung dar. Ziel dieses Konzeptes ist die weitgehend rückstandsfreie Umwandlung des Restabfalls in verwertbare Stoffe sowie die Nutzung von freiwerdender Energie.

1994 wurde die erste großtechnische Anlage mit einer Durchsatzleistung von 100.000 t/a in Fürth genehmigt, die im Februar 1997 den Erprobungsbetrieb aufnahm, der jedoch wegen technischer Probleme (u.a. mit der Konversionstrommel) mehrfach unterbrochen werden mußte. Im Februar 1999 wurde die Anlage stillgelegt. Derzeitige Aktivitäten zur Schwel-Brenn-Technik beschränken sich auf die Lizenznehmer Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. und Takuma Co., Ltd. in Japan.

Stoffliche Verwertung von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen: Eisen kommt in der Natur als Erz in der Form von Eisenoxid, Eisensulfid oder Eisencarbonat vor [5]. Um daraus metallisches Eisen zu gewinnen ist eine Reduktion, d.h. der Entzug von Sauerstoff bzw. Schwefel erforderlich, der bei Temperaturen oberhalb von 600 °C durch Kohlenmonoxid und Wasserstoff im Hochofen erfolgt. Als Kohlenstofflieferant dienen normalerweise Koks, Schweröl oder Erdgas. Im Stahlwerk Bremen und in anderen Stahlwerken wird nun Kunststoff (Kunststoffagglomerat [6]) verwendet, um Schweröl teilweise zu ersetzen. In der Praxis ergibt sich – bei einem Substitutionsgrad von 30 % Schweröl – ein durchschnittlicher Verbrauch von 374 kg Koks, 70 kg Schweröl und 30 kg Kunststoff pro Tonne Roheisen [5][28].

Der agglomerierte Kunststoff wird in die Vergasungszone des Hochofens eingebracht und bei den dort herrschenden Temperaturen von ca. 2000 °C vollständig in Kohlenmonoxid (CO) und Wasserstoff (H_2) umgewandelt. Das Kohlenmonoxid reduziert das Eisenoxid zu metallischem Eisen und wird dabei zu Kohlendioxid oxidiert, das mit dem Koks abermals zu Kohlenmonoxid reagiert (Boudouard-Reaktion).

Im Bremer Stahlwerk werden 70.000 t Kunststoffabfälle pro Jahr als Reduktionsmittel verwertet und dadurch die gleiche Menge Schweröl ersetzt [29]. Durch die erzielte Einsparung von 130 DM/t für das Schweröl ist das Verfahren bei einem Annahmepreise für den Kunststoff von ca. 200 DM/t wirtschaftlich [30]. Bei dieser Reaktion werden aller-

[6] standardisierter, rieselfähiger Mischkunststoff mit einer Korngröße bis zu 10 mm, einem Aschegehalt unter 4,5 %, einem Chlorgehalt von bis zu 2 % und einer Schüttdichte von mindestens 300 kg/m^3

dings nicht nur die stofflichen Eigenschaften sondern auch der Energieinhalt des Kunststoffs genutzt: Der Energienutzungsgrad beträgt ca. 80 %, wobei ca. 30 % der Energie thermisch – also energetisch - und ca. 50 % chemisch – also rohstofflich - zur Reduktion des Eisens genutzt werden [31][32]. *(s. auch Energetische Abfallverwertung im Hochofen)*

Thermoselect-Verfahren: Das Thermoselect-Verfahren stellt als kombiniertes, unterbrechungsloses Ent- und Vergasungsverfahren mit integrierter Direkteinschmelzung eine relativ junge Entwicklung im Bereich der thermischen Abfallbehandlung dar. Erste Versuche erfolgten 1989, und bereits 1992 konnte eine großtechnische Pilotanlage (4,2 t/h) in Fondotoce (Italien) in Betrieb genommen werden [33]. Seit 1994 besitzt die Anlage eine Dauerbetriebsgenehmigung [34]. 1994 entschieden sich der Abfallentsorgungsverband Ansbach [35] und 1995 die Stadt und der Landkreis Karlsruhe [36] für den Bau einer Thermoselect-Anlage mit einer Kapazität von 100.000 bzw. 225.000 t/a. Die Anlage in Ansbach befindet sich im Bau und die Karlsruher Anlage sollte Anfang 1999 ihren regulären Betrieb aufnehmen. Nach verschiedenen Problemen im Probebetrieb, u.a. mit der Krananlage und dem Kühlsystem, wurde der Termin für die Übergabe an den Betreiber mehrfach verschoben worden [37]. Das Regierungspräsidium Karlsruhe hat inzwischen einen befristeten Regelbetrieb bis Ende März 2000 genehmigt [38].

