



Materialien

Nr. 60

Untersuchungen zur Effizienz
von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung
bei Müllverbrennungsanlagen



Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen

Luft

Wasser

Boden

Abfall

**Technik
Verfahren**

Materialien

Nr. 60

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung bei Müllverbrennungsanlagen

Untersuchungsbericht erstellt von
Riemann, Sonnenschein & Partner GmbH
Ingenieurbüro für Umwelt- und
Entsorgungstechnik, Herne

Im Auftrag des
Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen

Landesumweltamt NRW, Essen 2001

Impressum

Herausgegeben vom

Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen (LUA NRW)

Postfach 10 23 63 • 45023 Essen; Wallneyer Str. 6 • 45133 Essen

Telefon (02 01) 79 95 - 0 • Telefax (0201) 79 95 - 1448

e-mail: poststelle@lua.nrw.de

Essen 2001

Projektbetreuung

und Redaktion: Dr.-Ing. Rolf Berghoff, LUA NRW

Druck:

Druckerei der JVA Geldern, Geldern

ISSN 0947-5206 (Materialien)

Gedruckt auf 100 % Altpapier ohne Chlorbleiche

Informationsdienste: Umweltdaten aus NRW, Fachinformationen des LUA NRW:

- Internet unter www.lua.nrw.de

Aktuelle Luftqualitätsdaten NRW:

- WDR-Videotext (3. Fernsehprogramm), Tafeln 177 bis 179
- Telefonansagedienst unter (0201) 19 700

Bereitschaftsdienst: Nachrichtenbereitschaftszentrale des LUA NRW
(24-Std.-Dienst): Telefon (0201) 714488

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Vorwort

Die Kosten für die Errichtung und den Betrieb von Müllverbrennungsanlagen sind in den vergangenen Jahren immer weiter gestiegen, bis in z. T. unverträglich hohe Bereiche. Der wesentliche Grund dafür ist, dass man seitens der Genehmigungsbehörde, wie natürlich auch der Anlagenanbieter, meinte, allen zusätzlichen Forderungen nach noch mehr Sicherheit, Emissionsminderung und Rückstandsverwertung entsprechen zu müssen.

Heute zeigt sich, dass die Anlagen auch mit einer vereinfachten Technik gebaut und betrieben werden können.

Das Landesumweltamt NRW ist daher der Frage nachgegangen, inwieweit sich die vereinfachte Technik bei der Abgasreinigung von Müllverbrennungsanlagen, wie sie zzt. fast ausschließlich bei neuen Projekten angeboten wird, auf die Emissionen auswirkt und ob damit nicht ein Rückschritt bezüglich o. a. Forderungen eingeleitet wird, bei dem die einmal erreichten Ziele zugunsten der Wirtschaftlichkeit aufgegeben werden.

Das konkrete Ziel dieser vom Landesumweltamt NRW vergebenen Untersuchung war es, neben einer Übersicht über die zzt. eingesetzten und auch geplanten Abgasreinigungssysteme (RGR) bei Müllverbrennungsanlagen, die Vor- und die Nachteile von 3 beispielhaft ausgewählten Systemen in einem ökologischen und ökonomischen Vergleich knapp und begrenzt darstellen zu lassen.

Als Ergebnis wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen Verfahren auf die Frachten der emittierten Schadstoffe unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Energieverbräuche ermittelt und dargestellt. Darüber hinaus wurden die spezifischen Müllbehandlungskosten bei den jeweiligen Gasreinigungstechniken errechnet.



Essen, 2001

Dr.-Ing. Harald Irmer
Präsident des
Landesumweltamtes
Nordrhein-Westfalen

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Gliederung der Studie:

1.	Veranlassung und Aufgabenstellung	7
2.	Zusammenstellung der betrachteten MVA und der zugehörigen Rauchgasreinigungen.....	8
2.1.	Auflistung der seit 1990 in Betrieb gegangenen MVA in Deutschland mit Skizzierung der Rauchgasreinigungsverfahren (RGR).....	8
2.2.	Zusammenstellung der vorgesehenen RGR-Verfahren aus aktuellen Anlagenplanungen (bundesweit).....	18
2.3.	Zusammenstellung der RGR-Verfahren in drei Kategorien und Definition der kennzeichnenden Eigenschaften dieser Kategorien.....	22
a)	Einfache Verfahren zur Erfüllung der 17. BImSchV	22
b)	Aufwendige Verfahren zur Erzielung sehr hoher Abscheidegrade.....	26
c)	Aufwendige Verfahren mit weitgehender Rückstandsverwertung.....	27
3.	Bewertung der verschiedenen RGR-Verfahren	28
3.1.	Definition einer Vergleichsbasis für die Bewertung der RGR-Verfahren.....	28
3.2.	Bestimmung und Bewertung der durchschnittlichen Mengen an Betriebsmitteln und Rückständen sowie der eingesetzten Energien bei den einzelnen Kategorien	30
3.3.	Vergleich der Schadstoff-Emissionen bei den gewählten RGR-Kategorien	35
a)	Direkt anfallende Emissionen am Standort.....	35
b)	Indirekt anfallende Emissionen durch Einsatz von Betriebsmitteln, Energie und der Entsorgung der Rückstände	39
3.4.	Bilanzierung der Gesamtemissionen bei den unterschiedlichen Kategorien der RGR.....	44
3.5.	Ökologische Bewertung der betrachteten RGR-Verfahren	45
3.6.	Abschätzung und Gegenüberstellung der Kosten für die RGR.....	48
a)	Investitionskosten für die RGR.....	48
b)	Betriebskosten und spezifische Kosten der Müllbehandlung aus der RGR	50
3.7.	Ökologisch / ökonomischer Bilanzierungsansatz.....	53
4.	Zusammenfassung	58
5.	Literaturverzeichnis.....	59

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

1. Veranlassung und Aufgabenstellung

Nachdem in Deutschland aufgrund der 17. BImSchV nahezu alle vorhandenen MVA mit zusätzlichen Aggregaten oder sogar mit komplett neuen Anlagen für die weitergehende Rauchgasreinigung (RGR) ausgerüstet wurden und Neuanlagen von vornherein mit leistungsstarken Anlagen zur Erfüllung oder sogar Übererfüllung der Immissionsschutzanforderungen errichtet wurden, soll ein Vergleich erstellt werden über die Möglichkeiten der Wahl verschiedener Verfahrenstechniken in Abhängigkeit von den Verfahrenszielen und den aus den verschiedenen Gründen gewünschten Abscheidegraden von Schadstoffen. Eine Bewertung der unterschiedlichen Emissionsergebnisse in Relation zum Aufwand und ein wirtschaftlicher Vergleich der verschiedenen Verfahrensalternativen soll eine kritische Bestandsaufnahme und einen Bilanzierungsansatz über den Sinn eines sehr viel höheren Aufwandes ergeben.

Hintergrund der Untersuchung ist der Gedanke, dass eine RGR mit dem Ziel der Erfüllung der Immissionsschutzanforderungen ohne deutlichen Mehraufwand zur Minimierung der Emissionswerte erhebliche Kostenvorteile hat und dass die bewährten einfachen Rauchgasreinigungsverfahren unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit anderer industrieller Prozesse auch Rauchgase aus anderen Feuerungsanlagen reinigen könnten und der dazu erforderliche finanzielle Aufwand zu erheblich höheren Emissionseinsparungen führen kann.

Das Vorgehen in dieser Studie soll nicht nur die Emissionen einer Anlage am Standort, sondern auch die externen Emissionen durch Produktion, Förderung und Transport der Betriebsmittel und der Energie und der Entsorgung der Abfälle der Anlage berücksichtigen und auf der Immissionsseite einen anschaulichen Vergleich über die Auswirkungen von Emissionswerten knapp unter den Grenzwerten oder in der Nähe der technisch oder wissenschaftlich möglichen Abscheidungsgrade ermöglichen.

Dabei sollen die Erfahrungswerte aus den vorhandenen deutschen MVA einfließen sowie bekannte Neuentwicklungen zur Vereinfachung der Rauchgasreinigungen, die noch keine großtechnische Erprobung hinter sich haben, mit deren Realisierungsaussichten in die Betrachtungen einbezogen werden.

2. Zusammenstellung der betrachteten MVA und der zugehörigen Rauchgasreinigungen

2.1. Auflistung der seit 1990 in Betrieb gegangenen MVA in Deutschland mit Skizzierung der Rauchgasreinigungsverfahren (RGR)

In der folgenden Tabelle werden alle momentan in Betrieb befindlichen Müllverbrennungsanlagen in Deutschland aufgelistet. Neben den Inbetriebnahmedaten und den Kapazitäten der Anlagen wird der jeweilige Aufbau der Rauchgasreinigung ausführlich dargestellt. Bei zwei Anlagen (Karlsruhe, Burgau) handelt es sich jedoch nicht um Müllverbrennungsanlagen im herkömmlichen Sinne (Rostfeuerung), sondern um Thermoselect- bzw. Pyrolyse-Anlagen, deshalb ist bei diesen Anlagen keine Rauchgasreinigung beschrieben. Ein direkter Vergleich der Rauchgasreinigungsverfahren wäre ohnehin nicht sinnvoll. Nach unserer Kenntnis sind seit 1990 vier Anlagen außer Betrieb gegangen: München-Süd, Heidelberg, Zirndorf und Marktoberndorf. Die Nürnberger Anlage wird 2001 außer Betrieb gehen und am gleichen Standort durch eine neue Anlage ersetzt; in der Auflistung sind beide Anlagen aufgeführt [Lit. 1-6].

Alle Anlagen werden, soweit möglich, in die in Kapitel 2.3 definierten Kategorien für Rauchgasreinigungsverfahren eingeordnet (letzte Tabellenspalte).

Die seit 1990 neu in Betrieb gegangenen und die in NRW befindlichen Müllverbrennungsanlagen (Untersuchungsschwerpunkte) werden in der Tabelle jeweils grau hinterlegt dargestellt. Zum Teil sind hier auch Anlagen berücksichtigt, bei denen z.B. eine vollständig neue Anlage auf dem alten Gelände errichtet wurde und lediglich der Name der alten Anlage erhalten blieb. Nicht berücksichtigt werden jedoch die Anlagen, bei denen die Rauchgasreinigung nach 1990 modernisiert, aufgerüstet bzw. vollständig neu gebaut wurde. Dieses ist der Tatsache zu verdanken, dass aufgrund der neuen Grenzwerte, die 1990 durch die 17. BImSchV festgelegt wurden, nahezu alle Rauchgasreinigungen nachgerüstet werden mussten. Bei allen Anlagen kann also davon ausgegangen werden, dass die letzte Modernisierung der Rauchgasreinigung nach 1989 stattgefunden haben muss.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgas- volumen m ³ /h i. N. tr	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
1	Baden- Württemberg	Böblingen (RMHKW)	1999	140.000	2x61.729	2	Schlauchfilter, mehrstufige Wäsche, SCR, AK-Reaktor, HCl+Gipsgewinnung	a - c
2		Göppingen	1975-97	120.000	95.000	1	Sprühtrockner, HOK-Eindüsung, Gewebefilter, 2 Wäscher, SCR, Filterschichtadsorber	b
3		Karlsruhe (Thermosel.)	1999	225.000			(Thermoselect-Verfahren)	
4		Mannheim	1965-97	380.000	1x210.000 1x141.000	3	E-Filter, zweistufiger Wäscher, Sprühtrockner, E-Filter, SCR, AK-Ads.	b
5		Stuttgart-Münster	1965-94	250.000	3x55.000	3	Gewebefilter, Sprühtrockner, E-Filter, Wäsche (4-stufig), SCR-Kombi-Kat	b
6		Ulm	1997	120.000	4x46.800	2	SNCR, E-Filter, 3-stufiger Wäscher, Flugstromads., NaCl- + Gipsproduktion	c

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgas- volumen m ³ /h i. N. Tr.	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
7	Bayern	Augsburg	1994	220.000	3x50.000	3	E-Filter, 2-stufiger Wäscher, Naß-E-Filter, SCR, Dediox. mit Schlauchfilter, Wasseraufbereitung, NaCl und CaCl ₂ -Produktion	a - c
8		Bamberg	1978-89	120.000	3x32.000	3	Elektrofilter, 2-stufiger Wäscher, Flugstromverfahren mit Schlauchfilter, SCR	b
9		Burgau (Pyrolyse)	1987	25.000		2	(Pyrolyse-Verfahren)	
10		Burgkirchen (MHKW)	1994	200.000	2x78.000	2	E-Filter, mehrstufiger Wäscher, SCR, Dediox. mit Schlauchfilter, NaCl-Produktion	c
11		Coburg	1988-96	115.000	2x52.000	2	SNCR, Sprühabsorber, Dedioxinierung mit Schlauchfilter, 2-stufiger Wäscher, Naß-E-Filter	b
12		Geiselbullach	1975-96	85.000	2x35.000	2 (+1)	Sprühabsorber Kalk/Kohle, Schlauchfilter, SCR	a1
13		Ingolstadt	1978-96	160.000	1x50.000 2x64.000	3	E-Filter, Dedioxinierung mit Schlauchfilter, Wäscher, SCR	b
14		Kempten	1975-96	60.000	70.000	1	E-Filter, 2 Wäscher, SCR, Dedioxinierung mit Schlauchfilter, HCl-Rektifikation, Gips-Ausschleusung	c

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgas- volumen m ³ /h i. N.tr	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
15	Bayern	Landshut	1972-89	39.000	2x40.000	2	Sprühtrockner, E-Filter, 3-stufiger Wäscher mit A-Kohle, SCR	a - c
16		München-Nord	1962-96	750.000	2x130.000 2x210.000	4	Sprühtrockner, E-Filter, 2-stufiger Wäscher, SCR, AK-Reaktor	b
17		Neufahrn/Freising	1971-78	22.000	18.000	1	trockener Rezykulationsreaktor, Schlauchfilter	a1
18		Nürnberg (bis 2001)	1968-93	200.000	3x80.000 1x110.000	4	E-Filter, quasitrockener Sprühabsorber, Schlauchfilter	a1
19		Nürnberg (ab 2001)	2001	204.000	3x56.000	3	2 E-Filter, 2-stufiger Wäscher, Flugstromabsorber, SCR, HCl-Rektifikation, Gipsausschleusung	c
20		Rosenheim	1964-96	60.000	50.000	1	SNCR, quasitrockener Sprühreaktor, Schlauchfilter, HOK-Adsorber	a1
21		Schwandorf	1982-94	450.000	3x75.000 1x125.000	4	quasitrockener CDAS-Reaktor mit Gewebefilter, SCR	a1
22		Schweinfurt	1994-96	144.000	3x40.000	3	SNCR, Multizyklon, HOK-Aufgabe mit Sprühtrockner, Gewebefilter, 2-stufiger Wäscher	b
		Weißenthorn	1991-98	63.400	2x43.600	2	Sprühtrockner, Zyklon, Gewebefilter, Wäscher, HOK-Festbettfilter, SCR	b

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgas- volumen m ³ /h i. N.Tr.	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
23	Bayern	Würzburg	1984-98	144.000	2x70.000 1x88.000	3	CDAS, Zyklon, Verdampfungskühler, Flugstromverfahren mit Schlauchfilter, SCR neue Linie: SNCR	a1
24	Berlin	Berlin-Ruhleben	1967-98	520.000	7x55.000	7 (+1)	trockenkonditionierter Rezirkulationsreaktor, SCR, Dedioxidierung mit Schlauchfilter	a1
25	Bremen	Bremen	1969-90	550.000	2x110.000 1x150.000	3	SNCR, E-Filter, CDAS-Sprühabsorber mit AK, Gewebefilter,	a1
26		Bremerhaven	1977-94	315.000	3x78.000	3	SNCR, E-Filter, 2-stufiger Wäscher, AK-Adsorber	b
27	Hamburg	HH-Borsigstraße (MVB)	1931-94	320.000	2x85.000	2	SNCR, Flugstromads. HOK, Schlauchfilter, 2 Wäscher, Naß-E-Filter, HCl+Gipsgewinnung, indirekte Eindampfung	c
28		HH-Rugenberger Damm	1999	320.000	2x89.000	2	SNCR, Schlauchfilter mit HOK-Zugabe, 2 Wäscher, HCl- +Gipsgewinnung, indirekte Eindampfung	c
29		HH-Stellinger Moor	1973-96	210.000	2x82.000	2	Sprühtrockner, E-Filter, 3-stufiger Wäscher, HOK-Adsorber, SCR, HCl- + Gipsproduktion	c

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgas- volumen m ³ /h i. N.Tr	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
30	Hessen	Darmstadt	1967-98	169.000	2x65.000 1x55.000	3	Zyklon, Sprühtrockner, E-Filter, mehrstufiger Wäscher, SCR+Dedioxinierung (Kombikat)	b
31		Frankfurt	1965-87	420.000	4x120.000	4	SNCR, Sprühabsorber, E-Filter, Dedioxinierung mit Flugstrom/Schlauchfilter	a1
32		Kassel	1968-99	150.000	2x63.000	2	E-Filter, Sprühabsorber, Gewebefilter, HOK-Festbetfilter, SCR-Kombi-Katalysator	b
33		Offenbach	1970-98	200.000	3x55.000	3	Sprühabsorber, E-Filter, 2-stufiger Wäscher, SCR-Kombikat	b
34	Niedersachsen	Buschhaus	1999	350.000	2x105.000	2	SNCR, Sprühtrockner, HOK/Flugstrom, Gewebefilter, 2 Wäscher	b
35		Hamelh	1977-93	155.600	3x55.000	3	Trockenabsorption, Gewebefilter, HOK-Festbettdsorber, SCR	a1

