

**Entscheidungshilfen durch
stoffstromanalytische Betrachtungen
bei der Bewertung von abfallwirtschaftlichen und
immissionsschutzrechtlichen Maßnahmen**

Habilitationsschrift
von
Dr. rer. nat. Uwe Lahl, Oytzen

April 2001

eingereicht bei
Prof. Dr. Johannes Jäger
Technische Universität Darmstadt

ÜBERSICHT

1	AUFGABENSTELLUNG	1
2	DIE STOFFFLUSSANALYSE (SFA)	2
2.1	DARSTELLUNG DER METHODE	2
2.2	REPRODUZIERBARKEIT DER ERGEBNISSE	5
2.3	ABGRENZUNG ZU ANDEREN BEWERTUNGSMETHODEN.....	6
3	PRAXISBEISPIELE.....	10
3.1	ENTWICKLUNGSPROGNOSE FÜR DIE ENTSORGUNG VON SIEDLUNGSABFÄLLEN EINES BUNDESLAND MITTELS SFA	11
3.2	BEWERTUNG UNTERSCHIEDLICHER ENTWICKLUNGSPROGNOSEN FÜR BESONDERS ÜBERWACHUNGSBEDÜRFTIGE ABFÄLLE EINES BUNDESLANDES	39
3.3	ENTSORGUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR MENGENMÄßIG BEDEUTSAME BESONDERS ÜBERWACHUNGSBEDÜRFTIGE ABFÄLLE NACH IMMISSIONSSCHUTZRECHLICHEN GESICHTSPUNKTEN.....	52
3.4	ÜBERPRÜFUNG VON GRENZWERTVORSCHLÄGEN FÜR ERSATZBRENNSTOFFE, DIE FÜR DIE VERWERTUNG IN ZEMENTWERKEN VORGESEHEN SIND	62
3.5	BERECHNUNG EINER EMISSIONSPROGNOSE UND ÜBERPRÜFUNG EINES ABFALLKATALOGES AM BEISPIEL EINES HEIZWERKES	71
3.6	BERECHNUNG EINER EMISSIONSPROGNOSE UND ÜBERPRÜFUNG EINES ABFALLKATALOGES AM BEISPIEL EINER SCHÜTTGUTREGENERIERANLAGE.....	80
3.7	BERECHNUNG EINER EMISSIONSPROGNOSE UND ÜBERPRÜFUNG EINES ABFALLKATALOGES AM BEISPIEL EINER ALTHOLZVERBRENNUNGSANLAGE.....	94
4	KRITISCHE ANALYSE UND AUSBLICK.....	118
4.1	LEISTUNGSGRENZEN DER SFA.....	118
4.2	KOMBINATION MIT ANDEREN METHODEN	120
5	GESAMTFAZIT	122
6	LITERATURVERZEICHNIS.....	124

G L I E D E R U N G

1	AUFGABENSTELLUNG	1
2	DIE STOFFFLUSSANALYSE (SFA)	2
2.1	DARSTELLUNG DER METHODE	2
2.1.1	<i>Modellbildung und mathematische Beziehungen</i>	<i>4</i>
2.1.2	<i>Ergebnisse und Bewertung</i>	<i>5</i>
2.2	REPRODUZIERBARKEIT DER ERGEBNISSE	5
2.3	ABGRENZUNG ZU ANDEREN BEWERTUNGSMETHODEN.....	6
2.3.1	<i>Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU) und Ökobilanz (LCA)</i>	<i>6</i>
2.3.1.1	<i>Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU)</i>	<i>6</i>
2.3.1.2	<i>Ökobilanz/Life Cycle Assessment (LCA)</i>	<i>7</i>
2.3.2	<i>Die strategische Umweltverträglichkeitsuntersuchung (SUP)</i>	<i>8</i>
2.3.3	<i>Stärken- und Schwächenanalyse</i>	<i>9</i>
3	PRAXISBEISPIELE.....	10
3.1	ENTWICKLUNGSPROGNOSE FÜR DIE ENTSORGUNG VON SIEDLUNGSABFÄLLEN EINES BUNDESLAND MITTELS SFA	11
3.1.1	<i>Aufgabenstellung</i>	<i>11</i>
3.1.2	<i>Modellbildung.....</i>	<i>12</i>
3.1.2.1	<i>Hausmüll.....</i>	<i>14</i>
3.1.2.2	<i>Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (inkl. Sortierreste und Baustellenmischabfälle) (hmäGA)</i>	<i>15</i>
3.1.2.3	<i>Müllverbrennungsanlagen (MVA)</i>	<i>16</i>
3.1.2.4	<i>Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung (MBA)</i>	<i>17</i>
3.1.2.5	<i>Deponien</i>	<i>20</i>
3.1.2.6	<i>Sortieranlagen</i>	<i>23</i>
3.1.2.7	<i>Industrielle Mitverbrennung.....</i>	<i>23</i>
3.1.2.7.1	<i>Zementwerke</i>	<i>24</i>
3.1.2.7.2	<i>Kraftwerke</i>	<i>25</i>
3.1.2.8	<i>Sonstiges</i>	<i>27</i>
3.1.3	<i>Ergebnisse.....</i>	<i>27</i>
3.1.3.1	<i>Szenario 1.....</i>	<i>27</i>
3.1.3.2	<i>Szenario 2.....</i>	<i>29</i>
3.1.3.3	<i>Szenario 3.....</i>	<i>31</i>
3.1.4	<i>Sensitivätsbetrachtung.....</i>	<i>37</i>
3.1.5	<i>Fazit SFA zur Entwicklungsprognose für ein Bundesland</i>	<i>38</i>
3.2	BEWERTUNG UNTERSCHIEDLICHER ENTWICKLUNGSPROGNOSEN FÜR BESONDERS ÜBERWACHUNGSBEDÜRFTIGE ABFÄLLE EINES BUNDESLANDES	39

3.2.1	<i>Aufgabenstellung</i>	39
3.2.2	<i>Modellbildung und verwendete Datengrundlagen</i>	39
3.2.2.1	<i>Szenario SVA</i>	39
3.2.2.2	<i>Szenario ZEM</i>	40
3.2.2.3	<i>Modellierung der Abfallarten</i>	40
3.2.2.3.1	<i>Vorgemischte Abfälle zum Zwecke der Verbrennung</i>	41
3.2.2.3.2	<i>Lack- und Farbschlämme</i>	42
3.2.2.3.3	<i>Mineralölschlämme</i>	43
3.2.2.4	<i>Modellierung der Abfallbeseitigung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage</i>	43
3.2.2.5	<i>Modellierung der Abfallentsorgung in ausländischen Zementwerken</i>	44
3.2.3	<i>Ergebnisse</i>	46
3.2.3.1	<i>Durchschnittlich belastete Abfälle</i>	47
3.2.3.2	<i>Worst case-Betrachtungen</i>	48
3.2.4	<i>Fazit Entwicklungsprognose besonders überwachungsbedürftige Abfälle</i>	51
3.3	ENTSORGUNGSEMPFEHLUNGEN FÜR MENGENMÄßIG BEDEUTSAME BESONDERS ÜBERWACHUNGSBEDÜRFTIGE ABFÄLLE NACH IMMISSIONSSCHUTZRECHLICHEN GESICHTSPUNKTEN	52
3.3.1	<i>Aufgabenstellung</i>	52
3.3.2	<i>Modellbildung und verwendete Datengrundlagen</i>	52
3.3.2.1	<i>Abfalldaten</i>	52
3.3.2.2	<i>Betrachtete Prozesse</i>	55
3.3.2.2.1	<i>Energiespezifische Abgasmenge</i>	55
3.3.2.2.2	<i>Transferfaktoren</i>	56
3.3.2.3	<i>Berechnung der zu erwartenden Emissionskonzentrationen</i>	57
3.3.2.4	<i>Beurteilung anhand von Prüfwerten für die SFA</i>	57
3.3.3	<i>Ergebnisse</i>	58
3.3.3.1	<i>Median-Werte</i>	58
3.3.3.2	<i>Spitzenwerte</i>	59
3.3.4	<i>Fazit Entsorgungsempfehlungen für Abfälle</i>	61
3.4	ÜBERPRÜFUNG VON GRENZWERTVORSCHLÄGEN FÜR ERSATZBRENNSTOFFE, DIE FÜR DIE VERWERTUNG IN ZEMENTWERKEN VORGESEHEN SIND	62
3.4.1	<i>Aufgabenstellung</i>	62
3.4.2	<i>Modellbildung und verwendete Datengrundlage</i>	63
3.4.3	<i>Regeleinsatzstoffe</i>	64
3.4.4	<i>Ergebnisse</i>	65
3.4.4.1	<i>Luftpfad</i>	66
3.4.4.2	<i>Erzeugnis</i>	67
3.4.5	<i>Fazit Überprüfung Grenzwertvorschläge für Ersatzbrennstoffe</i>	69
3.5	BERECHNUNG EINER EMISSIONSPROGNOSE UND ÜBERPRÜFUNG EINES ABFALLKATALOGES AM BEISPIEL EINES HEIZWERKES	71
3.5.1	<i>Aufgabenstellung</i>	71
3.5.2	<i>Modellbildung und verwendete Datengrundlagen</i>	71
3.5.2.1	<i>Transferfaktoren</i>	71

3.5.2.2	<i>Energiebezogenes Rauchgasvolumen</i>	72
3.5.2.3	<i>Abfalldaten</i>	72
3.5.3	<i>Ergebnisse</i>	74
3.5.3.1	<i>Ergebnisse Mittelwerte</i>	75
3.5.3.2	<i>Ergebnisse Maximalwerte</i>	76
3.5.3.3	<i>Ergebnisse 60 % des jeweiligen Grenzwertes</i>	77
3.5.4	<i>Fazit</i>	79
3.6	BERECHNUNG EINER EMISSIONSPROGNOSE UND ÜBERPRÜFUNG EINES	
	ABFALLKATALOGES AM BEISPIEL EINER SCHÜTTGUTREGENERIERANLAGE	80
3.6.1	<i>Aufgabenstellung</i>	80
3.6.2	<i>Modellbildung und verwendete Datengrundlagen</i>	80
3.6.2.1	<i>Abfallarten</i>	80
3.6.2.2	<i>Festlegung der Systemgrenzen</i>	81
3.6.2.3	<i>Modellierung</i>	82
3.6.3	<i>Ergebnisse</i>	83
3.6.3.1	<i>Schadlosigkeit und Ordnungsgemäßheit</i>	84
3.6.3.2	<i>Hauptzweckprüfung</i>	86
3.6.3.3	<i>Wirtschaftliche Betrachtung</i>	88
3.6.3.4	<i>Umweltverträglichere Maßnahme</i>	90
3.6.4	<i>Fazit SRG-Anlage</i>	92
3.7	BERECHNUNG EINER EMISSIONSPROGNOSE UND ÜBERPRÜFUNG EINES	
	ABFALLKATALOGES AM BEISPIEL EINER ALTHOLZVERBRENNUNGSANLAGE	94
3.7.1	<i>Aufgabenstellung</i>	94
3.7.2	<i>Systemmodellierung</i>	94
3.7.2.1	<i>Verwendetes Modell</i>	95
3.7.2.2	<i>Randbedingungen und mathematische Beziehungen</i>	96
3.7.3	<i>Datengrundlagen für die Berechnungen der Stoffflussanalyse</i>	97
3.7.3.1	<i>Energiespezifische Abgasmenge</i>	97
3.7.3.2	<i>Transferfaktoren</i>	98
3.7.3.3	<i>Daten zu den Abfallqualitäten</i>	99
3.7.4	<i>Ergebnisse</i>	103
3.7.4.1	<i>Ergebnisse für ASN 15 01 99 D1 und 17 02 99 D1</i>	104
3.7.4.2	<i>Ergebnisse für ASN 15 01 99 D1 und 17 02 99 D1 mit Inputbeschränkung</i> <i>110</i>	
3.7.4.3	<i>Vergleich mit den sonstigen zur Verbrennung beantragten Abfällen</i>	115
3.7.5	<i>Fazit der SFA für eine Altholzverbrennungsanlage</i>	116
4	KRITISCHE ANALYSE UND AUSBLICK	118
4.1	LEISTUNGSGRENZEN DER SFA	118
4.2	KOMBINATION MIT ANDEREN METHODEN	120
5	GESAMTFAZIT	122
6	LITERATURVERZEICHNIS	124

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Abb. 1:	Grundmodell einer Stoffflussanalyse	2
Abb. 2:	Schematisches Beispiel für die Durchführung einer Stoffflussanalyse für ein Kohlekraftwerk	2
Abb. 3:	Stoffflussanalyse unterschiedlicher abfallwirtschaftlicher Szenarien	13
Abb. 4:	Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 – hier: Eintrag in Senken	33
Abb. 5:	Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 – hier: Eintrag in Luft	34
Abb. 6:	Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 – hier: Eintrag ins Wasser	35
Abb. 7:	Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 – hier: Eintrag ins Erzeugnis	36
Abb. 8:	Ergebnisse der Szenarien 1, 3 und 3** - hier: Eintrag in den Boden	37
Abb. 9:	Vergleich der in der Diskussion befindlichen Regelungsvorschläge mit den in dieser Untersuchung abgeleiteten Obergrenzen (emissionsseitig ξ : Hg; produktseitig Ψ : übrige) für Ersatzbrennstoffe (in mg/MJ); Obergrenze = 100 %	70
Abb. 10:	Modellierung der Schüttgutregenerierungsanlage für Stoffflussanalyse SFA – vereinfacht –	81

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1:	Mittleres Emissionspotenzial (anorganisch und organisch) von Hausmüll (vgl. auch (11))	14
Tabelle 2:	Mittlere Schadstoffbelastung vermischter hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (inkl. Sortierreste und Baustellenmischabfälle) (modelliert) (mg/Mg FS)	15
Tabelle 3:	Transferfaktoren für die MVA in Baden-Württemberg	16
Tabelle 4:	Transferfaktoren (TF) Stand der Technik-MBA auf Basis der Massenflüsse in Abb. 3 (1 = 100 %), a = eigene Schätzungen auf Basis von ()	18
Tabelle 5:	Transferfaktoren low level-MBA; a = eigene Schätzungen auf Basis von (21)	19
Tabelle 6:	Transferfaktoren für unterschiedliche Deponiestandards (nach Literaturwerten und eigenen Abschätzungen)	22
Tabelle 7:	Mittlere Belastung von Ersatzbrennstoffen, berechnet mit Modell-Hausmüll und modelliertem hausmüllähnlichen Gewerbeabfall (inkl. Sortierresten und Baustellenmischabfällen) und den Transferfaktoren der Stand der Technik-MBA für Ersatzbrennstoffe	24
Tabelle 8:	Transferfaktoren für energetische Nutzung im Zementwerk	25
Tabelle 9:	Transferfaktoren TF energetische Nutzung im Kraftwerk (Reingas: Kohlekraftwerk Bocksberg (Staubfeuerung Braunkohle)) (a = eigene Schätzungen; b nach ())	26
Tabelle 10:	Szenario 1: Stoffflüsse. Aufkommen in Baden-Württemberg, Verbleib in Deutschland.	28
Tabelle 11:	Szenario 2: Stoffflüsse. Aufkommen in Baden-Württemberg, Verbleib in Deutschland.	30

Tabelle 12:	Szenario 3: Stoffflüsse. Aufkommen in Baden-Württemberg, Verbleib in Deutschland.	32
Tabelle 13:	Hauptkomponenten eines typischen Abfallgemisches, wie es 1994 zur Mitverbrennung in der belgische Zementindustrie vermarktet wurde	41
Tabelle 14:	Schadstoffbelastung aus vermischten Sonderabfällen aus Baden-Württemberg	42
Tabelle 15:	Schadstoffbelastung von Farb- und Lackschlämmen aus Baden-Württemberg ()	42
Tabelle 16:	Schadstoffbelastung von Mineralölschlämmen aus Baden-Württemberg (33)	43
Tabelle 17:	Transferfaktoren der Sonderabfallverbrennungsanlage der AVG ($\Sigma = 1$; a = eigene Schätzung)) ()	44
Tabelle 18:	Errechnete Transferfaktoren für Zementwerk nach dem Nassverfahren	46
Tabelle 19:	Ergebnis Stoffflussanalyse für Szenario SVA und ZEM, hier Quecksilber (in kg/1.000 Mg Abfall)	47
Tabelle 20:	Ergebnis Stoffflussanalyse für Szenario SVA und ZEM, hier Cadmium (Cd), Chrom (Cr) und Nickel (Ni) (in kg/1.000 Mg Abfall)	48
Tabelle 21:	Maximalabschätzung Klinkerbelastung bei Einsatz von Sonderabfällen	49
Tabelle 22:	Zu untersuchende Abfallarten	53
Tabelle 23:	Datenblatt Shredderleichtfraktion (LAGA-ASN 57801)	54
Tabelle 24:	Ableitung der verwendeten Transferfaktoren Reingas (36)	56
Tabelle 25:	Prüfwerte für die SFA (Emissionen)	57
Tabelle 26:	Beispielrechnung Luftpfad für die 13 untersuchten Abfallarten und vier untersuchten Prozesse (Basis: Medianwerte)	58
Tabelle 27:	Rechenergebnisse einer Spitzenwertanalyse für den Luftpfad für die 13 untersuchten Abfallarten und vier untersuchten Prozesse (Basis: 90-Quantil- bzw. (bei $n < 10$) Maximalwerte) im Genehmigungsverfahren: Konzentration im Abfall begrenzen für:	60
Tabelle 28:	Vergleichende Darstellung verschiedener Transferfaktoren ins Reingas (Υ) aus unterschiedlichen Quellen und die für diese Untersuchung verwendeten Transferfaktoren (hier: Υ Min und Υ Max)	64
Tabelle 29:	Belastung von Rohmehl und Regelbrennstoffen der Zementwirtschaft () in mg/kg; * = keine Daten bei Sprung (48), daher eigene Literaturrecherche, insbesondere Daten aus (43, ,)	65
Tabelle 30:	Vom Ersatzbrennstoff für Quecksilber einzuhaltende emissionsbezogene Obergrenze, damit im Abgasteilstrom keine Grenzwertüberschreitungen eintreten	67
Tabelle 31:	Produktbezogene Obergrenzen (Ψ) für Ersatzbrennstoffe, die eine Anreicherung im Erzeugnis ausschließen (in mg/MJ)	68
Tabelle 32:	Vergleich der in der Diskussion befindlichen Regelungsvorschläge mit den in dieser Untersuchung abgeleiteten Obergrenzen (emissionsseitig = ξ , produktseitig = Ψ) für Ersatzbrennstoffe (in mg/MJ), k.R. = keine Relevanz	69
Tabelle 33:	Transferfaktoren ins Reingas für die hier untersuchte Verbrennungsanlage	72
Tabelle 34:	Für die energetische Verwertung vorgesehene Abfallgruppen	73

Tabelle 35:	Prognose der Reingaswerte (Teilstrom) für die aus den beantragten Sekundärbrennstoffen gebildeten Gruppen (Mittelwerte)	75
Tabelle 36:	Prognose der Reingaswerte (Teilstrom) für die aus den beantragten Sekundärbrennstoffen gebildeten Gruppen (Maximalwerte)	76
Tabelle 37:	Einhaltung des 0,6-fachen Grenzwertes (GW) der 17. BImSchV für Cd/Tl und Summe Schwermetalle durch die untersuchten Abfallgruppen	78
Tabelle 38:	SRG-Anlage: Zu betrachtende Abfallarten	80
Tabelle 39:	Ergebnisse der Einzelfallberechnungen zur Prüfung der Ordnungsgemäßheit/Schadlosigkeit anhand von ausgewählten Proben (Nein: keine Einzelprobe positiv, Ja: alle Einzelproben positiv, in Einzelfällen Ja: weniger als die Hälfte der Einzelproben positiv, in Einzelfällen Nein: weniger als die Hälfte der Einzelproben negativ)	85
Tabelle 40:	Ergebnisse der Einzelfallberechnungen zur Hauptzweckprüfung anhand von ausgewählten Proben (Nein: keine Einzelprobe positiv, Ja: alle Einzelproben positiv, in Einzelfällen Ja: weniger als die Hälfte der Einzelproben positiv, in Einzelfällen Nein: weniger als die Hälfte der Einzelproben negativ)	87
Tabelle 41:	Bilanz für eine Sonderabfallverbrennungsanlage (SVA) im Einzugsbereich der SRG Lage, basierend auf Daten dieser Anlage und Daten aus den Emissionsberichten 1996 und 1997	90
Tabelle 42:	Beantragte Abfallschlüsselnummern nach EAK	94
Tabelle 43:	Wichtige Betriebskenngrößen und erwartete Emissionswerte für die geplante Holzverbrennungsanlage	95
Tabelle 44:	Transferfaktoren der vorhandenen Holzverbrennungsanlage (69)	98
Tabelle 45:	Transferfaktoren, nicht in Neumarkt bestimmt, * = Schätzung	99
Tabelle 46:	Abfalldaten nach BZL – ASN 15 01 99 D1 Verpackungen mit schädlichen Verunreinigungen (n = 64)	99
Tabelle 47:	Abfallarten nach ABANDA (STAT 277) – ASN 15 01 99 D1 Verpackungen mit schädlichen Verunreinigungen (n = 67) ()	100
Tabelle 48:	Abfalldaten nach BZL – ASN 17 02 99 D1 Holz mit schädlichen Verunreinigungen (n = 240)	101
Tabelle 49:	Abfallarten nach ABANDA (STAT 279) – ASN 17 02 99 D1 Holz mit schädlichen Verunreinigungen (n = 14) ()	102
Tabelle 50:	Abfalldaten Anlagenbetreiber (Brennstoffmix, angeliefert an der existierenden Anlage) – mit Inputbeschränkung	103
Tabelle 51:	Bedeutung der Zuordnungswerte (Z-Werte) nach LAGA	104
Tabelle 52:	Ergebnisse SFA unter Verwendung der eigenen Abfalldaten für den	105
Tabelle 53:	Ergebnisse SFA unter Verwendung der Abfalldaten nach ABANDA (STAT-277) für den ASN 15 01 99 D1	106
Tabelle 54:	Ergebnisse SFA unter Verwendung der eigenen Abfalldaten für den ASN 17 02 99 D1	108
Tabelle 55:	Ergebnisse SFA unter Verwendung der Abfalldaten nach ABANDA (STAT-279) für den ASN 17 02 99 D1	109
Tabelle 56:	Inputbeschränkungen für Brennmaterial stückig, max. 13,5 Mg/h; Zusammensetzung gemäß Formular 3/Ausbaustufe II, Blatt 1.1	111

Tabelle 57:	Ergebnisse SFA unter Verwendung der eigenen Abfalldaten für den ASN 15 01 99 D1 – mit Inputbeschränkung	112
Tabelle 58:	Ergebnisse SFA unter Verwendung der eigenen Abfalldaten für den ASN 17 02 99 D1 – mit Inputbeschränkung	113
Tabelle 59:	Ergebnisse SFA unter Verwendung der Abfalldaten des Betreibers für Brennstoffmix – mit Inputbeschränkung	115

1 Aufgabenstellung

Die Abgrenzung Verwertung zu Beseitigung (Abgrenzungsfrage) und die Umsetzung des Hochwertigkeitsgebots des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (für die Verwertung) bereitet in ihrer fachgerechten Umsetzung erhebliche Probleme, – wobei man zwischen den rein rechtlichen Problemen und den eher naturwissenschaftlich technischen Problemen unterscheiden muss.

Die rechtlichen Probleme möchte ich mit dieser Schrift nicht abhandeln und auf andere Publikationen verweisen (1). Hier hat zudem der Gesetz- bzw. Verordnungsgeber mit dem Arbeitstitel „TA Verwertung“ und einzelner Entwürfe für Rechtsverordnungen begonnen, Klarstellendes zu erarbeiten.

Aber selbst wenn die Rechtslage präzise wäre, müssten naturwissenschaftliche Werkzeuge vorhanden sein, um rechtliche Entscheidungen zu untermauern bzw. zu begründen. Dies ist ebenfalls eine gegenwärtig schwierige Fragestellung, insbesondere weil bei den bisherigen Versuchen, die Hochwertigkeit (§ 5 Abs. 2 KrW-/AbfG) einer Verwertungsmaßnahme, die Umweltverträglichkeit (§ 5 Abs. 5 KrW-/AbfG), die Schadlosigkeit (§ 5 Abs. 3 KrW-/AbfG) oder selbst die sog. Hauptzweckprüfung (§ 4 Abs. 3 KrW-/AbfG) zur Abgrenzung von Verwertung und Beseitigung zu bearbeiten, auf kein allgemein gültiges Methodeninventar zurückgegriffen werden konnte.

Mit dieser Schrift soll eine naturwissenschaftliche Bewertungsmethode vorgestellt werden, die für viele dieser Fragestellungen eingesetzt werden kann: die Stoffflussanalyse (SFA).

Weiter soll anhand von ausgewählten Praxisbeispielen die Leistungsfähigkeit aber auch die Leistungsgrenzen dieser Methode erläutert werden.

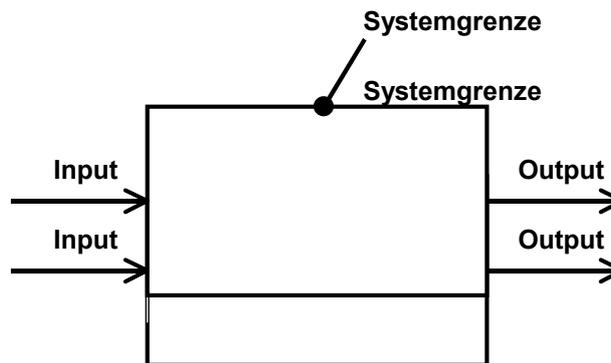
Im Rahmen einer abschließenden kritischen Analyse soll ein Ausblick gegeben werden, wie sich die SFA in Kombination mit anderen Bewertungsmethoden zur Schadlosigkeitsprüfung, zur Bearbeitung der Abgrenzungsfrage und des Hochwertigkeitsgebots in der Abfallwirtschaft einsetzen ließe.

2 Die Stoffflussanalyse (SFA)

Im folgenden wird zunächst die Methode SFA näher dargestellt. Anschließend erfolgt eine Abgrenzung zu anderen in der Abfallwirtschaft gebräuchlichen Bewertungsmethoden.

2.1 Darstellung der Methode

Die Stoffflussanalyse beschreibt die Massenflüsse, wie sie in ein System ein- und austreten.



Die folgende Abbildung zeigt diesen Zusammenhang schematisch für ein einfaches Beispiel.

Abb. 1: Grundmodell einer Stoffflussanalyse

Für die Stoffflussanalyse werden die Einträge in ein zu betrachtendes System und deren Austräge quantitativ erfasst, beispielsweise als Fracht eines Stoffes „X“ in der Einheit „Menge je Zeiteinheit“. Im Beispiel der obigen Abbildung 1 finden sowohl der Eintrag als auch der Austrag nur über einen Pfad statt. In der Praxis sind die Fälle in der Regel komplexer. Die folgende Abbildung zeigt schematisch das Beispiel eines Kohlekraftwerkes.