Vergärung (Anaerobe Verfahren): Bei anaeroben Verfahren erfolgt die Umsetzung organischer Substanzen unter Sauerstoffabschluß zu Kohlendioxid und Methan mit der Hilfe von Bakterien und deren Enzyme in vier Stufen: Die Makromoleküle werden in der ersten Stufe in ihre niedermolekularen Bestandteile zerlegt, die in Lösung (Hydrolyse) gehen, und in der zweiten Stufe (Vergärung und Säurebildung) von verschiedenen (acidogenen) Bakterien resorbiert und zu vorläufigen Gärendprodukten umgewandelt werden (hauptsächlich Carboxylsäuren wie Acetat, Propionat und Butyrat [19]). In der folgenden Stufe der Acetogenese (Essigsäurebildung) werden die in der Vergärungsstufe gebildeten organischen Säuren und Alkohole zu den methanogenen Nährstoffen Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid, umgewandelt, die in der vierten Stufe (Methanogenese) durch Methanbildner mit molekularem Wasserstoff zu CH_4 (Methan) umgesetzt werden.

Das entstehende Faulgas enthält normalerweise neben CO_2 (30-40 %) und CH_4 (60-70 %) auch noch andere Gase (z.B. H_2, NH_3 und H_2S) in geringen Mengen [39]. Die vierte Stufe ist aufgrund des langsamen Bakterienwachstums der geschwindigkeitslimitierende Schritt beim anaeroben Abbau. Für die Vergärung sehr gut geeignet sind feuchte nährstoffreiche und mit schwacher Struktur versehene Abfälle und bei leicht aufzuschließenden, niedermolekularen Verbindungen (Küchenabfälle) verläuft der Abbau schneller und vollständiger als bei hochmolekularen Biopolymeren (Pflanzenabfälle). Auf die Vergärung von Abfällen wirken z.B. Antibiotika, Desinfektionsmittel,

Schwermetalle und Salze hemmend bzw. toxisch und es muß daher darauf geachtet werden, daß die zu behandelnden Abfälle nur wenige dieser Hemmstoffe enthalten [20].

Von den Temperaturbereichen, in denen die methanogene Vergärung eine erhöhte Gasproduktion aufweist, wird in der Abfallwirtschaft am häufigsten der mesophile Bereich (32-50 °C) genutzt, da bei höheren Temperaturen (thermophiler Bereich 50-70 °C) die Vergärung biologisch instabiler abläuft und bei geringeren Temperaturen (psychrophiler Bereich um 10 °C) die Reaktionen zu langsam verlaufen, um sie in der Abfallwirtschaft einsetzen zu können. Da bei der Vergärung keine Wärme freigesetzt wird, muß die Reaktionstemperatur durch geeignete Heizungsverfahren von außen vorgegeben werden. Dafür kann das erzeugte Gas genutzt werden.

Die Reststoffe aus der Vergärung weisen unmittelbar nach Austritt noch erhebliche Geruchsintensitäten auf, die jedoch innerhalb eines Tages bei der Umstellung vom anaeroben zum aeroben Zustand stark abklingen [40]. Die Gärreststoffe können entweder direkt als Dünger ausgebracht werden oder in einer belüfteten Nachrotte zu Kompost verarbeitet werden. Durch die geringeren Geruchs- und Schadgasemissionen der Vergärungsverfahren können im Gegensatz zu Kompostierungsanlagen (Abstand > 500 m) auch Standorte mit angrenzender Bebauung genutzt werden.