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgas- volumen m ³ /h i.N.tr	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
36	Nordrhein- Westfalen	Bielefeld-Herford	1981-96	316.000	3x115.000	3 (+3)	E-Filter, Sprühtrockner, E-Filter, 2 Wäscher, SCR, Oxi-Kat., Flugstromverfahren mit Gewebefilter	a - c b
37		Bonn	1992	180.000	3x63.000	2 (+1)	SNCR, Sprühtrockner, Elektrofilter, Wäsche, Schlauchfilter	b
38		Düsseldorf	1964-91	450.000	2x350.000	4	Sprühabs., E-Filter, Dediox. mit HOK-Festbettfilter., SCR	a1
39		Essen-Karnap	1987-93	644.000	4x120.000	4	E-Filter, Wäsche, SCR, Dediox. mit AK-Adsorber	b
40		Hagen	1966-68	112.000	3x30.500	3	Zyklon, Sprühabsorber, E-Filter, SCR, Dedioxinierung mit Flugstrom und Schlauchfilter	a1
41		Hamm	1985-94	245.000	4x45.000	4	SNCR, Zyklon, Sprühabs., Dedioxinierung mit Flugstrom und Schlauchfilter	a1
42		Herten (RZR)	1981-96	257.000	2x113.000	2	Zyklon, Sprühtrockner, E-Filter, Wäscher, Dedioxinierung mit AK-Wanderbettadsorber, SCR	b
43		Iserlohn	1970-96	230.000	2x50.000 1x100.000	5	E-Filter, mehrstufiger Wäscher, SCR, Dediox. mit ZWS und Schlauchfilter, indirekte Eindampfanlage, NaCl- und Gipsproduktion	c

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgasvolumen m ³ /h i.N.tr	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
44	Nordrhein-Westfalen	Köln (RMVA)	1998	421.000	4x80.000	4	Sprühtrockner, Gewebefilter, 2 Wäscher, Ionentauscher für Hg, SCR-Kombikatalysator, HOK-Filter, Gipsproduktion	a - c
45		Krefeld	1975-97	340.000	3x80.000	3 (+1)	Verdampfungskühler, Schlauchfilter, mehrstufiger Wäscher, SCR, Dediox. mit HOK/Schlauchfilter, Gipsproduktion	c
46		Leverkusen (MHKW)	1970-97	210.000	180.000	3	E-Filter, 2-stufiger Wäscher, Dediox. mit HOK/Schlauchf., SCR	b
47		Oberhausen (GMVA)	1972-97	578.000	4x130.000	4	E-Filter, 2-stufiger Wäscher, SCR, Dedoxinierung mit AK/Flugstrom/Gewebefilter, Gipsausschleusung	c
48		Solingen	1969-93	100.000	90.000	2	Sprühabsorber, E-Filter, SCR, Dedioxinierung mit AK/Schlauchfilter	a1
49		Weisweiler/Eschweiler	1997	360.000	3x71.000	3	Sprühtrockner, Schlauchfilter, 2-stufiger Wäscher, SCR-Kombikat., Gipsausschleusung	c
50		Wesel, Kamp-Lintfort, Asdonkshof	1997	250.000	2x87.000	2	E-Filter, Sprühtrockner, E-Filter, 2 Wäscher, SCR-Kombikat., AK-Wanderbettsorber	b

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgasvolumen m ³ /h i.N.tr	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
51	Nordrhein-Westfalen	Wuppertal	1975-99	345.000	4 Linien, Summe: 400.000	5	E-Filter, Wäscher, Sprühabsorber, E-Filter, Dedioxinierung mit HOK-Gegenstromfilter, SCR	a - c
52	Rheinland-Pfalz	Ludwigshafen	1967-96	150.000	2x54.500	3	Sprühtrockner, E-Filter, 2-stufiger Wäscher, NaSelektrofilter, SCR-Kombikat	b
53		Pirmasens	1998	180.000	2x61.600	2	SNCR, E-Filter, Wäscher, Dediox. mit HOK/Flugstrom/Schlauchfilter, NaCl-Gewinnung	c
54	Saarland	Neunkirchen	1969-95	120.000	2x36.000	2	E-Filter, Wäscher, NaSelektrofilter, SCR, Flugstromabsorber, Schlauchfilter, indirekte Eindampfung, NaCl + Gipsproduktion	c
55		Velsen	1998	210.000	2x87.000	2	E-Filter, 3-stufiger Wäscher, SCR, HOK/Flugstromads., Schlauchf., indirekte Eindampfung, NaCl + Gipsproduktion	c

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Nr.	Bundesland	Anlage / Standort	Inbetriebnahme (Nachrüstung)	Kapazität [Mg/a]	Rauchgas- volumen m ³ /h i.N.tr	Verbr. Linien	Aufbau RGR	Kategorie
56	Schleswig-Holstein	Kiel-Süd	1975-96	120.000	2x45.000	2	E-Filter, mehrstufiger Wäscher, SCR-Kombikat., Flugstromads., Schlauchfilter, indirekte Eindampfung, HCl- + Gipsproduktion	a - c
57		Neustadt/Holstein	1964-97	62.000	65.000	1	Sprühtrockner, Zyklon, mehrstufiger Füllkörperwäscher, SCR, HOK/Flugstrom/Schlauchfilter	b
58		Pinneberg (Tornesch)	1974-94	80.000	2x26.000	2	SNCR, Sprühtrockner, Wäscher, Dedioxinierung mit Flugstrom/Schlauchfilter,	b
59		Stapelfeld	1979-97	350.000	2x120.000	2	E-Filter, mehrstufiger Wäscher, SCR, Dedioxinierung mit AK-Filter, indirekte Eindampfung, Umsalzung, Verwertung NaCl, Gips und CaCl ₂	c

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

2.2. Zusammenstellung der vorgesehenen RGR-Verfahren aus aktuellen Anlagenplanungen (bundesweit)

Ravon	
Anlagengröße	225.000 t/a
Standort	Lauta in Sachsen
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - Sprühdabsorber - Flugstromverfahren - Gewebefilter - Aktivkohlefilter - SNCR mit Ammoniakstrippung / SCR-Verfahren - Schornstein
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1996
Aktueller Status der Planung	Angebote von Anlagenbauunternehmen wurden eingeholt, z.Z keine erkennbaren Aktivitäten
Bemerkungen	Alternativ ist anstatt des SNCR-Verfahrens und der NH ₃ -Strippung auch eine SCR-Variante möglich. Eine Entscheidung hierzu liegt z.Z. nicht vor. Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - garantiert: : ca. 50% der 17. BImSchV-Werte - erwartet: : ca. 30% der 17. BImSchV-Werte
Kategoriezuordnung	b

Staßfurt	
Anlagengröße	300.000 t/a
Standort	Staßfurt in Sachsen-Anhalt
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - SNCR-Verfahren - Rückstromwirbler (Einsatz von Ca(OH)₂ und HOK) - Gewebefilter - Schornstein
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1998
Aktueller Status der Planung	Engineering-Auftrag vergeben, Genehmigungsplanung wurde erstellt und bei den Behörden eingereicht
Bemerkungen	Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - garantiert: 17. BImSchV-Werte
Kategoriezuordnung	a1

Lippendorf	
Anlagengröße	300.000 t/a
Standort	Lippendorf in Sachsen
Konzipierte RGR	Die Entscheidung für das RGR-Verfahren ist noch offen. Projekt befindet sich noch in der Angebotsphase.
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1999
Aktueller Status der Planung	Angebotsstadium, z.Z. Auswertung der Angebote
Bemerkungen	Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - gefordert: 50% der 17. BImSchV-Werte
Kategoriezuordnung	b

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Mainz/Wiesbaden	
Anlagengröße	230.000 t/a
Standort	Mainz/Wiesbaden
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - SCR-Verfahren - Sprühtrockner mit nachgeschaltetem Gewebefilter - 2-stufiger Wäscher mit vorgeschalteter Quench - Schornstein
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1998
Aktueller Status der Planung	Genehmigungsplanung wird erstellt
Bemerkungen	Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - garantiert: : 17. BImSchV-Werte - erwartet: : 50% der 17. BImSchV-Werte außer NO_x-Wert
Kategoriezuordnung	b

Rostock	
Anlagengröße	200.000 t/a
Standort	Rostock in Mecklenburg-Vorpommern
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - Sprühtrockner - Flugstromverfahren mit nachgeschaltetem Gewebefilter - 2-stufiger Wäscher mit vorgeschalteter Quench - Schornstein
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1996
Aktueller Status der Planung	Engineering-Auftrag erteilt, Genehmigungsplanung
Bemerkungen	Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - garantiert: : 50% der 17. BImSchV-Werte
Kategoriezuordnung	b

Salzbergen	
Anlagengröße	120.000 t/a
Standort	Salzbergen in Niedersachsen
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - SNCR-Verfahren - Sprühadsorber - Flugstromverfahren - Gewebefilter - Schornstein oder andere trockene oder quasitrockene RGR
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1999
Aktueller Status der Planung	Angebotsauswertung
Bemerkungen	Emissionswerte: gefordert: : 17. BImSchV-Werte jedoch mit NO _x < 150 mg/Nm ³ ; hinsichtlich der Schwermetalle, insbesondere in Bezug auf Cd, Tl und As sind strengere Grenzwerte einzuhalten
Kategoriezuordnung	a1

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Heilbronn	
Anlagengröße	200.000
Standort	Heilbronn in Baden-Württemberg
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - SCR-Verfahren - externer Economiser - Sprühadsorber mit nachgeschaltetem Gewebefilter - 2-stufiger Wäscher mit vorgeschalteter Quench - Schornstein
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1997
Aktueller Status der Planung	Angebote wurden eingeholt, z.Z keine erkennbaren Aktivitäten
Bemerkungen	Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - gefordert: : 50% der 17. BImSchV-Werte jedoch mit NOx < 70 mg/Nm³
Kategoriezuordnung	b

Bramsche	
Anlagengröße	230.000 t/a
Standort	Bramsche-Achmer in Niedersachsen
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - SNCR-Verfahren - Sprühtrockner - Flugstromverfahren mit nachgeschaltetem Gewebefilter - 2-stufiger Wäscher mit vorgeschalteter Quench - Schornstein evtl. Änderung des Konzeptes auf trockene oder quasitrockene RGR
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1998
Aktueller Status der Planung	Genehmigung des Standortes und der Technik in Vorbescheidverfahren beantragt, Vorbereitung der Ausschreibung
Bemerkungen	Das RG-Reinigungsverfahren ist von der möglichen Betreibergesellschaft (VEW, Verbund mit Bramsche-Achmer) in der Vorplanung angedacht worden und kann sich noch ändern Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - gefordert: : 17. BImSchV-Werte
Kategoriezuordnung	b (a1)

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

MVA-West	
Anlagengröße	150.000 t/a
Standort	noch nicht festgelegt
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - SCR-Verfahren - Economiser - Sprühadsorber mit nachgeschaltetem Gewebefilter - 2-stufiger Wäscher mit vorgeschalteter Quench - Schornstein
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1998
Aktueller Status der Planung	zur Zeit keine erkennbaren Aktivitäten
Bemerkungen	Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - gefordert: : 50% der 17. BImSchV-Werte jedoch mit NOx < 70 mg/Nm³
Kategoriezuordnung	b

Rothensee	
Anlagengröße	300.000 t/a
Standort	Magdeburg-Rothensee in Sachsen-Anhalt
Konzipierte RGR	<ul style="list-style-type: none"> - SNCR-Verfahren - Sprühtrockner - Flugstromverfahren - Gewebefilter - 2-stufiger Wäscher mit vorgeschalteter Quench - Schornstein
Zeitpunkt der Konzepterstellung	1998
Aktueller Status der Planung	Vorbereitung der Ausschreibung
Bemerkungen	Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - gefordert: : 17. BImSchV-Werte
Kategoriezuordnung	b

Köthen	
Anlagengröße	100.000 t/a
Standort	Köthen in Sachsen-Anhalt
Konzipierte RGR	Die Konzeption der RG-Reinigung ist z.Z. noch offen, voraussichtlich trocken / quasitrocken
Zeitpunkt der Konzepterstellung	noch nicht abgeschlossen
Aktueller Status der Planung	Ausschreibungsunterlagen werden z.Z. erstellt
Bemerkungen	Emissionswerte: <ul style="list-style-type: none"> - gefordert: : 85% der BImSchV-Werte
Kategoriezuordnung	voraussichtlich a1

Die Angaben in diesem Kapitel [Lit. 7] stammen größtenteils aus eigenen Zusammenstellungen aus Ausschreibungen, Betreiberunterlagen, Anbieterunterlagen sowie konkreten Angeboten, die größtenteils nicht veröffentlicht sind. Die Angaben stellen zum Teil nur den Planungsstand dar. Realisierungschancen werden hier nicht bewertet.

2.3. Zusammenstellung der RGR-Verfahren in drei Kategorien und Definition der kennzeichnenden Eigenschaften dieser Kategorien

In dieser Studie sollen verschiedenste Verfahren zur Rauchgasreinigung verglichen werden. Dazu ist es sinnvoll, Gruppen von Verfahrenstechniken zusammenzufassen, indem man Grundverfahren unterscheidet und dabei eine genaue Abgrenzung der verschiedenen Kategorien definiert, auch wenn man weiß, dass nicht alle ausgeführten Verfahrensvarianten in das gewählte Schema passen werden, weil einige Komponenten aus einer anderen Kategorie in einem Verfahren eingesetzt werden können.

Zunächst wurde versucht, anhand der unterschiedlichen Abscheidegrade für Schadstoffe 3-4 verschiedene Kategorien zu definieren. An praktischen Gegebenheiten wurde aber festgestellt, dass dies nicht durchgängig möglich ist, weil für verschiedene Schadstoffe in einer gewählten Rauchgasreinigung durchaus sehr unterschiedliche Abscheidegrade resultieren. Auch am Grad der Unterschreitung der Grenzwerte der 17. BImSchV lässt sich kein sinnvolles System zur Unterscheidung verschiedener Verfahrenszusammenstellungen festmachen. Wir entschlossen uns daher, als Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen den Rauchgasreinigungsvarianten den Einsatz von Naßwäschern zu definieren und als weiteres Abgrenzungsmerkmal einer dritten Kategorie die Vermeidung oder weitestgehende Minderung von Abfällen aus der Rauchgasreinigung, also die Aufarbeitung der Reststoffe zu verwertbaren Produkten (wobei unter gezielter Produktion von Werkstoffen in diesem Sinne nicht das Verwertungsziel Bergversatz einbezogen werden soll). Beispielhaft für ein solches Wertstoffgewinnungssystem ist in dieser Studie eine Salzsäure-Rückgewinnung erläutert.

a) Einfache Verfahren zur Erfüllung der 17. BImSchV

a1) Eingesetzte Verfahren

Als einfachste Rauchgasreinigungskategorie definieren wir für diese Studie alle Verfahren unter Verwendung von Trockensorption, Quasitrockenverfahren, konditionierter Trockensorption, Sprühabsorption etc. unter Verwendung eines filternden Abscheiders zur Entstaubung des Rauchgases und zur Abscheidung der Reaktionsprodukte. Zur Entstickung werden bei einfachen Verfahren meist nichtkatalytische Verfahren eingesetzt (SNCR), zur Schwermetall- und Dioxinabscheidung wird meist ein Flugstromverfahren unter Zugabe von Braunkohlenkoks (Herdofenkoks, HOK) oder Aktivkohle (AK) vor einem Gewebefilter eingesetzt. Der Gewebefilter kann dabei der einzige filternde Abscheider sein (bei Verwendung eines Gemisches aus alkalischen Absorptionsmitteln wie z.B. Kalk und AK oder HOK in der Sorptionsstufe) oder auch als Komponente nach der Trocken- oder Quasitrockensorption zusätzlich am Ende des RGR-Verfahrens eingesetzt sein. Ergänzt werden kann diese Kategorie der Rauchgasreinigung um eine getrennte Abscheidung der Stäube aus der Verbrennung in einem Zyklon vor der ersten Absorptionsmitteleindüsung. Die Rauchgasreinigungsrückstoffe können bei der gewählten Verfahrensweise als Bergversatz "verwertet" werden. Bei der Entscheidung zum Hauptkriterium "Wäscher" als Unterscheidungsmerkmal können allerdings auch Anlagen mit SCR- oder Kombikat-Stufe unter die Rubrik einfache Verfahren fallen. Verfahren mit Aufarbeitung der Rauchgasreinigungsprodukte zu Recyclingprodukten wie Salzsäure, Kochsalz, Kalziumchlorid oder Gips werden aber ausnahmslos nicht mit quasitrockenen oder trockenen Rauchgasreinigungsverfahren kombiniert. Ein Beispiel (Blockfließbild) für eine einfache RGR dieser Kategorie ist am Ende der Studie eingefügt.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

a2) Neuentwickelte Verfahren (noch nicht großtechnisch erprobt)

Es gibt zur Zeit nach unserer Kenntnis drei Verfahrensentwicklungen, die eine Vereinfachung der Rauchgasreinigung bei Müllverbrennungsanlagen zum Ziel haben:

- ◆ Im Forschungszentrum Karlsruhe [Lit. 8-10] wurde eine Verfahrensstufe zur Abscheidung hochsiedender organischer Schadstoffe aus Rauchgasen in einem Adsorber, der mit Polypropylen-Kunststoff gefüllt ist, entwickelt. Polypropylen (PP) adsorbiert z.B. Dioxine und Furane in einem Temperaturbereich, der am Ende einer nassen RGR üblich ist (60-80°C, ohne oder mit nur geringer Wiederaufheizung), sehr gut und fast quantitativ. Der Kunststoff kann in einer Desorptionsstufe (bei ca. 130°C) wieder von den anhaftenden Organika befreit werden und erneut zur Adsorption verwendet werden. Die Desorbate können der Feuerung zugeführt werden, wo sie durch die Nachverbrennung nahezu quantitativ zerstört werden. Wahlweise kann aber auch das beladene Adsorptionsmittel in der Feuerung der MVA eingesetzt und die Schadstoffe in der Nachbrennzone der MVA zerstört werden, ohne dass ein Aufschaukeln von Dioxinkonzentrationen oder anderen organischen Schadstoffen zu erwarten wäre. Diese Lösung wäre aber nur ein neues Aggregat in einer mehrstufigen Rauchgasreinigung, womöglich auch nach einer Waschstufe. Eine Abscheidung von Sauer gasen oder Staub wird in diesem Aggregat nicht erreicht, ist aber Vorbedingung für eine genügende Dedioxinierung, da am PP nur gasförmiges Dioxin (und andere hochsiedende Organika) abgeschieden werden können. Das Verfahren wurde bisher nur an der Forschungsanlage TAMARA in Karlsruhe über etwa 8 Wochen erprobt, soll aber von einem Lizenznehmer vermarktet werden. Die Bewährungsprobe hinsichtlich Technik und Wirtschaftlichkeit steht noch aus. Das in dieser Studie gewünschte Ziel der wesentlichen Vereinfachung und damit besseren Wirtschaftlichkeit der Rauchgasreinigung wird durch diese Entwicklung aber nicht erreicht.
- ◆ Eine echte Neuentwicklung, die eine sehr einfache Rauchgasreinigung möglichst mit nur einem Aggregat zum Ziel hat, ist in zwei neuen Verfahren gelungen, die aber auch noch vor der Bewährungsprobe stehen und sicher noch mit einigen Schwierigkeiten zu kämpfen haben werden. Die beiden gemeinten Verfahren gleichen sich in dem Ansatz, dass ein filternder Abscheider durch Kombination mit dem Flugstromverfahren und Einbau eines Katalysators in das Filtermedium andere Aggregate der Rauchgasreinigung einsparen hilft. Bei den beiden Verfahren ist lediglich das Filtermedium unterschiedlich:
- ◆ Die Firma Von Roll Inova [Lit. 11-12] hat mit der Fa. BWF eine Filterkerze (Basismaterial: keramisches Gewebe aus Pyrotex) entwickelt (4 D-Verfahren), die einen ins Filtermedium integrierten Katalysator (Vanadinpentoxid und Titandioxid) enthält, der zur Entstickung eingesetzt werden kann. Dieser Katalysator hat auch einen guten Wirkungsgrad zur Zerstörung von halogenierten Dioxinen und Furanen. Die Filterschicht auf der Keramikkerze kann Stäube und Feinststäube sehr gut abscheiden, vorher kann AK oder HOK zum Rauchgas gemischt werden, um eine Senke für Schwermetalle und organische Verbindungen zu erzeugen. Die Entstickung erfordert einen Temperaturbereich von 240-280°C, um eine optimale Entstickung bei geringen Ammoniakschlupf zu ermöglichen, die Adsorption von Organika an AK oder HOK hat einen besseren Wirkungsgrad bei niedrigeren Temperaturen. Für eine Gesamtlösung muß also ein Kompromiß gefunden werden, der aber bei normalen Rohgasbedingungen ein sicheres Erreichen der Grenzwerte der 17. BImSchV ermöglicht. Das Gesamtverfahren hat wesentliche Vorteile in der Einbaumöglichkeit des Heißgasfilters zwischen Kessel und Economizer und im Beschicken des Ecos mit staubfreiem und säurefreiem Rauchgas.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Außerdem werden Abkühlungen und Aufheizungen des Rauchgases und Wärmeverschiebungen im Prozeß nicht benötigt, so dass ein optimaler thermischer Wirkungsgrad der Anlage erreicht werden kann. Weitere Vorteile sind Platzeinsparungen und geringe Investkosten für die Rauchgasreinigung sowie geringer Regel- und Überwachungsaufwand, da nur noch ein Aggregat alle Schadstoffabscheidungen bzw. -zerstörungen bewirkt. Um sehr niedrige Emissionswerte zu erhalten (und auch die Menge an Abfällen zu minimieren), ist auch die Kombination mit einem Nachwäscher möglich. Immerhin bleibt ein Aktivkohlefilter und ein SCR-DeNOx-Katalysator überflüssig.

Risiken dieser Entwicklung sollen an dieser Stelle aber auch deutlich hervorgehoben werden: Heißgasfilter krank an dem Problem, dass im Filtermedium bei Anwesenheit verschiedener Verbindungen Reaktionen auftreten können, die durch aktive Zonen im Filtermaterial noch beschleunigt werden können, und die zur Kondensation von Salzen (oder im Fall des Vorhandenseins von Organika zu organischen, hochsiedenden Verbindungen, die bei Rauchgasen hinter MVA aber nicht relevant sind) und damit zu einem Verstopfen von Poren führen können, was ein Versagen des Filtermaterials nach sich ziehen kann. Bekannt sind in diesem Temperaturbereich zwischen 200 und 300°C Verbindungen zwischen den Elementen Zink, Sauerstoff und Chlor, die bei Elektrofiltrationsprozessen bereits zu erheblichen Störungen durch Bilden eines Eutektikums mit niedrigen Schmelzpunkt geführt haben. Im Falle der Kondensation in den Heißgasfilterporen könnte eine Verstopfung der Poren und ein Versagen des Filters durch Anstieg des Druckverlustes erfolgen. Weitere kritische Verbindungen sind Kalziumchlorid und Ammoniumsulfat, die in diesem Temperaturbereich störende Phasenumwandlungen durchlaufen können und zu Verstopfungen der Heißgasfilterporen führen können. Diese Probleme sind dem Verfahrensentwickler aber bewußt. Er will diese Schwierigkeit mit einer Aufheizstufe für den Heißgasfilter und der Verdampfung der auskondensierten Phasen begegnen. Die Funktion der Abscheidung und der Freihaltung der Poren muß großtechnisch aber noch erwiesen werden.

Bei Erreichen des Entwicklungszieles ist ein elegantes, einfaches Verfahren zur Rauchgasreinigung in nur einem Aggregat gegeben, dessen Wirtschaftlichkeit im wesentlichen nur noch von der Standzeit der Heißgasfilterkerzen abhängt. Der Anbieter verweist auf Pilotversuche mit Standzeiten von über 12 Monaten und der Hoffnung, dass man den Filter mit der kurzzeitigen Aufheizung mehrfach regenerieren kann.

- ◆ Eine andere Verfahrensentwicklung mit Nutzung eines Filtermediums zum Einbau eines Katalysators ist die Entwicklung der Fa. Gore [Lit. 13]: Die als katalytische Filtration (REMEDIA) bezeichnete Neuerung benutzt einen Gewebeaufbau als Filtermaterial, das neben der bekannten Membranfiltertechnologie (GORE-TEX-Membrane aus PTFE auf einem Nadelfilzaufbau) einen eingebauten Katalysator im Gewebematerial (katalytisch aktivierter Nadelfilz, ebenfalls aus PTFE, einem Teflon-Werkstoff) enthält. Der REMEDIA-Filter wird derzeit großtechnisch bei einer Temperatur zwischen 180 und 250°C betrieben, soll aber auch bei 140-160°C noch eine ausreichende katalytische Aktivität haben. Seit 1996 existieren Erfahrungen an der MVA IVRO in Roeselare in Belgien zunächst mit einer Pilotanlage, seit 1997 mit einer kompletten Verbrennungslinie. Außerdem wurden an mehr als 60 verschiedenen Anlagen, auch in anderen Industriezweigen, gute Erfahrungen gesammelt, um auch bei anderen Feuerungsanlagen und Abgasen einfache und wirkungsvolle Verfahren anbieten zu können.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Als Standzeit für den katalysatorbestückten Gewebefilter werden mehrere Jahre (5-8 Jahre) erwartet. Dass ähnliche Probleme wie bei den Heißgasfiltern geschildert die Standzeit deutlich beeinflussen können, wird nicht erwartet, da ein Gewebefilter kein starres Material darstellt und Kondensationen von Salzen etc. im Filtermaterial aufgebracht werden können und bei Rückspülung des Filters mit Druckimpulsen ausgetragen werden sollen. Konkrete Erfahrungen dazu liegen aber noch nicht vor. Die Temperaturbereiche, in denen der REMEDIA-Filter verwendet werden kann, sind aber auch niedriger als beim Von Roll-Verfahren und liegen im Bereich üblicher Rauchgastemperaturen für die Gewebefilteranwendung, in der die geschilderten Kondensationsprobleme sich bisher auch nicht an anderen Anlagen störend ausgewirkt haben. Insgesamt liegt für die Entwicklung von Gore die bisher längste Erfahrung von allen drei geschilderten Neuentwicklungen vor. Dabei konnte auch der Nachweis geführt werden, dass die Dioxine tatsächlich katalytisch zerstört worden sind.

Eine Optimierung des REMEDIA-Filterystems zur Stickoxidreduktion hat bisher aber noch nicht stattgefunden, so dass der Anspruch des 4 D-Verfahrens der Fa. Von Roll Inova noch nicht erhoben wird, dass ein RGR-Aggregat alle anderen Reinigungsstufen ersetzen soll. Weiterhin ist bei Verwendung des Gore-Filters mindestens eine zusätzliche Entstickungsstufe notwendig.

Zusätzlich zu den drei geschilderten Entwicklungen gibt es noch weitere Neuerungen im Rauchgasreinigungssektor, die aber im wesentlichen keine neuen Aggregate mit dem Ziel der Einsparung mehrerer Verfahrensschritte vorsehen, sondern verbesserte Sorptionsmittel auf der Basis der bisher bekannten Arten von Kalk und Kohlenstoffträgern. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Sorbentien der beiden Konkurrenten Rheinische Kalkwerke [Lit. 14] (Produktreihe Wülfrasorb) und Märker Umwelttechnik [Lit. 15-16] (Sorbaliith) genannt, die Ihre Produktlinien für die Trocken- oder Quasitrockensorption weiterentwickelt haben und heute mit geringerem stöchiometrischen Überschuss an Sorbens deutlich niedrigere Messwerte an Schadstoffen erzielen, wobei Märker aber einen Schritt weiter gegangen ist und ein Produkt in Pelletform anbietet, welches aus Kalk und HOK besteht und stabil genug ist, um in einem Festbettfilter als Ab- und Adsorbens eingesetzt zu werden. Mit dieser Anwendungsart sind alle Schwierigkeiten mit kohlenstoffhaltigen Sorbentien in Filtern nach Verbrennungsanlagen hinsichtlich der Sicherheitstechnik (Hotspots, Glimmnester, Brand- oder sogar Explosionsgefahr) ausgeschaltet und ein erheblicher Anteil an Investitionskosten wird erspart, es steht aber noch eine großtechnische Bewährungsprobe und der Nachweis der ausreichenden Standzeit der Filterbeschickung aus, da mit HCl aus dem Rauchgas ein sehr hygroskopisches Produkt (Kalziumchlorid) entsteht, welches bei Wasseraufnahme sein Volumen vergrößert oder sogar zerfließt und damit die Festigkeit der Pellets verschlechtern kann.

b) Aufwendige Verfahren zur Erzielung sehr hoher Abscheidegrade

Zur Erzielung sehr hoher Abscheidegrade ist in jedem Falle ein Naßwaschsystem notwendig, möglichst mit mehreren Waschstufen in einem großen Wäscher oder getrennten Wäschern z.B. für die Abscheidung starker Säuren und schwacher Säuren. Theoretisch sind auch Trocken- oder Halbtrockenverfahren so fahrbar, dass nur noch weniger als etwa 10% der Grenzwerte der 17.BImSchV als Emissionskonzentrationen entstehen; dies wird jedoch mit einem hohen Überschuß an Absorptionsmittel erkaufte, wodurch sich die Betriebskosten der Anlage und die Entsorgungskosten der Abfälle (zur Verwertung) unverhältnismäßig stark erhöhen.

Als Musterbeispiel für eine Anlage zur Erzielung sehr hoher Abscheidegrade wurde von uns eine Rauchgasreinigung

- ◆ mit Gewebefilter zur Entfernung der nach Kessel noch vorhandenen Stäube,
- ◆ zwei anschließenden Wäschern mit Waschwasseraufbereitung (oder alternativ Abwasservermeidung mit einem Sprühtrockner vor dem Gewebefilter)
- ◆ und zur Entstickung einem SNCR-Verfahren mit hoher Ammoniak- bzw. Harnstoffdosierung und der daraus resultierenden Notwendigkeit der Stripplung des Waschwassers zur Rückhaltung des Ammoniaküberschusses

ausgewählt. Bei der Waschwasseraufbereitung bietet sich eine indirekte Eindampfanlage mit Abtrennung der Schwermetalle in einer Flockungs- und Fällungs- sowie Filtrationsstufe an oder aber - verfahrenstechnisch wesentlich einfacher - einem Sprühtrockner zur Erzielung eines abwasserfreien Verfahrens mit Abscheidung der Reaktionssalze der Rauchgasreinigung gemeinsam mit den Stäuben aus der Verbrennung (1 Filter) bzw. getrennt von diesen (2 Filter). Durch die Strippanlage wird der Ammoniaküberschuß wiedergewonnen und erneut in der SNCR-Anlage eingesetzt, ohne erhöhte Ammoniakemissionen zu erzeugen.

In diese Rauchgasreinigungskategorie fallen auch Verfahren mit Benutzung eines Festbettreaktors mit Aktivkohle oder Herdofenkoks, es können aber auch durch Eindüsung von AK oder HOK vor dem Gewebefilter und Ausbildung eines Flugstromverfahrens die organischen Spurenverbindungen sowie Schwermetalle in ausreichendem Umfang abgeschieden werden. Die meisten Schwermetalle werden sowieso im Wäschersystem, besonders im ersten (sauren) Wäscher abgeschieden. Verfahren, die in die definierte RGR-Kategorie passen, können aber auch mit einer SCR-Entstickung oder zur gleichzeitigen Dioxinzerstörung auch mit einem Kombikat (gleichzeitige Reduktion von Stickoxiden zu Stickstoff und Oxidation von Dioxinen und Furanen zu Kohlendioxid, Wasser und Salzsäure in einem Katalysatoraggregat) ausgerüstet sein.

Ein Beispiel für eine Rauchgasreinigungsanlage dieser Kategorie (Blockfließbild) ist auf einer Zeichnung am Ende der Studie wiedergegeben.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

c) Aufwendige Verfahren mit weitgehender Rückstandsverwertung

Die für diese Studie gewählte Verfahrensweise für die 3. beispielhafte Kategorie, die sich von der Kategorie b prinzipiell nur durch die Behandlung oder Vermeidung von Abfällen zur Verwertung unterscheidet, beinhaltet neben den in der Kategorie b genannten Aggregaten (im Unterschied zur Kategorie b ist beispielhaft eine SCR-Variante und ein Kohlefilter am Ende des Rauchgasweges dargestellt) eine Anlage zur Rückgewinnung von handelsfähiger Salzsäure, nämlich eine Rektifikationsanlage, oder eine Abwasseraufbereitung zur Abtrennung von NaCl, CaCl₂ oder CaSO₄. In den weiteren Berechnungen wird die Rückgewinnung von Salzsäure als mögliche Variante weiterbetrachtet; für die Vermeidung von Abwasser ist dann weiterhin eine Abwasserbehandlung mit indirekter Eindampfung oder eine Sprühtrocknung notwendig. Die Sprühtrocknung ist als mögliche Alternative Blockfließbild der Verfahrensvariante Kategorie c am Ende dieser Studie angegeben.