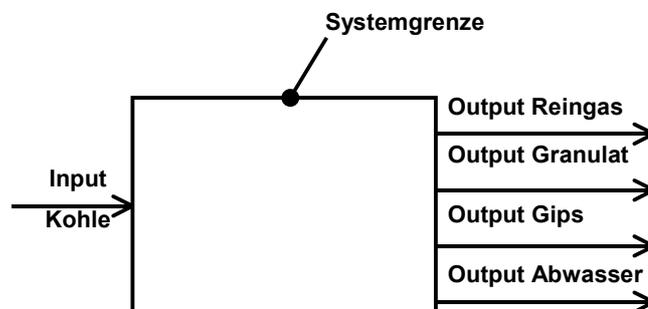


Abb. 2: Schematisches Beispiel für die Durchführung einer Stoffflussanalyse für ein Kohlekraftwerk

Der Vorteil der Stoffflussanalyse für die Praxis ist die Möglichkeit, den Verfahrensprozess eindeutig beschreiben zu können. Dies gelingt über eine Modellbildung und hieraus abgeleitet einen definierten Satz an mathematischen Gleichungen (s.u.). Dabei muss der Anwender der Stoffflussanalyse die einzusetzende Anlage bilanzieren. Wenn die Datenlage belastbar ist, führt die SFA zu eindeutigen Zahlenwerten und nachvollziehbaren Stoffbilanzen.

Für diese Ausarbeitung wird die Stoffflussanalyse für abfallwirtschaftliche Fragestellungen eingesetzt. Dies wurde wissenschaftlich bereits an anderer Stelle erfolgreich durchgeführt. Hierfür sei verwiesen auf die Arbeiten von Baccini (2), Brunner (3) und die neueren Arbeiten von Rechberger (zur Stoffkonzentrierungseffizienz (4)). Die dort verwendete Nomenklatur wird auch hier verwendet (nach Rechberger):

Unter einem **Prozess** wird an dieser Stelle eine **konkrete verfahrenstechnische Anlage** verstanden. Das kann eine **Abfallbehandlungsanlage** sein, aber auch eine **technische Produktionsanlage**, in der Abfälle verwertet werden sollen, wie z.B. ein Zementwerk oder ein Kraftwerk.

Ein **System** besteht aus einer Kombination solcher technischen Verfahrensprozesse einschließlich der räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen (siehe obige Abbildungen). Ein System wäre beispielsweise ein Kohlekraftwerk mit einer vorgeschalteten Pyrolyseanlage für die Verwertung von Abfällen.

Die im Rahmen dieser Schrift relevanten **Inputgüter** dieser Prozesse sind Abfälle, eventuell mineralische Güter wie z.B. Kalkstein, ggf. Regelbrennstoffe, eventuell sonstige Betriebsmittel.

Die **Outputgüter** von Prozessen sind Produkte/Erzeugnisse, Emissionen und ggf. Abfälle.

Ein **Stoff** im Sinne der vorgestellten Methode ist ein Element wie z.B. Cadmium, Thallium, Quecksilber oder eine Verbindung wie z.B. HCl oder HF.

Der **Transferfaktor** (syn. **Transferkoeffizient**) eines Stoffes in ein Umweltmedium (Luft, Wasser, Boden) oder in das beabsichtigte Produkt ist der Quotient aus dem Stofffluss im betreffenden Outputgut und jenem im Abfallinput.

- Der **Transferfaktor Reingas** gibt den relativen Anteil des in einen Prozess eingetragenen Stoffes an, der in die Atmosphäre abgegeben wird.
- Der **Transferfaktor Produkt/Erzeugnis** gibt den relativen Anteil des in einen Prozess eingetragenen Stoffes an, der in das Produkt/Erzeugnis gelangt.

- Der **Transferfaktor Abwasser** gibt den relativen Anteil des in einen Prozess eingetragenen Stoffes an, der in das Abwasser gelangt.
- Der **Transferfaktor Schlacke/Asche** gibt den relativen Anteil des in einen Prozess eingetragenen Stoffes an, der in die Schlacke/Asche gelangt.

Die Transferfaktoren sind prozessspezifische Kenngrößen und zudem von der Betriebsweise der jeweiligen Anlage abhängig.

Die SFA wird im Rahmen dieser Ausarbeitung nur auf statische Prozesse angewendet. In der Regel gelten die Transferfaktoren für statische Prozesse in einem gegebenen Fenster (Druck, Temperatur, Konzentration, sonstige Betriebsbedingungen) als konstant.

Für die Durchführung der SFA ist, wie ausgeführt, der Prozess mathematisch zu modellieren. Die modellierten mathematischen Beziehungen werden in ein EXCEL-Arbeitsblatt eingegeben. Anschließend sind die erforderlichen Eingabedaten zu erheben und ebenfalls einzugeben. Eingabedaten und modellierte mathematische Beziehungen sind zu verknüpfen. Die so erhaltenen Rechenergebnisse sind abschließend anhand von vorgegebenen Prüfwerten zu qualifizieren.

2.1.1 Modellbildung und mathematische Beziehungen

Die SFA basiert, vereinfacht, auf dem Prinzip der Erhaltung der Masse. So gilt beispielsweise für Schwermetalle in einem energetischen Verwertungsprozess folgende Beziehung:

$$\sum F_{In} = \sum F_{Out} \quad (\text{Gleichung 1})$$

F = Fracht
In = Input
Out = Output

Die obige Grundgleichung kann für den Output weiter aufgelöst werden, in Abhängigkeit der jeweils gegebenen Output-Stoffflüsse:

$$\sum F_{In} = T_{f_a} \cdot F_{In} + T_{f_b} \cdot F_{In} + \dots T_{f_x} \cdot F_{In} \quad (\text{Gleichung 2})$$

T_f = Transferfaktoren
a, b, ..., x = Index für Outputpfade

Für die SFA eines energetischen Verwertungsprozesses eines definierten Abfalls werden beispielsweise die folgenden **Daten** benötigt:

- unterer **Heizwert** (H_u),
- Konzentrationsangaben über die im Abfall enthaltenen entscheidungsrelevanten Inhaltsstoffe.

Die Modellbildung kann beispielsweise für einen Verwertungsprozess, der sich im Gleichgewicht befindet, in Form eines idealisierten Rührkessels erfolgen. In diesem Modell sind die Systemgrenzen die baulichen Grenzen der Anlagen, und das Anlageninnere wird als „black box“ gesehen. In diesem Modell interessieren nur die Input- und Outputströme. Es sind aber auch andere Modellbildungen gebräuchlich (s.u.).

2.1.2 Ergebnisse und Bewertung

Die SFA ermöglicht entsprechend der obigen exemplarisch dargestellten mathematischen Modellierung Prognosewerte für die unterschiedlichen Outputpfade einer Beseitigungs- oder Verwertungsmaßnahme. Hierbei werden grundsätzlich alle relevanten Pfade erfasst:

- Luft,
- Wasser,
- Erzeugnisse/Abfälle.

Diese Pfade können, je nach Prozess weiter aufgegliedert sein. So kann ein Prozess mehrere Erzeugnisse/Abfälle zur Folge haben. In der Regel besitzt die Energieerzeugung in einem Kraftwerk beispielsweise die Erzeugnisse/Abfälle:

- Stäube,
- Aschen/Schlacken,
- Gips.

Die so erhaltenen Daten müssen bewertet werden. So können die Prognosewerte für den Luftpfad verglichen werden mit Bescheidwerten der relevanten Anlagengenehmigung oder den Grenzwerten der einschlägigen Gesetze und Verordnungen. Die Prognosewerte für einzelne Erzeugnisse können verglichen werden mit den jeweiligen Produkthanforderungen oder Normen usw. usf..

2.2 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Die SFA benötigt als Datenbasis repräsentative Werte. Die im folgenden dargestellten Anwendungsbeispiele werden zeigen, dass je nach Abfallart sehr unterschiedlich umfangreiche Daten erhoben werden müssen bzw. können.

Für die Ermittlung von Transferfaktoren gelten die gleichen Anforderungen wie beispielsweise für die Ermittlung repräsentativer Untersuchungen für die Festlegung von Mischgrenzwerten nach § 5 Abs. 3 der 17. BImSchV.

Die Frage der Repräsentativität der Daten ist in jedem Einzelfall im Rahmen der zu prüfenden Fragestellung zu beachten.

2.3 Abgrenzung zu anderen Bewertungsmethoden

Weitere Bewertungsmethoden zur Bearbeitung der Schadlosigkeit, der Abgrenzungsfrage und des Hochwertigkeitsgebots des KrW-AbfG sind insbesondere:

- die Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU),
- die Ökobilanz (LCA),
- die Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung (SUP).

2.3.1 Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU) und Ökobilanz (LCA)

Mit der Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU) steht ein methodisches Instrumentarium für die Erfassung und Bewertung der **lokalen** Situation zur Verfügung, für den **globalen** Betrachtungsraum sind mit der Methode der Ökobilanz (DIN EN ISO 14040 ff.) entsprechende Arbeitsinstrumente verfügbar.

2.3.1.1 Umweltverträglichkeitsuntersuchung (UVU)

Die **Umweltverträglichkeitsuntersuchung** (UVU) ist durch Gesetz in Deutschland eingeführt und durch langjährige Praxis normiert. Die **Schutzgüter** sind in § 2 Abs. 1 des UVPG wie folgt definiert:

„Die Umweltverträglichkeitsprüfung umfasst die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen eines Vorhabens auf

- Menschen, Tiere und Pflanzen, Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft einschließlich der jeweiligen Wechselwirkungen,
- Kultur- und sonstige Sachgüter.“

Die **Umweltverträglichkeitsuntersuchung** im Auftrag des Vorhabenträgers (**UVU**) muss in jedem Fall mindestens die nach § 6 Abs. 3 UVPG (Unterlagen des Trägers des Vorhabens) geforderten Angaben beinhalten:

- Beschreibung des Vorhabens mit Angaben über Standort, Art und Umfang sowie Bedarf an Grund und Boden,
- Beschreibung von Art und Menge der zu erwartenden Emissionen und Reststoffe, insbesondere der Luftverunreinigungen, der Abfälle und des Anfalls von Abwasser sowie sonstige Angaben, die erforderlich sind, um erhebliche Beeinträchtigungen der Umwelt durch das Vorhaben feststellen und beurteilen zu können,
- Beschreibung der Maßnahmen, mit denen erhebliche Beeinträchtigungen der Umwelt vermieden, vermindert oder soweit möglich ausgeglichen werden, sowie der Ersatzmaßnahmen bei nicht ausgleichbaren aber vorrangigen Eingriffen in Natur und Landschaft,

- Beschreibung der zu erwartenden erheblichen Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt unter Berücksichtigung des allgemeinen Kenntnisstandes und der allgemein anerkannten Prüfungsmethoden.

Der methodische Ansatz der UVU fokussiert die Prüfung von umweltbezogenen Auswirkungen eines Vorhabens/einer Maßnahme auf die Bereiche (z.B. maximaler Immissionsaufpunkt bei der Bewertung des Luftpfads), bei denen die höchsten negativen Auswirkungen entstehen können. Fällt an diesen Bereichen die Auswirkung verglichen mit den relevanten Kenngrößen der zu betrachtenden Schutzgüter positiv aus, so wird die gesamte Maßnahme als umweltverträglich eingestuft. Diese Maximalauswirkungen bedingen methodisch den genannten lokalen Betrachtungs- und Bilanzierungsraum.

Bei der Abfallmitverbrennung in Industrieanlagen haben aus lokaler Sicht die folgenden Wirkungspotenziale die höchste Bedeutung:

- Humantoxizität (Carcinogene, toxische Schwermetalle),
- Emissionen an Stoffen, die zur bodennahen Ozonbildung beitragen (Photooxidanzienbildungspotenzial, POCP = photochemical ozone creation potential, in Ethylen-Äquivalenten),
- Emissionen an sauren Schadgasen (Versauerungspotenzial, AP = acidification potential, in SO₂-Äquivalenten).

Die Bewertung der lokalen Auswirkungen (Emissionsdaten) erfolgt in der Regel abwägend, verbal-argumentativ in Anlehnung an die Erfahrungen und Methodenentwicklungen zur Umweltverträglichkeitsprüfung (vgl. der UVP-VwV). Kenngrößen (bzw. Grenzwerte), die die genannten Schutzansprüche sicherstellen sollen, sind häufig gesetzlich (bzw. untergesetzlich) abgeleitet bzw. festgelegt.

2.3.1.2 Ökobilanz/Life Cycle Assessment (LCA)

Die Stärke des UVU-Ansatzes ist seine Erfassung und Bewertung der lokalen Umweltauswirkungen. Diese sind für die Frage der Bewertung einer vorgesehenen Maßnahme der energetischen Verwertung (Abfallmitverbrennung in Industrieanlage) sicherlich zwingend zu erheben. Die Schwäche des UVU-Ansatzes ist aber seine Beschränkung auf eben diese Wirkung und das Ausblenden von überregionalen bzw. globalen Wechselwirkungen, von ökologischen Folgen der In- und Outputstoffströme (Lebenswege) und vom Erfassen und Bewerten von Nutzen, die aus den jeweiligen Prozessen stammen (Energie, Stoffe, Dienstleistungen). Hier liefert die Ökobilanz (syn. Lebensweganalyse, **Life Cycle Assessment**, LCA) Antworten.

Das Instrument der Ökobilanz wurde in den letzten Jahren methodisch intensiv diskutiert und ist zwischenzeitlich international in verschiedene Normen gefasst worden. Nach heutigem Stand der Normung muss eine Ökobilanz enthalten:

- die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (DIN EN ISO 14040)
- die Sachbilanz (DIN EN ISO 14041)
- die Wirkungsabschätzung (DIN EN ISO 14042)
- die Auswertung der Ergebnisse (DIN EN ISO 14043).

Der methodische und wissenschaftliche Rahmen für die Wirkungsabschätzung und Auswertung war lange in der Diskussion. In den diesbezüglichen Normen DIN EN ISO 14042 und 14043 (vom Juli 2000) sind nunmehr Anleitungen für die Auswahl der Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle gegeben und sieben Anforderungen (5) an diese festgelegt (DIN 14042, Punkt 5.3.2). U.a. müssen die Quellen für die Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle angegeben und ihre Auswahl begründet werden.

Die DIN EN ISO 14043 sieht weiterhin u.a. eine Vollständigkeitsprüfung, eine Sensitivitäts- und eine Konsistenzprüfung für die Ergebnisse der Ökobilanz-Studie vor. Zweck der Sensitivitätsprüfung ist die Prüfung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse, indem eingeschätzt wird, ob Unsicherheiten zu den signifikanten Parametern die Schlußfolgerung beeinflussen. Für diese Prüfung sollen u.a. auch Sachverständigenurteile (critical review) berücksichtigt werden.

Ein grundsätzliches methodisches Problem für die Anwendung der Ökobilanz auf abfallwirtschaftliche Fragestellungen besteht allerdings darin, dass die bisher in den Normungsbemühungen fixierten und eingeflossenen Empfehlungen und Regeln schwerpunktmäßig am Beispiel von **Produkt-Ökobilanzen** entwickelt wurden. Bei der Bewertung einer vorgesehenen Maßnahme der energetischen Verwertung (Abfallmitverbrennung in Industrieanlage) werden, methodisch betrachtet, aber keine Produkte miteinander verglichen, sondern technische Verfahren (Verfahrensbilanz). Zwar wurde dieser Anwendungsbereich durch Aufnahme der Begrifflichkeit in das gesamte Norminventar integriert. Es hat sich aber bei der Bearbeitung verschiedener Projekte gezeigt, dass man dennoch ein schematisches Übertragen der Ökobilanz-Methode nicht vornehmen kann (6). An dieser Stelle besteht sicherlich noch Vereinheitlichungsbedarf.

2.3.2 Die strategische Umweltverträglichkeitsuntersuchung (SUP)

Ein im deutschem Recht nicht etabliertes interessantes Instrument stellt die **strategische Umweltverträglichkeitsuntersuchung** (SUP) dar. Die SUP ist eine Mischung aus konkreter UVU und dem Bewertungsinstrument Planspiel.

Die SUP eignet sich insbesondere für Vollzugsentscheidungen mit vermuteten gewichtigen Auswirkungen auf zukünftige Entwicklungen. So kann die Einführung eines neuen Kunststoffes in die Produktion und Konsumtion erhebliche Auswirkungen auf den zukünftigen Verwertungsmarkt von Kunststoffabfällen haben. Mithilfe der SUP können unterschiedliche Zukunftsszenarien durchgespielt und auf Umweltauswirkungen untersucht werden. Die Art und

Anzahl der Szenarien und die Rückwirkungen der Ergebnisse auf ggf. neu zu definierenden Szenarien stellt das strategische Element der Untersuchung dar. Die Untersuchungsstrategie ergibt sich direkt aus der insgesamten jeweiligen Aufgabenstellung der SUP.

2.3.3 Stärken- und Schwächenanalyse

Aufgrund der Komplexität und des hohen Zeit- und Arbeitsaufwand können selbst vereinfachte Ökobilanz-Modelle bzw. Rechenprogramme (7) nur für strittige Präzedenzfälle eingesetzt werden. Die SUP kann ebenfalls recht komplexe Ausmaße annehmen. In diesem Umstand ist sicherlich ein Grund zu sehen, warum seitens des praktischen Behördenalltags (und der diesbezüglichen rechtlichen Rahmensetzung) größere Zurückhaltung für die Einführung derartiger Instrumente gegeben ist.

Ggf. eignen sich diese Instrumente, neben der Entscheidungsvorbereitung von Präzedenzfällen oder Fallbeispielen grundsätzlicher Bedeutung, auch für die Erstellung von Ja/Nein-Listen, die dem Vollzug als Leitlinie (im Sinne einer Regelvermutung) dienen können.

Dementgegen ist die SFA, da sie einen deutlich geringeren Bearbeitungsaufwand nach sich zieht, für die unmittelbare Behördenpraxis im Rahmen der oben beschriebenen Aufgabenstellung geeignet.

Die Anwendung der dargestellten Instrumente kann in unterschiedlichen Rechtsbereichen erfolgen.

3 Praxisbeispiele

Im folgenden werden einzelne Praxisbeispiele in gekürzter Form wiedergeben. Die stoffflussanalytischen Untersuchungen wurden vom Autor im Rahmen unterschiedlicher Projekte durchgeführt. Die Projekte sind jeweils zitiert. Hier ein Überblick:

- 3.1 Entwicklungsprognose für die Entsorgung von Siedlungsabfällen eines Bundesland mittels SFA
- 3.2 Bewertung unterschiedlicher Entwicklungsprognosen für besonders überwachungsbedürftige Abfälle eines Bundeslandes
- 3.3 Entsorgungsempfehlungen für mengenmäßig bedeutsame besonders überwachungsbedürftige Abfälle nach immissionsschutzrechtlichen Gesichtspunkten
- 3.4 Überprüfung von Grenzwertvorschlägen für Ersatzbrennstoffe, die für die Verwertung in Zementwerken vorgesehen sind
- 3.5 Berechnung einer Emissionsprognose und Überprüfung eines Abfallkataloges am Beispiel eines Heizwerkes
- 3.6 Berechnung einer Emissionsprognose und Überprüfung eines Abfallkataloges am Beispiel einer Schüttgutregenerieranlage
- 3.7 Berechnung einer Emissionsprognose und Überprüfung eines Abfallkataloges am Beispiel einer Altholzverbrennungsanlage

3.1 Entwicklungsprognose für die Entsorgung von Siedlungsabfällen eines Bundesland mittels SFA

Dieses Projekt behandelte die Frage, welche ökologischen Auswirkungen mit unterschiedlichen Entwicklungsszenarien für die Entsorgung von Siedlungsabfällen in einem Bundesland verbunden sind (8).

3.1.1 Aufgabenstellung

In den genannten Studie wurde untersucht, in welchem Umfang die in definierten Abfällen enthaltenen Schadstoffe (synonym „Stoffe“) über unterschiedliche Prozesse im System Technosphäre verbleiben oder in Zielmedien verteilt werden. Dabei wird die SFA dazu eingesetzt, auf der Basis typischer Technikkonzepte und bekannter Kennzahlen für Anlagen (Prozesse) die Schadstoffflüsse für unterschiedliche Abfallarten (aus Baden-Württemberg) in Entwicklungs- bzw. Entsorgungsszenarien zu berechnen.

Unter Prozesse werden beispielsweise Beseitigungsanlagen wie Deponien oder diverse Verwertungsanlagen wie etwa Sortieranlagen verstanden. Unter Zielmedien werden u.a. die klassischen Umweltmedien verstanden.

Von den eigentlichen Umweltmedien wie Wasser oder Luft werden zusätzlich relevante „Lagerräume“ unterschieden, da hier Schadstoffe auf längere Zeit (Deponien) oder auf Dauer (Senke) von Umweltmedien ferngehalten werden. Eine Zwischenstellung nehmen in Erzeugnisse eingebrachte Schadstoffe ein, wenn die Erzeugnisse irreversibel in Umweltmedien verteilt werden.

In dieser Studie wurden daher die folgenden Zielmedien betrachtet:

- Luft (Umweltmedium),
- Wasser (Umweltmedium),
- Boden (Umweltmedium),
- Erzeugnis (Umweltmedium),
- Deponie (Lagerraum)
- Senken (Lagerraum).

Luft: Das Zielmedium Luft ist relevant für alle betrachteten Prozesse einschließlich MBA und Deponien.

Wasser: Das Zielmedium Wasser ist relevant für alle nicht abwasserfreien Prozesse wie MBA, Kraftwerke und Deponien.

Boden: Die Abfallverwertung im Straßen- und Landschaftsbau wird dem Umweltmedium Boden zugerechnet, ebenso wie die unabgedichteten Deponien.

- Erzeugnis:** Hierunter werden Erzeugnisse wie Klinker/Zement aus Zementwerken oder REA-Gips aus Kraftwerken verstanden. Für die Stoffflussanalyse sind die Erzeugnisse von Bedeutung, die im Rahmen der Nutzung oder postkonsum irreversibel in Umweltmedien wie Boden oder Wasser verteilt werden. Erzeugnisse, die wieder in die Produktion zurückgeführt werden (z. B. NE-Metalle für das stoffliche Recycling), bleiben hingegen innerhalb der Systemgrenzen der Technosphäre (s.u.).
- Deponie:** Unter Deponie wird lediglich die entsprechend TASI ausgestattete gekapselte Deponie (Dichtung, Sickerwasserfassung und Reinigung) verstanden (inkl. Vorbehandlung nach TASI entsprechend TASI-Fristen).
- Senken:** Als Senke wird zum einen die Untertagedeponie eingestuft. Zum anderen wird für organische Stoffe die Mineralisierung als Senke betrachtet.

Betrachtet werden die Schadstoffflüsse in wahrscheinlichen Entwicklungsszenarien (**Szenarien**, s.u.) und dies jeweils für die Jahre **2002**, **2006** und **2010**. Betrachtungsraum ist die **Bundesrepublik Deutschland**. Im- und Exporte von Abfällen werden aus Vereinfachungsgründen als für das Gesamtergebnis ausgeglichen angenommen (Import = Export) und daher außer Betrachtung gesetzt.

3.1.2 Modellbildung

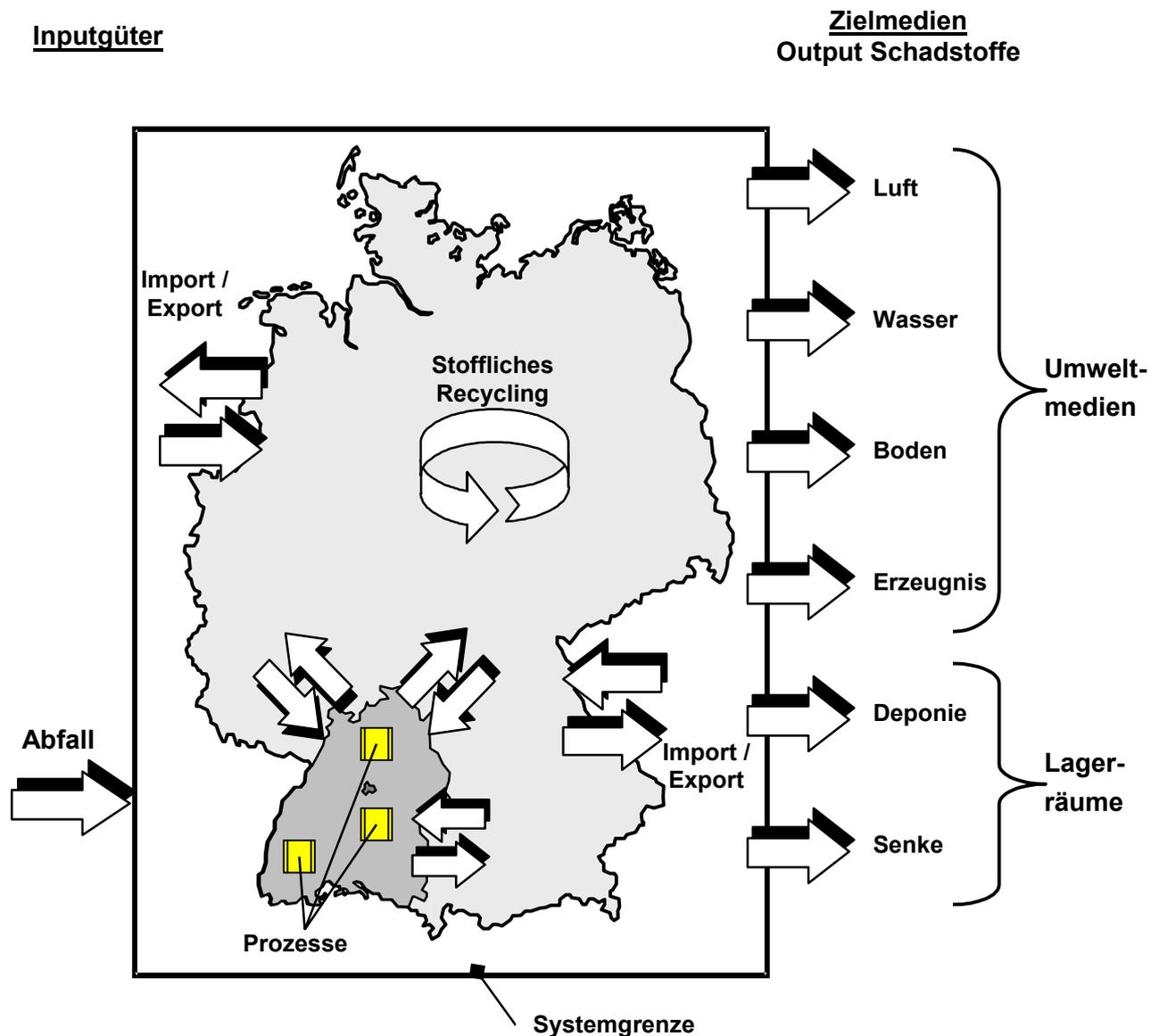
Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Struktur der Untersuchung inkl. der betrachteten Systemgrenzen. Es wird deutlich, dass die Abfallströme bzw. Stoffflüsse nicht auf Baden-Württemberg zu beschränken sind. Selbst Wechselwirkungen mit benachbarten Nationalstaaten sind einzubeziehen.

Es gelten weiterhin folgende Abschneidekriterien:

- Stoffflüsse aus Hilfsmitteln für die Abfallbehandlung, die als Abfälle anfallen oder wieder zur Produktion aufgearbeitet werden
- sowie
- Stoffflüsse aus der Aufbereitung von Abfällen, die mit dem Ziel der weiteren Verwertung dieser Fraktion abgetrennt werden (z.B. Metallschrott)
- bleiben als „vernachlässigbare“ Fraktionen unberücksichtigt.

Die Stoffflussanalyse liefert in dem hier gewählten Anwendungsfall Erkenntnisse, welche Schadstofffrachten im jeweiligen Entwicklungsszenario in welches Umweltmedium eingetragen werden.