Werkstoffliches Recycling von Kunststoffen: Zum werkstofflichen Recycling der gebrauchten Kunststoffverpackungen kommen die auch in der Produktion von Neuware üblichen Verfahren zum Einsatz [41]: Sortenreine Kunststoffabfälle können in Extrudern zu neuen Produkten oder zu Granulat[7] bzw. sogenanntem Regranulat verarbeitet werden. In Folienblasanlagen entstehen aus gebrauchten Folien, Beuteln und Säcken aus Polyethylen oder Polypropylen wieder neue Folien bzw. Beutel oder Säcke.

In Spritzgußanlagen entstehen in mehreren Arbeitsgängen beispielsweise Paletten, Reitbodenmatten oder Abfallbehälter. Mischkunststoffe lassen sich im Preßverfahren direkt zu Produkten, wie z.B. Platten, Paletten etc., verarbeiten, wobei allerdings wegen der unterschiedlichen Schmelzpunkte der verschiedenen Kunststoffe keine dünnwandigen Produkte hergestellt werden können.

Beim Intrusionsverfahren können auch nicht geschmolzene Partikel (auch kleinere Verunreinigungen wie Sand oder Glas) in die Kunststoffschmelze eingebettet und daraus Produkte wie Verkehrsinseln, Rasengittersteine, Fensterprofile etc. geformt werden.

[7] kleine, gleichmäßig zylindrisch oder linsenförmig geformte, rieselfähige Kunststoffteilchen

Literaturverzeichnis zu Anhang B

[1] Lahl, U.; Zeschmar-Lahl, B.; Dehoust, G.; Lohse, J.; Sander, K.: Zu kurz gedacht – Bei der Mitverbrennung von Restabfällen in Industrieanlagen überwiegen in der Regel die ökologischen Nachteile. Müllmagazin **10** (1997) Nr. 1, S. 78-84

[2] Pruckner, E.: Pro und Contra: Recycling, Verwertung, thermische Nutzung. In: VDI (Hrsg.): Verwertung von Kunststoffabfällen. VDI-Berichte Nr. 1288, S. 1-11, VDI-Verlag, Düsseldorf 1996

[3] Langer, B.: Hitzige Reaktionen - Die DSD-Kunststoffvergasung im Hochofen kann sich zu einem Hemmnis für werkstoffliche Verwertungsverfahren entwickeln. Müllmagazin **8** (1995) Nr. 4, S. 69-71

[4] Wirsig, G.: Kunststoffe im Hochofen entsorgen. Umwelt **25** (1995) Nr. 11/12, S. 508-509

[5] Lahl, U.: Der Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen – ein Rückblick. Müll und Abfall **27** (1995) Nr. 5, S. 309-313

[6] Bierbaum, K.; Greif, H.-G.: Mitverbrennung von Produktionsrückständen und Klärschlämmen in Braunkohlekesselanlagen. BWK/TÜ/Umwelt-Special Oktober 1996, S. S18-S26

[7] Bündnis 90/Die Grünen (Hrsg.): Gewerbeabfälle in Baden-Württemberg – Wege und Verbleib. Studie erstellt von BZL und DPU im Auftrag der Grünen im Landtag von Baden-Württemberg, Suttgart, Nov. 1997

[8] Tauber, C.; Klemm, J.; Schönrok, M.: Mitverbrennung kommunaler Klärschlämme in Steinkohlekraftwerken. Enregiewirtschaftliche Tagesfragen **45** (1995) Nr. 11, S. 725-733

[9] Hansmann, G.; Mitmann, H.; Lindert, M.; Görtz, W.: .: Mitverbrennung von Klärschlämmen in Steinkohlekraftwerken am Beispiel Düsseldorf Lausward. In: Fortbildungszentrum Gesundheits- und Umweltschutz Berlin e.V. (Hrsg.): Mitverbrennen von Abfällen - eine sinnvolle Entsorgungsmöglichkeit? 17. Seminar im Rahmen der UTECH ´97 am 17. Februar 1997 in Berlin