3. Bewertung der verschiedenen RGR-Verfahren

3.1. Definition einer Vergleichsbasis für die Bewertung der RGR-Verfahren

Um die verschiedenen Rauchgasreinigungsvarianten vergleichen zu können und insbesondere die Emissionen, Verbräuche und Investkosten der jeweiligen Anlage abschätzen zu können, ist es sinnvoll, eine Anlage mittlerer technischer Größe als Basis der Rauchgasreinigung zu definieren. Wir gehen dabei von einer typischen Müllverbrennungsanlage mit Rostfeuerung und Kessel aus, deren Auslegungsgröße so gewählt wird, dass die Rauchgasmenge 100.000 m³/h i.N. nach Abzug der Rauchgasfeuchte mit einem üblichen Betriebsauerstoffgehalt von etwa 8% O₂ ergibt. Die Kesselendtemperatur wird mit 200°C angenommen. Bei einem Wassergehalt am Kesselende von etwa 15% ergibt sich eine nasse Gasmenge von 118.000 m³/h i.N. Diese Annahmen entsprechen etwa durchschnittlichen Verhältnissen an bundesdeutschen Müllverbrennungsanlagen und einem Jahresdurchsatz von Hausmüll in einer Größenordnung von etwa 150.000 Mg [siehe Lit. 1-7, für 1 Linie]

Für die Abschätzung der Verbräuche an Betriebsmitteln ist eine weitere Annahme notwendig, die die Schadstoffgehalte der Verbrennungsgase für den Vergleich festlegt. Dazu werden typische Rohgasgehalte moderner Verbrennungsanlagen ermittelt und verglichen mit folgendem Ergebnis: Der Durchschnittsgehalt an Schadstoffen in Rauchgasen hinter Müllverbrennungsanlagen beträgt [Lit. 17]:

Schadstoff	Rohgasgehalte	
	mg/m ³ i.N.trocken	kg/h
Staub	2.000	200,0
CO	20	2,0
HCl	800	80,0
SO₂	400	40,0
NO_x	350	35,0
C_{org.}	3	0,3
HF	5	0,5
TE	1^{a)}	1x10⁻⁷
Hg	400^{b)}	0,04
Cd	1.000^{b)}	0,1
TI	100^{b)}	0,01
As	100^{b)}	0,01
Pb	20.000^{b)}	2

^{a)} = ng/m³ i.N.trocken ^{b)} = µg/m³ i.N.trocken

In der Tabelle ist auch der Massenstrom der Schadstoffe unter den genannten Rauchgasmengen und -bedingungen eingetragen.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Bei der Berechnung der Betriebsmittel wird für die Umsetzungsreaktionen der Schadstoffe mit den Absorptionsmitteln von der Bruttoreaktion der mengenmäßig wichtigsten Komponenten ausgegangen, also z.B. bei den Schwefeloxiden vom SO_2 . Für die **stöchiometrische** Umsetzung der bei der Rauchgasreinigung ablaufenden Absorptionen werden beim Einsatz von Kalkhydrat als Absorptionsmittel (überwiegend wird in MVA in Deutschland Kalkhydrat als alkalisches Neutralisationsmittel eingesetzt) folgende Einsatzmengen benötigt und fallen folgende Reststoffe an:

Schadstoff		Ca(OH)_2	Restprodukte		Wasser
Art	kg	kg	Art	kg	kg
HCl	1	1,014	CaCl_2	1,521	0,493
HF	1	1,850	CaF_2	1,950	0,900
SO_2	1	1,156	CaSO_4	2,125	0,283

Für diese Studie wird nur der Einsatz von Kalk als Absorbens betrachtet. Ebenfalls oftmals als Reagens verwendete Natronlauge wird vernachlässigt.

Für andere Schadstoffe findet die Umsetzung nicht stöchiometrisch statt, sondern es finden in erster Linie physikalische Anlagerungen (Adsorptionen) statt, die in niedrigen Konzentrationsbereichen proportional zur vorhandenen Oberfläche des Adsorbens stattfinden.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

3.2 Bestimmung und Bewertung der durchschnittlichen Mengen an Betriebsmitteln und Rückständen sowie der eingesetzten Energien bei den einzelnen Kategorien

Kategorie a): Schadstoffminimierung auf z.B. 90% der Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV
 Beispiel des Betriebsmitteleinsatzes mit 100.000 m³ i.N. tr./h (O₂ im Betriebszustand) [Lit. 17]

	Schadstoffe im Rohgas		Schadstoffe im Reingas (90%)		Δ	erforderl. Betriebsmittel incl. überstöchiometrischer Anteil		Bemerkungen	Abfälle/Produkte	
	mg/m ³ i.N	kg/h	mg/m ³ i.N	kg/h		Art	kg/h		Art	kg/h
Staub	2.000	200,0	9	0,9	199,1	---	---	Abscheidung durch E- oder Gewebefilter	Staub	199,1
CO	20	2,0				---	---	Emission durch Feuerung bereits unter GW	---	---
HCl	800	80,0	9	0,9	79,1	Ca(OH) ₂	143,5	Sprühabsorber, Reinheit 95%, f = 1,7	Mischsalz	183,6
SO ₂	400	40,0	45	4,5	35,5	Ca(OH) ₂	73,4	Sprühabsorber, Reinheit 95%, f = 1,7	Mischsalz	107,8
NO _x	350	35,0	180	18	17	NH ₄ OH	60,0	für SNCR-Verfahren, NH ₄ OH-Lös. 25%-ig	---	---
C _{org.}	3	0,3				---	---	Emission durch Feuerung bereits unter GW	---	---
HF	5	0,5	0,9	0,09	0,41	Ca(OH) ₂	1,36	Sprühabsorber, Reinheit 95%, f = 1,7	Mischsalz	1,4
TE	1 ^{a)}	1x10 ⁻⁷	9x10 ⁻²	9x10 ⁻⁹	~ 1x10 ⁻⁷					
Hg	400 ^{b)}	0,04	27	2,7x10 ⁻³	~ 0,04					
Cd	1.000 ^{b)}	0,1	45	4,5x10 ⁻³	~ 0,11	HOK	50,0			
Tl	100 ^{b)}	0,01								
As	100 ^{b)}	0,01								
Pb	20.000 ^{b)}	2								

a) = ng/m³ i.N.trocken b) = µg/m³ i.N.trocken

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Kategorie b): Schadstoffminimierung auf z.B. 30% (außer NO_x, =50%) der Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV
 Beispiel des Betriebsmitteleinsatzes mit 100.000 m³ i.N. tr./h (O₂ im Betriebszustand) [Lit. 17]

	Schadstoffe im Rohgas		Schadstoffe im Reingas (90%)		Δ	erforderl. Betriebsmittel incl. überstöchiometrischer Anteil		Bemerkungen	Abfälle/Produkte	
	mg/m ³ i.N	kg/h	mg/m ³ i.N.	kg/h		kg/h	Art		kg/h	Art
Staub	2.000	200,0	3	0,3	199,7	---	---	Abscheidung durch E- oder Gewebefilter	Staub	199,7
CO	20	2,0	15	1,5	0,5	---	---	Schadstoffminimierung: Feuerungstechnik	---	---
HCl	800	80,0	3	0,3	79,7	Ca(OH) ₂	85,1	Waschstufe 1, Reinheit 95%, f = 1,0	gelöst. Salz	125,5
SO ₂	400	40,0	15	1,5	38,5	Ca(OH) ₂	46,9	Waschstufe 2, Reinheit 95%, f = 1,0	gelöst. Salz	84,2
NO _x	350	35,0	100	10	25	NH ₄ OH	110,0	für SNCR-Verfahren, NH ₄ OH-Lös. 25%-ig	---	---
C.org.	3	0,3	3			---	---	Emission durch Feuerung bereits unter GW	---	---
HF	5	0,5	0,3	0,03	0,47	Ca(OH) ₂	0,92	Waschstufe 1, Reinheit 95%, f = 1,0	gelöst. Salz	1,0
TE	1 ^{a)}	1x10 ⁻⁷	3x10 ⁻²	3x10 ⁻⁹	~1x10 ⁻⁷					
Hg	400 ^{b)}	0,04	9	9x10 ⁻⁴	~0,04					
Cd	1.000 ^{b)}	0,1	15	1,5x10 ⁻³	~0,11	HOK	50,0			
Tl	100 ^{b)}	0,01								
As	100 ^{b)}	0,01								
Pb	20.000 ^{b)}	2								

a) = ng/m³ i.N.trocken b) = µg/m³ i.N.trocken

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Kategorie c): Schadstoffminimierung auf z.B. 20% (außer NO_x, =30%) der Emissionsgrenzwerte nach 17. BImSchV
Beispiel des Betriebsmitteleinsatzes mit 100.000 m³ i.N. tr./h (O₂ im Betriebszustand) [Lit. 17]

	Schadstoffe im Rohgas		Schadstoffe im Reingas (90%)		Δ	erforderl. Betriebsmittel incl. überstöchiometrischer Anteil		Bemerkungen	Abfälle/Produkte	
	mg/m ³ i.N	kg/h	mg/m ³ i.N.	kg/h		Art	kg/h		Art	kg/h
Staub	2.000	200,0	2	0,2	199,8	---	---	Abscheidung durch E- oder Gewebefilter	Staub	199,8
HCl	800	80,0	2	0,2	79,8	Ca(OH) ₂	85,2	Washstufe 1, Reinheit 95%, f = 1,0	gelöst. Salz	125,7
CO	20	2,0				---	---	Emission durch Feuerung bereits unter GW	---	---
SO ₂	400	40,0	10	1,0	39,0	Ca(OH) ₂	47,5	Washstufe 2, Reinheit 95%, f = 1,0	gelöst. Salz	85,4
NO _x	350	35,0	60	6	29	NH ₄ OH	50,0	für SCR-Verfahren, NH ₄ OH-Lös. 25%-ig		
C _{org.}	3	0,3	2	0,2	0,1			Adsorption an AK oder HOK ohne gesonderte Anrechnung Betriebsmittel		
HF	5	0,5	0,2	0,02	0,48	Ca(OH) ₂	0,93	Washstufe 1, Reinheit 95%, f = 1,0	gelöst. Salz	1,0
TE	1 ^{a)}	1x10 ⁻⁷	2x10 ⁻²	2x10 ⁻⁹	~ 1x10 ⁻⁷					
Hg	400 ^{b)}	0,04	6	6x10 ⁻⁴	~ 0,04					
Cd	1.000 ^{b)}	0,1	10	1x10 ⁻³	~ 0,11	HOK	50,0			
Tl	100 ^{b)}	0,01								
As	100 ^{b)}	0,01								
Pb	20.000 ^{b)}	2								

a) = ng/m³ i.N.trocken b) = µg/m³ i.N.trocken

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Betriebsmittel		Anlage Typ a)	Anlage Typ b)	Anlage Typ c)
Ammoniakwasser (25%)	SNCR- Verfahren	60,0 kg/h	110,0 kg/h	---
	SCR - Verfahren	---	---	50,0 kg/h
Ca(OH) ₂		220 kg/h	130 kg/h	130 kg/h
HOK		50 kg/h	50 kg/h	60 kg/h
Betriebswasser		2.985 kg/h	6.780 kg/h	7.980 kg/h
Flockungshilfsmittel		---	---	5,0 kg/h
Fällungsmittel TMT 15		---	1,5 kg/h	1,5 kg/h
Eisen-(III)-Chlorid		---	2,0 kg/h	2,0 kg/h

Reststoffe		Anlage Typ a)	Anlage Typ b)	Anlage Typ c)
Flugstaub / Kesselasche		200 kg/h	200 kg/h	200 kg/h
Salze und Altadsorbens		295 kg/h	---	---
Reststoffe aus ABA		---	260 kg/h	150 kg/h

Energie		Anlage Typ a)	Anlage Typ b)	Anlage Typ c)
Strom		550 kW	790 kW	1.030 kW
ND-Dampf	SNCR-Eindüsung	980 kg/h	980 kg/h	---
	NH ₃ -Strippung	---	220 kg/h	---
	HCl-Produktion	---	---	2.500 kg/h
Erdgas		---	---	240 m ³ /h

Verwertungsprodukte		Anlage Typ a)	Anlage Typ b)	Anlage Typ c)
	Salzsäure (30%)	---	---	240 kg/h

- a) Einfache Verfahren zur Erfüllung der 17. BImSchV: ca. 60 – 100 % der erlaubten Schadstoffkonzentrationen werden emittiert
- b) Aufwendige Verfahren zur Erzielung sehr hoher Abscheidegrade: ca. 10 – 60 % der erlaubten Schadstoffkonzentrationen werden emittiert
- c) Aufwendige Verfahren mit weitgehender Rückstandsverwertung

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Stromverbraucher	Anlage Typ a)	Anlage Typ b)	Anlage Typ c)
SNCR-Eindüsung	5 kW	5 kW	---
Sprühtrockner	---	30 kW	---
Sprühabsorber mit Quench	45 kW	---	---
Gewebefilter	30 kW	30 kW	---
Elektrofilter	---	---	60 kW
Wäscher- und Quenchenpumpen	---	95 kW	95 kW
Saugzug einfache RG-Reinigung	450 kW	---	---
Saugzug für RG-Reinigung mit Wäscher	---	600 kW	600 kW
SCR-Katalysator-Anlage	---	---	5 kW
NH ₃ -Strippping	---	10 kW	---
HCl-Produktion	---	---	250 kW
Sonstiges, Diverses	20 kW	20 kW	20 kW
Gesamt	550 kW	790 kW	1.030 kW

- a) Einfache Verfahren zur Erfüllung der 17. BImSchV: ca. 60 – 100 % der erlaubten Schadstoffkonzentrationen werden emittiert
- b) Aufwendige Verfahren zur Erzielung sehr hoher Abscheidegrade: ca. 10 – 60 % der erlaubten Schadstoffkonzentrationen werden emittiert
- c) Aufwendige Verfahren mit weitgehender Rückstandsverwertung

3.3. Vergleich der Schadstoff-Emissionen bei den gewählten RGR-Kategorien

a) Direkt anfallende Emissionen am Standort

Wenn man die Vorgaben der 17.BImSchV mit den tatsächlichen Emissionen der mit den beschriebenen Rauchgasreinigungen ausgerüsteten Anlagen vergleichen will, bietet sich für die direkten Emissionen der Anlage die Gegenüberstellung in einer Tabelle an. Während in der Betriebsmittelberechnung von den Standardwerten (Auslegungswerten) der einzelnen Rauchgaskategorien wie in der Definition in Kapitel 3.2 ausgegangen wird, kann für den Emissionsvergleich für jeden Schadstoff eine geringere Emissionskonzentration angenommen werden, wie sie in heutigen Rauchgasreinigungsanlagen (auch der jeweiligen Kategorie) oft erreicht wird. Dabei werden nicht die von einzelnen Anlagen erreichbaren maximalen Abscheidegrade und minimalen Emissionen zugrundegelegt, sondern solche, die in der Regel möglich sind. Der Reingaswert, der in die Emissionsbetrachtung eingeht, liegt teilweise an der Nachweisgrenze der kontinuierlichen Messgeräte für die Messung und Registrierung der MVA-Emissionen. Tiefere Emissionsmesswerte sind aus diesem Grunde, von diskontinuierlichen Messungen abgesehen, statistisch nicht absicherbar. In der Literatur werden zwar manchmal noch wesentlich geringere Emissionswerte zitiert, aber für den Standardbetrieb sollen diese im Emissionsvergleich nicht angesetzt werden [z.B. Lit. 18].

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Schadstoffemissionen der MVA pro m³ i.N.tr. (links Tagesmittel bzw. Mittel über Probenahmezeit bezogen auf trockenes Rauchgas mit ca. 8% Sauerstoff, Auslegungswerte) für die verschiedenen Kategorien der RGR (Angaben wie in Kap. 3.2., rechts erreichbare Werte für die Emissionsbetrachtung in Klammern)							
Schadstoff	Forderung der 17. BImSchV	Betriebswerte "Einfache Rauchgasreinigung"		Betriebswerte "Aufwendige Rauchgasreinigung"		Betriebswerte "Aufwendige RGR mit Abfallminimierung"	
Staub	10 mg	9 mg	(1)	3 mg	(0,5)	2 mg	(0,5)
Stickoxide, ang. als NO ₂	200 mg	180 mg	(140)	100 mg	(70)	60 mg	(40)
Schwefeloxide ang. als SO ₂	50 mg	45 mg	(25)	15 mg	(5)	10 mg	(3)
Anorganisches Chlor, Chlorwasserstoff (Salzsäure), HCl	10 mg	9 mg	(2)	3 mg	(1)	2 mg	(0,5)
Fluorwasserstoff HF	1 mg	0,9 mg	(0,2)	0,3 mg	(0,1)	0,2 mg	(0,1)
Quecksilber und seine Verbindungen, ang. als Hg	30 µg	27 µg	(10)	9 µg	(2)	6 µg	(1)
Halogenierte Dioxine und Furane: ang. als Toxische Äquivalente, "TE"	0,1 ng	0,09 ng	(0,02)	0,03 ng	(0,01)	0,02 ng	(0,01)

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Schadstoffemissionen der MVA pro Stunde, entsprechend der verbrannten Müllmenge von ca. 20 Mg, für die verschiedenen Kategorien der RGR, errechnet aus den erreichbaren Werten aus der vorhergehenden Tabelle, in kg/h			
Schadstoff	Emittierte Schadstoffe "Einfache Rauchgas- reinigung"	Emittierte Schadstoffe "Aufwendige Rauch- gasreinigung"	Emittierte Schadstoffe "Aufwendige RGR mit Abfallminimierung"
Staub	0,1	0,05	0,05
Stickoxide, ang. als NO ₂	14	7	4
Schwefeloxide ang. als SO ₂	2,5	0,5	0,3
Anorganisches Chlor, Chlorwas- serstoff (Salzsäure), HCl	0,2	0,1	0,05
Fluorwasserstoff HF	0,02	0,01	0,01
Quecksilber und seine Verbindun- gen, ang. als Hg	0,001 (1 g)	0,0002 (0,2 g)	0,0001 (0,1 g)
Halogenierte Dioxine und Furane: ang. als Toxische Äquivalente, "TE"	0,000000002 (2 µg)	0,000000001 (1 µg)	0,000000001 (1 µg)

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Zusammenfassend kann man die Mehremissionen hinter einer einfachen RGR (gegenüber den in aufwendigen Anlagen Kategorie b und c erreichbaren Werten, Definition wie in der Einleitung Kap. 3.3 a) als Produkt aus der Differenz der Produkte der mittleren Konzentrationen und der Rauchgasmenge in Frachten/h ausdrücken:

Schadstoff	Staub	NO _x	SO ₂	HCl	HF	Hg	"TE" Dioxin
Mehrfracht pro Stunde in einfacher RGR (a) gegenüber der RGR Kategorie b	50 g	7 kg	2 kg	100 g	10 g	0,8 g	1 µg
Mehrfracht pro Stunde in einfacher RGR (a) gegenüber der RGR Kategorie c	50 g	10 kg	2,2 kg	150 g	10 g	0,9 g	1 µg

Die aufwendigeren Rauchgasreinigungen erbringen erwartungsgemäß niedrigere Emissionen. Geht man jedoch davon aus, dass die 17. BImSchV aber bereits Schadstoffgrenzwerte aus Vorsorgegesichtspunkten heraus festlegt und nicht aus begründeten epidemiologischen Wirkungsbetrachtungen und daraus hergeleiteten Grenzkonzentrationen heraus, ist es fraglich, ob der höhere Aufwand auch durch einen volkswirtschaftlichen Nutzen gerechtfertigt wird. Aus diesem Gesichtspunkt heraus ist es sinnvoll, auch die standortunabhängigen Wirkungen der aufwendigeren Anlagenausführung hinsichtlich der zusätzlich verbrauchten Betriebsmittel und Energien (bzw. der aus dem Energieinhalt der Abfälle nicht zur Verfügung gestellten Energie) und den Emissionswirkungen bei der Herstellung der Einsatzstoffe bzw. der Entsorgung oder Verwertung der entstehenden Abfälle und Produkte der Anlage inklusive dem Transport abzuschätzen.

b) Indirekt anfallende Emissionen durch Einsatz von Betriebsmitteln, Energie und der Entsorgung der Rückstände

Aus der Gegenüberstellung der benötigten Betriebsmittel und der entstehenden Abfälle und Produkte aus Kapitel 3.2 ist ersichtlich, dass die aufwendigere Rauchgasreinigung die deutlich niedrigeren Emissionswerte nicht nur durch eine umfangreichere Anlagentechnik schafft, sondern zusätzlich auch teilweise größere Mengen an Betriebsmitteln (außer dem in Variante a bestehenden Mehrverbrauch an Absorptionsmitteln) benötigt und in Summe auch eine größere Menge an Produkten erzeugt, die zum Teil als Wirtschaftsstoffe in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können, aber zum anderen auch geeignet entsorgt werden müssen.