Abb. 3: Stoffflussanalyse unterschiedlicher abfallwirtschaftlicher Szenarien



Als Inputgröße für die Berechnungen ist entscheidend, welche Schadstoffpotenziale die jeweils zu betrachtende Abfallart aufweist. In diesem Zusammenhang ist festzulegen, welche Schadstoffe für die durchzuführende ökologische Analyse von Bedeutung sind. Diese Entscheidung hängt maßgeblich von den zu betrachtenden Prozessen ab. So spielen organische Schadstoffe für den Prozess „thermische Anlage“ gemeinhin eine geringe Rolle. Dies ist anders, wenn Deponien oder biologische Behandlungsverfahren betrachtet werden. Um alle relevanten Prozesse abzudecken, werden im Folgenden sowohl **organische** als auch **anorganische** Schadstoffe betrachtet. Als anorganische Schadstoffe sind insbesondere Schwermetalle von Bedeutung. Weiter sind die Elemente Chlor und Schwefel von Relevanz. Bei den organischen Schadstoffen sind flüchtige Stoffe, die in das Umweltmedium Atmosphäre/Luft verlagert werden, von den wasserlöslichen Stoffen zu unterscheiden. Letztere werden in das Umweltmedium Grund- bzw. Oberflächenwasser verlagert. Schließlich sind

Schadstoffe zu betrachten, die in einem Prozess neu gebildet werden (de novo-Synthese). Als Siedlungsabfälle werden die beiden Gruppen Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall (inkl. Sortierreste und Baustellenmischabfälle) betrachtet. Weiter werden ergänzend drei besonders überwachungsbedürftige Abfälle in einem separaten Entwicklungsszenario betrachtet.

3.1.2.1 Hausmüll

Hausmüll stellt ein relativ heterogenes Abfallgemisch dar. Bei der Datenerhebung des Schadstoffgehaltes von Hausmüll ist dieser Aspekt als Problem anzusprechen.

Belastbare Ergebnisse werden durch das Analysieren großer Probemengen erzielt. Hier sind Untersuchungen von Brunner et al. anzusprechen, in denen die Belastung von Restabfall über die Outputstoffflüsse von MVAs bestimmt wurde. Allerdings ist dies nur für einen Ausschnitt der relevanten Schwermetalle durchgeführt worden (Cd, Hg, Pb, Cu) (9, 10). Ergänzend werden Daten aus verschiedenen deutschen Quellen herangezogen (11) sowie durch Untersuchungen, die das organische Schadstoffpotenzial näher beschreiben (12). Die folgende Tabelle zeigt die für die Berechnungen abgeleiteten Belastungswerte für Hausmüll.

Tabelle 1: Mittleres Emissionspotenzial (anorganisch und organisch) von Hausmüll (vgl. auch (11))

Parameter	mg/Mg FS
Chlor (Cl)	8.730.000
Schwefel (S)	3.300.000
Cadmium (Cd)	8.500
Thallium (Tl)	100
Quecksilber (Hg)	1.800
Antimon (Sb)	38.000
Arsen (As)	5.000
Blei (Pb)	410.000
Chrom (Cr)	50.000
Kobalt (Co)	5.000
Kupfer (Cu)	450.000
Mangan (Mn)	350.000
Nickel (Ni)	22.000
Vanadium (V)	6.000
Zinn (Sn)	110.000
Flüchtige organische Verbindungen (VOC)	1.000.000
Elutionspotenzial (ELU*)	45.000.000

* wasserlösliche organische Stoffe

3.1.2.2 Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (inkl. Sortierreste und Baustellenmischabfälle) (hmäGA)

Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (hmäGA) setzen sich nach der hier unterstellten Definition aus hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, Sortierresten, Baustellenmischabfällen und Fehlwürfen aus dem Bereich der produktionsspezifischen Abfälle zusammen.

Es gibt nur wenige detailliertere aktuelle Untersuchungen zur branchenspezifischen Herkunft und Zusammensetzung von hmäGA.

Aus unterschiedlichen Datensätzen (s.u.) lässt sich ein repräsentativer **vermischter hausmüllähnlicher Gewerbeabfall** modellieren.

Tabelle 2: Mittlere Schadstoffbelastung vermischter hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (inkl. Sortierreste und Baustellenmischabfälle) (modelliert) (mg/Mg FS)

Parameter (mg/Mg FS)	DSD- Sortierreste (vgl. (11))	schadstoffarme heizwertreiche gewerbliche Abfälle in		Modellierung Gruppe 5; (hier: Holz, Kunst- stoffe, Textilien) (13)	Baustellen- mischabfälle	hmäGA in A, Projekt MBRVV, (14)	Mittelwert gerundet (Modell- Gewerbe- abfall)
		Deutschland (ABANDA etc., vgl.(15))	Österreich (ASTRA) (vgl. (16))				
Chlor	24.400.000	20.600.000	7.551.000	6.139.000	75.000.000	4.865.000	26.700.000
Schwefel	2.600.000	2.200.000	6.105.000			7.786.000	3.600.000
Cadmium	10.000	7.500	12.300	4.900		1.200	8.700
Thallium	90	0		140			100
Quecksilber	440	1.400	740	40		410	700
Antimon	42.000	730.000		8.400		1.116.500	260.000
Arsen	3.100	1.500		850		2.500	1.800
Blei	260.000	210.000	218.800	38.800		314.300	182.000
Chrom	93.000	380.000		34.000		380.400	170.000
Kobalt	9.700	440				8.700	5.100
Kupfer	540.000	2.900.000		10.700		1.075.100	1.200.000
Mangan	110.000	17.000		77.800		330.800	68.000
Nickel	55.000	11.000		10.900		190.200	26.000
Vanadium	17.000	0		5.100		16.130	7.400
Zinn	79.000	39.000		17.800		58.600	45.000
VOC ¹							1.000.000
ELU ²							45.000.000

¹ flüchtige organische Stoffe, hier: Daten wie Hausmüll

² wasserlösliche organische Stoffe, hier: Daten wie Hausmüll

3.1.2.3 Müllverbrennungsanlagen (MVA)

Die in Deutschland betriebenen Müllverbrennungsanlagen (MVA) weisen einen vergleichsweise hohen Standard der Abgasreinigung auf.

Bezüglich der Schwermetalleinträge sowie der Elemente Chlor und Schwefel errechnen sich aus der folgenden Gleichung aus den obigen Betreiberangaben (Mittelwert für Baden-Württemberg aus (17) in (8)), den bekannten Anlagenbilanzierungen und den Belastungen der eingebrachten Abfallarten s.o.) die folgenden Kennziffern für die Stoffflussanalyse.

$$Tf_{\text{Rein}} = F_{\text{Rein}} / F_{\text{In}} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Tf_{Rein} = Transferfaktor Reingas

F_{Rein} = Fracht Reingas

F_{In} = Fracht Input

wobei gilt:

$$F_{\text{Rein}} = K_{\text{Rein}} \cdot H_u \cdot \varphi \quad (\text{Gleichung 4})$$

K_{Rein} = Konzentration im Reingas (mg/m³)

H_u = unterer Heizwert des Abfalls (MJ/Mg)

φ = energiespezifisches Abgasvolumen (N, tr.) (m³/MJ)

Tabelle 3: Transferfaktoren für die MVA in Baden-Württemberg

Parameter	TF Luft: Reingas	TF Fe-/NE-Metalle	TF Staub/ RGR / Schlacke (Summe TF Reingas + TF Fe/NE-Metalle ergänzt zu 1, ausgenommen VOC und ELU)
Chlor	0,00062		0,99938
Schwefel	0,00177		0,99823
Cadmium	0,00065	0,050	0,94935
Thallium	0,00065		0,99935
Quecksilber	0,00689		0,99311
Antimon	0,00004		0,99996
Arsen	0,00004		0,99996
Blei	0,00004	0,100	0,89996
Chrom	0,00004	0,100	0,89996
Kobalt	0,00004		0,99996
Kupfer	0,00004	0,100	0,89996
Mangan	0,00004		0,99996

Parameter	TF Luft: Reingas	TF Fe-/NE-Metalle	TF Staub/ RGR / Schlacke (Summe TF Reingas + TF Fe/NE-Metalle ergänzt zu 1, ausgenommen VOC und ELU)
Nickel	0,00004	0,100	0,89996
Vanadium	0,00004		0,99996
Zinn	0,00004		0,99996
VOC ¹	0,00002		
ELU ²			0,02140

¹ flüchtige organische Stoffe

² wasserlösliche organische Stoffe

3.1.2.4 Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung (MBA)

Die Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung (MBA) ist unter dem Aspekt Stoffstrommanagement als eine Anlage anzusehen, die verschiedene Stoffströme erzeugt, im Unterschied zur MVA beispielsweise aber keine eigentliche Endbehandlung darstellt.

Für die MBA ist das Beherrschen der flüchtigen organischen Schadstoffe in den betrachteten Abfallarten das herausragende Thema.

MBA's sollen entsprechend der 30. BImSchV betrieben werden. Diese Anlagen reduzieren die VOC-Emissionen auf unter 55 g/Mg FS (18).

Die Massenflüsse (Deponie, hochkalorische Fraktion) werden maßgeblich durch die Anforderungen aus der Ablagerungsverordnung bestimmt (insbesondere H₀-Regelung) (19). Da es in Deutschland bei den existierenden MBA's noch keine hinreichenden Erfahrungen mit der Einhaltung dieser Vorgaben gibt, wird auf die Kennwerte einer österreichischen MBA zurückgegriffen (MBA Kufstein der Fa. Thöni).

Für den Schwermetallinput ist eine geringfügige Emission flüchtiger Elemente zu beachten. Ansonsten findet lediglich eine Verteilung der Schwermetallfracht auf die Outputströme statt. Von uns wird weiter unterstellt, dass MBA's diesen Standards eine funktionstüchtige NE-Metallabtrennung durchführen müssen, um einen verkehrsfähigen Ersatzbrennstoff (EBS) erzeugen zu können. Dies führt zu einer Schwermetallentfrachtung der hochkalorischen Fraktion.

Für die flüchtige Organik (VOC) wird unsererseits unterstellt, dass die Vorgaben der 30. BImSchV eingehalten werden. Für die wasserlöslichen organischen Schadstoffe wird, in Anlehnung an eigene Untersuchungen (20) und die Anforderungen der Ablagerungsverordnung, ein Abbau von 90 % durch die biologische Behandlung der Deponiefraktion angenommen (Eluat vor Behandlung: 1.000–5.000 mg/l, nach Behandlung < 250 mg/l).

Die folgende Tabelle zeigt die von uns abgeschätzten Transferfaktoren für eine MBA nach dem Stand der Technik. Die Daten wurden aus unterschiedlichen Datenquellen abgeleitet. Die Transferfaktoren sind jeweils auf die Inputwerte des Gesamtabfalls bezogen.

Tabelle 4: Transferfaktoren (TF) Stand der Technik-MBA auf Basis der Massenflüsse in Abb. 3 (1 = 100 %), a = eigene Schätzungen auf Basis von (21)

Parameter	TF Luft	TF Deponiefraction (22, 23)	TF Hochkalorische Fraktion (22, 23, 24)	TF Fe-, NE-Metallabtrennung (und sonstiges) (22) oder ergänzt zu 1
Chlor	0,004 ^a	0,10 ^a	0,85 ^a	0,046
Schwefel	0,01 ^a	0,20 ^a	0,73 ^a	0,06
Cadmium	<0,001 ^a	0,38	0,47	0,15
Thallium	<0,001 ^a			
Quecksilber	0,05 ^a	0,44	0,30 ^a	0,21
Antimon	<0,001 ^a	0,15 ^a	0,75 ^a	0,10
Arsen	<0,001 ^a	0,55	0,37	0,08
Blei	<0,001 ^a	0,46	0,30	0,24
Chrom	<0,001 ^a	0,32	0,35	0,33
Kobalt	<0,001 ^a	0,29	0,23	0,48
Kupfer	<0,001 ^a	0,14	0,20 ^a	0,66
Mangan	<0,001 ^a	0,15 ^a	0,30 ^a	0,55
Nickel	<0,001 ^a	0,19	0,14	0,67
Vanadium	<0,001 ^a	0,50 ^a	0,10 ^a	0,40
Zinn	<0,001 ^a	0,40 ^a	0,10 ^a	0,50
VOC ¹	0,05 ^a	0,001		
ELU ²		0,1 ^a		

¹ flüchtige organische Stoffe

² wasserlösliche organische Stoffe

Für die Sensitivitätsbetrachtung wird untersucht, welche Auswirkungen eintreten, wenn sich Bestrebungen verschiedener Interessensgruppen durchsetzen, das Verordnungspaket des BMU an entscheidenden Stellen in seinen Anforderungen zu reduzieren. Neben dem Weiterbetrieb von Deponien ohne TASI-Standard nach 2005 ist hier die Reduzierung der Umweltschutzanforderungen an die MBA zu berücksichtigen. Im Einzelnen wird hierfür unterstellt, dass die heute gegebenen Techniken als ausreichend angesehen werden:

- Abgas: TOC im Reingas = 300 g/m³,
- Deponiefraction: AT₄ = 5 mg O₂/g oTS,
- Einbau: ohne Auflagen.

Für die Berechnung dieser Variante wird als Modellanlage daher auf die MBA Lüneburg zurückgegriffen.

Bezüglich der Transferfaktoren werden für die anorganischen Stoffe ähnliche Werte wie für die MBA Kufstein unterstellt. Für die VOCs wird aufgrund der geringeren Abgasreinigungsleistung dieser MBAs ein Transferfaktor von 0,35 angesetzt; für die wasserlösliche Organik wird mit einem Transferfaktor von 0,20 gerechnet. Für die Schwermetalle wird aufgrund der nicht gegebenen NE-Metallabtrennung pauschal eine um 50 % reduzierte Entfrachtung gegenüber der Stand der Technik-MBA angesetzt.

Je nach politischem Entscheidungsprozess zum Komplex TASI-Novellierung wird die zukünftige Rolle der low level-MBA entschieden. Daher wird unsererseits für die Sensitivitätsbetrachtung die ökologisch ungünstige Variante eines anteiligen Nutzens des Prozesses low level-MBA mit angesetzt. Hierbei war zu prüfen, welche Auswirkungen es hat, wenn die low level-MBA auch nach 2005 weiter betrieben werden kann (als Verwertungsanlage). Eine low level-MBA stellt konzeptionell eine Vorbehandlung vor der Ablagerung dar, wie sie auch an wenigen Standorten in Baden-Württemberg aktuell noch in Betrieb ist (21). Es werden keine Materialien zur Verwertung ausgeschleust. Eine Abgasreinigung findet nicht statt (Freilandrotten), und die löslichen Schadstoffe werden anteilig in den Deponiekörper verfrachtet.

Tabelle 5 zeigt die Transferfaktoren, die im Rahmen dieser Studie für die low level-MBA herangezogen wurden.

Tabelle 5: Transferfaktoren low level-MBA; a = eigene Schätzungen auf Basis von (21)

Parameter	TF Luft	TF Deponiefraction (ergänzt zu 1, ausgenommen VOC ¹ und ELU ²)
Chlor	0,01 ^a	0,99
Schwefel	0,15 ^a	0,85
Cadmium	0,01 ^a	0,99
Thallium	0,01 ^a	0,99
Quecksilber	0,10 ^a	0,9
Antimon	0,01 ^a	0,99
Arsen	0,01 ^a	0,99
Blei	0,01 ^a	0,99
Chrom	0,01 ^a	0,99
Kobalt	0,01 ^a	0,99
Kupfer	0,01 ^a	0,99
Mangan	0,01 ^a	0,99
Nickel	0,01 ^a	0,99
Vanadium	0,01 ^a	0,99
Zinn	0,01 ^a	0,99
VOC ¹	0,75	0,01 (Abbau 0,249)
ELU ²		0,50 (Abbau 0,50)

¹ flüchtige organische Stoffe

² wasserlösliche organische Stoffe

3.1.2.5 Deponien

Das Emissionsverhalten der Deponien hängt wesentlich vom Ausbaustandard der Deponie selbst ab.

Bei vollständig fehlender Basisabdichtung, was in einzelnen Bundesländern die „Regeldeponie“ darstellt, ist von einem weitgehenden kurz- bis mittelfristigen Transfer vieler Schadstoffe ins Grundwasser auszugehen. Bei nicht TASI-konformer Basisabdichtung, was bei vielen der oben dokumentierten Bundesländer die „Regeldeponie“ darstellt, ist, je nach Art der Basisabdichtung, eine höhere Transferrate (verglichen mit TASI-Standard) ins Grundwasser zu erwarten (s.u.). Bei nicht vorhandener Gasfassung (was in Niedersachsen beispielsweise in rund einem Drittel der betriebenen Deponien der Fall ist) ist anzunehmen, dass die im Restabfall enthaltenen flüchtigen Schadstoffe weitgehend in die Atmosphäre verlagert werden und zusätzlich erhebliche Sekundäremissionen (Methan) entstehen.

Allerdings ist es aufgrund der vorhandenen Datenlage schwer, quantitativ exakte Prognosen anzugeben, wie sich die Schadstofffrachten, die in eine Deponie eingebracht werden, bezüglich der Austragspfade Luft und Wasser verteilen werden. Dies hängt einerseits mit der gegebenen unzureichenden Datenbasis zusammen und stellt auch ein methodisches Problem dar, da hier Prognosezeiträume von Jahrzehnten (bzw. Jahrhunderten) zu betrachten sind. Neben der überwachten Betriebsphase einer Deponie ist auch deren Nachsorgephase einzubeziehen. Die Nachsorgephase ist so lange auszudehnen, bis die Emissionen der Anlage ohne Behandlung abgeleitet werden dürfen.

Als Prognosezeitraum in dieser Studie werden 150 Jahre festgelegt.

Für eine Deponie, die komplett den TASI-Standard bezüglich Untergrundabdichtung, Sickerwasserfassung und -reinigung sowie Gasfassung und -entsorgung einhält, werden die Transferfaktoren in die Umweltmedien Luft und Wasser niedrig ausfallen. Für den Luftpfad wird allgemein eine 40 %ige Fassung und Entsorgung der über das Deponiegas emittierten organischen Schadstoffe für möglich angesehen, folgt man den betrieblichen Erfahrungen in Deutschland. Für den Wasserpfad wird eine 70 %ige Fassung und Entsorgung für möglich angesehen (25). Für die meisten anorganischen Elemente wird eine niedrige Transferrate in die genannten Umweltmedien unterstellt. Diese Annahmen ergeben sich aufgrund der chemischen Beschaffenheit der Elemente. Diese Schätzungen sind dann zutreffend, wenn die Schlämme aus der Abwasserreinigung nicht landwirtschaftlich verwertet werden. Für die Ermittlung dieser Transferfaktoren wird u.a. auf (26) zurückgegriffen. Die dort enthaltenen Faktoren sind über umfangreichen Modellrechnungen ermittelt worden.

Deponien nach TASI-Standard, aber ohne die geforderten natürlichen Standorteigenschaften weisen einen erhöhten Transfer an Stoffen ins Grundwasser auf. Für die geologische Barriere ergeben sich hierdurch, je nach gegebener Geologie, erhöhte Infiltrationsraten im Bereich

des Faktors 10 bis 100. Allerdings wird diese Infiltrationsrate erst „in Anspruch“ genommen, wenn die technische Barriere und die Sickerwasserfassung versagt. Insgesamt wird daher pauschal angenommen, dass auf die gesamte Betrachtungszeit der Deponie dadurch das Emissionspotenzial an wasserlöslichen organischen Stoffen nur zur Hälfte zurückgehalten werden kann. Für die restlichen Pfade sind gegenüber der obigen Deponieausstattung identische Werte anzusetzen.

Für die Deponie ohne jedwede Ausstattung sind uns aus der Literatur keine Betrachtungen des Emissionspotenzials bekannt. Für den Wasserpfad kann abgeschätzt werden, welches Sickerwasserpotenzial anfallen dürfte. Geht man von der Durchschnittsgröße von 5 l je Mg und Jahr aus (25), ergeben sich über den Betrachtungszeitraum insgesamt 750 l Sickerwasser. Diese Sickerwassermenge kann wiederum als Emission in den Wasserpfad angesehen werden. Sie kann über einen mittleren Erfahrungswert der Sickerwasserbelastung (27) in Beziehung zum Abfallinput gesetzt werden, um die jeweiligen Transferfaktoren zu berechnen. Für die Gasphase wird eine beinahe vollständige Freisetzung der flüchtigen Organik unterstellt; Schwermetalle werden nur in unbedeutendem Umfang über den Gaspfad emittiert.

Für den Deponietyp ohne natürliche und ohne technische Deponiebasis, aber mit Sickerwasserfassung, wird ein Emissionspotenzial zwischen den beiden oben genannten Deponietypen (keine geologische Barriere / vollständig ohne Ausstattung) angenommen. Für den Gaspfad wird eine 40 %ige Fassung und Entsorgung angenommen (wie TASI-Deponie).

Die folgende Tabelle zeigt die Transferfaktoren, die für unterschiedliche Deponiestandards von uns unterstellt wurden. Wir haben in unseren Überlegungen die Deponie eher optimistisch abgeschätzt, insbesondere was den Wasserpfad anbelangt. In der Sensitivitätsbetrachtung setzen wir uns mit pessimalen Annahmen aus der Literatur auseinander.

Tabelle 6: Transferfaktoren für unterschiedliche Deponiestandards (nach Literaturwerten und eigenen Abschätzungen)

Parameter	Deponie komplett mit TASI-Standard			Deponie mit TASI-Standard bis auf Standortvoraussetzungen			Deponie mit TASI-Standard bis auf Untergrundabdichtung			Deponie ohne Abdichtung, Sickerwasser- und Gasfassung		
	Luft	Wasser	Deponie (Senke)	Luft	Wasser	Deponie (Boden)	Luft	Wasser	Deponie (Boden)	Luft	Wasser	Deponie (Boden)
Chlor	0,060	0,01	0,93	0,06	0,025	0,915	0,06	0,035	0,905	0,1	0,1	0,8
Schwefel	0,003	0,005	0,992	0,003	0,015	0,982	0,003	0,020	0,977	0,005	0,08	0,915
Cadmium	0,000004	0,0006	0,999	0,000004	0,0025	0,997	0,000004	0,003	0,997	0,000007	0,005	0,995
Thallium			1,0			1,0			1,0			1,0
Quecksilber	0,00004	0,0001	1,0	0,00004	0,00015	1,0	0,00004	0,0002	1,0	0,00007	0,0003	1,0
Antimon	0,0000001	0,0005	0,999	0,0000001	0,0007	0,999	0,0000001	0,0009	0,999	0,0000002	0,001	0,999
Arsen	0,0000001	0,0005	0,999	0,0000001	0,0015	0,998	0,0000001	0,003	0,997	0,0000002	0,005	0,995
Blei	0,0000001	0,0003	1,0	0,0000001	0,001	0,999	0,0000001	0,0015	0,998	0,0000002	0,002	0,998
Chrom	0,0000001	0,0005	0,999	0,0000001	0,001	0,999	0,0000001	0,0015	0,998	0,0000002	0,002	0,998
Kobalt	0,0000001	0,0005	0,999	0,0000001	0,001	0,999	0,0000001	0,0015	0,998	0,0000002		1,0
Kupfer	0,0000002	0,0007	0,999	0,0000002	0,0005	0,999	0,0000002	0,8	0,999	0,0000002	0,001	0,999
Mangan	0,0000001	0,0005	0,999	0,0000001	0,001	0,999	0,0000001	0,8	0,999	0,0000002	0,001	0,999
Nickel	0,0000001	0,0005	0,999	0,0000001	0,0025	0,997	0,0000001	0,0035	0,996	0,0000002	0,005	0,995
Vanadium	0,0000001	0,0005	0,999	0,0000001	0,001	0,999	0,0000001		1,0	0,0000002		1,0
Zinn	0,0000001	0,0005	0,999	0,0000001	0,001	0,999	0,0000001		1,0	0,0000002		1,0
VOC ¹	0,60	0,001	0,399	0,60	0,002	0,398	0,60		0,40	0,95		0,05
ELU ²	0,001	0,30	0,699	0,001	0,50	0,499	0,001	0,75	0,249	0,002	0,90	0,098

¹ flüchtige organische Stoffe² wasserlösliche organische Stoffe

3.1.2.6 Sortieranlagen

Sortieranlagen werden für die gewerblichen Abfallströme eingesetzt. Allerdings ist die Sortiertiefe heute eher gering.

Sortieranlagen erzeugen, ähnlich wie die MBA, unterschiedliche Stoffströme. Sie stellen selbst keine Endbehandlung dar. Sie sind aber auch aufgrund der geringen Sortiertiefe und Behandlungsintensität keine eigene relevante Quelle von Schadstoffemissionen (abgesehen von den hier nicht erfassten Parametern Lärm, Staub, Mikroorganismen, Gerüche).

Sortieranlagen können nach 2005 auch genutzt werden, um gezielt Ersatzbrennstoffe für die industrielle Mitverbrennung zu erzeugen. Die Transferfaktoren für die Auftrennung in Abfallströme variieren entsprechend den ökonomischen Randbedingungen, die sich wiederum über die Randbedingungen der Szenarien definieren.

3.1.2.7 Industrielle Mitverbrennung

Von den verschiedenen Möglichkeiten der Mitverbrennung von Abfällen in Industrieanlagen werden im Folgenden die beiden mengenmäßig wichtigsten Prozesse näher betrachtet:

- Zementwerke
- Kraftwerke.

Der Einsatz von unvorbehandeltem Hausmüll oder hausmüllähnlichem Gewerbeabfall (inkl. Sortierresten und Baustellenmischabfälle) im Zement- oder Kraftwerk ist nicht möglich. Vielmehr müssen diese Abfälle einer umfänglichen Aufbereitung unterzogen werden, bevor sie eingesetzt werden können. Dies kann in hierauf ausgebauten MBAs (Splitting- oder Stabilisierungsanlagen), in umgebauten Sortieranlagen oder in speziellen Ersatzbrennstoff-Erzeugungsanlagen erfolgen.

Im Rahmen dieses Aufbereitungsprozesses kommt es auch zu Schadstoffabreicherungen durch beispielsweise Sichtungsaggregate oder NE-Metallabtrennung. Die abgetrennten schadstoffhaltigen Fraktionen werden über die MVA oder die Schrottaufbereitung entsorgt.

Für die Belastung der erzeugten Ersatzbrennstoffe werden gegenwärtig unterschiedliche Grenzwertvorschläge diskutiert. Für die Aufbereitung wird angenommen, dass die in Tabelle 4 für die MBA genannte Aufbereitungseffizienz (Transferfaktoren für EBS) erreicht wird. Dies stellt für EBS aufbereitungstechnisch gesehen kein ehrgeiziges Ziel (Schadstoffentfrachtung) dar. Hieraus ergeben sich, je nach Herkunftsbereichen, die im Folgenden dargestellten mittleren Belastungen der Ersatzbrennstoffe. Für die industrielle Mitverbrennung wird mit den in Tabelle 7 wiedergegebenen Belastungswerten gerechnet.