[10] Stellungnahme des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg: Klärschlammverbrennung im Kohlekraftwerk Walheim. Landtagsdrucksache 12/1328 vom 16. April 1997

[11] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ): Beton – Hart im Nehmen, stark in der Leistung, fair zur Umwelt. Umweltverträglichkeit von Zement und Beton, Herstellung, Anwendung und Sekundärrohstoffeinsatz. Die Deutsche Zementindustrie informiert. VDZ, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf 1996

[12] Reiter, B.; Stroh, R.: Behandlung von Abfällen in der Zementindustrie. Monographien Band 72, Umweltbundesamt, Wien, Dezember 1995

[13] Kreft, W.: Thermische Reststoffentsorgung im Zementwerk – ein Vergleich mit anderen Verfahren der Abfallbehandlung. Zement-Kalk-Gips 48 (1995) Nr. 1, S. 1-7

[14] Buttker, B.: Betriebserfahrungen zur Vergasung von Hausmüll und anderen Abfällen im Sekundärrohstoffverwertungszentrum Schwarze Pumpe. In: Verein zur Förderung des Institutes WAR e.V. (Hrsg.): Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen. 54. Darmstädter Seminar „Abfalltechnik“ am 6. Februar 1998, Schriftenreihe WAR Nr. 105, TU Darmstadt 1998

[15] Richter, E.: Verwertung von Kunststoffabfällen. Umwelt **27** (1997) Nr.3, S.49-53

[16] Veba Oel AG (Hrsg.): Veba Oel und DSD beenden Zusammenarbeit im Kunststoff-Recycling. Kohleöl-Anlage stellt Betrieb bis Ende 1999 ein. Pressemitteilung vom 24. August 1999

Duales System Deutschland AG (Hrsg.): Vertrag mit Kohleöl-Anlage wird beendet. Pressemitteilung vom 24. August 1999

[17] Der Grüne Punkt - Gesellschaft für System Technologie mbH (Hrsg.): Die saubere Lösung. Recycling von Verpackungen und gewerblichen Altkunststoffen. Prospekt zur Pilotanlage KAKTUS, Köln 1998

[18] Anonym: Die Spreu vom Weizen trennen. Mit neuen Sortierverfahren zu wirtschaftlichem Recycling. Punkt, das Partnermagazin der Duales System Deutschland GmbH Nr. 2 (1997), S. 6-11

[19] Zachäus, D.: Grundlagen der biologischen Abfallbehandlung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Kreislaufwirtschaft. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin 1994

[20] Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.: Abfallwirtschaft. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1994

[21] Doedens, H.: Stand der Technik MBA - geschlossene Anlagen. In: Stegmann, R.; Rettenberger, G. (Hrsg.): Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik. Hamburger Berichte Nr. 12 - Abfallwirtschaft der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Economica Verlag, Bonn 1998

[22] Stegmann, R.; Hupe, K.: Anpassung der Deponietechnik an die MBV-Reststoffe. In: Stegmann, R.; Rettenberger, G. (Hrsg.): Entwicklungstendenzen in der Deponietechnik. Hamburger Berichte Nr. 12 - Abfallwirtschaft der Technischen Universität Hamburg-Harburg, Economica Verlag, Bonn 1998

[23] Franke, J.; Fricke, K.: Möglichkeiten der energetischen und stofflichen Verwertung von heizwertreichen Reststoffen aus der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung im Rahmen des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes. In: Verein zur Förderung des Institutes WAR e.V. (Hrsg.): Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen. 54. Darmstädter Seminar „Abfalltechnik“ am 6. Februar 1998, Schriftenreihe WAR Nr. 105, TU Darmstadt 1998

[24] Jager, J.; Lohf, A.; Herr, C.: Auswertung der Verbrennungsversuche zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben „Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen“. In: Verein zur Förderung des Institutes WAR e.V. (Hrsg.): Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung unter Einbindung thermischer Verfahren für Teilfraktionen. 54. Darmstädter Seminar „Abfalltechnik“ am 6. Februar 1998, Schriftenreihe WAR Nr. 105, TU Darmstadt 1998