Eine Betrachtung, welche Umweltrelevanz die geeignete Entsorgung der anfallenden Stoffe aus der aufwendigeren RGR im Vergleich zu der Entsorgung der Abfälle aus dem einfacheren Verfahren hat, soll an dieser Stelle nicht erschöpfend geführt werden, sondern nur in wesentlichen Punkten kurz angerissen werden. Wesentlich sind die zu beseitigenden bzw. zu verwertenden Abfälle bei der ökonomischen Bilanzierung der Gesamtanlage.

Eine geeignete Entsorgung der Abfälle der Anlage (erst recht eine geeignete Verwertung der anfallenden Produkte) sollte eigentlich keine negativen Auswirkungen auf die Umwelt haben. Unter diesem Gesichtspunkt wäre zu diskutieren, ob die Verwertung der aufwendig hergestellten Produkte der intensiveren Rauchgasreinigung (z.B. HCl, Gips) vergleichbar ist mit der auch als Verwertung angesehenen Nutzung des Altsorbens aus der einfachen RGR als Versatzmaterial in einem Salzbergwerk. Diese Art der Verwertung wird sehr kontrovers diskutiert und oft nur als "Pseudo-Verwertung" bezeichnet. Trotzdem ist es sehr schwierig, Unterschiede in der Umweltrelevanz zu quantifizieren, so dass der Versuch hier nicht unternommen werden soll. Andere Abfälle der aufwendigeren Rauchgasreinigung können ebenfalls auf die gleiche Art als Bergwerkversatzstoff verwertet werden, lediglich der Filterkuchen (Reststoffe aus ABA, Abwasserbehandlungsanlage, bei Schwermetallflockung und -fällung und anschließender Filtration vor der Eindampfung oder Sprühtrocknung des Restwassers) mit hohen Schwermetallgehalten wird in der Regel auf geeigneten Deponien entsorgt. Der Altkoks aus dem Adsorptionsreaktor kann in der Regel als Einsatzstoff der MVA geeignet entsorgt werden, weil die Schadstoffe aus dem Altkoks entweder in der MVA zerstört werden oder aber in einer geeigneten Schadstoffsene aus dem Verfahren ausgeschleust werden. Eine Bewertung der Umweltrelevanz der Entsorgung dieser Abfälle ist wiederum sehr schwierig, wenn man davon ausgeht, dass die gewählte Beseitigung ebenso wie die praktizierten Verwertungen der Abfälle umweltunschädlich sein müssen und u.E. auch sind.

Für die vergleichende Bewertung der Umweltrelevanz der Emissionen aus Einsatzstoffen und Energien bleiben also im wesentlichen nur noch die Emissionen aus der Produktion der Einsatzstoffe Kalk bzw. Kalk-HOK-Gemisch und der in den aufwendigeren RGR zusätzlich benötigten Energien (entweder ND-Dampfmehrverbrauch für die Ammoniakstrippung oder zum Wärmetausch mit Rauchgas oder direkter Verbrauch von Erdgas zur Wiederaufheizung

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

der Rauchgase vor der Entstickung im SCR-Verfahren und höherer Bedarf an elektrischer Energie, die entweder fremdbezogen werden muß oder aber aus Eigenproduktion nicht abgegeben wird und damit keine Kraftwerksemissionen einsparen hilft), besonders durch die Abfallminimierungsstrategien bei der gewählten Variante mit HCl-Rektifikation.

Wesentliche Unterschiede bestehen im Kalkbedarf der einfacheren RGR (220 kg/h) im Vergleich zur aufwendigeren RGR (130 kg/h), im größeren Dampfverbrauch der aufwendigeren Verfahren (Variante b mit 220 kg/h und Variante c mit 1520 kg/h mehr als Version a) und im zusätzlichen Erdgas-Bedarf der aufwendigeren RGR mit HCl-Rektifikation (Variante c: 240 m³/h Erdgas/h) sowie dem Mehrverbrauch an elektrischer Energie beim aufwendigen RGR-Verfahren (1030 kWh/h bei der Variante c, 790 kWh/h bei der Variante b gegenüber 550 kWh/h bei der Variante a), also besonders durch die Wertstoffherstellung aus Rauchgasreinigungsprodukten in der gewählten Variante mit HCl-Rektifikation.

Der ökologische Unterschied der standortunabhängigen Emissionswirkung der verschiedenen Rauchgasreinigungsverfahren soll vereinfachend - aber u.E. ausreichend zutreffend - durch den unterschiedlichen Energiebedarf in beiden Verfahren und bei der Herstellung von deren Einsatzstoffen (im wesentlichen nur Kalk) verdeutlicht werden. Vernachlässigt werden dabei die Emissionen zur Herstellung der anderen Betriebsmittel der aufwendigen RGR, z.B. Aktivkoks, Fällungs- und Flockungsmittel sowie Eisenchloride. Vernachlässigt werden soll ebenfalls der durch die Herstellung der Verfahrenskomponenten und durch den größeren Bauteil des aufwendigen Verfahrens bewirkte größere Energie- und Rohstoffverbrauch mit allen Reststoffen bei deren Produktion sowie die größere Flächeninanspruchnahme und damit auch Geländeversiegelung durch die größere, aufwendigere Anlage.

Der zusätzliche Energiebedarf der aufwendigen RGR kann über den in Deutschland typischen "Energimix" in Emissionen umgerechnet werden, die mit den zusätzlichen Emissionen des einfacheren Rauchgasreinigungsverfahrens verglichen werden müssen, die sich aus der Multiplikation der mittleren Emissionswerte mit der Rauchgasmenge von 100.000 m³/h ergeben.

Der zusätzliche Energiebedarf einer der RGR-Varianten läßt sich aus der folgenden Tabelle entnehmen, die die 4 Energiearten thermische Energie (zur Herstellung von Kalk aus Kalkstein), Dampfenergie (ND-Dampf zur Verdüsung Ammoniak bei SNCR, zur Ammoniakstrippung und zur Aufheizung des Rauchgases vor SCR, Erdgas (zur weiteren Wiederaufheizung des Rauchgases) und elektrische Energie (für Motoren und Antriebe) getrennt erfaßt. Grundlage für die folgenden Zahlen sind der Heizwert von Erdgas, der mit ca. 32 MJ/m³ oder ca. 6,5 kW(thermisch)/kg angenommen wird, und die Gesamtenergiemenge zur Herstellung einer Tonne Kalk (incl. Rohstoffgewinnung und Infrastrukturverlusten), die vom Bundesverband der deutschen Kalkindustrie als Mittelwert über die in Deutschland ausgeführten Herstellungsverfahren mit 3044 MJ/t entsprechend 0,846 kW(thermisch)/kg angegeben wird sowie der nutzbare Energiegehalt von ND-Dampf, der mit 2.200 kJ/kg entsprechend 0,61 kW(thermisch)/kg angenommen wird.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Zur Umrechnung der verschiedenen Betriebsmittel und Energien soll ein elektrisches Energieäquivalent bestimmt werden, das bei verschiedenen Verfahren zusätzlich durch Produktion von Rohstoffen, durch die fehlende Erzeugung von Strom oder durch zusätzlichen Stromverbrauch anfällt. Dieses Äquivalent kann dann mit Hilfe der in der Literatur abgeleiteten Emissionen aus dem "Strommix" in externe Emissionen umgerechnet werden, die dann mit den Emissionen am Anlagenstandort bilanziert werden können.

Dazu werden folgende Annahmen benutzt:

- ◆ Für die Produktion von Kalk (beispielhaft für Absorptionsmittel) wird der Energiebedarf aus den Angaben des Kalkindustrieverbandes mit dem Umwandlungswirkungsgrad von 33% zu elektrischer Energie umgerechnet.
- ◆ Die Dampfergie wird mit dem gleichen Umwandlungswirkungsgrad zu elektrischer Energie bewertet.
- ◆ Die Energie des verbrauchten Erdgases könnte ebenfalls mit 33% Umwandlungsgrad in elektrische Energie "veredelt" werden.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Betriebsbedarf	Einfache RGR Kategorie a	Aufwendige RGR Kategorie b	Aufwendige RGR Kategorie c	Mehrfache einfache RGR Kategorie a		Mehrfache aufwendige RGR Kategorie b		Mehrfache aufwendige RGR Kategorie c	
				Betriebs- mittel	Energie- äquivalent	Betriebs- mittel	Energie- äquivalent	Betriebs- mittel	Energie- äquivalent
Kalk kg/h	220	130	130	gegen b und gegen c: 90 kg/h	gegen b und gegen c: 76 kW _{th}				
Elektrische Energie kWh/h	550	790	1.030			gegen a: 240 kW _{el}		gegen a: 480 kW _{el} gegen b: 240 kW _{el}	
ND-Dampf kg/h	980	1200	2500			gegen a: 220 kg/h	gegen a: 134 kW _{th}	gegen a: 1520 kg/h gegen b: 1300 kg/h	gegen a: 930 kW _{th} gegen b: 790 kW _{th}
Erdgas m ³ /h	-	-	240					gegen a und gegen b: 240 m ³ /h	gegen a und gegen b: 1.560 kW _{th}

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Wertet man die thermischen Energien (fürs Kalkbrennen, für Dampf und für den Heizwert des Heizöls) mit einem Umwandlungswirkungsgrad von 33 % äquivalent als elektrische Energie, ergibt sich folgender Bedarf an "Energieäquivalenten" für die drei Verfahrensvarianten:

Bedarf an "Energie- äquivalent" aus Betriebsmitteln in kWh _e /h	Kategorie a	Kategorie b	Kategorie c
		25	285

Man erhält als Summe des Mehrbedarfs gegenüber der Kategorie a an elektrischer Energie (Äquivalent aus verbrauchter und aus anderer Energieform nicht erzeugter elektrischer Energie)

- ◆ auf Seiten der aufwendigeren RGR Kategorie b: **260 kWh/h**
- ◆ und entsprechend für Kategorie c mit Wertstoffrückgewinnung: **1285 kW/h**.

Die Emissionsbelastung aus der Stromherstellung pro kWh ergibt sich aus folgenden Emissionen "Strommix" in der nachstehenden Tabelle, ebenso die je Stunde bei der Produktion des Mehrbedarfs an Energie extern freigesetzten Emissionen.

Schadstoff	NO _x	HCl	SO ₂	HF	Hg	"TE"
Emission durch 1 kWh "Strommix"	910 mg	19,1 mg	415 mg	1,19 mg	9,4 µg	8 pg
Externe Mehr-Emission durch 260 kWh (Kategorie b) und 1285 kW (Kategorie c) (in 1 Stunde)	237 g	5 g	108 g	309 mg	2,4 mg	2,1 ng
	1,17 kg	24,5 g	533 g	1,53 g	12,1 mg	10,3 ng

3.4. Bilanzierung der Gesamtemissionen bei den unterschiedlichen Kategorien der RGR

In diesem Kapitel sollen die Mehremissionen der einzelnen Kategorien der RGR-Anlagen für die gewählte Auslegunggröße der Anlage pro Stunde, das heißt, pro 20 Mg verbrannten Hausmülls, gegenübergestellt und die Mehremissionen vor Ort mit den externen Mehremissionen (durch Betriebsmittel und Energie) gegeneinander verrechnet werden. Dadurch werden die Netto-Mehremissionen bei Wahl des einfachen Rauchgasreinigungsverfahrens gegenüber beiden Alternativen für die jeweiligen Schadstoffe ermittelt.

Die Bilanz ergibt - mit Ausnahme des Schadstoffs Schwefeldioxid - netto regelmäßig eine Mehrbelastung durch die Emissionen der einfachsten Anlage (Kategorie a):

Schadstoff	NO _x	HCl	SO ₂	HF	Hg	"TE"
Mehremission durch einfache RGR a vor Ort pro Stunde gegen b und c (aus Kapitel 3.3)	7 kg	2 kg	100 g	10 g	0,8 g	1 µg
	10 kg	2,2 kg	150 g	10 g	0,9 g	1 µg
Externe Mehr-Emission durch 260 kWh "Energie-äquivalent" (Kategorie b) und 1285 kWh (Kategorie c) (in 1 Stunde)	237 g	5 g	108 g	309 mg	2,4 mg	2,1 ng
	1,17 kg	24,5 g	533 g	1,53 g	12,1 mg	10,3 ng
Netto-Mehremission durch einfache RGR a pro Stunde gegen b und c	6,763 kg	1,995 kg	8 g*	9,69 g	0,798 g	0,998 µg
	8,83 kg	2,175 kg	383 g*	8,5 g	0,888 g	0,99 µg

* Minderemission durch Kategorie a

3.5. Ökologische Bewertung der betrachteten RGR-Verfahren

Die in dieser Studie vorgestellten Rauchgasreinigungsverfahren erfüllen ausnahmslos die Forderungen der Immissionsschutzgesetzgebung, insbesondere der für Verbrennungsanlagen anzuwendenden 17. BImSchV. Alle Emissionsdaten aller 3 Rauchgasreinigungskategorien bleiben mit deutlichem Abstand unter den Grenzwerten, die aufwendigeren Verfahren ermöglichen Emissionswerte von weniger als 1/10 der Grenzwerte.

Ökologisch ist es notwendig, die Emissionen auf ein Maß zu reduzieren, das eine Schädigung, Gefährdung oder Belästigung der Anwohner verhindert und auch die anderen Schutzgüter (Tiere, Pflanzen, Kulturgüter) in ausreichendem Maße berücksichtigt. Die Grenzwerte der 17. BImSchV sind so festgesetzt, dass diese Anforderungen auch für sensible Anwohner erfüllt sind, indem nicht nur bekannte epidemiologische Daten berücksichtigt wurden, sondern aus Vorsorgegesichtspunkten heraus strengere Grenzwerte gefordert werden. Außerdem sind in den Grenzwerten (bzw. in den diesen Grenzwerten zugrundeliegenden Immissionsgrenzwerten) auch schon Wechselwirkungen verschiedener Schadstoffe berücksichtigt.

Nun ist es schwierig zu beurteilen, ob eine RGR, die die Schadstoffbegrenzung noch um einen Faktor von 10 oder mehr unterschreiten kann, ökologisch sehr viel besser ist als diejenige, die Grenzwerte, die aus Vorsorgegesichtspunkten abgeleitet sind, "nur" um den Faktor 2 unterbietet. Besonders schwierig wird die ökologische Bewertung aufwendiger Verfahren, wenn man bedenkt, dass ein deutlich größerer Effekt auftritt, wenn man die Mehrkosten, die die aufwendige RGR benötigt, an anderer Stelle zur Immissionsminderung einsetzt, bei der größere Frachten an Schadstoffen mit gleichem Aufwand abgeschieden werden können (siehe auch Diskussion im Kapitel 3.7).