Tabelle 7: Mittlere Belastung von Ersatzbrennstoffen, berechnet mit Modell-Hausmüll und modelliertem hausmüllähnlichen Gewerbeabfall (inkl. Sortierresten und Baustellenmischabfällen) und den Transferfaktoren der Stand der Technik-MBA für Ersatzbrennstoffe

Parameter	Ersatzbrennstoff aus Hausmüll (mg/Mg)	Ersatzbrennstoff aus hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen (inkl. Sortierreste und Baustellenmischabfälle) (mg/Mg)
Chlor	3.710.300	11.347.500
Schwefel	1.402.500	1.530.000
Cadmium	2.600	2.700
Thallium	k. A..	k. A.
Quecksilber	300	100
Antimon	14.300	97.500
Arsen	900	300
Blei	102.500	45.500
Chrom	11.300	38.300
Kobalt	600	600
Kupfer	45.000	120.000
Mangan	52.500	10.000
Nickel	1.500	1.800
Vanadium	300	400
Zinn	27.500	11.300

3.1.2.7.1 Zementwerke

In Deutschland sind rund 50 Zementöfen in Betrieb. Die folgende Tabelle 8 zeigt, wie sich die mit den Ersatzbrennstoffen eingebrachten Schwermetalle (sowie Chlor und Schwefel) auf diese beiden Austragspfade verteilen.

Die Transferfaktoren für die Schwermetalle wurden vom VDZ (Verein Deutscher Zementwerke) aus den dort vorliegenden Untersuchungen errechnet (11). Für Quecksilber scheint die errechnete Verlagerung ins Reingas niedrig. Hier wird von anderen Autoren bis zu 90 % angegeben (28). Wir haben uns entschlossen, für diese Studie weitgehend auf die Datenbasis der betreibenden Industrie zurückzugreifen, weil hierdurch die jeweiligen Ergebnisse sicherlich nicht als zu pessimistisch kritisiert werden können. Im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung wird mit einem höheren Transferfaktor nach Gallenkemper und Braungart (28) gerechnet.

Tabelle 8: Transferfaktoren für energetische Nutzung im Zementwerk

Parameter	Transferfaktoren Reingas	Transferfaktoren Produkt
Chlor	0,0002	0,9998
Schwefel	0,01@	0,99
Cadmium	0,00003	0,99997
Thallium	0,0002	0,9998
Quecksilber	0,4	0,6
Antimon	0,000005	0,999995
Arsen	0,000005	0,999995
Blei	0,00002	0,99998
Chrom	0,000005	0,999995
Kobalt	0,000005	0,999995
Kupfer	0,000005	0,999995
Mangan	0,000005	0,999995
Nickel	0,000005	0,999995
Vanadium	0,000005	0,999995
Zinn	0,000005	0,999995
VOC ¹	<0,0001 ^a	<0,0001 ^a
ELU ²	<0,0001 ^a	<0,0001 ^a

¹ flüchtige organische Stoffe

² wasserlösliche organische Stoffe; Daten: (11)

a = eigene Schätzung

@ = (28)

3.1.2.7.2 Kraftwerke

Kraftwerke verfügen über einen deutlich höheren Brennstoffbedarf, als dies für Zementwerke in Deutschland der Fall ist und können demzufolge auch höhere Mengen an Ersatzbrennstoffen aufnehmen. Allerdings ist die Applikation dieser Brennstoffe in den Verbrennungsraum je nach Kraftwerkstyp mit höheren Aufwendungen und Schwierigkeiten verbunden.

Der Kraftwerkspark in Deutschland setzt sich im wesentlichen zusammen aus:

- Rostfeuerung,
- Wirbelschichtfeuerung,
- Staubfeuerung (Trockenfeuerung),
- Schmelzkammerfeuerung.

In Abhängigkeit der jeweiligen Feuerungsart ist in der Diskussion, ob der Einsatz von Abfällen die Zeitverfügbarkeit der Kraftwerksanlagen beeinträchtigen kann (Korrosion). Nun kann gegenwärtig nicht prognostiziert werden, welche der genannten Kraftwerkstypen sich mehr oder weniger umfangreich auf dem EBS-Markt engagieren. Die Schmelzkammerfeuerung ist sicherlich eine Technologie, die auch aus ökologischer Sicht besonders günstige Voraussetzungen für die Abfallmitverbrennung aufweist. Hier ist insbesondere die Einbindung der schwer flüchtigen Schwermetalle in die Schmelze zu nennen. Allerdings ist die Anzahl der in Deutschland betriebenen Schmelzkammerfeuerungen derzeit eher gering. Neben diesem Feuerungstyp werden zunehmend auch Braunkohlekraftwerke (Staubfeuerung) ins Gespräch gebracht (z. B. Jänschwalde in Brandenburg). Daher wird u.E. neben der Schmelzkammerfeuerung die Abfallverwertung mengenmäßig hauptsächlich im Bereich der Braunkohle-Staubfeuerung stattfinden. Die folgende Tabelle zeigt die Transferfaktoren (Reingas) für ein Braunkohlekraftwerk (Staubfeuerung) und die berechneten Transferfaktoren für die anderen Umweltmedien.

Tabelle 9: Transferfaktoren TF energetische Nutzung im Kraftwerk (Reingas: Kohlekraftwerk Bocksberg (Staubfeuerung Braunkohle)) (a = eigene Schätzungen; b nach (29))

	TF Reingas	TF REA-Gips ^{a,b}	TF (Schlacke + Stäube ^{a,b})	TF Abwasser ^{a,b}
Chlor	0,002	0,0001	0,0001	0,9978
Schwefel	0,0001	0,86	0,1349	0,005
Cadmium	0,00019	0,03781	0,96	0,002
Thallium	0,018	0,041	0,94099	0,00001
Quecksilber	0,62	0,005	0,37	0,005
Antimon	0,005	0,051	0,94399	0,00001
Arsen	0,0016	0,01439	0,984	0,00001
Blei	0,0031	0,00589	0,991	0,00001
Chrom	0,00018	0,001	0,998815	0,000005
Kobalt	0,00068	0,001	0,998315	0,000005
Kupfer	0,0037	0,001	0,995295	0,000005
Mangan	0,00083	0,001	0,998165	0,000005
Nickel	0,016	0,008	0,975995	0,000005
Vanadium	0,00018	0,007	0,99281	0,00001
Zinn	0,0027	0,001	0,996295	0,000005
VOC ¹	0,00002	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
ELU ²	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

¹ flüchtige organische Stoffe

² wasserlösliche organische Stoffe

3.1.2.8 Sonstiges

Unter die Rubrik sonstige Anlagen fallen Hochöfen, Kalkstein- und Ziegelindustrie u.v.m.. Diese Prozesse, mögen sie in Einzelfällen auch durchaus interessant und bedeutend sein, dürften für die Betrachtung der drei Entwicklungsszenarien in Deutschland eine eher untergeordnete Rolle einnehmen.

3.1.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Schadstoffflüsse innerhalb der zu betrachtenden Entwicklungsszenarien für Baden-Württemberg für die Jahre 2002, 2006 und 2010 prognostiziert.

Die Entwicklungsszenarien sollen die praktischen, ökologischen Konsequenzen analysieren, die mit der Einführung der Abfallverwaltungsverordnung des BMU (AbfallVwV) verbunden wären. Wobei, aufgrund der gegebenen zeitlichen Parallelität, für die Szenarien zur Siedlungsabfallentsorgung auch die Entscheidungen zur Novellierung der TA Siedlungsabfall einzu beziehen waren.

3.1.3.1 Szenario 1

Das Szenario 1 beschreibt eine Entwicklung, in der konsequent die Grundgedanken des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes vollzogen werden. Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle (inkl. Sortierreste und Baustellenmischabfälle) sind in der Überlassungspflicht der öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger. Deponien ohne Basisabdichtung, Sickerwasserfassung und Gasfassung sind bis 2002 bundesweit geschlossen. Scheinverwertung findet nicht statt. Bis 2005 sind alle erforderlichen Vorbehandlungsanlagen realisiert und in Betrieb, unvorbehandelter Restabfall wird nicht mehr abgelagert (Szenario 1: Verwirklichung der Grundgedanken des KrW-/AbfG). Die TASI-Anforderungen werden in diesem Szenario per Rechtsverordnung (Abfall-Ablagerungs-Verordnung, AbfAbIV) gefasst und dadurch in ihrem bindenden Charakter unmittelbar wirksam. Die AbfAbIV wird allerdings nicht für MBA-Fractionen geöffnet.

Tabelle 10 zeigt die für Szenario 1 errechneten Stoffflüsse im Detail. Die Ergebnisse zeigen insbesondere die Auswirkungen, die mit der **konsequenten Umsetzung der TASI** verbunden sind: **Die betrachteten Schwermetalle werden über Senken von den Umweltmedien ferngehalten, die organischen Schadstoffe werden weitgehend mineralisiert** (wird hier ebenfalls als Senke angesehen).

Tabelle 10: Szenario 1: Stoffflüsse. Aufkommen in Baden-Württemberg, Verbleib in Deutschland.

Bezugsjahr		I n p u t (k g)			
		Hg	Cd	VOC ¹	ELU ²
2002		3.500	24.400	2.360.000	108.000.000
2006		3.200	22.000	2.130.000	97.000.000
2010		3.100	21.300	2.060.000	94.000.000
Bezugsjahr		O u t p u t			
Zielmedium		Hg@	Cd@	VOC ¹	ELU ²
2002	Luft	1,3 %	0,1 %	31,0 %	0,0 %
2002	Wasser	0,0 %	0,1 %	0,0 %	15,8 %
2002	Boden	4,3 %	7,9 %	0,2 %	0,6 %
2002	Erzeugnis	0,5 %	3,2 %	0,0 %	0,0 %
2002	Deponie	37,9 %	38,5 %	16,8 %	29,3 %
2002	Senke	50,8 %	46,1 %	51,9 %	54,2 %
2002	Summe Zielmedien	94,8 %	95,9 %	100,0 %	100,0 %
2006	Luft	0,7 %	0,1 %	1,1 %	0,0 %
2006	Wasser	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,5 %
2006	Boden	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
2006	Erzeugnis	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
2006	Deponie	0,5 %	1,8 %	0,7 %	1,3 %
2006	Senke	97,2 %	94,3 %	98,2 %	98,2 %
2006	Summe Zielmedien	98,4 %	96,2 %	100,0 %	100,0 %
2010	Luft	0,7 %	0,1 %	1,1 %	0,0 %
2010	Wasser	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,5 %
2010	Boden	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
2010	Erzeugnis	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
2010	Deponie	0,5 %	1,7 %	0,7 %	1,2 %
2010	Senke	97,2 %	94,3 %	98,2 %	98,2 %
2010	Summe Zielmedien	98,4 %	96,1 %	100,0 %	100,0 %

¹ flüchtige organische Stoffe² wasserlösliche organische Stoffe

@ Differenz zu 100 % ist der im System verbleibende Anteil (Modellierung siehe Abb. 3)

3.1.3.2 Szenario 2

In Szenario 2 wird der heutige Status quo beibehalten. Rechts- und Investitionsunsicherheiten sind die beherrschenden Randbedingungen in diesem Szenario. Die Abfallverwaltungsverordnung des BMU (AbfallVwV) wird nicht erlassen, der Vorgang bleibt aber weiter „zunächst unterbrochen bzw. eingefroren, aber keineswegs zurückgezogen“. Klarstellungen zur Überlassungspflicht und zur Scheinverwertung müssen dadurch weiterhin im Einzelfall erstritten werden. Auf diesem Feld werden daher für das Land Baden-Württemberg sowohl einzelne Erfolge als auch Misserfolge eintreten. Die Scheinverwertung lässt sich mit den Mitteln des Landesvollzugs nur teilweise verhindern.

Die TASI wird in diesem Szenario gemäß den Vorstellungen des BMU novelliert (AbfAbIV; WHG § 7a Anhang 59; 30. BImSchV).

Die folgende Tabelle 11 zeigt die für Szenario 2 errechneten Stoffflüsse im Detail.

Die Ergebnisse des Szenarios 2 zeigen ebenfalls den **positiven Einfluss der Umsetzung der TA Siedlungsabfall**. Durch einen stärkeren Rückgriff auf energetische Nutzungsanlagen **erhöhen sich** in diesem Szenario die **Schadstoffeinträge ins Erzeugnis**. Zusätzlich führt die Öffnung der TASI für die MBA zu **erhöhten Werten für die Deponie und den Boden**.

Tabelle 11: Szenario 2: Stoffflüsse. Aufkommen in Baden-Württemberg, Verbleib in Deutschland.

Bezugsjahr		I n p u t (k g)			
		Hg	Cd	VOC ¹	ELU ²
2002		3.500	24.400	2.360.000	108.000.000
2006		3.200	22.000	2.13.000	97.000.000
2010		3.100	21.300	2.060.000	94.000.000
Bezugsjahr		O u t p u t			
Zielmedium		Hg@	Cd@	VOC ¹	ELU ²
2002	Luft	1,2 %	0,0 %	27,1 %	0,0 %
2002	Wasser	0,0 %	0,1 %	0,0 %	16,4 %
2002	Boden	6,4 %	14,7 %	0,5 %	1,0 %
2002	Erzeugnis	0,6 %	2,6 %	0,0 %	0,0 %
2002	Deponie	37,2 %	35,6 %	13,2 %	23,5 %
2002	Senke	45,5 %	38,3 %	59,1 %	59,1 %
2002	Summe Zielmedien	90,8 %	91,3 %	100,0 %	100,0 %
2006	Luft	3,0 %	0,1 %	2,4 %	0,0 %
2006	Wasser	0,0 %	0,0 %	0,0 %	2,4 %
2006	Boden	4,7 %	8,8 %	0,7 %	0,6 %
2006	Erzeugnis	2,1 %	9,5 %	0,0 %	0,0 %
2006	Deponie	2,6 %	5,1 %	0,4 %	1,0 %
2006	Senke	76,8 %	65,7 %	96,5 %	96,0 %
2006	Summe Zielmedien	89,2 %	89,1 %	100,0 %	100,0 %
2010	Luft	3,0 %	0,1 %	1,4 %	0,0 %
2010	Wasser	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,3 %
2010	Boden	1,2 %	4,6 %	0,4 %	0,3 %
2010	Erzeugnis	2,2 %	10,0 %	0,0 %	0,0 %
2010	Deponie	5,5 %	7,2 %	0,3 %	1,1 %
2010	Senke	77,9 %	68,0 %	98,0 %	97,4 %
2010	Summe Zielmedien	89,8 %	89,8 %	100,0 %	100,0 %

¹ flüchtige organische Stoffe² wasserlösliche organische Stoffe

@ Differenz zu 100 % ist der im System verbleibende Anteil (Modellierung siehe Abb. 3)

3.1.3.3 Szenario 3

Szenario 3 beschreibt eine Entwicklungsrichtung, die eintreten wird, sofern die Abfallverwaltungsvorschrift des BMU (AbfallVwV) erlassen wird. Die der Verwaltungsvorschrift zugrundeliegende Rechtsauffassung setzt sich in diesem Szenario bundesweit durch (30).

Die TASI wird in diesem Szenario ebenfalls entsprechend den Vorstellungen des BMU novelliert. Daher ergeben sich bezüglich der TASI-Problematik zwischen Szenario 2 und 3 keine unterschiedlichen Annahmen bzw. Randbedingungen.

Die folgende Tabelle 12 zeigt die für Szenario 3 errechneten Stoffflüsse im Detail.

Szenario 3 schneidet gegenüber Szenario 2 **deutlich ungünstiger** ab (Boden, Deponie, Senke, Luft), da die untersuchten Verwertungsprozesse verstärkt genutzt werden.

Tabelle 12: Szenario 3: Stoffflüsse. Aufkommen in Baden-Württemberg, Verbleib in Deutschland.

Bezugsjahr		I n p u t (k g)			
		Hg	Cd	VOC ¹	ELU ²
2002		3.500	24.400	2.360.000	108.000.000
2006		3.200	22.000	2.130.000	97.000.000
2010		3.100	21.300	2.060.000	94.000.000
Bezugsjahr		O u t p u t			
Zielmedium		Hg@	Cd@	VOC ¹	ELU ²
2002	Luft	1,7 %	0,0 %	23,5 %	0,0 %
2002	Wasser	0,0 %	0,1 %	0,0 %	16,5 %
2002	Boden	16,1 %	27,6 %	0,8 %	1,9 %
2002	Erzeugnis	1,2 %	5,7 %	0,0 %	0,0 %
2002	Deponie	28,3 %	27,5 %	9,8 %	17,6 %
2002	Senke	32,3 %	23,4 %	65,8 %	63,9 %
2002	Summe Zielmedien	79,6 %	84,4 %	100,0 %	100,0 %
2006	Luft	3,8 %	0,0 %	3,5 %	0,0 %
2006	Wasser	0,0 %	0,1 %	0,0 %	3,8 %
2006	Boden	9,0 %	16,2 %	0,3 %	0,7 %
2006	Erzeugnis	2,9 %	14,6 %	0,0 %	0,0 %
2006	Deponie	2,2 %	4,6 %	0,6 %	1,3 %
2006	Senke	57,8 %	47,7 %	95,7 %	94,2 %
2006	Summe Zielmedien	75,7 %	83,1 %	100,0 %	100,0 %
2010	Luft	3,9 %	0,0 %	1,5 %	0,0 %
2010	Wasser	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,9 %
2010	Boden	5,7 %	11,5 %	0,3 %	0,5 %
2010	Erzeugnis	3,1 %	15,3 %	0,0 %	0,0 %
2010	Deponie	5,0 %	7,8 %	0,5 %	1,4 %
2010	Senke	58,0 %	48,5 %	97,7 %	96,1 %
2010	Summe Zielmedien	75,7 %	83,1 %	100,0 %	100,0 %

¹ flüchtige organische Stoffe² wasserlösliche organische Stoffe

@ Differenz zu 100 % ist der im System verbleibende Anteil (Modellierung siehe Abb. 3)

Die folgenden Abbildungen zeigen ausgewählte Ergebnisse für die Szenarien 1 bis 3.

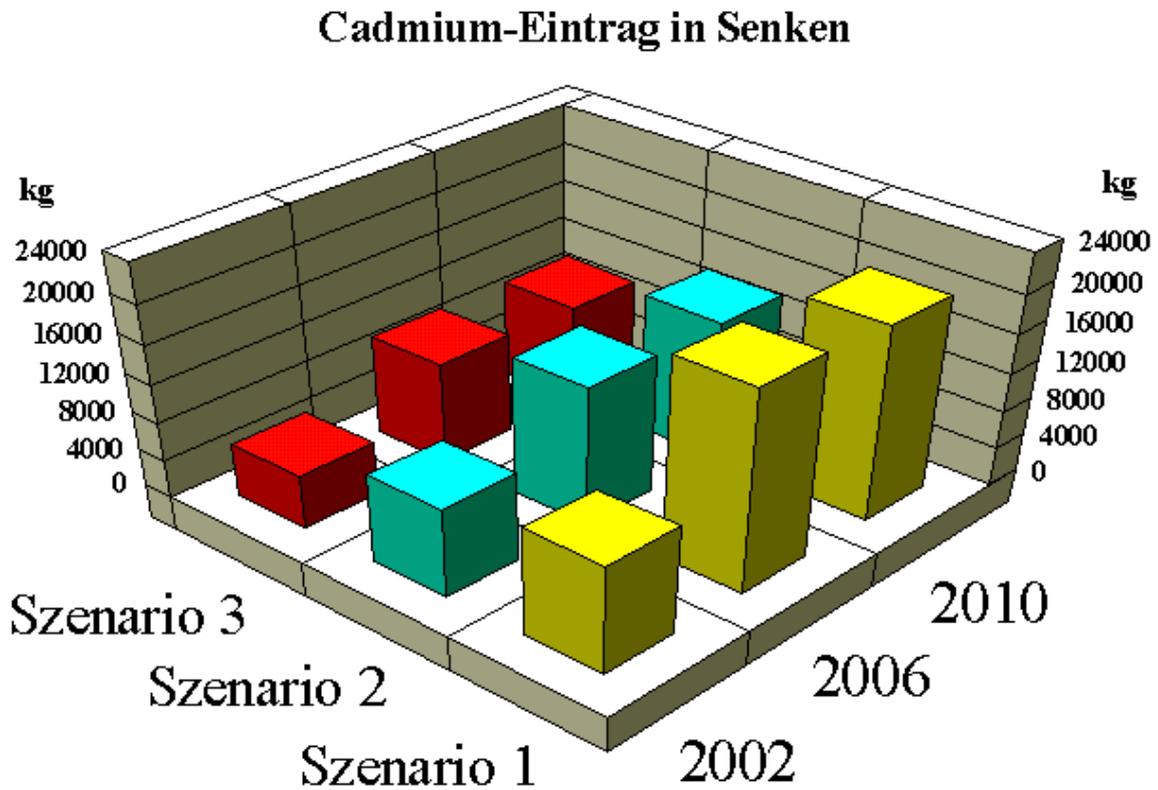


Abb. 4: Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 – hier: Eintrag in Senken

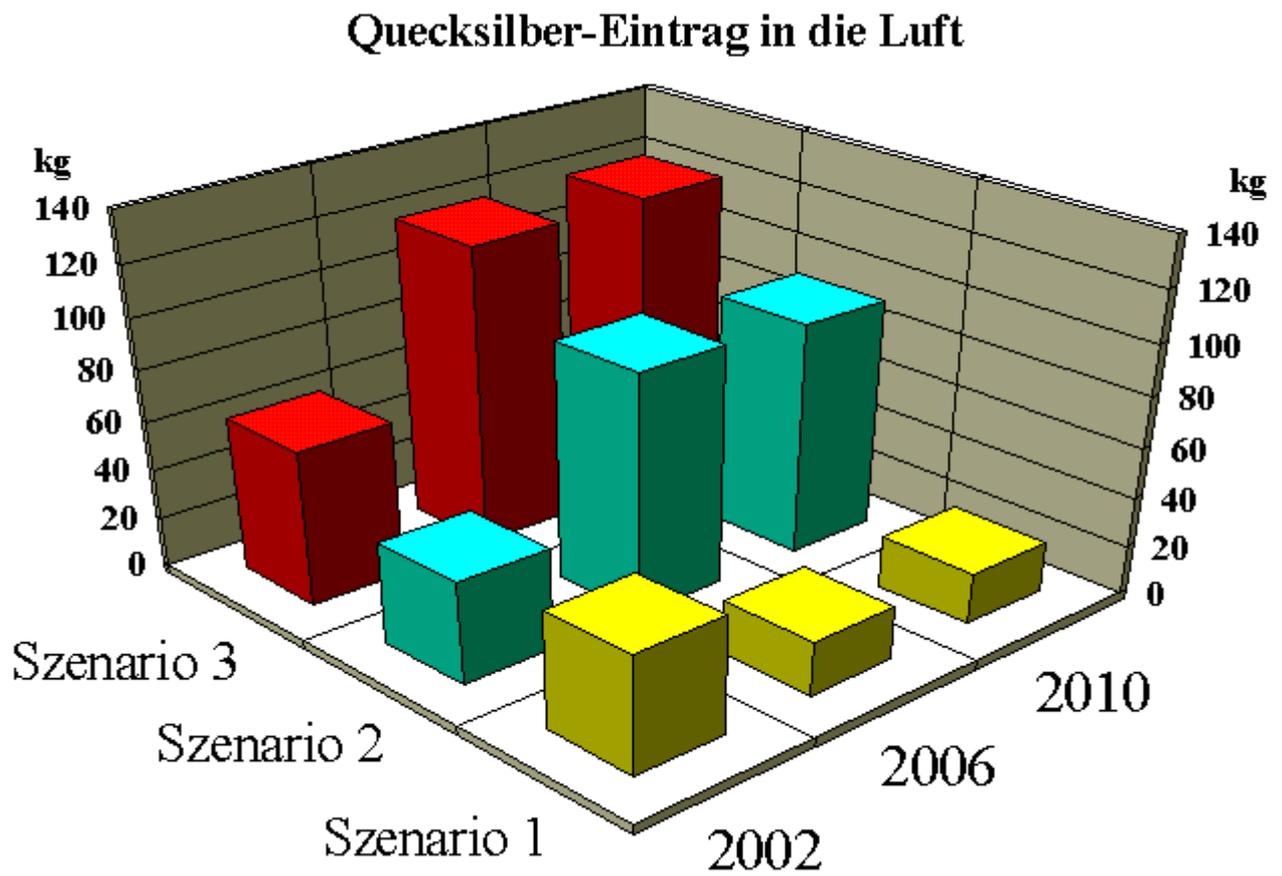


Abb. 5: Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 – hier: Eintrag in Luft

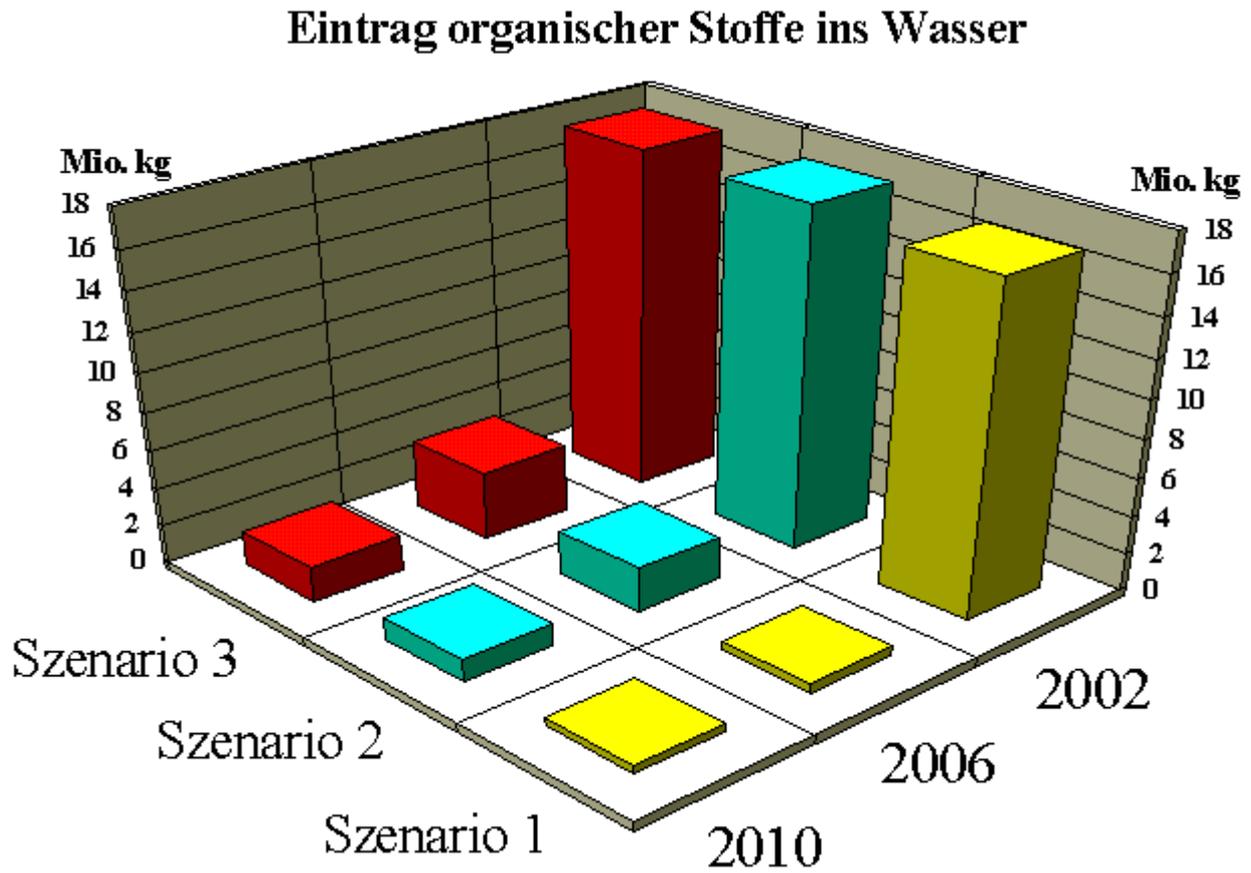


Abb. 6: Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 – hier: Eintrag ins Wasser

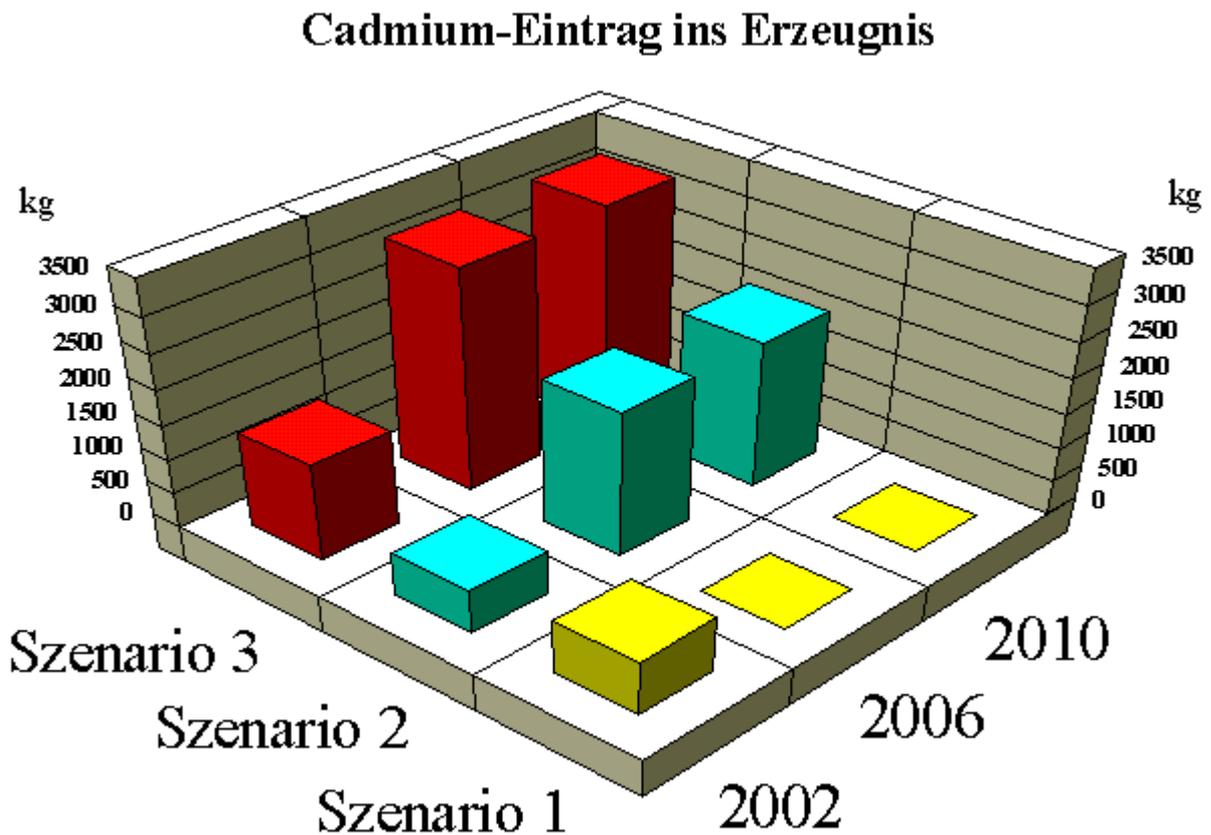


Abb. 7: Ergebnisse der Szenarien 1 bis 3 – hier: Eintrag ins Erzeugnis

Es zeigt sich, dass mit der Fortsetzung der Rechtsunsicherheit und insbesondere im Falle des „Auftauens“ der AbfallVwV des BMU die Schadstoffeinbringung in die Umweltsenken abnehmen und dafür die Werte für die Umweltmedien Luft, Boden und insbesondere Erzeugnis steigen werden.