[25] Lenzing AG (Hrsg.): Geschäftsbericht 1998. Lenzing/Österreich, 1999

[26] Anonym: Müll-Duo - RCP-Verfahren von Von Roll. Energie Spektrum **10** (1995) Nr. 11, S. 36-38

[27] Von Roll Umwelttechnik AG: Von Roll RCP-Verfahren. Standard Angebot, Zürich, April 1996

[28] Urban, A.I.; Friedel, M.: Kapazitäten thermischer Verfahren und Behandlungsanlagen. In; Urban, A.I.; Bilitewski, B.; Faulstich, M. (Hrsg.): Thermische Aballbehandlung – Entwicklung von Technik und Kosten. Verein zur Förderung der Fachgebiete Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik an der Universität Gh Kasse e.V., Kassel 1997

[29] Duales System Deutschland AG (DSD): Verpackungsrecycling – Techniken, Trends, Tendenzen. DSD, Köln, 1. Auflage Januar 1998 und 2. aktualisierte Auflage August 1998

[30] Wirsig, G.: Kunststoffe im Hochofen entsorgen. Umwelt **25** (1995) Nr. 11/12, S. 508-509

[31] Lahl, U.: Der Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen – ein Rückblick. Müll und Abfall **27** (1995) Nr. 5, S. 309-313

[32] Anonym: Begehrter Stoff - Kunststoffverwertung im Hochofen. Energie Spektrum **11** (1996) Nr. 2, S. 22-24

[33] Stahlberg, R.; Feuerriegel, U.: Thermoselect Energie- und Rohstoffgewinnung. Verfahrensgrundlagen zur unterbrechungslosen Verwertung von Restabfällen. In: Häßler, G. (Hrsg.): Thermoselect - Der neue Weg, Restmüll umweltgerecht zu behandeln. Verlag Karl Goerner, Karlsruhe 1995

Schweitzer, F. J. (Hrsg.): Thermoselect-Verfahren zur Ent- und Vergasung von Abfällen. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin 1994

[34] Reiling, W.; Burgbacher, G.; Beck, U.; Wissmann, G.: Bewertung des Thermoselect-Verfahrens. Gutachten im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Unternehmensgruppe TÜV Südwest - TÜV Energie und Umwelt GmbH, Stuttgart, Dezember 1994

[35] Anonym: Erste Thermoselect-Anlage in Ansbach. VDI-Nachrichten Nr. 31 vom 5. August 1994, S. 16

[36] Anonym: Thermoselect-Vertrag unterzeichnet. Neue thermische Müllbehandlung soll am 1. Januar 1999 aufgenommen werden. Staatsanzeiger für Baden-Württemberg vom 25. Februar 1995, S. 2

[37] Heck, M.: Ärger mit High-Tech-Kränen – Start für Thermoselectanlage Karlsruhe weiter verschoben. Stuttgarter Zeitung vom 13. April 1999, S. 7

[38] Donath, C.: Thermoselect krankt weiter – Vorerst gibt es keine Dauergenehmigung für die Anlage. Stuttgarter Zeitung vom 6. November 1999, S. 8

[39] Maurer, M.; Winkler, J.-P.: Biogas. Verlag C.F. Müller, Karlsruhe 1982

[40] Bidlingmaier, W.: Kompostierung und Vergärung, Konkurrenten oder Partner? In: Forschungs- und Entwicklungsinstitut für Industrie- und Siedlungswasserwirtschaft sowie Abfallwirtschaft (FEI) e.V. (Hrsg.): Nachhaltige Abfallwirtschaft. 73. Abfalltechnisches Kolloquium am 7. Mai 1998 in Stuttgart

[41] Deutsche Gesellschaft für Kunststoff-Recycling mbH (DKR): Wege des werkstofflichen Recyclings von gebrauchten Kunststoffverkaufsverpackungen aus den Sammlungen des Dualen Systems. DKR, Köln, November 1997