Vielleicht ist es sinnvoller, über die nicht im Gesetzeswerk erwähnten Schadstoffe eine ökologische Bewertung der einzelnen Rauchgasreinigungsverfahren herzuleiten. Der frachtmäßig größere Anteil von Schadstoffen im Rauchgas ist anorganischer Natur, also z.B. Salzsäure, Schwefeloxide und Stickoxide sowie der größte Teil des Staubes. Ein weiterer bedeutenderer Anteil der Schadstoffe sind Schwermetalle und deren Verbindungen, die auch meist anorganische Verbindungen sind und wovon der größte Anteil in der Staubfracht der RGR liegt. Ein mengenmäßig kleinerer Anteil - neben Kohlenmonoxid - ist der sogenannte organische Kohlenstoffanteil, in dem sich hunderte von bekannten Verbindungen und mit Sicherheit noch weitere tausende noch unbekannte oder im Rauchgas noch nicht nachgewiesene Verbindungen verstecken. Diese organischen Einzelverbindungen können in einer RGR nicht ausreichend detektiert und bestimmt werden, erst recht nicht in einem routinemäßigen Verfahren oder gar kontinuierlich. Aus diesem Grunde sollte eine moderne Rauchgasreinigung auch für diese Schadstoffe ein ausreichendes Abscheidungspotential haben. Die einzelnen organischen Schadstoffe haben sehr unterschiedliche Gefährdungspotentiale. Bekannt ist das Schädigungspotential z.B. bei halogenierten Dibenzodioxinen und -furanen. Deren Grenzwert in der 17. BImSchV ist mit $0,1 \text{ ng/m}^3$ bereits erkennbar niedrig angesetzt. Aber auch andere bekannte organische Schadstoffe, die aus anderen Umweltbereichen bekannt geworden sind, können auch in Rauchgasen in geringen Konzentrationen

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

vorkommen [Lit. 20-21]. Die Schadstoffe, von denen Grenzwerte in der TA Luft oder in anderen Immissionsschutzanforderungen bekannt sind, werden im Rauchgas auch nur in deutlich geringeren Konzentration als den entsprechenden Grenzwerten vorgefunden, so dass der Vorsorgegedanke bei der Festsetzung der Grenzwerte eine weitere Besorgnis ausschließen sollte. Aber was ist mit den vielen bekannten Schadstoffen, die im Rauchgas nicht gemessen werden und deren genaues Gefährdungspotential noch gar nicht bekannt ist? Oder was können noch unbekannte Einzelschadstoffe an Gefährdung bedeuten, falls deutlich niedrigere Konzentrationen als der Summenparameter "organisch gebundener Kohlenstoff" schon zu Gefährdungen führen können (siehe das vor 40 Jahren auch noch nicht diskutierte Dioxin, das heute mit einem Hundertmilliardstel des Grenzwertes für Cgesamt in der 17. BImSchV bewertet wird). Als mögliche Gefahrenstoffe können eine Vielzahl reiner Kohlenwasserstoffe (z.B. PAK oder Biphenyle) oder deren halogenierte oder anders substituierte Verwandte sowie andere Polycyclische oder Heterocyclische Verbindungen und deren substituierte Vertreter in Frage kommen, deren Gefährdungspotential nicht unbedingt deutlich geringer als das von halogenierten Dioxinen sein muß. In jüngster Zeit sind aus dieser unvorstellbar großen Verbindungsvielfalt z.B. die polychlorierten Naphthaline [Lit. 22] als einfachster Vertreter der PAK sowie Nitroaromaten oder, nach einer japanischen Veröffentlichung, das als Kyotogift bezeichnete 3-Nitrobenzanthron [Lit. 23] näher in die Untersuchung genommen worden. Eine Vorstellung von der Vielfalt dieser Verbindungen gibt sich beispielsweise in den zuletzt genannten Literaturstellen [Lit. 20-23]. Die denkbaren Schadstoffe sollen hier aber nicht weiter vertieft werden.

Stattdessen soll eine ökologische Bewertung der verschiedenen Rauchgasreinigungen anhand dieser Schadstoffe in etwas allgemeinerer Form durchgeführt werden:

Moderne Rauchgasreinigungen besitzen eine sehr effektive Abscheidestufe für organische Schadstoffe in Form einer Adsorption an Aktivkohle oder Aktivkoksen. Zunächst wird bei MVA aber eine möglichst weitgehende Zerstörung aller organischen Schadstoffe gefordert. Dies gelingt mit der Optimierung des Feuerraumes und der Verbrennungsbedingungen auf dem Rost (gleichermaßen natürlich auch entsprechend bei den konkurrierenden, aber noch nicht bewährten Verfahren wie der Schwel-Brenn-Anlage oder beim Thermoselect-Verfahren) und, wie in der 17. BImSchV festgelegt, in einer Mindestverweilzeit und einer Mindesttemperatur nach der letzten Verbrennungsluftzuführung, damit den organischen Verbindungen genügend Reaktionszeit zum Ausbrand gegeben wird.

Die Konstruktion des Verbrennungsraumes, der Nachbrennkammer und des Kessels sind also wesentliche Merkmale zur Reduzierung der Rauchgasbelastung mit organischen Spurenschadstoffen. Die Abscheidung von organischen Verbindungen an Kohlenstoffteilen wie AK oder HOK ist eine bekannte und durch die Notwendigkeit der Abscheidung von halogenierten Dioxinen und Furanen ausgereifte und zuverlässige Technik. Da in allen Rauchgasreinigungskategorien dieser Studie Kohlenstoff als Adsorptionsmittel für Organika eingesetzt wird (teils im Flugstromverfahren, teils im Festbettfilter, in der Praxis aber auch in einer Aufschlammung im Wäscher oder in der zur Reaktion ins Rauchgas eingedüsten Kalkmilch bei Quasitrockenverfahren) ist eine ausreichende Abscheidung der Organika bei allen RGR zu erwarten. Höhere Sicherheit der Abscheidung ergeben logischerweise aber Verfahren mit sehr langer Verweilzeit der Rauchgase in einer Aktivkohle-Filter-schicht.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Diesen Vorteil haben aber eher Verfahren mit einem Festbettfilter als solche mit einer dünnen Filterkuchenschicht auf einem Gewebefilter. Aus diesem Grunde sind Verfahren mit höherem Filterkohleinsatz potentiell als ökologisch bessere Variante einzustufen, weil die

Konzentrationen im Roh- und Reingas nicht ausreichend bekannt sind und die toxischen oder physiologischen Eigenschaften vergleichbarer Konzentrationen der Schadstoffe meist nicht bekannt sind. Es ist aber bekannt, dass Kohlenstoff ein sehr effektives und fast quantitatives Adsorptionsmittel für organische Schadstoffe ist und die sehr geringen Frachten im Rohgas auch nicht zu einer Sättigung der Kohle führen, so dass auch bei längeren Standzeiten der Aktivkohle oder des Braunkohlenkokes und ohne Bestimmung der Einzelkonzentrationen der Schadstoffe kein Durchbruch dieser Schadstoffe stattfinden kann. Der ökologische Vorteil der aufwendigeren Verfahren b oder c mit Festbett-Aktivkohlefilter ist also zu relativieren. Außerdem ist ja ein Verfahren der Kategorie a ebenfalls in einer Ausführung mit AK-Festbettfilter denkbar.

Ein weiteres ökologisches Unterscheidungsmerkmal für die einzelnen Rauchgasreinigungsvarianten wäre eine unterschiedlich gute Schwermetallabscheidung. Das Hauptaggregat zur Abscheidung von Schwermetallen (nicht so ausgeprägt gültig für die flüchtige Schwermetalle und deren flüchtige Verbindungen, in erster Linie also Quecksilber und seine Verbindungen) ist das Gewebefilter, der alle Stäube mit einem Korndurchmesser ab 1-10 µm nahezu quantitativ aus dem Rauchgas entfernen kann. Für flüchtige Komponenten ist ein wichtiges Abscheidungsaggregat wieder die (zu diesem Zweck teilweise auch dotierte) Aktivkohle oder HOK (Herdofenkoks=Braunkohlenkoks). Insofern sind die Rauchgasreinigungsverfahren wieder etwa gleichwertig. Die aufwendigeren Verfahren haben jedoch eine effektive Abscheidungsstufe zusätzlich: Für flüchtige Schwermetalle und deren flüchtige Verbindungen ist der sauer betriebene 1. Wäscher (oder die saure Waschstufe in einen zweistufigen Wäscher) ein sehr effektives Aggregat, indem physikalisch durch Kondensation der flüchtigen Verbindungen und chemisch durch die Bildung wasserlöslicher Salze oder stabiler Fällungsprodukte eine sehr gute Abscheidung aus dem Rauchgas gelingt. Aber auch in dieser Hinsicht ist der ökologische Vorteil aufwendiger Rauchgasreinigungsverfahren nur ein relativ geringer: Die Abscheidungssicherheit ist mit einem Wäscher größer, der Abscheidungsgrad ist aber auch ohne Wäscher bereits völlig ausreichend (gemessen an den Grenzwerten der 17: BImSchV) und muß damit nicht zwangsläufig durch erheblich größeren Aufwand verbessert werden.

Im Fazit ist in diesem Kapitel zu betonen, dass ein erheblich höherer Aufwand zu niedrigeren Immissionen führen kann, dies ökologisch aber nicht unbedingt notwendig erscheint. Der finanzielle Aufwand dazu ist an anderer Stelle sicherlich mit einem ökologisch besserem Ergebnis zu verwenden (siehe auch Kapitel 3.7).

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

3.6. Abschätzung und Gegenüberstellung der Kosten für die RGR

a) Investitionskosten für die RGR

- a Einfache Verfahren zur Erfüllung der 17. BImSchV: ca. 60 – 100 % der erlaubten Schadstoffkonzentrationen werden emittiert
- b Aufwendige Verfahren zur Erzielung sehr hoher Abscheidegrade: ca. 10 – 60 % der erlaubten Schadstoffkonzentrationen werden emittiert
- c Aufwendige Verfahren mit weitgehender Rückstandsauflösung zu Wertstoffen

Bereiche RG-Reinigung	Anlage Typ a)	Anlage Typ b)	Anlage Typ c)
SNCR-Eindüsung und –Versorgung	500.000 DM	500.000 DM	---
Sprühtrockner	---	2.000.000 DM	---
Sprühabsorber mit Quench	2.200.000 DM	---	---
Gewebefilter	1.000.000 DM	1.000.000 DM	---
Elektrofilter	---	---	1.500.000 DM
Wäscher- und Quenchenpumpen	---	1.500.000 DM	1.500.000 DM
Saugzug einfache RG-Reinigung	300.000 DM	---	---
Saugzug für RG-Reinigung mit Wäscher	---	400.000 DM	400.000 DM
SCR-Katalysator-Anlage	---	---	4.000.000 DM
HOK-Filter			1.500.000 DM
NH ₃ -Strippung	---	2.500.000 DM	---
HCl-Produktion	---	---	20-24 Mill. DM
RG-Kanäle einfache RG-Reinigung	1.500.000 DM	---	---
RG-Kanäle für RG-Reinigung mit Wäscher	---	3.000.000 DM	3.000.000 DM
E- und Leittechnik u.a. einfache RGR	2.500.000 DM	---	---
E- und Leittechnik u.a. für RGR mit Wäscher	---	3.000.000 DM	3.000.000 DM
Sonstiges, Diverses	500.000 DM	500.000 DM	500.000 DM
Gesamt	8.500.000 DM	14.400.000 DM	15.400.000 DM
			+HCl-Anlage 20-24 Mill. DM

Die Tabelle enthält von uns abgeschätzte Kosten der Einzelaggregate [Lit. 17] in der erforderlichen Auslegungsgröße, die je nach Lieferant und Ausführung des Aggregates sehr

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

differieren können. Wir haben bewußt keine Preisspannen angegeben, sind aber der Meinung, dass bei der Summierung der Einzelpreise ein etwa realistischer Preis für eine Rauchgasreinigung heutigen Zuschnitts und heutiger Marktlage entsteht. Die Preise befinden sich derzeit in einem sehr niedrigen Niveau [Lit. 4], so dass für die Zukunft, bei Annäherung an das Jahr 2005, durch das Ende des Übergangstermins der TA Siedlungsabfall und damit einer von den Anlagenbauunternehmen erhofften höheren Auslastung der Anbieterkapazitäten mit etwas höheren Preisen zu rechnen sein wird. Die genannten Preise sind, jeder für sich betrachtet, mit Vorbehalt zu betrachten und nicht für alle Anlagenbauunternehmen repräsentativ.

Die Investitionskosten für die verschiedenen Aggregate beinhalten noch keine Generalunternehmeraufschläge und keine Engineeringkosten für die Gesamtanlage. Die Kosten für die Gesamt-RGR werden aus den hier abgeschätzten Preisen folgendermaßen festgesetzt:

- a) Investitionsanteil: 9– 13 Millionen DM
- b) Investitionsanteil: 16– 21 Millionen DM
- c) Investitionsanteil: 17,5– 22,5 Millionen DM
zu ergänzen um 20 – 24 Millionen für beispielsweise eine Anlage zur HCl-Gewinnung.

Die Preise beinhalten nicht die Infrastruktur und den Bauteil sowie Versicherungen, Bauzeit-zinsen etc.. Diese Zusatzkosten werden bei den Verfahrensvarianten pauschal mit 10% der Investsumme für die Verfahrenstechnik angesetzt.

Die abgeschätzten Investitionskosten für die unterschiedlichen Ausführungen der RG-Reinigungen können nur als grobe Einschätzung für eine einlinige RG-Reinigung gelten. Es sind jeweils die Investkosten für eine heute übliche Anlagentechnik der jeweiligen Kategorie angesetzt, wohl wissend, dass man Rauchgasreinigungen auch sehr viel aufwendiger bauen kann mit Investitionskosten, die bis zum 10-fachen der hier niedergelegten Kosten und damit auch mit spezifischen Betriebskosten, die allein von der RGR herrühren, die weit von den errechneten Werten in den folgenden Tabellen abweichen.

Insbesondere für die Ermittlung von spezifischen Behandlungskosten haben viele andere Faktoren, wie z.B. Standort, Anzahl der Linien, etc. einen nicht unerheblichen Einfluß. Besonders bei Einrichtungen zur Rückstandsverwertung wirkt sich das Konzept der Gesamtanlage stark aus, da die Wertstoffgewinnung mitunter ausführungsbedingt eine Mindestgröße besitzen muß und auch bei einer mehrlinigen Müllverbrennung nicht unbedingt größer ausfallen muß. Dafür fallen die Investkosten und auch die spezifischen Müllbehandlungskosten umso höher aus, je mehr einzelne Anlagenergänzungen zur Rückgewinnung von Wertstoffen ins Verfahren eingebracht werden, und zwar ähnlich der Investkosten für die HCl-Rückgewinnung.

b) Betriebskosten und spezifische Kosten der Müllbehandlung aus der RGR

Für den Anlagenbetreiber, aber auch für den Bürger, der über die Abfallgebühren seiner Gemeinde direkt am Aufwand für die Rauchgasreinigung bei der Entsorgung seines Hausmülls bzw. Restmülls beteiligt ist, spielt der betriebswirtschaftliche Aspekt der Wahl des technischen Verfahrens ebenfalls eine große Rolle. Diese Auswirkungen sind für den Bürger in erster Linie am Preis für die Entsorgung von einer (Gewichts-)Tonne Hausmüll festzumachen. Für den Anlagenbetreiber können die effektiven Selbstkosten der Anlage entscheiden über die Auslastung der Anlage oder die notwendige Betriebsweise mit reduzierter Müllmenge und damit weiter steigenden spezifischen Entsorgungskosten.

Für den vorliegenden Vergleich soll eine einfache Abschätzung der spezifischen Kosten zur Entsorgung von Hausmüll vorgenommen werden, die sich nur auf den Teilaspekt Rauchgasreinigung erstreckt. Damit sollen - zur Verdeutlichung - nicht die Gesamtkosten der Müllentsorgung, die sich zusätzlich aus der gesamten thermischen Anlage und deren Betriebs-, Personal- und Finanzierungskosten ergeben, ermittelt werden, sondern nur die relativen Kosten der RGR. Unterschiede im Personalbedarf und daraus abzuleitende Einflüsse auf die unterschiedlichen Betriebskosten sind zunächst technisch nicht eindeutig auszumachen (weitgehende Automation beider Verfahrensvarianten) und werden deshalb ebenfalls nicht berücksichtigt, da die Tätigkeiten des Personals nicht einfach auf die Betriebsteile der Gesamtanlage umgelegt werden können.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

In der folgenden Tabelle sollen die Einflüsse der Wahl der RGR auf die Investitions- und Betriebskosten [Lit. 17] übersichtlich verglichen werden.