3.1.4 Sensitivitätsbetrachtung

Im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung wurde zusätzlich ein Szenario 3** erstellt, in dem die bisherigen Entwürfe des BMU zur Novellierung der TASI durch Vorschläge zur Verringerung der Anforderungen an die Ablagerungskriterien und durch Verringerung der Anforderungen an die zulässigen Emissionen aus mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen aufgeweicht werden. Insbesondere hat dies eine drastische Verringerung der Abschöpfung der heizwertreichen Fraktion in den Abfällen und entsprechend eine wesentliche höhere Ablagerung auf Altdeponien zur Folge.

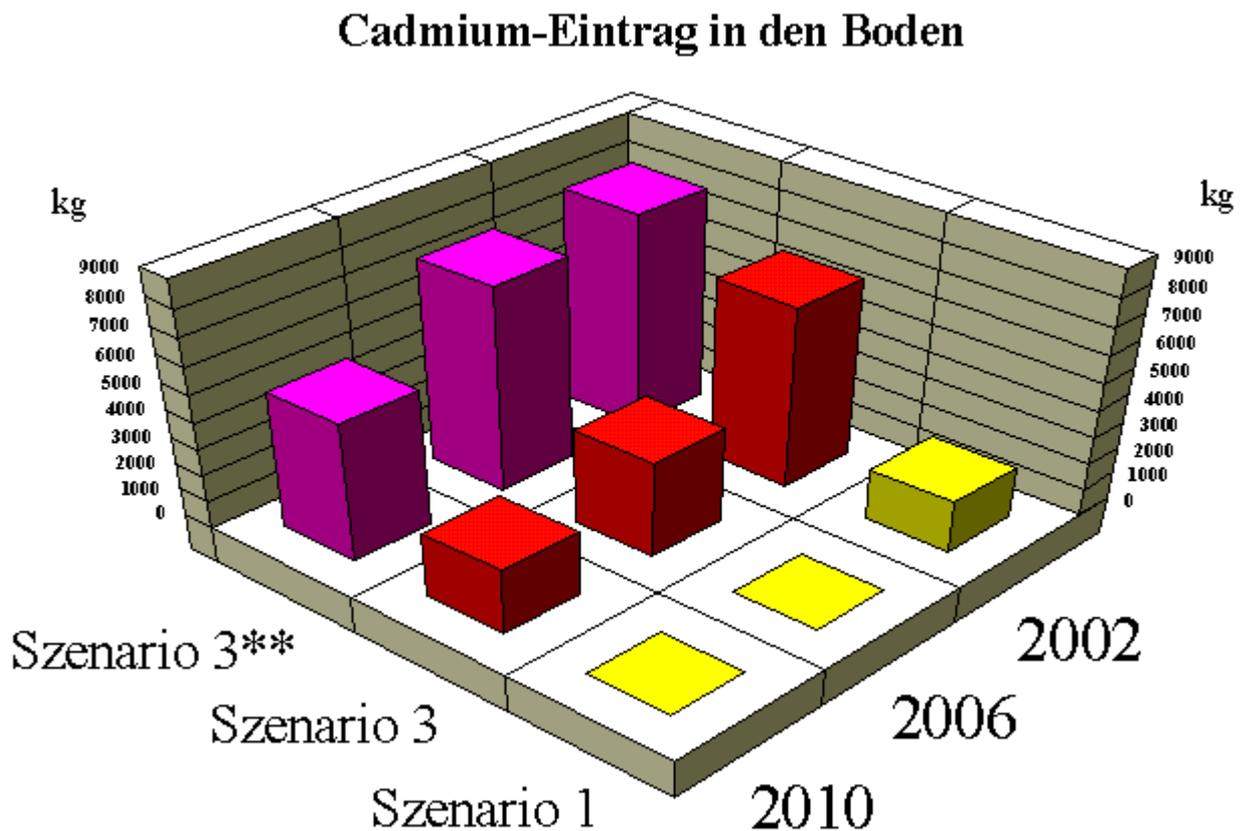


Abb. 8: Ergebnisse der Szenarien 1, 3 und 3** - hier: Eintrag in den Boden

3.1.5 Fazit SFA zur Entwicklungsprognose für ein Bundesland

Mit der Fortsetzung der Rechtsunsicherheit und insbesondere im Falle des „Auftauens“ der AbfallVwV des BMU wird die Einbringung von Schadstoffen in die Umweltsenken abnehmen. Im Gegenzug werden dafür die Einträge in die Umweltmedien Luft, Boden und insbesondere ins Erzeugnis steigen.

Die erhaltenen Ergebnisse erwiesen sich im Rahmen einer Sensitivitätsprüfung als belastbar (8).

Es ließen sich wichtige abfallwirtschaftliche Schlußfolgerungen ableiten, die für das entsprechende Bundesland Entscheidungsgrundlage für seine eigene Positionierung im Rahmen laufender Gesetzgebungsverfahren ermöglichte.

Entwicklungsprognosen für gesamte Entsorgungsräume helfen, die konkrete Entscheidungspraxis zu unterlegen. Die SFA ist in diesem Zusammenhang geeignet, die Schadstoffflüsse, je nach gesetzten politischen Randbedingungen naturwissenschaftlich zu prognostizieren.

Die SFA liefert präzise Ergebnisse, wenn die jeweils verwendete Datenbasis repräsentativ und belastbar ist.

3.2 Bewertung unterschiedlicher Entwicklungsprognosen für besonders überwachungsbedürftige Abfälle eines Bundeslandes

In diesem Projekt sollte berechnet werden, wie sich für ein Bundesland die abfallwirtschaftliche Situation auf dem Feld der besonders überwachungsbedürftigen Abfälle (**büA**) entwickeln würde, wenn unterschiedliche Entwicklungsszenarien eintreten (8).

3.2.1 Aufgabenstellung

Mit Hilfe der SFA wird untersucht, welche ökologischen Auswirkungen für die Sonderabfallwirtschaft mit der Verabschiedung der vom Bundesumweltministerium (**BMU**) geplanten Abfallverwaltungsvorschrift (AbfallVwV) (8) verbunden sind.

3.2.2 Modellbildung und verwendete Datengrundlagen

Hierfür werden Abfallarten betrachtet, die für das Bundesland Baden-Württemberg von Bedeutung sind:

- Vorgemischte Abfälle zum Zwecke der Verbrennung (EAK-AS 190204D1),
- Lack- und Farbschlämme (LAGA-AS 55503),
- Mineralölschlämme, insbesondere Schlämme aus Öltrennanlagen (LAGA-AS 54703).

Da die Deponierung für diese Abfallarten aus Baden-Württemberg keine Bedeutung hat, werden nur die Stoffe:

- Chlor
- Schwermetalle

berechnet.

Die Untersuchung erfolgt jeweils bezogen auf eine Menge von 1.000 Mg/a der oben genannten Abfälle (funktionelle Einheit).

3.2.2.1 Szenario SVA

Im Szenario SVA wird davon ausgegangen, dass die Abfallverwaltungsvorschrift des BMU (AbfVwV) nicht verabschiedet wird und das KrW-/AbfG sich in Verbindung mit dem Bundesländer-Konsenspapier unter weiterer Konkretisierung bundesweit und auf EU-Ebene durchsetzt. Sonderabfälle unterliegen hiernach der **Beseitigung**, wenn bei deren Behandlung die Beseitigung des Schadstoffpotenzials und nicht die Nutzung der Abfalleigenschaft im Vordergrund steht.

Im Rahmen dieses Szenarios wäre es weiterhin wünschenswert, die bÜA zur Beseitigung durch den Bundesgesetzgeber näher zu definieren. PCB- und PCT- sowie hoch schwermetallhaltige und hoch halogenhaltige brennbare Abfälle sollten eindeutig der Beseitigung zugeordnet werden. Im Rahmen dieses Szenarios müsste die Verbrennung der unten genannten Abfälle bei entsprechendem Schadstoffgehalt der Beseitigung zugeordnet werden (Sonderabfallverbrennungsanlage, **SVA**). Ebenso würden im Rahmen dieses Szenarios weitere hochschadstoffhaltige bÜA von der Kreislaufwirtschaft ausgeschlossen werden, um so mit Sicherheit eine Schadstoffanreicherung in Wirtschaftskreisläufen zu vermeiden.

3.2.2.2 Szenario ZEM

Im Szenario ZEM wird die Abfallverwaltungsvorschrift des BMU (AbfVwV) verabschiedet und setzt sich bundesweit als Rechtsstandpunkt verbindlich durch. Auf europäischer Ebene setzen sich die derzeitigen Regelungen des KrW-/AbfG in Verbindung mit dem Bund-Länder-Konsenspapier ebenfalls nicht durch.

Entsprechend ist im Rahmen der Umsetzung der Rechtspositionen des BMU damit zu rechnen, dass alle bÜA künftig zur energetischen Verwertung ins benachbarte Ausland und dort insbesondere in die Zementindustrie gelangen. Wichtig ist hierbei insbesondere, dass gemäß dem Entwurf der AbfVwV im Rahmen der Abfallverbringung ins Ausland keine Mindestheizwerte (wie im Inland) zur energetischen Verwertung erforderlich sind. Des Weiteren wird im Ausland über die vorherige Benutzung von genehmigten Mischanlagen auch der Einsatz von bÜA in Industrieprozessen mit Schadstoffgehalten, die weit über den genehmigten Werten für den Industrieprozess liegen, ermöglicht.

Im Szenario ZEM findet die Entsorgung der genannten Abfälle daher als **Ersatzbrennstoff in einem belgischen Zementwerk** statt.

3.2.2.3 Modellierung der Abfallarten

Im Folgenden werden die Schadstoffbelastungen der drei zu betrachtenden Abfallarten dargestellt. Für diesen Zweck wurde auf Untersuchungen aus Baden-Württemberg zurückgegriffen. Ziel war es, Daten aus den Erzeugerbereichen zu erheben bzw. auszuwerten, die für die aktuellen Diskussionen von Bedeutung sind.

3.2.2.3.1 Vorgemischte Abfälle zum Zwecke der Verbrennung

In Baden-Württemberg werden in sechs „Mischanlagen“ Abfälle zum Zwecke der Verbrennung vorgemischt. Die hier charakterisierte Abfallart (AS 190204D1) enthält mindestens einen besonders überwachungsbedürftigen Abfall. Viele dieser Abfallgemische gehen aktuell in bundesdeutsche Sonderabfallverbrennungsanlagen. Der Einsatz derartiger Abfallgemische als Ersatzbrennstoff für die Zementindustrie ist in der Diskussion.

Die Gemische werden, entsprechend den Anforderungen der aufnehmenden Beseitigungs- oder Verwertungsanlage, aus zehn bis hin zu über hundert einzelnen Abfallarten zusammen gemischt. Die folgende Tabelle zeigt exemplarisch für einen Marktteilnehmer, welche Abfallarten und -anteile für die Erzeugung eines Gemisches für den Einsatz in einem Zementwerk vorgesehen waren (in 1994).

Tabelle 13: Hauptkomponenten eines typischen Abfallgemisches, wie es 1994 zur Mitverbrennung in der belgische Zementindustrie vermarktet wurde

LAGA AS	Stoffgruppe	Anteil im Gemisch
547 03	Schlämme aus Öltrennanlagen	34 %
555 03	Lack- und Farbschlämme	27,5 %
547 04	Schlamm aus Tankreinigung und Fasswäsche	10,2 %
547 10	Schleifschlamm, ölhaltig	5,1 %
554 02	Lösemittelhaltige Schlämme ohne halogenierte Lösemittel	4,1 %
571 29	Sonstige ausgehärtete Kunststoffabfälle	3,0 %
544 02	Bohr- und Schleifölemulsionen, Emulsionsgemische	1,6 %
542	Fette und Wachse aus Mineralöl	1,0 %
573	Kunststoffschlämme und –emulsionen	1,0 %
547 01	Sandfangrückstände	3,6 %
314 34	Verbrauchte Filter- und Aufsaugmassen	1,3 %
---	Sonstiges	7,6 %

Im Zeitraum von 1995 und 1996 wurde für einen der Mischanlagenbetreiber eine relativ detaillierte Untersuchung über die Qualität des erzeugten Mischguts durchgeführt (31). Die Untersuchung erfolgte zur Unterstützung der Verbringungsabsichten in belgische Zementwerke und kann daher sicherlich nicht als überzogene worst case-Beprobung angesehen werden. Sie wird demzufolge für diese Studie als geeignet eingestuft und der weiteren Berechnung zugrunde gelegt. Tabelle 14 zeigt die Schadstoffbelastungen des untersuchten Abfallgemisches.

Tabelle 14: Schadstoffbelastung aus vermischten Sonderabfällen aus Baden-Württemberg

Parameter	Dimension in FS	Mittelwert (Anzahl Proben = 37)	Maximalwert (Anzahl Proben = 37)
Heizwert Hu	MJ/Mg	10.532	16.000*
Chlor gesamt	%	0,18	1,20
Blei	mg/kg	309	1.700
Chrom	mg/kg	132	280
Kupfer	mg/kg	458	1.500
Nickel	mg/kg	131	450
Zink	mg/kg	2.396	11.000

* Für die worst case-Betrachtungen wird als Hu der Mittelwert verwendet

3.2.2.3.2 Lack- und Farbschlämme

Lack- und Farbschlämme (LAGA-AS 55503) werden auch direkt (unvermischt) als Ersatzbrennstoff eingesetzt. Tabelle 15 zeigt den Belastungsbereich für derartige Abfälle aus unterschiedlichen Herkunftsbereichen.

Tabelle 15: Schadstoffbelastung von Farb- und Lackschlämmen aus Baden-Württemberg (32)

Parameter	Dimension in FS	Mittelwert (Anzahl Proben = 12)	Maximalwert (Anzahl Proben = 12)
Heizwert Hu	MJ/Mg	10.140	27.420*
Chlor gesamt	%	0,16	0,5
Arsen	mg/kg	2,5	2,5
Blei	mg/kg	2.569	15.700
Cadmium	mg/kg	2,9	10
Chrom	mg/kg	604	3.300
Kupfer	mg/kg	59,1	148
Nickel	mg/kg	15,3	35,8
Quecksilber	mg/kg	0,6	2,5
Zink	mg/kg	4.513	20.800

* Für die worst case-Betrachtungen wird ein Hu im unteren Drittel des Datenkollektivs verwendet

3.2.2.3.3 Mineralölschlämme

Mineralölschlämme, insbesondere Schlämme aus Öltrennanlagen (LAGA-AS 54703), werden auch direkt als Ersatzbrennstoffe eingesetzt. Tabelle 16 zeigt den Belastungsbereich für derartige Abfälle aus unterschiedlichen Herkunftsbereichen.

Tabelle 16: Schadstoffbelastung von Mineralölschlämmen aus Baden-Württemberg (32)

Parameter	Dimension in FS	Mittelwert (Anzahl Proben = 43)	Maximalwert (Anzahl Proben = 43)
Heizwert Hu	MJ/Mg	14.410	30.100*
Chlor gesamt	%	0,4	2
Antimon	mg/kg	4,9	6,6
Arsen	mg/kg	5	5
Blei	mg/kg	276	1.182
Cadmium	mg/kg	6,6	27,7
Chrom	mg/kg	713	3.200
Kobalt	mg/kg	104	178
Kupfer	mg/kg	5.481	61.253
Nickel	mg/kg	376	1.416
Quecksilber	mg/kg	2,2	10
Vanadium	mg/kg	8,5	8,5
Zink	mg/kg	2.706	16.811
Zinn	mg/kg	17	17

* Für die worst case-Betrachtungen wird als Hu der Mittelwert verwendet

3.2.2.4 Modellierung der Abfallbeseitigung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage

Die Transferfaktoren für Sonderabfallverbrennungsanlagen lassen sich nach folgender Beziehung berechnen.

$$T_{f_{\text{Rein}}} = F_{\text{Rein}} / F_{\text{In}} \quad ((\text{Gleichung 3}) \text{ (s.S. 16)})$$

$T_{f_{\text{Rein}}}$ = Transferfaktor Reingas

F_{Rein} = Fracht Reingas

F_{In} = Fracht Input

wobei gilt:

$$F_{\text{Rein}} = K_{\text{Rein}} \cdot H_u \cdot \varphi \quad ((\text{Gleichung 4}) \text{ (s.S. 16)})$$

K_{Rein} = Konzentration im Reingas (mg/m^3)

H_u = unterer Heizwert des Abfalls (MJ/Mg)

φ = energiespezifisches Abgasvolumen (N, tr.) (m^3/MJ)

Die folgende Tabelle gibt die dergestalt für die Sonderabfallverbrennungsanlage der AVG ermittelten Transferfaktoren wieder.

Tabelle 17: Transferfaktoren der Sonderabfallverbrennungsanlage der AVG ($\Sigma = 1$; a = eigene Schätzung) (33)

	Transferfaktoren Reingas	Transferfaktoren Schmelzgranulat und Filterkuchen
Chlor	0,0001	0,9999
Schwefel	0,00002	0,99998
Cadmium	0,0000000003	0,999999997
Thallium	k.A.	k.A.
Quecksilber	0,0001	0,9999
Antimon	0,000000033	0,999999967
Arsen	0,000000033	0,999999967
Blei	0,000000033	0,999999967
Chrom	0,000000033	0,999999967
Kobalt	0,000000033	0,999999967
Kupfer	0,000000033	0,999999967
Mangan	k.A.	k.A.
Nickel	0,000000033	0,999999967
Vanadium	0,000000033	0,999999967
Zinn	0,000000033	0,999999967
VOC ¹	<0,0001 ^a	<0,0001 ^a
ELU ²	<0,0001 ^a	<0,0001 ^a

¹ flüchtige organische Stoffe

² wasserlösliche organische Stoffe

3.2.2.5 Modellierung der Abfallentsorgung in ausländischen Zementwerken

Für den Einsatz von Abfällen im Zementerzeugungsprozess kommen im Prinzip vier Einsatzorte in Frage:

1. Mit dem Input der mineralischen Ausgangsstoffe (Rohmehl) können auch Abfälle zugeführt werden, die aufgrund ihrer Zusammensetzung in die vorgesehene Zementrezeptur passen (Sekundärrohstoff).
2. In der Primärfeuerung (Ofen) als Ersatzbrennstoff.
3. In der Sekundärfeuerung im Rahmen der Vorwärmung des Brenngutes (bzw. Vorcalcinator) oder im Ofeneingangsbereich ebenfalls als Ersatzbrennstoff.
4. Als Additiv im Rahmen der Klinkermahlung zur Zementerzeugung, soweit dies mit den gewünschten Produkteigenschaften konform geht (Sekundärrohstoff).

Im Folgenden werden nur die Einsatzbereiche als **Brennstoffsubstitut (Ersatzbrennstoff)** näher betrachtet.

Die Verbrennungsbedingungen im Drehrohr sind für die Abfallbeseitigung unter dem Gesichtspunkt der Mineralisierung sehr günstig. So wird das Brenngut auf rund 1.450°C erhitzt (Abgastemperatur über 2.000°C), und Mindestverweilzeiten von 15 min. für den Feststoff und in der Gasphase von über 2 Sekunden sind eingehalten.

Zwar ist die deutsche Zementindustrie aktuell sehr am Ausbau des Einsatzes von Abfällen zur Brennstoffsubstitution interessiert, die hier betrachteten besonders überwachungsbedürftigen Abfälle waren bisher eher die Domäne ausländischer Zementwerke.

Das belgische Zementwerk Obourg beispielsweise verfügt über zwei Drehrohröfen und arbeitet nach dem sog. Nassverfahren. Hierbei wird das nass vermahlene Rohmaterial mit Wassergehalten von 30–40 % dem Drehrohr aufgegeben. Trocknen, Kalzinieren und Sintern finden im Drehrohr statt.

Nassverfahren werden in Mitteleuropa relativ selten eingesetzt, da sie ökonomisch und ökologisch ungünstig zu bewerten sind. So beträgt der Wirkungsgrad des Nassverfahrens, bezogen auf den thermodynamisch notwendigen Wärmeverbrauch zum Brennen von Klinker (1.750 MJ/Mg Klinker), beim Nassverfahren nur 31 % (34). Umgerechnet bedeutet dies einen Energieverbrauch von rund 5.500–6.000 MJ/Mg Klinker gegenüber 3.100–3.500 MJ/Mg Klinker, wie dies für typische inländische Zementwerke der Fall ist. **Für die folgende Berechnung wird mit einem Wert von 5.700 MJ/Mg gearbeitet.**

Die Transferfaktoren für ein Nassverfahren lassen sich nach folgender Beziehung berechnen:

$$TF = (1 - \varepsilon) \cdot (1 - \eta) \cdot SK \quad (\text{Gleichung 5})$$

ε = Einbindegrad in den Klinker

η = Wirkungsgrad E-Filter

SK = Stoffkonzentrationsfaktor für filtergängige Feinstäube

Tabelle 18 zeigt die erhaltenen Berechnungsergebnisse für Transferfaktoren.

Tabelle 18: Errechnete Transferfaktoren für Zementwerk nach dem Nassverfahren

Parameter	Transferfaktor Reingas	Transferfaktor Erzeugnis
Chlor	0,06809	0,93191
Cadmium	0,00152	0,99848
Quecksilber	0,4925	0,5075
Blei	0,00064	0,99936
Chrom	0,00024	0,99976
Kupfer	0,0024	0,9976
Nickel	0,00008	0,99992

3.2.3 Ergebnisse

Mit Hilfe der Stoffflussanalyse wird für die in den drei ausgewählten Abfallarten enthaltenen Stoffe (Tabelle 14 bis Tabelle 16) errechnet, welche Umweltmedien in den beiden betrachteten Szenarien beansprucht werden.

Die Untersuchung erfolgt jeweils auf eine Menge von 1.000 Mg/a der oben genannten Abfälle bezogen (funktionelle Einheit).

Neben einer Mittelwertbetrachtung (für 1.000 Mg) wird zusätzlich eine worst case-Abschätzung für hochbelastete Einzelchargen durchgeführt. Diese Betrachtung ist erforderlich, weil es zum Charakteristikum der Sonderabfallwirtschaft gehört, mit hohen Belastungsschwankungen der Abfälle umgehen zu müssen. Mit dieser worst case-Abschätzung wird eine Risikoanalyse verbunden.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die berechneten Mittelwerte und die Maximalabschätzung getrennt abgehandelt.

3.2.3.1 Durchschnittlich belastete Abfälle

Die folgende Tabelle zeigt die erhaltenen Berechnungsergebnisse für die zu betrachtenden Abfälle für das Schwermetall Quecksilber.

Tabelle 19: Ergebnis Stoffflussanalyse für Szenario SVA und ZEM, hier Quecksilber (in kg/1.000 Mg Abfall)

	Luft	Erzeugnis	Senke
Vermischte Sonderabfälle			
Szenario SVA (Sonderabfallverbrennung)		keine Daten für Hg	
Szenario ZEM (Zementwerk)		keine Daten für Hg	
Lack- und Farbschlämme			
Szenario SVA (Sonderabfallverbrennung)	0,00006	0	0,62
Szenario ZEM (Zementwerk)	0,31	0,31	0
Mineralölschlämme			
Szenario SVA (Sonderabfallverbrennung)	0,00022	0	2,2
Szenario ZEM (Zementwerk)	1,09	1,12	0

Für Quecksilber ist zu beobachten, dass im Vergleich zum SVA-Szenario im ZEM-Szenario deutlich höhere Emissionsfrachten in die Luft eintreten.

Die folgende Tabelle zeigt die Berechnungsergebnisse für die nicht-flüchtigen Schwermetalle am Beispiel der humantoxikologisch relevanten Elemente Cadmium, Chrom und Nickel.

Man erkennt, dass das ZEM-Szenario im Vergleich zum SVA-Szenario mit höheren Luftemissionen und einer besonders hohen Verlagerung der Schwermetalle ins Erzeugnis (gegenüber der Senke für die Beseitigung) verbunden ist. Dies scheint für diese Elementgruppe (schwer flüchtige Schadstoffe) die wichtigste Erkenntnis zu sein.

Tabelle 20: Ergebnis Stoffflussanalyse für Szenario SVA und ZEM, hier Cadmium (Cd), Chrom (Cr) und Nickel (Ni) (in kg/1.000 Mg Abfall)

	kg Cd / 1.000 Mg Abfall			kg Cr / 1.000 Mg Abfall			kg Ni / 1.000 Mg Abfall		
	Luft	Erzeug.	Senke	Luft	Erzeug.	Senke	Luft	Erzeug.	Senke
Vermischte Sonderabfälle									
Szenario SVA (Sonderabfallverbrennung)	keine Daten für Cd			0,000	0	132	0,000	0	131
Szenario ZEM (Zementwerk)	keine Daten für Cd			0,032	132	0	0,011	131	0
Lack- und Farbschlämme									
Szenario SVA (Sonderabfallverbrennung)	0,000	0	2,94	0,000	0	604	0,000	0	15,3
Szenario ZEM (Zementwerk)	0,005	2,94	0	0,145	603	0	0,001	15,3	0
Mineralölschlämme									
Szenario SVA (Sonderabfallverbrennung)	0,000	0	6,64	0,09	0	713	0,000	0	376
Szenario ZEM (Zementwerk)	0,010	6,63	0	0,17	712	0	0,03	376	0

3.2.3.2 Worst case-Betrachtungen

In diesem Abschnitt wird untersucht, welche Belastungen das Produkt Klinker maximal aufweisen kann. Es wird berechnet, zu welchen Klinkerbelastungen es führen würde, wenn der jeweils am höchsten belastete Ersatzbrennstoff eingesetzt wird. Diese worst case-Betrachtung dient der Risikoanalyse. Die Berechnung erfolgt nach folgender Gleichung.

$$K_{\text{Kli}} = (K_{\text{Roh}} \cdot 1,6) + (K_{\text{Abf}} \cdot \chi \cdot A \cdot f / Hu_{\text{Abf}}) + (K_{\text{RBrenn}} \cdot \chi \cdot (1 - A) \cdot f / Hu_{\text{RBrenn}})$$

(Gleichung 6)

wobei

K = Konzentration im jeweiligen Material

χ = Energiebedarf des jeweiligen Zementwerks zum Klinkerbrennen (hier: Nassverfahren)

A = Substitutionsrate des Ersatzbrennstoffes

f = elementspezifischer Einbindegrad in den Klinker nach SPRUNG

Hu = unterer Heizwert des jeweiligen Brennstoffes

Die Basisdaten für die Berechnungen (Einbindegrad in Drehrohrofen nach SPRUNG/WINKLER; Rohmehl nach WINKLER, Regelbrennstoff nach ENET 96) wurden aus (28) entnommen.

Die obige Formel zeigt, dass das Einbringen der Schadstofffrachten in die inneren und äußeren Kreisläufe des jeweiligen Zementwerkes nicht mit einbezogen wurden. Hierdurch würden sich die Klinker- bzw. Zementwerte weiter erhöhen. Mit der hier gewählten vereinfachten Berechnung wird nur der (Haupt-)Anteil der eingebrachten Schwermetalle erfasst, der nach der Brennstoffaufgabe in die Primärfeuerung direkt in den Klinker eingebunden wird.

Tabelle 21: Maximalabschätzung Klinkerbelastung bei Einsatz von Sonderabfällen

Parameter	in FS	Abfalleinsatz max.				Richtwert Erzeugnis	
		10 %	25 %	50 %	80 %	Obourg (B)	BUWAL (CH)
Vorgemischte Sonderabfälle							
Blei	mg/kg	121	256	480	749	100	100
Chrom	mg/kg	83	107	147	195	200	150
Kupfer	mg/kg	105	230	438	687	100	100
Nickel	mg/kg	69	110	178	259	150	100
Zink	mg/kg	720	1.669	3.251	5.149	500	350
Lack- und Farbschlämme							
Cadmium	mg/kg	0,6	1,1	1,9	2,8	1	0,5
Quecksilber	µg/kg	83	85	88	93	1.000	500
Arsen	mg/kg	26	26	26	25	80	40
Blei	mg/kg	866	2.118	4.204	6.707	100	100
Chrom	mg/kg	260	551	1.036	1.618	200	150
Kupfer	mg/kg	30	41	61	84	100	100
Nickel	mg/kg	44	46	50	55	150	100
Zink	mg/kg	1.285	3.081	6.075	9.668	500	350
Mineralölschlämme							
Cadmium	mg/kg	1,2	2,5	4,7	7,4	1	0,5
Quecksilber	µg/kg	87	97	110	130	1.000	500
Antimon	mg/kg	2	3	4	5	50	-
Arsen	mg/kg	26	26	26	27	80	40
Blei	mg/kg	94	187	342	529	100	100
Chrom	mg/kg	254	537	1.007	1.571	200	150
Kobalt	mg/kg	20	36	62	92	50	50
Kupfer	mg/kg	3.435	8.555	17.089	27.329	100	100
Nickel	mg/kg	128	258	474	734	150	100
Vanadium	mg/kg	173	173	172	171	200	-
Zinn	mg/kg	5	6	8	10	30	25
Zink	mg/kg	1.055	2.506	4.926	7.829	500	350

Tabelle 21 zeigt die Schadstoffbelastung des erzeugten Klinkers, wenn die Abfälle mit der höchsten Belastung eingesetzt werden (Substitution durch Ersatzbrennstoff: 10 %, 25 %, 50 % und 80 %). Diese Ergebnisse stellen keine überzogene Maximalabschätzung der höchsten Belastungen des Klinkers durch Abfalleinsatz dar, da die für die Abfallmodellierung verfügbare Datenmenge klein war. In der Praxis sind durchaus Chargen mit höheren Belastungen wahrscheinlich.

Die obigen Ergebnisse stellen insoweit eine Maximalabschätzung dar, da unterstellt wurde, dass die Belastungsspitze des vorliegenden Datenkollektivs als Einzelcharge in den Zementprozess gelangt und dort, entsprechend der festgelegten Substitutionsrate und dem bekannten Klinkereinbindungsgrad, zu einer Belastungsspitze des Erzeugnisses führt. Da ein Vermischen von Abfall-Einzelchargen mit dem Ziel, Konzentrationen herunterzuverdünnen, nicht zulässig ist, kann dieser Ansatz sicherlich nicht kritisiert werden.

Bezogen auf die vorgemischten Sonderabfälle ist zudem darauf hinzuweisen, dass die Maximalwerte *nach* Vermischung ermittelt wurden, also für ein Material, das transportfertig für die „Verwertung“ in Obourg war. Da die Maximalwerte zudem weitgehend unterhalb der Anforderungen an den Ersatzbrennstoff liegen, die vom Zementwerk Obourg vorgegeben sind (und stichprobenartig kontrolliert werden), ist für diese Abfallart der Eintritt des berechneten worst case mehr als realistisch. Schließlich ist einzuschränken, dass die obigen Belastungsspitzen nur elementweise auftreten werden, da der eingesetzte Abfall nicht gleichzeitig für alle Schadstoffe den Spitzenwert ausmacht.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass unter pessimalen Konstellationen sehr hohe Klinkerbelastungen möglich sind. Die obige Tabelle zeigt auch, dass die Konzentrationen auf Werte ansteigen können, je nach Substitutionsrate des Regelbrennstoffes, die die einschlägigen Richtwerte für eine „noch“ akzeptable Produktbelastung deutlich überschreiten.

Der Hinweis auf die (abfallwirtschaftlich sicherlich nicht zu befürwortende und rechtlich fragwürdige) aber technisch gegebene Möglichkeit der weiteren Vermischung von Einzelchargen mit Spitzenbelastungen mit weniger belasteten Abfällen (im Szenario ZEM) soll hier nur der Vollständigkeit halber angesprochen werden.

3.2.4 Fazit Entwicklungsprognose besonders überwachungsbedürftige Abfälle

Dieses Anwendungsbeispiel ist ein zweiter Fall, der die Möglichkeiten der SFA dokumentiert, Entwicklungsszenarien zu rechnen.

Sowohl im Szenario SVA als auch im Szenario ZEM werden die organischen Schadstoffe weitgehend mineralisiert (Senke), was für beide Szenarien positiv zu bewerten ist. Ein gravierender Unterschied zwischen Szenario SVA und Szenario ZEM besteht auf dem Feld der anorganischen Schadstoffe. Hier zeigt das Szenario SVA eine weitgehende Verlagerung der Schwermetallflüsse ins Zielmedium Senke, während im Szenario ZEM das Zielmedium insbesondere das Erzeugnis ist. Daher ist als erster relevanter Unterschied hervorzuheben, dass im Unterschied zur **Schadstoffkonzentrierung** im Szenario SVA im Szenario ZEM eine **Schadstoffverteilung** stattfindet. Dieser Unterschied ist aus umweltpolitischen Gründen grundsätzlich kritisch zu beurteilen, da es bisher ein entscheidendes Paradigma der deutschen Umweltpolitik war, Schadstoffe – insbesondere toxische Schwermetalle – von Umweltmedien wie Luft, Wasser oder Boden fernzuhalten und in Senken zu konzentrieren. Dieses Paradigma wird aus dem Vorsorgegrundsatz der deutschen Umweltpolitik gespeist.

Die Ergebnisse dieses Anwendungsbeispiels können daher eingesetzt werden, um für den Behördenvollzug Grundsatzentscheidungen über auszuwählende Entsorgungspfade zu begründen.

3.3 Entsorgungsempfehlungen für mengenmäßig bedeutsame besonders überwachungsbedürftige Abfälle nach immissionsschutzrechtlichen Gesichtspunkten

Im Rahmen dieses Projektes sollte mithilfe der SFA für die Behördenpraxis eine Arbeitshilfe entwickelt werden, nach der Entsorgungsempfehlungen für definierte Abfallarten ausgesprochen werden können.

3.3.1 Aufgabenstellung

Die Stoffflussanalyse kann, wie dargestellt, herangezogen werden, um unterschiedliche Output-Stoffflüsse zu prüfen; so die Schadstoffverlagerung in ein Erzeugnis, in die Abluft, in den Abwasserpfad oder in den Boden. In den folgenden Anwendungsbeispielen wird aufgrund der herausragenden tatsächlichen und rechtlichen Bedeutung die Schadstoffverlagerung in die Abluft (bzw. ins Abgas) vertieft betrachtet und immissionsschutzrechtlich bewertet.

Im Folgenden wird berechnet und geprüft, ob für die untersuchten einzelnen Abfälle in den jeweiligen Prozessen (Anlagen) im Abgasteilstrom, der aus der Abfallverbrennung resultiert, die Grenzwerte des § 5 Abs. 1 der 17. BImSchV eingehalten werden. Die betrachteten Stoffe sind die Halogene Chlor und Fluor sowie die Schwermetalle Cadmium, Thallium, Quecksilber, Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium und Zinn.

3.3.2 Modellbildung und verwendete Datengrundlagen

3.3.2.1 Abfalldaten

Für die Beispielrechnungen werden die in Tabelle 22 aufgeführten Abfallarten betrachtet.

Für die Beispielrechnungen wurde auf die alte LAGA-Nomenklatur zurückgegriffen, weil dazu umfangreiche Analysendaten vorliegen. Für die SFA werden folgende **Daten** benötigt:

- unterer **Heizwert** (Hu),
- **Konzentrationsangaben über die im Abfall enthaltenen Inhaltsstoffe** zu den nach **17. BImSchV** geregelten **Stoffen**: den Halogenen Chlor und Fluor sowie den Schwermetallen Cadmium/Thallium; Quecksilber; Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium, Zinn.

Sind diese Konzentrationsangaben auf Trockensubstanz (TS) und nicht auf Frischsubstanz (FS) bezogen, sind darüber hinaus Angaben zum Gehalt an Wasser erforderlich.

Tabelle 22: Zu untersuchende Abfallarten

ASN (LAGA)	Beschreibung
17213	Holzabfälle mit schädlichen Verunreinigungen, vorwiegend organisch
17214	Holzabfälle mit schädlichen Verunreinigungen, vorwiegend anorganisch
18401	Spuckstoffe
18402	Papierschlamm
18714	Verpackungsmaterial mit schädlichen Verunreinigungen oder Restinhalten, vorwiegend organisch
18715	Verpackungsmaterial mit schädlichen Verunreinigungen oder Restinhalten, vorwiegend anorganisch
31435	Aufsaug- und Filtermaterialien mit schädlichen Verunreinigungen
54209	Ölverunreinigte Betriebsmittel
54702	Öl- und Benzinabscheiderinhalte
55220	Lösemittel, halogenhaltig
55370	Lösemittel, halogenfrei
55503	Lack- und Farbschlamm
57801	Shredderleichtfraktion

Für die Beispielrechnungen wurden Daten aus verschiedenen Quellen zusammengetragen:

- **Daten aus ABANDA, der Abfalldatenbank des Landesumweltamtes NRW.** Hier sind die Abfalldaten aus mehreren Regierungsbezirken aus der laufenden abfallrechtlichen Genehmigungs- und Überwachungstätigkeit erfasst. Enthalten sind sowohl Deklarationsanalysen als auch seitens der Abfallbehörden durchgeführte bzw. beauftragte Kontrollanalysen. Der Datenbestand umfasst schwerpunktmäßig besonders überwachungsbedürftige Abfälle. Die Daten wurden direkt auf Datenträger zur Verfügung gestellt und sind für zukünftige Genehmigungsverfahren jederzeit verfügbar. Das Landesumweltamt hat die Nomenklatur mittlerweile auf EAK-Nummern umgestellt.

Zusätzlich:

- Abfallanalysedaten der Bezirksregierungen Münster, Detmold und Arnsberg. Es wurden vornehmlich Entsorgungsnachweise (mit Deklarationsanalysen) ausgewertet.
- Abfallanalysedaten aus verschiedenen Genehmigungsverfahren.
- Abfallanalysedaten von Entsorgungsunternehmen. Hier wurden Daten für verschiedene Abfallschlüsselnummern (LAGA, vereinzelt auch schon EAK) aus den Jahren 1997 und 1998 zur Verfügung gestellt.
- Abfallanalysedaten von Müllverbrennungsanlagen aus NRW.
- Abfallanalysedaten von der DPU GmbH, die diese aus verschiedenen Quellen zusammengetragen hatte.
- Abfallanalysedaten von der BZL GmbH, die dieser aus anderen Projekten zur Verfügung standen.

Alle Daten wurden in eine EXCEL-Datei nach einem **einheitlichen Muster** eingegeben und, wo erforderlich, auf FS umgerechnet. Tabelle 23 zeigt die Vorgehensweise exemplarisch für eine Abfallart. Die Daten für die weiteren untersuchten Abfallarten sind in (35) dokumentiert.

Tabelle 23: Datenblatt Shredderleichtfraktion (LAGA-ASN 57801)

ASN 57801		Shredderleichtfraktion						
Anzahl Proben insgesamt						245		
n* = Anzahl Proben mit Messwert; Chlor und Fluor: wenn < NWG oder n.n. angegeben, dann kein Wert eingegeben								
n* = Anzahl Proben mit Messwert; Schwermetalle: wenn < NWG oder n.n. angegeben, dann Wert = 0 gesetzt								
Spalte		1	2	3	4	5	6	7
Parameter		n*	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90-Quantil	Anzahl Proben mit Wert 0
Eigenschaften:								
Heizwert	MJ/Mg	19	5.810	20.100	11.426	10.900	18.260	
Brennwert	MJ/Mg	13	6.460	22.000	13.780	12.900	20.440	
Zusammensetzung (FS):								
Trockensubstanz	%	73	71,7	99,6	93,6	95,8	98,1	
Wassergehalt	%	110	0,4	38,8	7,2	5,6	13,8	
Elementaranalyse (FS):								
Chlor	%	25	0,27	18,10	1,92	1,10	2,37	
Fluor	%	6	0,01	0,41	0,08	0,02	0,22	
Schadstoffe, anorganisch (FS):								
Cadmium	mg/kg	24	9,6E+00	3,1E+02	6,5E+01	4,2E+01	9,9E+01	0
Thallium	mg/kg	8	0,0E+00	8,0E-01	1,4E-01	3,0E-02	3,2E-01	4
Quecksilber	mg/kg	19	0,0E+00	3,3E+01	6,3E+00	4,0E+00	1,2E+01	1
Antimon	mg/kg	5	6,0E+01	5,6E+02	2,9E+02	3,0E+02	4,6E+02	0
Arsen	mg/kg	12	5,0E+00	4,6E+01	1,6E+01	1,5E+01	2,4E+01	0
Blei	mg/kg	29	5,0E-01	4,0E+04	6,0E+03	2,9E+03	1,3E+04	0
Chrom _{gesamt}	mg/kg	23	1,3E+00	2,3E+03	7,1E+02	4,3E+02	1,8E+03	0
Kobalt	mg/kg	2	4,5E+01	5,2E+01	4,9E+01	4,9E+01	5,1E+01	0
Kupfer	mg/kg	24	2,7E+00	4,1E+05	3,0E+04	8,8E+03	3,9E+04	0
Mangan	mg/kg	5	2,0E-01	8,9E+02	3,6E+02	2,4E+02	7,2E+02	0
Nickel	mg/kg	23	6,4E+01	3,8E+03	7,3E+02	4,5E+02	1,2E+03	0
Vanadium	mg/kg	1	2,7E+01	2,7E+01	2,7E+01	2,7E+01	2,7E+01	0
Zinn	mg/kg	7	1,5E+02	1,6E+03	5,0E+02	2,7E+02	1,1E+03	0

3.3.2.2 Betrachtete Prozesse

Für die Beispielsrechnung werden die folgenden vier Prozesse (Anlagen) betrachtet:

- Verwertung im Kraftwerk,
- Verwertung im Zementwerk,
- Beseitigung in einer Müllverbrennungsanlage (MVA-NRW),
- Beseitigung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage (SVA-D).

Benötigt werden für den jeweiligen Prozess die folgenden **Daten**:

- Angaben zur **energiespezifischen Abgasmenge** (m^3/MJ)
- Angaben zu den **Transferfaktoren** für die o. g. Stoffe.

Viele der benötigten Daten können aus der Eigenüberwachung der Unternehmen oder der laufenden Behördenüberwachung (ggf. ergänzt um Einzeluntersuchungen) der bereits genehmigten Industrieanlage (vor dem Einsatz von Abfällen) errechnet werden (Transferfaktoren). Die relevanten Prozessgrößen (energiespezifische Abgasmenge) sind den Betreibern i.d.R. bekannt.

3.3.2.2.1 Energiespezifische Abgasmenge

Die energiespezifische Abgasmenge gibt an, wie viel m^3 Reingas in einem Prozess gebildet werden, wenn Abfall mit einer „Energienmenge“ von 1 MJ verbrannt wird. Die energiespezifische Abgasmenge (m^3/MJ) für die hier zu betrachtenden Prozesse hängt insbesondere davon ab, mit welchem Sauerstoffgehalt im Reingas die jeweilige Anlage betrieben wird. Hier sind in der Praxis beachtliche Schwankungen gegeben.

In der Einzelfallanwendung der SFA ist zu entscheiden, ob die Prüfung der Schadstoffbelastung des Abgasteilstroms für den einzelnen Abfall unter den Bedingungen (Sauerstoffgehalt) durchgeführt wird, wie sie in der jeweiligen Anlage gegeben sind, oder ob vor der Prüfung eine Normierung der Abgasmenge auf den Bezugssauerstoffgehalt von 11 % erfolgt.

Wird nicht auf 11 % O_2 normiert, stellt die energiespezifische Abgasmenge eine Anlagenkenngröße dar und ist aus den Betriebsdaten zu ermitteln.

Für die folgende Beispielsrechnung wird für Dampfkesselanlagen eine Normierung auf 11 % O_2 unterstellt und daher einheitlich mit einer energiespezifischen Abgasmenge von **0,530 m^3/MJ** gerechnet. Für Zementwerke wurden 0,667 m^3/MJ angesetzt.

3.3.2.2.2 Transferfaktoren

Die Transferfaktoren für die folgenden Beispielrechnungen wurden als Mittelwerte aus unterschiedlichen Datenquellen ermittelt. Die Ableitung der in der folgenden Tabelle wiedergegebenen Daten ist in (35) enthalten.

Tabelle 24: Ableitung der verwendeten Transferfaktoren Reingas (35)

Parameter nach 17. BImSchV, § 5 Abs. 1	Kohlekraftwerk mittel	MVA-NRW mittel	SVA-D	Zementwerk mittel
1.) Chlor	3,50E-03	1,06E-03	1,50E-04	2,00E-04
Fluor	2,05E-03	1,49E-03	2,00E-05	k.A.
3 a) Cadmium	7,75E-04	3,04E-04	9,00E-05	1,70E-03
Thallium	5,55E-03	7,57E-03	1,60E-06	1,30E-02
3 b) Quecksilber	6,50E-01	4,37E-02	4,00E-03	4,00E-01
3 c) Antimon	4,05E-03	4,33E-05	7,90E-08	3,00E-04
Arsen	1,07E-02	3,00E-04	7,00E-07	2,30E-04
Blei	8,59E-04	6,76E-05	4,00E-05	5,00E-04
Chrom	7,54E-05	1,17E-04	7,90E-09	1,20E-04
Kobalt	4,65E-04	7,20E-04	5,30E-07	1,90E-04
Kupfer	2,12E-03	3,82E-05	8,00E-10	9,30E-05
Mangan	4,75E-04	1,34E-05	2,60E-09	1,80E-04
Nickel	4,11E-03	6,39E-04	2,60E-09	3,00E-04
Vanadium	3,20E-04	1,18E-04	1,30E-08	5,20E-04
Zinn	1,64E-03	3,97E-05	k.A.	7,40E-04
energiespez. Abgasmenge	0,530	0,530	0,530	0,667

Die Transferfaktoren für Kraftwerke sind als Mittelwert aus vier unterschiedlichen Großkraftwerken abgeleitet (35).

Die Transferfaktoren für ein typisches Zementwerk wurden vom Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) erarbeitet und zur Verfügung gestellt (35).

Für die MVA wurde ebenfalls ein Mittelwert gebildet (aus 12 MVAs in NRW). Die Modellierung erfolgte anhand der im Landesumweltamt NRW bekannten Emissionsdaten der Anlagen und anhand des üblichen Inputs „Restabfall“ (35).

Die Transferfaktoren für die Sonderabfallverbrennungsanlage stammen aus umfassenden Messungen an einer Sonderabfallverbrennungsanlage (36). Die Transferfaktoren wurden mit Daten aus anderen Sonderabfallverbrennungsanlagen verglichen und auf Plausibilität geprüft (36, 37).

3.3.2.3 Berechnung der zu erwartenden Emissionskonzentrationen

Es werden auf den einzelnen Abfall bezogen Emissionsprognosen gerechnet. Gerechnet wurde anhand folgender Formel:

$$C_{\text{Reingas,i,p}} = F_{\text{Reingas,i,p}} / H_{u_i} \cdot R_{V_e} \quad (\text{Gleichung 7})$$

- C = Konzentration in mg/m³, mg/kg
 H_u = unterer Heizwert des Abfalls in MJ/Mg
 R_{V_e} = energiebezogenes Rauchgasvolumen in m³/MJ

3.3.2.4 Beurteilung anhand von Prüfwerten für die SFA

Als Beurteilungsmaßstab („Prüfwerte“) für die zu erwartenden Emissionen werden für den Luftpfad die Grenzwerte des § 5 Abs.1 der 17. BImSchV (Tagesmittelwerte, Halbstundenmittelwerte bzw. Mittelwerte über einen Probenahmezeitraum) herangezogen. Bei der Prüfung, ob die zu erwartenden Emissionen den jeweiligen Prüfwert überschreiten, wird mit Rundungstoleranzen gearbeitet. Die hier gewählten Rundungstoleranzen entsprechen den allgemeinen mathematischen Regeln zum Auf- und Abrunden (38) und werden von den Behörden auch so angewendet.

Die folgende Tabelle stellt die Zahlenwerte der 17. BImSchV den Prüfwerten (= Werte mit den Rundungstoleranzen) gegenüber.

Tabelle 25: Prüfwerte für die SFA (Emissionen)

Reingas (mg/m ³)	Grenzwert 17. BImSchV	Prüfwert
HCl, Tagesmittelwert	10	> 10,49
HF, Tagesmittelwert	1	> 1,49
Cd/Tl, Mittelwert	0,05	> 0,0549
Hg; Tagesmittelwert	0,03	> 0,0349
Σ Schwermetalle, Mittelwert	0,5	> 0,549

3.3.3 Ergebnisse

3.3.3.1 Median-Werte

Die Stoffflussanalyse wird für einen einzelnen Abfall anhand der **Medianwerte** durchgeführt (siehe auch besondere Hervorhebung in Tabelle 23). Die Verwendung der **Medianwerte** für die weitere Berechnung und nicht der Mittelwerte hat folgenden Grund: Beim Median (Lageparameter) liegt jeder zweite Wert über diesem Wert. Wenn daher der Median zu einer Überschreitung des jeweiligen Prüfwertes (s.u.) führt, ist der mit dem Datenkollektiv beschriebene Abfall insgesamt für den untersuchten Zielpfad grundsätzlich nicht geeignet.

Die folgende Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse für den Medianwert.

Tabelle 26: Beispielrechnung Luftpfad für die 13 untersuchten Abfallarten und vier untersuchten Prozesse (Basis: **Medianwerte**)

- geeignet für Prozess
 - nicht geeignet für Prozess wegen:
 - ① Chlorwasserstoff (HCl)
 - ② Fluorwasserstoff (HF)
 - ③ Cadmium/Thallium (Cd, Tl)
 - ④ Quecksilber (Hg)
 - ⑤ Summe Schwermetalle (As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, V)
- * ohne Rundungstoleranz Prüfwert überschritten

ASN LAGA	Beschreibung	in EAK- ASN	Ergebnis (Median) im Teilstrom für			
			Kraftwerk	Zementwerk	MVA	SVA
17213	Holzabfälle mit schädlichen Verunreinigungen, vorwiegend organisch	1502 99D1 1702 99D1	○	○	○	○
17214	Holzabfälle mit schädlichen Verunreinigungen, vorwiegend anorganisch	1502 99D1 1702 99D1	○	○	○	○
18401	Spuckstoffe	0303 07	○	○	○	○
18402	Papierschlamm	0303 05 0303 06	○	○	○	○
18714	Verpackungsmaterial mit schädlichen Verunreinigungen oder Restinhalten, vorwiegend organisch	1501 99D1	⑤	○	○	○
18715	Verpackungsmaterial mit schädlichen Verunreinigungen o. Restinhalten, vorwiegend anorganisch	1501 99D1	○	○	○	○
31435	Aufsaug- und Filtermaterialien mit schädlichen Verunreinigungen	0504 01 0508 01 0607 02 0613 02 0701 09 0701 10 0702 09 0702 10	○	○	○	○

ASN LAGA	Beschreibung	in EAK- ASN	Ergebnis (Median) im Teilstrom für			
			Kraftwerk	Zementwerk	MVA	SVA
		0703 09 0703 10 0704 09 0704 10 0705 09 0705 10 0706 09 0706 10 0707 09 0707 10 1502 99D1				
54209	Ölverunreinigte Betriebsmittel	1502 99D1	○	○	○	○
54702	Öl- und Benzinabscheiderinhalte	1305 01 1305 02 1908 03	○	○	○	○
55220	Lösemittel, halogenhaltig	0701 03 0702 03 0703 03 0704 03 0705 03 0706 03 0707 03 1401 02 1402 01 1403 02 1404 02 1405 02 2001 13	○ (1)*	○	○	○
55370	Lösemittel, halogenfrei	0701 04 0702 04 0703 04 0704 04 0705 04 0706 04 0707 04 1401 03 1402 02 1403 03 1404 03 2001 13	○	○	○	○
55503	Lack- und Farbschlamm	0801 06 0801 07 0801 08	4	○	○	○
57801	Shredderleichtfraktion	1601 05 1602 08	4	5	4	○

3.3.3.2 Spitzenwerte

Im Genehmigungsverfahren kann es erforderlich sein, die Auswirkungen des Abfalleinsatzes auf die Gesamtemissionen einer Anlage auch unter Berücksichtigung der Spitzenwerte (90-Quantil-Wert bzw. Max.-Wert) zu prüfen. Die folgende Tabelle 27 zeigt die Ergebnisse für die Spitzenwertbetrachtung am Beispiel des 90 Quantils.