Vergleich der Investitions- und Betriebskosten von 3 RGR-Einheiten einer MVA: Basisdaten: 20 Mg/h oder 150.000 Mg/a Hausmüll, 100.000 m³/h i.N.tr Rauchgas (Definition der Kategorien siehe in Kap. 2.3)							
Art der Kosten		Kategorie a		Kategorie b		Kategorie c	
Investitionskosten (ohne MwSt):							
Nur RGR incl. Stahlbau, Bauteil, Montage, EMSR, Nebenanlagen		12 Mio		20,5 Mio		46 Mio	
Jährliche Finanzierungskosten (7% Zins, 15 Jahre Abschreibung, Annuität 0,10979):							
		1,32 Mio (150 DM/h)		2,25 Mio (257 DM/h)		5,05 Mio (576 DM/h)	
Reparatur, Wartung und Unterhalt der Anlage: 2,5% der Investkosten /a							
Kosten für Steuer und Versicherung: 1% der Investkosten /a							
		46.200 DM (5,27 DM/h)		78.750 DM (8,99 DM/h)		176.750 DM (20,18 DM/h)	
Betriebskosten, bezogen auf eine Stunde:							
Betriebsmittel/ Energie/ Reststoff	Spezifi- scher Preis	Spezi- fische Menge /h	Kosten DM/h	Spezi- fische Menge /h	Kosten DM/h	Spezi- fische Menge /h	Kosten DM/h
Elektrische Energie aus EP (Eigenproduktion)	0,05 DM /kWh	550 kW	27,50	790 kW	39,50	1.030 kW	51,50
Erdgas	0,40 DM /m³	-		-		240 m³/h	96,00
ND-Dampf aus EP	7 DM /Mg	980 kg/h	6,86	1200 kg/h	8,40	2500 kg/h	17,50
Ammoniak Wasser 30%	216 DM/Mg	60 kg/h	13,00	110 kg/h	23,80	50 kg/h	11,00
Kalk für Kalkmilch	200 DM/Mg	220 kg/h	48,40	130 kg/h	26,00	130 kg/h	26,00
Aktivkoks (HOK)	450 DM/Mg	50 kg/h	22,50	50 kg/h	22,50	60 kg/h	27,00
Eisen-(III)-Chlorid	4 DM/kg	-		2 kg/h	8,00	2 kg/h	8,00
Schwermetall-fällungsmittel TMT 15	6 DM/kg	-		1,5 kg/h	9,00	1,5 kg/h	9,00
Flockungshilfsmittel	1 DM/kg	-		-		5 kg/h	5,00
Wasser	2 DM/Mg	2,985 Mg/h	6,00	6,780 Mg/h	13,60	7,980 Mg/h	16,00
Gesamtbetriebsmittel- und Energiekosten DM/h		124,30		150,80		267,00	

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Art der Kosten		Kategorie a		Kategorie b		Kategorie c	
Betriebsmittel/ Energie/ Reststoff	Spezifi- sche Kosten	Spezifi- sche Menge /h	Kosten DM/h	Spezifi- sche Menge /h	Kosten DM/h	Spezifi- sche Menge /h	Kosten DM/h
Für die Entsorgung / Verwertung von Reststoffen, bezogen auf stündlichen Anfall:							
Altsorbens und Salze (Versatz)	100 DM/Mg	295 kg/h	29,50				
Filterasche (Versatz)	100 DM/Mg	200 kg/h	20,00	200 kg/h	20,00	200 kg/h	20,00
Filterkuchen aus ABA (Deponie)	200 DM/Mg			260 kg/h	52,00	150 kg/h	30,00
Salzsäure (Verwertung)	30 DM/Mg Gewinn					240 kg/h	+ 7,20
Gesamtsorgungskosten RGR / h			49,00		72,00		42,80
Spezifische Betriebskosten der RGR / h			328,57		478,79		911,18
Spezifische Entsorgungskosten / Mg von Hausmüll, hervorgerufen durch die RGR			16,42		23,94		45,56

Man erkennt aus der Gegenüberstellung der verschiedenen Kostenarten Mehrkosten gegenüber der Kategorie a

- ◆ für die emissionsärmere Rauchgasreinigung Kategorie b: etwa 7,50 DM/Mg und
- ◆ für die RGR mit Wertstoffgewinnung Kategorie c: etwa 29,15 DM/Mg Hausmüll.

Ob diese Mehrkosten zur Erzielung des relativ geringen Emissionsvorteils gerechtfertigt sind, bleibt der Einzelbeurteilung überlassen. U.E. könnten die finanziellen Aufwendungen zur Erreichung dieser geringen Emissionseinsparung in anderen technischen Anlagen mit geringerem Emissionsminderungsstandard wesentlich effektiver eingesetzt werden.

3.7. Ökologisch / ökonomischer Bilanzierungsansatz

In diesem Kapitel soll ein Bilanzierungsansatz zur Abschätzung der ökologischen Relevanz der Emissionen der MVA mit den verschiedenen Rauchgasreinigungen gemacht werden. Dabei wird folgendes Vorgehen gewählt:

Die Emissionen einer Anlage können mit einem konstanten Umrechnungsfaktor auf Immissionen in der Nähe der Anlage umgerechnet werden, und zwar ist es nahezu unabhängig von der Rauchgasmenge und der Schornsteinhöhe, dass die Immissionskonzentration bei gemäß TA Luft gewählter Schornsteinhöhe und sonst üblicher Bedingungen für die Rauchgase (Temperatur, Rauchgasgeschwindigkeit am Kaminaustritt, Wassergehalt) um den Faktor 500.000 geringer ist als die Emissionskonzentration [Lit. 17-18]. Zur Abschätzung der Immissionen, die nahe dem Anlagenstandort im Jahresmittel bei der Nachbarschaft ankommen, soll diese Vereinfachung der sonst recht aufwendigen Ausbreitungsrechnungen genügen.

Um den Einfluß der externen Emissionen, wie in dieser Studie definiert als die Emissionen, die bei der Förderung, Produktion und beim Transport der Betriebsmittel und Energien entstehen, in das Immissionsmodell einzubeziehen, wird die konservative Annahme gewählt, dass die zusätzlichen Emissionen gleichfalls in der Nähe des Anlagenstandortes als Immissionen auftreten. Dazu wird die zusätzliche Emissionsfracht zu der Rauchgasmenge von 100.000 m³/h i.N.tr. dazugerechnet und mit dem eben definierten Verdünnungsfaktor von 500.000 als Immission im höchstbeaufschlagten Aufpunkt nahe der Anlage festgelegt. Die so gefundenen maximalen Zusatzbelastungen der Atmosphäre der Anlagenumgebung werden mit Grenzwerten (IW 1) aus der TA Luft bzw., wenn diese nicht gegeben sind, mit anderen Grenzwerten wie z.B. Maximalen Immissionskonzentrationen (MIK) oder Maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen (MAK) verglichen.

Zusätzlich findet ein Vergleich statt zwischen den ermittelten Immissionskonzentrationen im Umfeld der Anlage und Messwerten aus Nordrhein-Westfalen (Schwerpunkt: Rhein-Ruhr-Gebiet) aus dem Jahre 1997 (aktuellste verfügbare Daten aus LUA-Berichten) bzw. für die Schwermetalle Pb und Cd die Immissionskonzentrationen aus verschiedenen Jahren ab 1974.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Bestimmung der Immissionskonzentrationen für verschiedene RGR-Kategorien und Vergleich mit den Immissionsgrenzwerten IW 1 der TA Luft:

Schadstoff	Emissionen aus RGR pro m ³			Zusatzemissionen durch Betriebsmittel gegenüber "a" (extern) pro m ³			Durch RGR nicht abgeschiedene Immissionen (intern) pro m ³			Zusatzimmissionen in Standortnähe incl. Betriebsmittel (gesamt) pro m ³			IW 1/ *MAK pro m ³
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	
SO₂	25 mg	5 mg	3 mg	-	1,08 mg	5,33 mg	50 ng	10 ng	6 ng	50 ng	12 ng	17 ng	0,14 mg
NO₂	140 mg	70 mg	40 mg	-	2,37 mg	11,7 mg	280 ng	140 ng	80 ng	280 ng	145 ng	104 ng	0,08 mg
HCl	2 mg	1 mg	0,5 mg	-	0,05 mg	0,25 mg	4 ng	2 ng	1 ng	4 ng	2,1 ng	1,5 ng	0,10 mg
HF	0,2 mg	0,1 mg	0,1 mg	-	0,03 µg	0,15 µg	0,4 ng	0,2 ng	0,2 ng	0,4 ng	0,2 ng	0,2 ng	1,0 µg
CO	3 mg	3 mg	3 mg	-			6 ng	6 ng	6 ng	6 ng	6 ng	6 ng	10 mg
TE	0,02 ng	0,01 ng	0,01 ng	-	0,02 pg	0,1 pg	40 ag	20 ag	20 ag	40 ag	20,02 ag	20,2 ag	-
Hg	10 µg	2 µg	1 µg	-	24 ng	121 ng	20 pg	4 pg	2 pg	20 pg	4,1 pg	2,24 pg	*100 µg
Pb	200 µg	100 µg	100 µg	-			0,4 ng	0,2 ng	0,2 ng	0,4 ng	0,2 ng	0,2 ng	2,0 µg
Cd	20 µg	5 µg	2 µg	-			40 pg	10 pg	4 pg	40 pg	10 pg	4 pg	0,04 µg

Man erkennt an dieser Zusammenstellung, dass selbst bei Nutzung der einfachsten Rauchgasreinigung entsprechend der Kategorie a in dieser Studie ein sehr deutlicher Abstand zwischen der von der MVA verursachten Zusatzimmission und der Begrenzung des IW 1-Wertes der TA-Luft besteht. Der IW 1-Wert ist zwischen 285 (NO₂) und 25.000 (HCl) oder gar 1,6 Mio (CO) mal so hoch wie der Immissionswert, der durch die direkten und indirekten Emissionen der MVA und der für die RGR benutzten Betriebsmittel gebildet wird.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Vergleich der ermittelten Immissionen, Grenzwerte und Messwerte:

Schadstoff	Zusatzimmissionen (gesamt) $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Messwerte 1997 Rhein-Ruhr $\mu\text{g}/\text{m}^3$			Grenzwerte $\mu\text{g}/\text{m}^3$		
	a	b	c	Mittelwert	98%-Wert	1/2h-Maximum	Mittelwert TA Luft	98%-Wert TA Luft	MIK VDI-DIN
SO₂	0,05	0,012	0,017	13	61	578	140	400	1000
NO₂	0,28	0,145	0,104	37	87	490	80	200	200
NO*	0,028	0,015	0,01	27	200	1288	-	-	1000
CO	0,006	0,006	0,006	700	2500	15000	10000	30000	50000

*NO-Gehalt mit max. 10% des NO₂ abgeschätzt

In dieser Zusammenstellung erkennt man neben den teilweise deutlichen Abständen zwischen den Mittelwerten und den 98%-Werten (Messwert, unter dem 98 % aller gemessenen Werte liegen) und den Grenzwerten der TA-Luft, dass die Zusatzimmissionen selbst der einfachsten Rauchgasreinigung wieder um einen Faktor zwischen 132 (NO₂), 260 (SO₂) und knapp 1000 (NO) sowie sogar 117.000 (CO) unter den gemessenen Mittelwerten liegt. Noch deutlich größer ist der Abstand zwischen den Werten der Kategorien b und c einerseits und den 98%-Werten oder gar den 1/2-Stunden-Maxima der Immissionsmesswerte an Rhein und Ruhr in NRW andererseits.

Vergleich der Pb- und Cd-Immissionswerte mit Messwerten aus der Vergangenheit:

Schadstoff	Zusatzimmissionen durch RGR ng/m^3			Rhein-Ruhr-Jahresmittel ng/m^3				
	a	b	c	1974	1980	1985	1990	1998
Pb	0,4	0,2	0,2	1100	370	300	120	40
Cd	0,04	0,01	0,004	11	4	4	2,4	1,5

An der letzten Tabelle ist der immer noch große Abstand zwischen den aus sehr konservativen Emissionskonzentrationen berechneten Immissionswerten von Pb und Cd und den letzten verfügbaren Jahresmittelwerten für Pb- und Cd-Immissionen in NRW-Rhein-Ruhr-Gebiet (Faktoren von 37,5 und 100 für die Kategorie a). Auch die deutliche Verringerung der Immissionswerte seit 1974 ist bemerkenswert.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Es soll nochmals betont werden, dass die Emissionswerte für Pb und Cd sehr hoch angesetzt wurden (bei allen 3 Kategorien), weil kein großer Datenstamm zur Verfügung stand, um kleinere Werte statistisch abzusichern. In der Regel sind mehrere uns bekannte Messwerte um einen Faktor von etwa 10 kleiner als die angewendeten Emissionswerte. Dementsprechend wäre auch der Faktor zwischen der maximalen Zusatzimmission und dem Jahresmittel 1998 etwa zehnfach so hoch.

Bei den deutlichen Abständen von Immissionsbeiträgen einer MVA zu den bestehenden Messwerten und den festgelegten Immissionsgrenzwerten ist es sicher berechtigt zu fragen, ob ein erheblicher Mehraufwand sinnvoll ist, um den ohnehin schon geringen Beitrag durch nicht abgeschiedene Rauchgasschadstoffe nochmals zu senken. Als Erläuterung zu den Immissionsbeiträgen der MVA sei angemerkt, dass der hier diskutierte Wert $I_{1z_{max}}$ (maximale Immissionszusatzbelastung) aus der TA-Luft, der sich mit einem aufwendigen Rechenprogramm unter Berücksichtigung aller anlagen- und umgebungsbedingten Parameter aus den Emissionswerten ergibt, die maximale Zusatzbelastung unter ungünstigsten Wetterbedingungen am maximalen Aufpunkt in der Regel in einem Umkreis von ca. 4 km um die Anlage ist und dass diese maximale Konzentration außerhalb dieses Aufpunktes sehr schnell kleiner wird. Da die Immissionsgrenzwerte bereits unter Vorsorgegesichtspunkten auch unter Berücksichtigung der Wechselwirkung verschiedener Schadstoffe gesetzt worden sind, haben Einflüsse unterhalb von etwa 1/100 oder 1/1000 dieser Werte wohl kaum noch Bedeutung. Die Immissionsgrenzwerte berücksichtigen bereits die Möglichkeit der Beeinflussung kranker, schwacher oder älterer Menschen und Kinder, so dass u.E. zusätzliche technische Maßnahmen mit deutlich höheren Kosten - die ja nicht nur einen evtl. Gewinn des Betreibers derartiger Anlagen schmälern, sondern in erster Linie die Allgemeinheit mit ständig steigenden Entsorgungskosten für den von uns produzierten Hausmüll belastet - nicht wirtschaftlich vertretbar sind. Auch wenn man alles technisch machbare unternimmt, wird immer noch eine messbare Restkonzentration übrig bleiben, insbesondere wenn man bedenkt, dass die Analytik mit großen Sprüngen immer niedrigere Nachweisgrenzen möglich macht. Man muß versuchen, sich anhand der vorangegangenen Tabellen eine Vorstellung von der Größenordnung der Konzentrationen zu machen: Bei den Sauerstoffschadstoffen sind Größenordnungen von 1/10 bis 1/100 eines Millionstel Gramm pro Kubikmeter als bewirkter Immissionsbeitrag im Gespräch, bei den Schwermetallen 1/2 bis 1/20 Milliardstel Gramm pro Kubikmeter.

Für den ökonomischen Bilanzierungsansatz sollen an dieser Stelle die Mehrkosten für die Errichtung und den Betrieb einer aufwendigeren Anlage entsprechend den Kategorien b oder c gegenüber der Rauchgasreinigungsvariante a deutlich gemacht werden:

Um eine weitere Abscheidung von Schadstoffen in der Rauchgasreinigung zu erreichen und damit die Immissionswerte in der Umgebung der MVA noch weiter zu mindern, indem der Immissionsbeitrag der Anlage statt 0,1 -1% zur vorhandenen Belastung nur deutlich weniger als 0,1 % beitragen soll, muß folgender finanzieller Mehraufwand in Kauf genommen werden:

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

Die Wahl der Verfahrensvariante b statt a erfordert Mehrkosten in Höhe von

7,52 DM/Mg oder 1,13 Mio DM/Jahr.

Die Wahl der Rauchgasreinigung entsprechend der Definition dieser Studie Kategorie c statt a erfordert

29,14 DM/Mg oder 4,37 Mio DM/Jahr Zusatzkosten.

Wir sind der Meinung, dass dieser finanzielle Aufwand, der nicht zu einem messbaren Ergebnis bei der Feststellung der Immissionen führt (nur rechnerisch ist die unterschiedliche Belastung auszudrücken), an anderer Stelle, zum Beispiel bei Errichtung einer einfachen Rauchgasreinigung hinter einer anderen Feuerungsart in einem anderen Industriebetrieb zu einem deutlich besseren Ergebnis hinsichtlich der Schadstoffeinsparung und damit zu einer stärkeren Umweltentlastung führt als die exzessive Anwendung des neuesten Standes der Entwicklung in einer ehemals stark umstrittenen Entsorgungsanlage, deren neue Vertreter aber inzwischen zu einer wesentlichen Schadstoffsenke für anorganische und organische Umweltchemikalien geworden sind.

4. Zusammenfassung

Die vorliegende Studie stellt die derzeit in Betrieb befindlichen MVA in Deutschland zusammen und faßt die wesentlichen Angaben für die Rauchgasreinigung in einer Tabelle zusammen. Auch bekannte Neubaupläne werden mit ihren Rauchgasreinigungsvorhaben ermittelt und zusammengestellt. Anschließend werden die verschiedenen Varianten der Rauchgasreinigung in 3 Kategorien eingeteilt, wobei das Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen a einerseits und b und c andererseits die Verwendung eines Wäschersystems ist. Kategorie b und c unterscheiden sich nur durch die möglichst vollständige Verwertung von Produkten der Rauchgasreinigung durch Weiterverarbeitung zu marktgerechten Handelsprodukten wie etwa Salzsäure.

Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Kategorien werden verglichen, ebenso die Investitions- und Betriebskosten. Ein Emissionsvergleich unter Einbeziehung der Emissionen bei der Herstellung, Förderung oder beim Transport der benötigten Betriebsmittel und Energien wird mit dem Ergebnis erstellt, dass die einfache Rauchgasreinigung auch insgesamt die größten Emissionsfrachten erzeugt. Der wirtschaftliche Vergleich ergibt erwartungsgemäß aber auch deutliche Mehrkosten für die Wahl eines aufwendigeren Rauchgasreinigungsverfahrens, erst recht bei Produktion von Wertstoffen am Ende des Rauchgasreinigungsverfahrens.