Tabelle 27: Rechenergebnisse einer Spitzenwertanalyse für den Luftpfad für die 13 untersuchten Abfallarten und vier untersuchten Prozesse (Basis: 90-Quantil- bzw. (bei $n < 10$) Maximalwerte) im Genehmigungsverfahren: Konzentration im Abfall begrenzen für:

- ① Chlorwasserstoff (HCl)
- ② Fluorwasserstoff (HF)
- ③ Cadmium/Thallium (Cd, Tl)
- ④ Quecksilber (Hg)
- ⑤ Summe Schwermetalle (As, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, V)

ASN		Ergebnis (90-Quantil bzw. Max.) im Teilstrom NEGATIV für			
LAGA	Beschreibung	Kraftwerk	Zementwerk	MVA	SVA
17213	Holzabfälle mit schädlichen Verunreinigungen, vorwiegend organisch	④	④		
17214	Holzabfälle mit schädlichen Verunreinigungen, vorwiegend anorganisch	④ ⑤			
18401	Spuckstoffe	④			
18402	Papierschlamm	④	④		
18714	Verpackungsmaterial mit schädlichen Verunreinigungen oder Restinhalten, vorwiegend organisch	③ ④ ⑤	③ ④	③ ④	④
18715	Verpackungsmaterial mit schädlichen Verunreinigungen oder Restinhalten, vorwiegend anorganisch	④			
31435	Aufsaug- und Filtermaterialien mit schädlichen Verunreinigungen	② ④ ⑤	④	② ④	④
54702	Öl- und Benzinabscheiderinhalte	④			
55220	Lösemittel, halogenhaltig	① ④	④	④	
55370	Lösemittel, halogenfrei	④	④		
55503	Lack- und Farbschlamm	④ ⑤	④		
57801	Shredderleichtfraktion	④ ⑤	④ ⑤	④ ⑤	

3.3.4 Fazit Entsorgungsempfehlungen für Abfälle

Die obigen Ergebnisse zeigen, dass für einzelne Abfallarten auf der Basis der dargestellten Datengrundlage eine Entsorgungsempfehlung nur in Richtung Beseitigungsanlagen getroffen werden kann.

Weiter zeigt die durchgeführte Spitzenwertanalyse, dass für viele Abfallarten die Entsorgungsempfehlung „Verwertungsanlage“ mit Auflagen zu versehen ist.

Insgesamt zeigt die obige Berechnung, dass mittels SFA derartige Entsorgungsempfehlungen abgeleitet werden können. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die obigen Berechnungsergebnisse nur für den Luftpfad durchgeführt wurden. In der praktischen Anwendung sollte die Betrachtung auf die anderen relevanten Pfade ergänzt werden.

3.4 Überprüfung von Grenzwertvorschlägen für Ersatzbrennstoffe, die für die Verwertung in Zementwerken vorgesehen sind

Mit dieser Untersuchung sollte überprüft werden, ob die von der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) im Jahre 1997 erarbeiteten Richtwertvorschläge für die Abfallverwertung in Zementwerken (39) einer heutigen ökologischen Prüfung standhalten (40).

3.4.1 Aufgabenstellung

Die in 1997 erarbeiteten Richtwertvorschläge der LAGA beziehen sich auf die energetische Verwertung in Zementwerken. Die hierfür einsetzbaren Abfälle werden, ggf. nach entsprechender Aufbereitung, zur Substitution von Regelbrennstoffen eingesetzt.

Ausgangspunkte der Überprüfung sind die folgenden Randbedingungen bzw. Umweltqualitätsziele:

- Es darf zu keiner Überschreitung der Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV im Abgasteilstrom des jeweils eingesetzten Abfalls kommen.
- Es darf zu keiner Schadstoffanreicherung im Erzeugnis (Klinker) kommen.

Die rechtliche Begründung für die Betrachtung des Abgasstroms aus der Verbrennung des Abfalls folgt aus den Anforderungen des § 5 Abs. 3 Satz 1 der 17. BImSchV. In diesem Abgasteilstrom sind die Grenzwerte des § 5 Abs. 1 einzuhalten.

Die rechtliche Begründung für die zweite Randbedingung folgt aus Artikel 4 EG-Abfallrahmenrichtlinie in Verbindung mit dem europarechtlichen Vorsorgegrundsatz sowie den Grundpflichten der Kreislaufwirtschaft. So darf es nach § 5 Abs. 3 Satz 3 KrW-/AbfG insbesondere zu keinen Schadstoffanreicherungen im Wertstoffkreislauf kommen.

Einen der volkswirtschaftlich wichtigsten Wertstoffkreisläufe stellt sicherlich der Baustoffkreislauf dar. In ihm werden Bauprodukte wie Zement/Beton/Mörtel erzeugt, die sich in Gebäuden, Flächenbefestigungen etc. wiederfinden. Nach Ablauf der „Lebenszeit“ dieser Einrichtungen erfolgt der Abbruch und die Verwertung. Teilmengen der ehemaligen Bauprodukte werden wieder bei der Erzeugung neuer Bauprodukte eingesetzt. Deshalb ist es ökologisch wichtig, dass in diesen Kreislauf keine Schadstoffe in erhöhtem Maße eingetragen werden.

Eine Schadstoffanreicherung in diesem Kreislauf ist dann gegeben, wenn sich die Schadstoffmengen innerhalb des Kreislaufes erhöhen. Dies wird offensichtlich, wenn sich durch die Abfallverwertung die Belastungen der Bauprodukte mit Schadstoffen signifikant erhöhen.

3.4.2 Modellbildung und verwendete Datengrundlage

Es wurde die Spannweite vorhandener Zementwerke in Deutschland bezüglich ihrer Stoffbilanzen modelliert. In dieses Modell hinein wurde eine Substitution von Regelbrennstoffen mit Ersatzbrennstoffen eingefügt und errechnet, ab welchen Schadstoffbelastungen des Ersatzbrennstoffes definierte Prüfwerte der Zielmedien überschritten werden. Diese Schadstoffbelastungen werden mit vorhandenen Grenzwertvorschlägen in- und ausländischer Gremien verblichen.

Die für die Berechnungen herangezogenen Daten entstammen öffentlich zugänglichen Untersuchungen der Zementwirtschaft und wissenschaftlicher Institutionen.

Tabelle 28 zeigt eine aggregierte Übersicht wichtiger Untersuchungen der letzten Jahre im Bereich der Ableitung von Transferfaktoren für den Zementherstellungsprozess, hier die ermittelten Transferfaktoren für Schwermetallemissionen ins Reingas (γ_{Reingas}).

Tabelle 28: Vergleichende Darstellung verschiedener Transferfaktoren ins Reingas (Υ) aus unterschiedlichen Quellen und die für diese Untersuchung verwendeten Transferfaktoren (hier: Υ Min und Υ Max)

Elemente	VDZ (D) ①	VDZ (D) ②	Gallenk./ Braungart (D) ③	BZL (D) ④	GCI (USA) ⑤	Graf (CH) ⑥	PRIZMA- Studie (A) ⑦	Mittelwert	Υ Min	Υ Max
Verfahren	Trocken	trocken	trocken	trocken	nass/ trocken	trocken	trocken	alle	alle	alle
Quecksilber	0,40	0,30	0,93	0,75		0,16	0,40	0,52	0,16	0,93
Antimon	0,0003	0,000005	0,0002	0,0003	0,0016	0,0001		0,0004	0,000005	0,0016
Arsen	0,0002	0,000005	0,0002	0,0001	0,0006	0,0001		0,0002	0,000005	0,0006
Blei	0,0005	0,00002	0,0002	0,0036	0,0064	0,0001	0,0004	0,0014	0,000020	0,0064
Cadmium	0,0017	0,00003	0,0005	0,0028	0,0044	0,0002	0,0002	0,0013	0,000030	0,0044
Chrom	0,00012	0,000005	0,00004	0,0001	0,0005	0,000023		0,00014	0,000005	0,0005
Kobalt	0,0002	0,000005	0,0003	0,0002		0,00001		0,0002	0,000005	0,0003
Kupfer	0,00009	0,000005	0,0002	0,0001		0,00001		0,00009	0,000005	0,0002
Mangan	0,0002	0,000005		0,0001				0,0001	0,000005	0,0002
Nickel	0,0003	0,000005	0,0001	0,0002		0,000010		0,00013	0,000005	0,0003
Thallium	0,0130	0,0002	0,0110	0,0270	0,0005	0,0008		0,0086	0,000200	0,0270
Vanadium	0,0005	0,000005		0,001				0,0005	0,000005	0,001
Zink	0,0003	0,000005	0,00007	0,0001		0,000006	0,0001	0,0001	0,000005	0,0003
Zinn	0,0007	0,000005	0,00003	0,001				0,0004	0,000005	0,001

① Mittelwerte für Deutschland nach Verein Deutscher Zementwerke aus (41) nach $\Upsilon = F_{\text{Reingas}}/F_{\text{Input}}$ (F = Fracht)

② Mittelwerte für Deutschland nach Verein Deutscher Zementwerke aus (41) nach „Einbinde- mal Abscheidegrad“

③ Transferfaktoren nach (42)

④ Mittelwert für Zementwerke in NRW, berechnet nach $\Upsilon = F_{\text{Reingas}}/F_{\text{Input}}$, Datenbasis nach Winkler (43)

⑤ Mittelwert aus Bilanzmessungen an 34 Zementöfen (= *kiln*) (44)

⑥ Theoretische Υ ermittelt aus den im Stoff-Modell von Graf (459) verwandten Υ ohne Koksfilter (90 % Verbundbetrieb, 10 % Direktbetrieb), siehe dort: (A40 bis L63)

⑦ Transferfaktoren nach $\Upsilon = F_{\text{Reingas}}/F_{\text{Input}}$ (46)

Tabelle 28 zeigt, dass die Transferfaktoren je nach Literaturquelle und Element um den Faktor 10 bis 100 schwanken. Hiermit wird die Bandbreite der vorhandenen Verfahren (trocken, nass) abgedeckt. Weiter werden die wissenschaftlichen Unsicherheiten bei der Methodik der Modellbildung einbezogen (Black box, Einbinde- mal Abscheidegrad). Für die folgenden Berechnungen wird daher mit der Streubreite der Daten gerechnet (Υ Min und Υ Max).

3.4.3 Regeleinsatzstoffe

Die folgende Tabelle zeigt Werte für Rohmehl und Regelbrennstoffe, wie sie von Sprung (47) zusammengestellt bzw. berechnet wurden.

Tabelle 29: Belastung von Rohmehl und Regelbrennstoffen der Zementwirtschaft (47) in mg/kg; * = keine Daten bei Sprung (47), daher eigene Literaturrecherche, insbesondere Daten aus (42, 48, 49)

Parameter	Rohmehl (Ton/Kalk 1:3)		Steinkohle (Hu 26.000 – 28.000 MJ/Mg)	
	Min in mg/kg	Max in mg/kg	Min mg/kg	Max mg/kg
Antimon	0,1*	0,3*	0,05*	5*
Arsen	3	15	9	50
Blei	4	15	11	270
Cadmium	0,04	0,15	0,1	10
Chrom	23	39	5	80
Kobalt	2*	9*	0,52*	26*
Kupfer	5*	19*	0,52*	44,2*
Mangan	50*	500*	5,2*	262*
Nickel	18	23	20	80
Quecksilber	0,01*	0,05*	0,03*	0,78*
Thallium	0,21	0,78	0,2	4
Vanadium	32	102	30	50
Zink	31	47	16	220
Zinn	2*	5*	1,3*	7,8*

Die prozessspezifischen Daten sind ebenfalls der Publikation von Sprung (47) und weiteren aktuellen Ausarbeitungen der Zementindustrie entnommen worden. So wird mit einem energiespezifischen Abgasvolumen von 0,55–0,67 m³/MJ und einem Energiebedarf von 3,0–3,8 MJ/kg Klinker gerechnet

3.4.4 Ergebnisse

Bei der Zementherstellung werden bei den in Mitteleuropa vorherrschenden technischen Verfahren die mit den Einsatzstoffen eingetragenen Schwermetalle über die luftseitigen Anlagenemissionen und/oder das Erzeugnis (Klinker) ausgetragen. Daher werden im Folgenden auch nur diese beiden Pfade betrachtet.

Für den **Luftpfad** ist **Quecksilber** von großer Bedeutung, die restlichen hier betrachteten Schwermetalle weisen für diesen Pfad eine vergleichsweise geringere Relevanz auf.

Für den Pfad **Erzeugnis** sind die Schwermetalle Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Quecksilber, Thallium, Vanadium, Zink und Zinn von Bedeutung.

3.4.4.1 Luftpfad

Betrachtet wird im Folgenden das Schwermetall Quecksilber.

Ausgehend von den Grenzwerten der 17. BImSchV für Quecksilber (Tagesmittelwert) wird errechnet, welche Obergrenze der als Ersatzbrennstoff eingesetzte Abfall einhalten muss, damit im Abgasteilstrom keine Emissionsüberschreitungen eintreten.

Diese emissionsseitige Obergrenze ξ ist auf die Energieeinheit MJ normiert, wodurch die unterschiedliche Höhe des Heizwertes eines Ersatzbrennstoffes als Einflussgrösse auf das Ergebnis einbezogen wird. Die emissionsseitige Obergrenze ξ errechnet sich wie folgt:

$$\xi = EG \cdot \rho / \Upsilon \quad (\text{Gleichung 8})$$

ξ = emissionsseitige Obergrenze

EG = Emissionsgrenzwert der 17. BImSchV

ρ = spezifische Abgasmenge in m³/MJ (N, tr., 11 % O₂)

Υ = Transferfaktor ins Reingas

Die folgende Tabelle zeigt die erhaltenen Berechnungsergebnisse, wobei die höchste spezifische Abgasmenge mit der höchsten Durchbruchrate (niedrigster Transferfaktor) gerechnet wurde (und umgekehrt), um die ganze Bandbreite der Datenstreuung zu erfassen.

Es zeigt sich, dass die Ergebnisse sehr stark von den jeweils gegebenen Abscheideleistungen der Zementwerke (Transferfaktor Reingas) geprägt sind.

Weiter zeigt sich, dass bei Einhalten des LAGA-Richtwertes für Quecksilber (0,02 mg/MJ) auch bei einem Transferfaktor von 0,93 der Grenzwert der 17. BImSchV nicht überschritten wird.

Tabelle 30: Vom Ersatzbrennstoff für Quecksilber einzuhaltende emissionsbezogene Obergrenze, damit im Abgasteilstrom keine Grenzwertüberschreitungen eintreten

Emissionsgrenzwert (EG) der 17. BImSchV in mg/m ³ für Quecksilber (N, tr., 11 % O ₂)	Tagesmittelwert	
		0,035
Y Transferfaktor Reingas	0,16 (45)	0,93 (42)
ρ spezifische Abgasmenge in m ³ /MJ (N, tr., 11 % O ₂)	0,55	0,67
ξ emissionsseitige Obergrenze in mg/MJ	0,15	0,021

3.4.4.2 Erzeugnis

Betrachtet werden die Schwermetalle Quecksilber, Antimon, Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Thallium, Vanadium, Zink und Zinn.

Eine Anreicherung im Erzeugnis findet dann statt, wenn die Grundbelastung des erzeugten Klinkers durch den Einsatz von Ersatzbrennstoffen erhöht wird (s.o.). Unter Grundbelastung werden die Schadstoffbelastungen verstanden, die bei der Zementerzeugung gegeben sind, wenn der Klinker insgesamt ohne Abfallstoffe, d. h. im Wesentlichen aus Ton und Kalkstein als Rohmaterial und Steinkohle als Brennstoff, erzeugt wird.

Da die Grundbelastung des Klinkers auch beim ausschließlichen Einsatz von Primärroh- und -brennstoffen einen definierten Schwankungsbereich aufweist (im Folgenden Δ), tritt die Anreicherung im Erzeugnis erst dann ein, wenn dieser Schwankungsbereich überschritten wird. Delta wird wie folgt berechnet:

$$\Delta = (\varphi_{\text{Max}} \cdot (1 - \gamma_{\text{Min}}) + \theta_{\text{Max}} \cdot (1 - \gamma_{\text{Min}})) - (\varphi_{\text{Min}} \cdot (1 - \gamma_{\text{Max}}) + \theta_{\text{Min}} \cdot (1 - \gamma_{\text{Max}}))$$

(Gleichung 9)

wobei gilt:

Δ = Streubreite der Grundbelastung des Klinkers in mg/MJ Brennstoffeinsatz („Schwankungsbereich“)

φ = Schwermetallfracht Rohmehl in mg/MJ Brennstoffeinsatz

θ = Schwermetallfracht Steinkohle in mg/MJ Brennstoffeinsatz

γ = Transferfaktor ins Reingas, $1 - \gamma$ = Transferfaktor ins Erzeugnis

Die Anreicherung im Erzeugnis ist dann ausgeschlossen, wenn der Ersatzbrennstoff eine definierte produktseitige Obergrenze Ψ dauerhaft unterschreitet. Diese Obergrenze ergibt sich wie folgt:

$$\Psi = 0,5 \cdot \Delta + \theta_{\text{Mittel}} \quad (\text{Gleichung 10})$$

θ_{Mittel} = mittlere Schwermetallfracht Steinkohle in mg/MJ Brennstoffeinsatz (Mittelwert aus Tabelle 30)

Diese Annahmen stellen konservative Randbedingungen dar, weil sie die rechnerische Grenzsituation der Schwermetallbelastung des Zementklinkers erfassen. Daher stellt Ψ **keinen Richtwert, sondern eine Obergrenze dar**. Die folgende Tabelle zeigt die erhaltenen Ergebnisse.

Tabelle 31: Produktbezogene Obergrenzen (Ψ) für Ersatzbrennstoffe, die eine Anreicherung im Erzeugnis ausschließen (in mg/MJ)

Parameter	Δ	θ_{Mittel}	Produktbezogene Obergrenze Ψ
Quecksilber	0,04	0,01	0,03
Antimon	0,23	0,09	0,2
Arsen	5,88	1,05	4,0
Blei	11,95	5,02	11
Cadmium	0,33	0,18	0,3
Chrom	8,53	1,52	5,8
Kobalt	3,53	0,47	2,2
Kupfer	6,85	0,80	4,2
Mangan	186	4,77	98
Nickel	3,55	1,79	3,6
Thallium	0,34	0,08	0,2
Vanadium	28,05	1,43	15
Zink	12,25	4,21	10
Zinn	1,37	0,16	0,8

Die Analyse der Rechenergebnisse zeigt, dass die Streubreite der Transferfaktoren (Tabelle 29) sich nur für Quecksilber auf die Obergrenzen der obigen Tabelle auswirken. Eine größere Bedeutung ist den natürlichen Belastungen der Rohstoffe und des Regelbrennstoffes zuzuschreiben.

3.4.5 Fazit Überprüfung Grenzwertvorschläge für Ersatzbrennstoffe

Die folgende Tabelle 32 zeigt einen Vergleich der obigen mittels Stoffflussanalyse erzielten luftbezogenen (ξ) bzw. produktbezogenen Obergrenzen (Ψ) mit verschiedenen in der Diskussion befindlichen Regelungsvorschlägen.

Tabelle 32: Vergleich der in der Diskussion befindlichen Regelungsvorschläge mit den in dieser Untersuchung abgeleiteten Obergrenzen (emissionsseitig = ξ , produktseitig = Ψ) für Ersatzbrennstoffe (in mg/MJ), k.R. = keine Relevanz
A = heizwertreiche Fraktion aus Siedlungsabfall (Hu 16.000 MJ/Mg)
B = produktionsspezifische Abfälle (Hu 20.000 MJ/Mg)

Parameter	emissionsseitige	Produktseitige	LAGA- Richtwert Entwurf 1997 (39) mg/MJ	BUWAL- Richtwert (50) mg/MJ	Medianwert Bun- desgütegemein- schaft Sekundär- brennstoffe (51) mg/MJ	
	Obergrenzen für Ersatz- brennstoffe ξ mg/MJ	Obergrenzen für Ersatz- brennstoffe Ψ mg/MJ			A	B
Quecksilber	0,021	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03
Antimon	k.R.	0,2	0,07	0,2	1,56	1,25
Arsen	k.R.	4,0	1,9	0,6	0,3	0,25
Blei	k.R.	11	10,0	8,0	11,9	3,5
Cadmium	k.R.	0,3	0,3	0,08	0,25	0,2
Chrom	k.R.	5,8	3,7	4,0	7,8	2,0
Kobalt	k.R.	2,2	1,2	0,8	0,4	0,3
Kupfer	k.R.	4,2	3,7	4,0	21,9	6,0
Mangan	k.R.	98	k.A.	k.A.	15,6	2,5
Nickel	k.R.	3,6	3,5	4,0	5,0	1,3
Thallium	k.R.	0,2	0,15	0,12	0,06	0,05
Vanadium	k.R.	15	k.A.	k.A.	0,6	0,5
Zink	k.R.	10	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Zinn	k.R.	0,8	0,4	0,4	1,9	1,5

Es wird deutlich, dass die Regelungsvorschläge und die hier berechneten Obergrenzen (emissionsseitig = ξ , produktseitig = Ψ) für Ersatzbrennstoffe für viele Elemente zahlenmäßig gut übereinstimmen. Im Falle von Arsen, Mangan und Vanadium fallen alle Regelungsvorschläge niedriger aus, als dies nach der hier jeweils abgeleiteten Obergrenze möglich wäre. Hier ergäben sich ggf. Spielräume (wenn in der Praxis erforderlich), die Grenzwerte anzupassen.

Im Falle von Quecksilber, Antimon, Chrom, Kupfer und Zinn liegen die Medianwerte der Gütegemeinschaft (für Brennstoffe aus den heizwertreichen Fraktionen von Siedlungsabfällen) **über** der hier berechneten Obergrenze und den LAGA- sowie BUWAL-Richtwerten. Abb. 9 illustriert das Ergebnis für zwölf der genannten Schwermetalle.

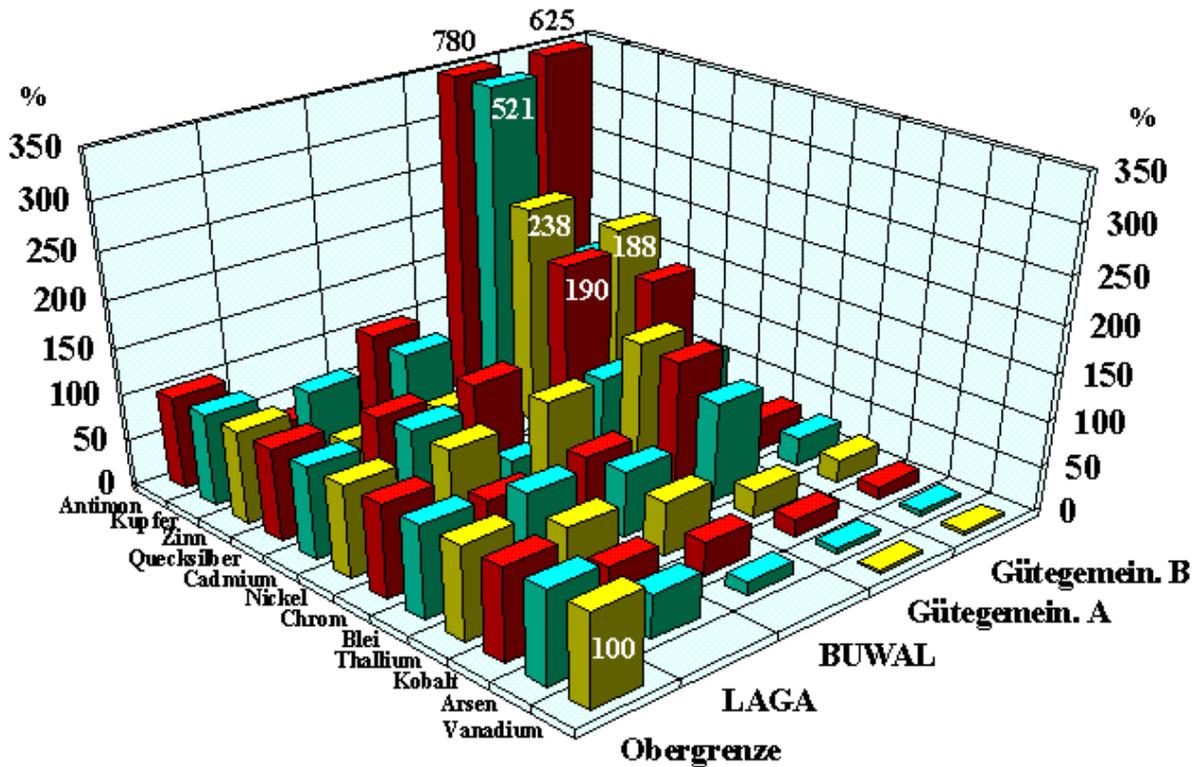


Abb. 9: Vergleich der in der Diskussion befindlichen Regelungsvorschläge mit den in dieser Untersuchung abgeleiteten Obergrenzen (emissionsseitig ξ ; Hg; produktseitig Ψ : übrige) für Ersatzbrennstoffe (in mg/MJ); Obergrenze = 100 %
 Gütegem. A = heizwertreiche Fraktion aus Siedlungsabfall (Hu 16.000 MJ/Mg)
 Gütegem. B = produktionsspezifische Abfälle (Hu 20.000 MJ/Mg)

Tabelle 32 zeigt, dass die Grenzwertvorschläge zahlenmäßig oftmals übereinstimmen. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Werte unterschiedlich definiert sind. Entscheidend für die Regelung auf diesem Feld ist erfahrungsgemäß, wie die Spitzenwertproblematik abgedeckt ist.

Insgesamt konnte daher gezeigt werden, dass die Grenzwertvorschläge der LAGA grundsätzlich einer fachlichen Prüfung mittels SFA standhalten. Weiter hat die SFA gezeigt, an welchen Stellen Anpassungsmöglichkeiten für eine Überarbeitung des Grenzwertkatalogs bestehen würden.

3.5 Berechnung einer Emissionsprognose und Überprüfung eines Abfallkataloges am Beispiel eines Heizwerkes

Anlaß der Untersuchung war die Frage, welche Abfallarten in dem Anfang 2000 im Genehmigungsverfahren befindlichen Heizwerk Mindener Industriehafen unter Einhaltung der Grenzwerte der 17. BImSchV als Sekundärbrennstoff eingesetzt werden können (52).