Ein weiterer Teil der Studie befaßt sich mit dem Immissionsauswirkungen der Wahl der verschiedenen Rauchgasreinigungen und vergleicht die maximalen Zusatzimmissionen der MVA mit den Immissionsgrenzwerten IW 1 der TA Luft sowie mit den tatsächlichen Gesamtimmissionen in NRW, Schwerpunkt Rhein-Ruhr. Der Immissionsbeitrag einer mittelgroßen MVA in der unmittelbaren Umgebung der Anlage wird zu maximal 0,1 -1% ermittelt bei Wahl einer einfachen Rauchgasreinigung, deutlich niedriger bei Wahl der anderen Rauchgasreinigungen.

Eine ökologische Bewertung der verschiedenen Rauchgasreinigungen führt zwar zu einer deutlichen Schadstoffminimierung durch aufwendigere Verfahren, der ökologische Vorteil wird jedoch relativiert durch die Unbedenklichkeit der Immissionen, die bereits durch das einfache Rauchgasreinigungsverfahren mit deutlicher und sicherer Unterschreitung der Grenzwerte der 17. BImSchV und anderer relevanter Vorschriften ausgehen.

Ein ökologisch-ökonomischer Bilanzierungsansatz führt zu deutlichen Mehrkosten für eine messtechnisch nicht nachweisbare weitere Immissionsminderung und zu der Erkenntnis, dass die finanziellen Belastungen aus den aufwendigeren Rauchgasreinigungen - die in erster Linie der Bürger über höhere Entsorgungspreise zu bezahlen hat - an anderer Stelle, z.B. bei anderen Industriefeuerungen durch Einsatz einer einfachen, angepaßten Rauchgasreinigung zu weitaus größeren Einsparungen an Emissionen und damit zu geringeren, wahrscheinlich auch messbaren Immissionsauswirkungen führt.

5. Literaturverzeichnis

- 1 BDE: Kreislaufwirtschaft in der Praxis Nr. 5: Thermische Behandlung / Energetische Nutzung (1997)
- 2 UBA: Thermische Behandlung von Abfällen, <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/tba.htm>
- 3 K.-J. Thomé-Kozmiensky: Thermische Abfallbehandlung, EF-Verlag 1994, Seite 45 ff
- 4 M. Achternbosch, U. Richters, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6306, Juli 1999
- 5 UBA: Thermische, mechanisch-biologische Behandlungsanlagen und Deponien für Siedlungsabfälle in der Bundesrepublik Deutschland, Informationsschrift, 2. Auflage, Oktober 1999
- 6 ISA Initiative Sichere Abfallbehandlung, Frankfurt: CD-ROM mit aktuellen Daten zu allen deutschen MVA, Auflage 1999, Weitkämper Medien Consulting
- 7 Eigene Unterlagen aus Angaben zu Ausschreibungen, Betreiberunterlagen, Anbieterunterlagen, teilweise nicht veröffentlicht
- 8 S. Kreis, H. Hunsinger et al., ITC-TAB Forschungszentrum Karlsruhe: Experimentelle Untersuchungen zum Verhalten von PCDD/F in Naßwaschsystemen von MVA, in: Nachrichten 1997, S. 139-146
- 9 S. Kreis, H. Hunsinger et al., ITC-TAB Forschungszentrum Karlsruhe, 1998: Polypropylene as Regenerable Absorber for PCDD/F Emission Control
- 10 S. Kreis, ITC-TAB Forschungszentrum Karlsruhe: Polypropylen (PP) zur Dioxinabscheidung, in: VDI-Seminar 43-59-11: BAT- und preisorientierte Dioxin-/ Gesamtemissionsminderungstechniken, 16.-17. 9. 99
- 11 R. Frey, Von Roll Inova: Der Von Roll 4 D-Filter - Kombination von Katalysator, Filter und Trockensorption, in: VDI-Seminar 43-59-11, s.o.
- 12 Von Roll Inova: Firmeninformationen, Vortragsmanuskripte und -folien, z.T. nicht veröffentlicht
- 13 P. Kleine-Möllhoff, W.-L- Gore GmbH: Katalytische Filtration - Dioxinzerstörung am Gewebefilter, in: VDI-Seminar 43-59-11, s.o.

Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen
zur Rauchgasreinigung hinter Müllverbrennungsanlagen

- 14 B. Morun, RKW Wülfrath GmbH: Neue Ergebnisse bei der RGR mit hocheffizienten Additiven, in: VDI-Seminar 43-59-11, s.o.
- 15 L.-P. Nethe, Märker Umwelttechnik GmbH: Kohlenstoffhaltige Adsorbentien zum Einsatz in der RGR von Verbrennungs- und Feuerungsanlagen, GIT-Verlag, UTA Nr. 6 (1995), S. 357-363
- 16 L.-P. Nethe; Märker Umwelttechnik, Firmeninformationen, z.T. nicht veröffentlicht
- 17 Eigene Unterlagen aus Ausschreibungen, Angeboten, Genehmigungsanträgen, Messreihen von diversen MVA, nicht veröffentlicht, abgeglichen mit Literaturangaben [Lit. 4 + 18]
- 18 W. Notter, G. Konrad, P. Myrcik, IGA Stuttgart: Vergleich des Immissionsverhaltens unterschiedlicher Verfahren zur thermischen Behandlung von Restabfällen, in Abfallwirtschafts-Journal 9 (1998), S. 8-14
- 19 Angaben zum Energiemix und den resultierenden Emissionen durch Dr. Berghoff, LUA (persönliche Mitteilung)
- 20 J. Wieneck et al., Christian-Albrechts-Universität Kiel: Organic Compounds in the Flue Gas of a Waste Incinerator, in: Chemosphere Vol. 30, Nr. 5, S. 907-913, 1995
- 21 K. Jay, L. Stieglitz, Forschungszentrum Karlsruhe: Identifizierung und Quantifizierung organischer Komponenten in Emissionen von MVA, PWAB-Vorhaben 90100, Abschlußbericht
- 22 M. Schneider, Forschungszentrum Karlsruhe: Formation of Polychlorinated Naphthalenes on Fly Ash
- 23 "Grüne warnen vor Kyoto-Gift", in: Mittelbayerische Zeitung Schwandorf vom 27.11.97 sowie Kleine Anfrage der Fraktion Bündnis 90 / Die Grünen vom 28.12.97 (Bundestagsdrucksache 13/9564) sowie Antwort der Bundesregierung vom 23.1.98 (Bundestagsdrucksache 13/9698)

Seit 1. April 1994 sind bisher folgende „Materialien“ des Landesumweltamtes NRW erschienen:

1	Der Dynamische Daphnientest – Erfahrungen und praktische Hinweise – Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 44 S.	15,00 DM
2	Umsetzung der TA-Siedlungsabfall bei Deponien 2. Abfallwirtschaftliches Fachgespräch Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 99 S.	15,00 DM
3	Verwertung von Elektro- und Elektronikgeräten Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 153 S.	20,00 DM
4	Einsatz alternativer Baustoffe in Abdichtungssystemen Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 91 S.	15,00 DM
5	Einwicklung im Bereich der Sonderabfallentsorgung Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 39 S.	15,00 DM
6	Ökologische Auswirkungen von Fischteichen auf Fließgewässer Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 208 S.	25,00 DM
7	Ökologische Effizienz von Renaturierungsmaßnahmen an Fließgewässern Essen: Landesumweltamt NRW 1994, 462 S.	28,00 DM
8	Vermeidung von Bunkerbränden in Abfallverbrennungsanlagen mit Hilfe der Infrarot-Thermographie Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 53 S.	15,00 DM
9	Prozessleittechnik in Anlagen der chemischen Industrie – Anlagenschutz und sicherheitsrelevante Komponenten Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 119 S.	20,00 DM
10	Sicherheitstechnische Hinweise und Anforderungen an Abschott- und Entlastungssysteme aus der Sicht der Störfall-Verordnung Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 40 S.	15,00 DM
11	Literaturstudien zum PCDD/F-Transfer vom Boden in die Nahrungskette Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 149 S.	25,00 DM
12	Die verlust- und kontaminationsfreie Probenahme und -vorbereitung von Wässern und Feststoffen Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 203 S.	28,00 DM
13	Essener Verfahren zur Bewertung von Altlastenverdachtsflächen – Erstbewertung und normierte Charakterisierung – Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 66 S.	15,00 DM
14	Optimierung der thermischen Behandlung organischer chlorhaltiger Problemafälle Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 132 S.	25,00 DM
15	Entsorgungsbericht 1993 über Sonder- und Massenabfälle in NRW Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 75 S.	20,00 DM
16	Begleitende messtechnische Erfolgskontrolle bei der Sanierung einer Textilreinigungsanlage Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 60 S.	15,00 DM

- 17 Ausgewählte Untersuchungsergebnisse der halbertechnischen Versuchskläranlage
– Untersuchungen zur Stickstoffelimination –
– Praxiserprobung von Online-Messtechnik –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 110 S. 20,00 DM
- 18 Vergleich verschiedener europäischer Untersuchungs- und Bewertungsmethoden für Fließgewässer
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 140 S. 25,00 DM
- 19 Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer vor gefährlichen Stoffen
– Ergebnisse der Erprobung in NRW –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 150 S. 25,00 DM
- 20 Information und Dokumentation bei Deponien
4. Abfallwirtschaftliches Fachgespräch, 26. Oktober 1994
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 98 S. 20,00 DM
- 21 Ausbreitungsuntersuchungen von Gerüchen anhand einer Modellquelle
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 57 S. 15,00 DM
- 22 Erschütterungen und Körperschall des landgebundenen Verkehrs
– Prognose und Schutzmaßnahmen –
Essen: Landesumweltamt NRW 1995, 658 S. 40,00 DM
- 23 Naturraumspezifische Leitbilder für kleine und mittelgroße Fließgewässer in der freien Landschaft
Eine vorläufige Zusammenstellung von Referenzbach- und Leitbildbeschreibungen für die Durchführung von Gewässerstrukturgütekartierungen in Nordrhein-Westfalen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 127 S. 25,00 DM
- 24 Siedlungsabfalldeponien – Oberflächenabdichtung und Sickerwasser
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 162 S. 25,00 DM
- 25 Thermodynamische Analyse der Verfahren zur thermischen Müllentsorgung
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 121 S. 25,00 DM
- 26 Normierung und Konventionen in der Abfallanalytik – Aufgaben und Ziele
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 188 S. 28,00 DM
- 27 Entsorgungsbericht 1994 über Sonder- und Massenabfälle in Nordrhein-Westfalen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 92 S. 20,00 DM
- 28 Umweltüberwachung im Spannungsfeld; integral/medial – privat/staatlich
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 289 S. 30,00 DM
- 29 Bauabfallentsorgung – von der Deponierung zur Verwertung und Vermarktung
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 181 S. 28,00 DM
- 30 Ergebnisse von Dioxin-Emissionsmessungen an Industrieanlagen in NRW – Dioxinmessprogramm Nordrhein-Westfalen –
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 114 S. 20,00 DM
- 30 Results of Measurements of the Emissions of Dioxins by Industrial Plants in North Rhine-Westphalia – Dioxins Measurement Programme
North Rhine-Westphalia – Final Report 1996
English translation of the report LUA-Materialien No. 30 (1996); original edition published in German language – Translated by Edith Navé, Hohenbrunn, Germany
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 102 S. 30,00 DM

- | | | |
|----|--|----------|
| 31 | Umsetzung der TA Siedlungsabfall bei Deponien in NRW
Fortbildungsveranstaltung am 27./28. Juni 1995 im Bildungszentrum für
die Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH (BEW) in Essen
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 189 S. | 28,00 DM |
| 32 | Medienübergreifendes Arbeiten im technischen Umweltschutz
Beiträge aus dem Fachgespräch anlässlich der Verabschiedung von
Herrn Abteilungsdirektor Dr.-Ing. H.-O. Weber am 06. Juli 1995
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 78 S. | 20,00 DM |
| 33 | Handbuch der Laborpraxis für Ver- und Entsorgerinnen/
Ver- und Entsorger – 1. und 2. Ausbildungsjahr –
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 186 S. | 30,00 DM |
| 34 | Explosionsschutz bei der Lagerung brennbarer Flüssigkeiten
Entwicklungen und Erkenntnisse
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 54 S. | 18,00 DM |
| 35 | Physikalisch-chemische und biologische Auswirkungen bei der Verwendung
von Waschbergen in Schifffahrtskanälen
Untersuchungsbericht des Arbeitskreises „Waschberge im Wasserbau“
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 154 S. | 25,00 DM |
| 36 | Anforderungen an sachverständige Stellen für die Bekanntgabe und die
Zulassung im Bereich des Immissionsschutzes
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 132 S. | 25,00 DM |
| 37 | Schadstoffströme bei der Gebrauchtholzverwertung für
ausgewählte Abfallarten
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 275 S. | 30,00 DM |
| 38 | Zivile Anschlussnutzung von Militärstandorten
– Risikofaktor Altlasten/Bodenbelastung – Tagungsband
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 168 S. | 25,00 DM |
| 39 | Flächenhafter Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in das Grundwasser
– Abschlußbericht, Dezember 1994
Essen: Landesumweltamt NRW 1996, 217 S. | 30,00 DM |
| 40 | Gewässerüberwachung in Nordrhein-Westfalen
Teil I: Oberirdische Gewässer
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 40 S. | 15,00 DM |
| 41 | Brand- und Zersetzungsprodukte
Abschlußbericht des Projekts „Integration von Daten zu Brand- und
Zersetzungsprodukten in das Informationssystem für gefährliche/
umweltrelevante Stoffe (IGS)“
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 134 S. | 25,00 DM |
| 42 | Kreislaufwirtschaft und Abfallverwertung in thermischen Prozessen
9. Aachener Kolloquium am 5. Dezember 1996 – Tagungsband –
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 156 S. | 25,00 DM |
| 43 | Identification of Relevant Industrial Sources of Dioxins and Furans
in Europe (The European Dioxin Inventory) – Final Report –
Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 926 S. | 50,00 DM |

44	Emissionskataster der genehmigungsbedürftigen Anlagen im Lande Nordrhein-Westfalen Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 32 S.	15,00 DM
45	Entsorgungsbericht 1995 über Sonder- und Massenabfälle in Nordrhein-Westfalen Essen: Landesumweltamt NRW 1997, 101 S.	22,00 DM
46	Validierung von Passivsammlern für Immissionsmessungen von Kohlenwasserstoffen Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 95 S.	22,00 DM
46	Validation of Passive Samplers for Measurements of Hydrocarbons in Ambient Air English translation of the report LUA-Materialien No. 46 (1998) original edition published in German language Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 92 S.	30,00 DM
47	Leitfaden für Analysen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung von Abfällen aus Haushaltungen Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 131 S.	25,00 DM
48	Kommunale Abfallvermeidungs- und -Verwertungsmaßnahmen in NRW Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 92 S.	25,00 DM
49	Vollzugshilfe zum Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz • Dichtetabelle • EAK-Schlüssel-Kennzeichnung anhand von Nachweispflichten Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 66 S.	25,00 DM
50	Konzept zur Optimierung der Energieversorgung bei einem Unternehmen der Wellpappenherstellung Abschlussbericht des Forschungsvorhabens des Lehrstuhls für Nukleare und Neue Energiesysteme (NES) der Ruhr-Universität Bochum im Auftrag des Landesumweltamtes Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 131 S.	30,00 DM
51	Konzept zur Optimierung der Energieversorgung bei einem Unternehmen der Textilverarbeitung Abschlussbericht des Forschungsvorhabens des Lehrstuhls für Nukleare und Neue Energiesysteme (NES) der Ruhr-Universität Bochum im Auftrag des Landesumweltamtes Essen: Landesumweltamt NRW 1998, 182 S.	30,00 DM
52	Analysenverfahren für Abwasser Essen: Landesumweltamt NRW 1999, 86 S.	22,00 DM
53	Entsorgungsbericht 1996/97 über Sonder- und Massenabfälle in Nordrhein-Westfalen Essen: Landesumweltamt NRW 1999, 104 S.	22,00 DM
54	Gezielte Infiltration von Wasser in einen Deponiekörper zur Reduzierung des Emissionspotentials Essen: Landesumweltamt NRW 1999, 104 S.	22,00 DM

55	Gewässerschutzbezogene Zielvorgaben für Pflanzenschutzmittel Essen: Landesumweltamt NRW 1999, 66 S.	20,00 DM
56	Emissionen luftverunreinigender Stoffe durch den Schiffsverkehr in Nordrhein-Westfalen Essen: Landesumweltamt NRW 1999, 110 S.	25,00 DM
57	Der Immissionsschutz auf dem Weg zum integrierten Umweltschutz Essen: Landesumweltamt NRW 2001, 77 S. (nur CD-ROM Ausgabe)	10,00 €
58	Ambient Air Pollution by As, Cd and Ni Compounds – Position Paper Essen: Landesumweltamt NRW 2001, 366 S.	25,00 €
59	The European Dioxin Emission Inventory – Stage II Essen: Landesumweltamt NRW 2001, 370 S.	25,00 €
60	Untersuchungen zur Effizienz von unterschiedlichen Systemen zur Rauchgasreinigung bei Müllverbrennungsanlagen Essen: Landesumweltamt NRW 2001, 68 S.	15,00 €