3.5.1 Aufgabenstellung

Zu diesem Zweck wurde eine Emissionsprognose mittels Stoffflussanalyse für die relevanten Abfallgruppen durchgeführt. Dieses Vorgehen musste gewählt werden, da es sich bei der geplanten Anlage um eine norwegische Technologie handelte, die in Minden erstmals unter deutschen Rechtsbedingungen erstellt werden sollte.

3.5.2 Modellbildung und verwendete Datengrundlagen

Die für die Anwendung des Modells erforderliche Berechnung von Konzentrationen von Stoffen im Reingas wurde wie folgt durchgeführt:

$$C_{\text{Reingas},i,p} = F_{\text{Reingas},i,p} / Hu_i \cdot RV_e = F_{\text{Reingas},i,p} / Hu_i \cdot 0,37 \quad (\text{Gleichung 11})$$

C	=	Konzentration in mg/m ³ , mg/kg
Hu	=	unterer Heizwert des Abfalls in MJ/Mg
RV _e	=	energiebezogenes Rauchgasvolumen in m ³ /MJ

Wenn jeder einzelne Sekundärbrennstoff unter Anwendung dieser Formel für alle Parameter die Grenzwerte der 17. BImSchV in dem aus seiner Verbrennung resultierenden Abgas einhält, dann ist davon auszugehen, dass ein Gemisch dieser Sekundärbrennstoffe diese Grenzwerte selbst unter ungünstigsten Mischungsverhältnissen einhalten wird. Daher wird, um worst case-Bedingungen (konservativer Ansatz) zu simulieren, die jeweilige Verbrennung der einzelnen Sekundärbrennstoffe (Abfallgruppen) berechnet. Hierdurch wird ein hinreichender Sicherheitsabstand in die Berechnungsmethodik eingefügt, der die bei jeder Prognose eintretenden Datenunsicherheiten abdeckt.

3.5.2.1 Transferfaktoren

Die folgende Tabelle zeigt die mit der hier untersuchten Technologie gegebenen Transferfaktoren ins Reingas. Die Faktoren wurden auf der Basis umfangreicher Messungen an der

Anlage Ranheim (N) und einer Modifizierung der Rauchgasreinigung für die Anpassung an die deutsche immissionsschutzrechtliche Situation errechnet (53).

Tabelle 33: Transferfaktoren ins Reingas für die hier untersuchte Verbrennungsanlage

Parameter nach 17. BImSchV, § 5 Abs. 1			Transferfaktor ins Reingas (53)
1.)	Cl	Chlor	0,003
	F	Fluor	-
	S	Schwefel	0,01
3 a)	Cd	Cadmium	0,00006
	Tl	Thallium	-
3 b)	Hg	Quecksilber	0,02 – 0,05
3 c)	Sb	Antimon	0,00003
	As	Arsen	0,0003
	Pb	Blei	0,00005
	Cr	Chrom	0,00005
	Co	Kobalt	0,0005
	Cu	Kupfer	0,00003
	Mn	Mangan	0,00004
	Ni	Nickel	0,0003
	V	Vanadium	0,00006
	Sn	Zinn	0,00005

3.5.2.2 Energiebezogenes Rauchgasvolumen

Das energiebezogene Rauchgasvolumen von 0,37 m³/MJ wurde aus den zur Verfügung gestellten Auslegungsdaten der Anlage errechnet (54).

3.5.2.3 Abfalldaten

In dem zur Genehmigung beantragten Heizwerk sollen aufbereitete, schadstoffarme Sekundärbrennstoffe zum Einsatz kommen. Die folgende Tabelle fasst die Abfallarten, deren Einsatz als Sekundärbrennstoff in dieser Anlage beantragt wurde, nach Gruppen und Untergruppen zusammen.

Tabelle 34: Für die energetische Verwertung vorgesehene Abfallgruppen

Gruppe	Untergruppen
Gruppe 1	Heizwertreiche Abfälle aus der gewerblichen Wirtschaft, überwiegend aus Holz / Papier / Kunststoff / Textilien und Verbunde (ohne 571 16, PVC-Abfälle) (auch Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung; feste Abfälle aus der Forstwirtschaft; Pflanzenfaserabfälle) (24 EAK-ASN)
Gruppe 2	Abfälle überwiegend pflanzlichen Ursprungs / Abfälle aus der Lebensmittel-industrie / Komposte (7 EAK-ASN): <ul style="list-style-type: none"> • Abfälle überwiegend pflanzlichen Ursprungs / Abfälle aus der Lebensmittel-industrie / Komposte • Komposte, nicht spezifikationsgerecht (modelliert) • Grün- und Biokomposte • Klärschlammkomposte
Gruppe 3	Schlämme und Spuckstoffe (5 EAK-ASN) <ul style="list-style-type: none"> • Schlämme ohne Klärschlamm und ohne Spuckstoffe • kommunaler Klärschlamm • Spuckstoffe
Gruppe 4	Heizwertreiche Fraktionen aus Siedlungsabfällen (3 EAK-ASN): <ol style="list-style-type: none"> (a) DSD-Sortierreste (b) Heizwertreiche Fraktion aus Siedlungsabfall, z.B. MBA-Leichtfraktion (c) Abfälle, die durch biologische Behandlung stabilisiert sind, z.B. Trockensta-bilat® (d) nicht kompostierbare Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen, z.B. hochkalorische Fraktion aus MBA-Splitting-Anlagen, und (e) von aus nicht kompostierbarer Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Ab-fällen hergestellte Ersatz-/Sekundärbrennstoffe (SBS)

Für **Gruppe 1** wurden keine Untergruppen gebildet. Es standen insgesamt Daten zu 198 Proben zur Verfügung, darunter auch statistisch ausgewertete Daten von der MVA Bielefeld-Herford (55).

Aufgrund der geringen Datenbasis (Originalproben) für **Gruppe 2** wurde für die Untergruppen zusätzlich auf allgemeine Literaturdaten zurückgegriffen :

- Abfälle überwiegend pflanzlichen Ursprungs: 2 Proben von Entsorgern, 22 Proben von Schalen von Ölsaaten, Nüssen, Reis (PHYLLIS-Datenbank (56)) und Mittelwerte von 108 Proben Stroh (PHYLLIS-Datenbank)
- nicht spezifikationsgerechte Komposte: Ableitung anhand der Grenzwerte der BioAbfV (Mittelwert = zweifacher Grenzwert, Maximalwert = achtfacher Grenzwert).
- Grün- und Bioabfallkomposte: 200 Proben (LUFA Bonn (57))
- Klärschlammkomposte: 22 Proben (LUFA Speyer (58)).

Für die Untergruppen der **Gruppe 3** standen folgende Abfallanalysendaten zur Verfügung:

- (a) Schlämme (brennbar) ohne Klärschlamm und ohne Spuckstoffe; als Kriterium für die Brennbarkeit bzw. Eignung für die Mitverbrennung wurde ein Mindest-Organikgehalt (angegeben als Glühverlust) von 25 % der Trockensubstanz angesetzt: 32 Proben
- (b) kommunaler Klärschlamm: ca. 500 Proben aus einer aktuellen Studie des nordrhein-westfälischen Umweltministeriums (59)
- (c) Spuckstoffe: 98 Proben.

Für **Gruppe 4** wurde neben vorhandenen Originaldaten zusätzlich mit statistisch ausgewerteten Daten aus der Literatur, aus der wissenschaftlichen Begleitforschung für die niedersächsischen MBA-Anlagen und von einem Entsorger gerechnet:

- (a) DSD-Sortierreste: 23 Proben (INFA/BZL (60), MVA Bielefeld-Herford (55))
- (b) Heizwertreiche Fraktion aus Siedlungsabfall, z.B. MBA-Leichtfraktion: 58 Proben (INFA/BZL (60))
- (c) Abfälle, die durch biologische Behandlung stabilisiert sind: Trockenstabilat®: 40 Proben, Min., Max., Mittelwerte (Fa. Herhof (61))
- (d) nicht kompostierbare Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen, z.B. hochkalorische Fraktion aus MBA-Splitting-Anlagen: 22 Proben heizwertreicher Fraktionen aus Hausmüll, Gewerbeabfall, Sperrmüll, aus drei niedersächsischen MBAs (IBA (62)), und
- (e) von aus nicht kompostierbarer Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen hergestellte Ersatz-/Sekundärbrennstoffe (SBS): 21 Proben (Entsorger).

3.5.3 Ergebnisse

Als Beurteilungsmaßstab wurden die Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV herangezogen. Die 17. BImSchV nennt drei Arten von Grenzwerten:

- den Halbstundenmittelwert,
- den Tagesmittelwert,
- den Mittelwert aus einer Messkampagne (mehrere Einzelwerte).

Die statistische Auswertung der vorhandenen Abfallanalysen zeigte eine für heterogene Abfallarten typische hohe Streuung der Ergebnisse. Daher stellte sich die Frage, mit welchen Inputwerten die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte zu prüfen ist.

Der **Tagesmittelwert** mittelt die auftretenden Schwankungen über einen Zeitraum von 24 Stunden. Diese Randbedingung wird durch den mittleren Bereich des jeweiligen Datenkollektivs abgebildet. In der bisherigen Anwendungspraxis der Stoffflussanalyse wurde für die Prüfung der Tagesmittelwerte auf den Median oder auf den Mittelwert zurückgegriffen. Die hier gewählte Verwendung des Mittelwertes stellt eine konservative Randbedingung dar, da der Mittelwert gegenüber dem Median stärker von den Spitzenwerten des Datenkollektivs (Untergruppe) geprägt wird und somit eher eine Überschreitung der Prüfwerte zu erwarten ist als bei Verwendung der Medianwerte.

Der **Halbstundenmittelwert** soll, die Tagesmittelwertbetrachtung ergänzend, die kurzfristigen Schwankungen der Reingaswerte erfassen und reglementieren. Daher sind für diese Prüfung die oberen Bereiche des jeweiligen Input-Datenkollektivs (Untergruppe) heranzuziehen. In der bisherigen Anwendungspraxis der Stoffflussanalyse wurde für die Prüfung der Kurzzeitgrenzwerte auf den 90-Quantil oder auf den Maximalwert zurückgegriffen. Die hier gewählte Verwendung der Maximalwerte (Ausnahme: Hu, s.u.) stellt ebenfalls eine konservative Randbedingung dar, da sie auch statistische Ausreißer und untypische Maximalwerte erfasst. Die hier gewählte Verwendung des Mittelwertes für den Hu bei gleichzeitiger Verwendung der maximalen Schadstoffbelastung stellt eine weitere konservative Randbedingung dar, da der Hu als Divisor in die Berechnung der zu erwartenden Reingaskonzentration eingeht und der Mittelwert des Hu somit eher eine Überschreitung der Prüfwerte erwarten lässt als der Maximalwert.

Der **Mittelwert aus einer Messkampagne** (2 bis 4 Einzelmessungen) bedeutet ebenfalls, dass auftretende Schwankungen gemittelt werden, allerdings nicht in dem Umfang, wie dies beim Tagesmittelwert der Fall ist. Für diese Prüfwerte wird auch hier mit dem **Mittelwert** des Datenkollektivs gerechnet.

3.5.3.1 Ergebnisse Mittelwerte

Die folgenden Tabellen zeigen die erhaltenen Gesamtergebnisse in aggregierter Darstellungsform. Die detaillierten Daten der Untersuchung sind in (52) enthalten.

Tabelle 35: Prognose der Reingaswerte (Teilstrom) für die aus den beantragten Sekundär-brennstoffen gebildeten Gruppen (Mittelwerte)

- = errechneter Reingaswert < Prüfwert (Grenzwert 17. BImSchV),
 - = errechneter Reingaswert > Prüfwert (Grenzwert 17. BImSchV)
- MW = Mittelwert, SM = Schwermetalle

Mittelwerte	HCl	HF	SO ₂	Cd/Tl	Hg	Summe SM
	Tages-MW	Tages-MW	Tages-MW		Tages-MW	
Gruppe 1	○	○	○	○	○	○
Gruppe 2 a) pflanzliche Abfälle	○	○	○	○	○	○
Gruppe 2 b) Komposte, nicht spezifikationsgerecht	○	○	○	○	○	○
Gruppe 2 c) Grün-/Biokomposte	○	○	○	○	○	○
Gruppe 2 d) Klärschlammkomposte	○	○	○	○	○	○

Mittelwerte	HCl Tages-MW	HF Tages-MW	SO ₂ Tages-MW	Cd/Tl	Hg Tages-MW	Summe SM
Gruppe 3						
a) Schlämme (brennbar) ohne Klärschlamm und ohne Spuckstoffe	○	○	○	○	○	○
Gruppe 3						
b) kommunale Klär- schlämme	○	○	○	○	○	○
Gruppe 3						
c) Spuckstoffe	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4						
a) DSD-Leichtfraktion	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4						
b) Heizwertreiche Frakt. aus Siedlungsabfall	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4						
c) Trockenstabilat®	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4						
d) hochkal. MBA-Fraktion	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4						
e) Sekundärbrennstoff aus heizwertreicher Fraktion	○	○	○	○	○	○

3.5.3.2 Ergebnisse Maximalwerte

Tabelle 36: Prognose der Reingaswerte (Teilstrom) für die aus den beantragten Sekundärbrennstoffen gebildeten Gruppen (Maximalwerte)

○ = errechneter Reingaswert < Prüfwert (Grenzwert 17. BImSchV),

● = errechneter Reingaswert > Prüfwert (Grenzwert 17. BImSchV)

MW = Mittelwert, SM = Schwermetalle

Maximalwerte	HCl, Halb- stunden- MW	HF, Halb- stunden- MW	SO ₂ , Halb- stunden- MW	Cd/Tl	Hg; Halb- stunden- MW	Summe SM
Gruppe 1	○	○	○	○	○ ₁	○

Maximalwerte	HCl, Halb- stunden- MW	HF, Halb- stunden- MW	SO ₂ , Halb- stunden- MW	Cd/Tl	Hg; Halb- stunden- MW	Summe SM
Gruppe 2 a) pflanzliche Abfälle	○	○	○	○	○	○
Gruppe 2 b) Komposte, nicht spezifikationsgerecht	○	○	○	○	○ ₂	○
Gruppe 2 c) Grün-/Biokomposte	○	○	○	○	○	○
Gruppe 2 d) Klärschlammkomposte	○	○	○	○	○	○
Gruppe 3 a) Schlämme (brennbar) ohne Klärschlamm u. ohne Spuckstoffe	○	○	○	○	○	○
Gruppe 3 b) kommunale Klärschlämme	○	○	○	○	○	○
Gruppe 3 c) Spuckstoffe	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4 a) DSD-Leichtfraktion	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4 b) Heizwertreiche Frakt. aus Siedlungsabfall	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4 c) Trockenstabilat®	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4 d) hochkal. MBA-Fraktion	○	○	○	○	○	○
Gruppe 4 e) Sekundärbrennstoff aus heizwertreicher Fraktion	○	○	○	○	○	○

- 1) zwei Einzelwerte aus dem Datenkollektiv (68 Proben mit Hg-Wert) führten zu einer Überschreitung, ansonsten keine Beanstandung
- 2) ohne Beanstandung bis zur achtfachen Überschreitung des Grenzwertes der BioAbfV

3.5.3.3 Ergebnisse 60 % des jeweiligen Grenzwertes

Nach § 15 Abs. 1 der 17. BImSchV war weiter zu prüfen, ob für die diskontinuierlich zu überwachenden Schwermetalle (Cd/Tl; Summe Schwermetalle) Emissionskonzentrationen zu erwarten sind, die 60 % des jeweiligen Grenzwertes des § 5 Abs. 1 überschreiten. Die folgende Tabelle zeigt, dass für die untersuchten Abfallgruppen die 60 %-Schwelle durch die

zu erwartenden Emissionskonzentrationen, auf die jeweiligen Abfallgruppen bezogen, in keinem Fall erreicht oder überschritten wird.

Tabelle 37: Einhaltung des 0,6-fachen Grenzwertes (GW) der 17. BImSchV für Cd/Tl und Summe Schwermetalle durch die untersuchten Abfallgruppen

Maximalwerte	Cd/Tl	60 %-GW ausgeschöpft zu	Σ SM	60 %-GW ausgeschöpft zu
60 % vom Grenzwert =	3,00E-02		3,00E-01	
Gruppe 1	5,07E-04	1,7 %	2,90E-01	96,8 %
Gruppe 2				
a) pflanzliche Abfälle	1,05E-07	0,0 %	1,36E-04	0,0 %
Gruppe 2				
b) Komposte, nicht spezifikationsgerecht	8,47E-05	0,3 %	2,87E-02	9,6 %
Gruppe 2				
c) Grün-/Biokomposte	8,97E-05	0,3 %	1,15E-02	3,8 %
Gruppe 2				
d) Klärschlammkomposte	4,17E-06	0,0 %	1,12E-03	0,4 %
Gruppe 3				
a) Schlämme (brennbar) ohne Klärschlamm / Spuckstoffe	1,44E-04	0,5 %	6,07E-02	20,2 %
Gruppe 3				
b) kommunale Klärschlämme	1,84E-04	0,6 %	1,74E-02	5,8 %
Gruppe 3				
c) Spuckstoffe	9,19E-05	0,3 %	5,29E-03	1,8 %
Gruppe 4				
a) DSD-Leichtfraktion	1,01E-03	3,4 %	5,57E-02	18,6 %
Gruppe 4				
b) Heizwertreiche Fraktion aus Siedlungsabfall	1,56E-04	0,5 %	4,28E-02	14,3 %
Gruppe 4				
c) Trockenstabilat®	4,32E-05	0,1 %	8,26E-03	2,8 %
Gruppe 4				
d) hochkalorische MBA-Fraktion	1,29E-04	0,4 %	6,81E-02	22,7 %
Gruppe 4				
e) Sekundärbrennstoff aus heizwertreicher Fraktion	9,44E-05	0,3 %	5,47E-02	18,2 %

3.5.4 Fazit

Die mit Hilfe der Stoffflussanalyse für das berechnete Emissionsprognose für den Einsatz der beantragten Sekundärbrennstoffe ergibt folgendes Resultat:

Alle untersuchten Abfälle bzw. Abfallgruppen führen bei den betrachteten **Mittelwerten** zu **keiner Überschreitung der Prüfwerte** (keine Beanstandungen).

Für die zusätzlich betrachteten **Maximalwerte** ergibt sich, von zwei Ausnahmen abgesehen, ebenfalls keine Überschreitung der Prüfwerte. In der **Gruppe 1** (Sekundärbrennstoffe aus Gewerbeabfällen) führte bei zwei Proben (von 68 mit angegebenem Hg-Gehalt) die Quecksilberbelastung zur Überschreitung des Prüfwertes (0,05 mg Hg/m³). Beide Proben fallen unter die LAGA-Schlüsselnummer 58104 (Zellulosefaserabfälle). Die Einzelwerte für diese Abfälle betragen 44,3 bzw. 16,4 mg Hg/kg FS. Hier ist von einer speziellen Herkunft auszugehen. Ohne diese Einzelproben würde sich keine Überschreitung des Halbstundenmittelwertes für diese Gruppe ergeben.

Die durchgeführte Stoffflussanalyse wurde unter konservativen Randbedingungen modelliert:

- Aus den zusammengestellten Datenkollektiven (Gruppen bzw. Untergruppen) wurden die Mittel- und Maximalwerte verwendet. Der Mittelwert ist gegenüber dem Median stärker von den Spitzenwerten des Datenkollektivs (Untergruppe) geprägt und lässt somit eher eine Überschreitung der Prüfwerte erwarten als die Verwendung der Medianwerte. Maximalwerte erfassen auch statistische Ausreißer und untypische Werte, so dass auch hier eher eine Überschreitung der Prüfwerte zu erwarten ist als etwa bei der Anwendung des für SFA häufig herangezogenen 90-Quantils (vergleiche auch, sofern angegeben, in Anhang B die Daten für Median und 90-Quantil).
- Das resultierende Reingasvolumen wird auf 6,2 % O₂ berechnet (nicht 11 %, wie bei der Abfallmitverbrennung oder der konventionellen MVA). Durch die Normierung auf 6,2 % O₂ ergibt sich bei Einhaltung der Grenzwerte der 17. BImSchV im Rahmen der Stoffflussanalyse eine deutliche niedrigere Emissionsfracht, als wenn der gleiche Rechengang auf 11 % O₂ normiert durchgeführt würde.
- Analysiert wird die Verbrennung des jeweiligen einzelnen Sekundärbrennstoffs und nicht das im späteren Betrieb eingesetzte Gemisch aus diesen Sekundärbrennstoffen. Somit ist eine rechnerische Senkung der Input- und daraus resultierend der Emissionskonzentrationen durch Vermischen unterschiedlich belasteter Sekundärbrennstoffe ausgeschlossen.

Insgesamt konnte mit diesem Anwendungsbeispiel gezeigt werden, dass mittels SFA Emissionsprognosen für noch nicht errichtete Anlagen gerechnet werden können. Mithilfe dieser Prognosen können im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens einzusetzende Abfallkataloge auf Kompatibilität mit dem Leistungsvermögen der Anlage überprüft werden.

Die Anlage wurde zwischenzeitlich mit dem beantragten Abfallkatalog genehmigt.

3.6 Berechnung einer Emissionsprognose und Überprüfung eines Abfallkataloges am Beispiel einer Schüttgutregenerieranlage

Die zu untersuchende Fragestellung umfasste die Erweiterung des Abfallkatalogs einer existierenden Aufbereitungsanlage für die Regenerierung von Gießereisanden (im Folgenden SRG-Anlage) (63).

3.6.1 Aufgabenstellung

Die Anlage wurde mit Bescheid vom 5. Mai 1988 vom Regierungspräsidenten Detmold gemäß § 4 BImSchG genehmigt. Die Betreiberfirma hat 1998 beim Regierungspräsidenten Detmold Antragsunterlagen zur wesentlichen Änderung der bestehenden Anlage eingereicht.

Neben verschiedenen technischen Maßnahmen ist vorgesehen, den Katalog der zu behandelnden Abfälle wesentlich zu erweitern. Es war zu prüfen, ob diese Erweiterung des Abfallkatalogs mit dem Leistungsvermögen der Anlage (in der beantragten technischen Erweiterung und veränderten Ausstattung) kompatibel ist.

3.6.2 Modellbildung und verwendete Datengrundlagen

3.6.2.1 Abfallarten

Die folgenden Abfallarten waren zu betrachten (Tabelle 38):

Tabelle 38: SRG-Anlage: Zu betrachtende Abfallarten

ASN	Name
54701	Sandfangrückstände
54702	Öl- und Benzinabscheiderinhalte
54703	Schlamm aus Öltrennanlagen
54704	Schlamm aus Tankreinigung und Faßwäsche
94704	Sandfangrückstände aus der Kanalisation
94801	Schlämme aus industrieller Abwasserreinigung
31435	Verbrauchte Filter- und Aufsaugmassen mit schädlichen Verunreinigungen
31440	Strahlmittelrückstände mit schädlichen Verunreinigungen
31425/ 31426	Kernsand/Formsand
31401	Gießereialsand
31439	Mineralische Rückstände aus der Gasreinigung

ASN	Name
31402	Putzereisandrückstände, Strahlsandrückstände
31428	Verbrauchte Ölbinder
31449	Strahlmittelrückstände
31626	Schlamm aus NE-Metallurgie
31621	Kalkschlamm mit schädlichen Verunreinigungen
31616	Schlamm aus Gießereien
12303	Ziehmittelrückstände
14402	Gerbereischlämme
35101	Eisenhaltiger Staub ohne schädliche Verunreinigungen
31217	Filterstaub, NE-metallhaltig
35315	Sonstige NE-metallhaltige Abfälle (ohne Al- und Mg-Abfälle)
35317	Aluminiumhaltiger Staub
59507	Katalysatoren und Kontaktmassen

3.6.2.2 Festlegung der Systemgrenzen

Die folgende Abbildung zeigt die Systemgrenzen für die zu untersuchende Fragestellung.

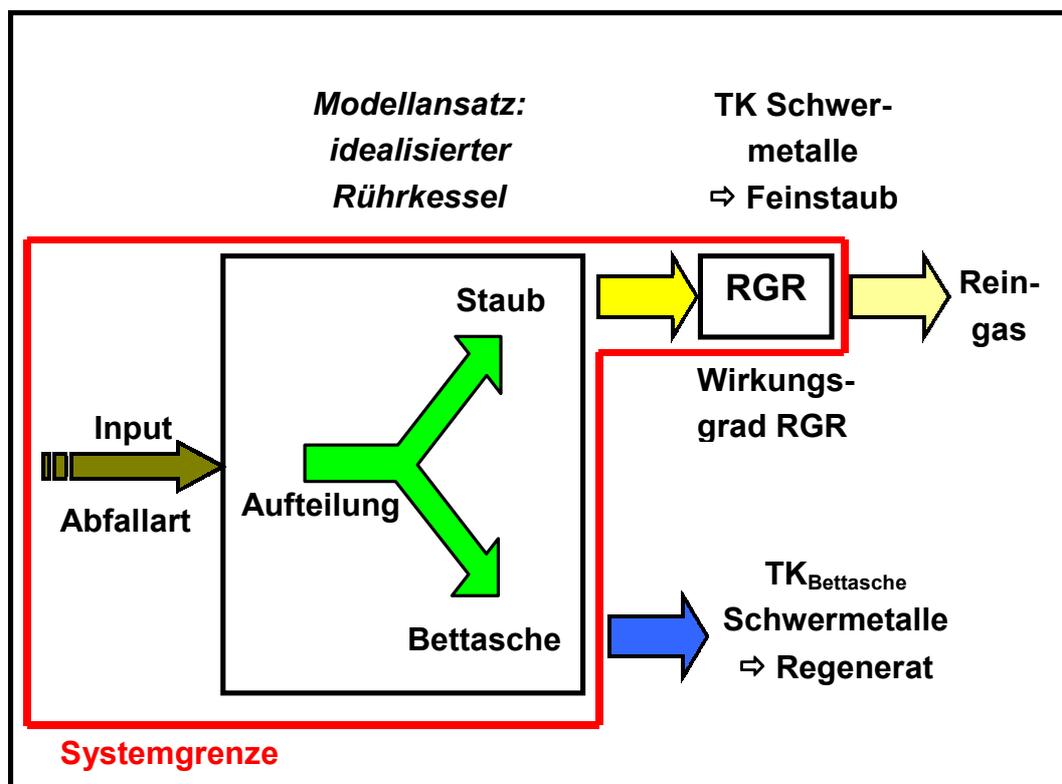


Abb. 10: Modellierung der Schüttgutregenerierungsanlage für Stoffflussanalyse SFA – vereinfacht –

3.6.2.3 Modellierung

Die Ofenanlage wird als idealisierter Rührkessel betrachtet. In ihm findet eine Aufteilung des jeweiligen Abfallinputs in Stäube (die den Ofenraum verlassen) und Bettasche, die abgezogen wird (Regenerat), statt.

Die Stäube wiederum teilen sich in zwei Teilströme auf:

- die mit der RGR abgeschiedenen Stäube, die zu beseitigen sind,
- die Feinstäube, die nicht abgeschieden werden.

Für letztere wird unterstellt, dass sie mit einer Konzentration von $7,5 \text{ mg/m}^3$ emittiert werden.

Für die organischen Schadstoffe wiederum wird eine beinahe vollständige Mineralisierung unterstellt, so dass diese Stoffgruppe im Modell und der hierauf aufbauenden Bewertung keine Bedeutung hat. Von Bedeutung sind einerseits der erhaltene Anteil an Regenerat und andererseits die Stoffflüsse für die eingebrachten Schwermetalle.

Die Aufteilung der Stoffströme auf Bettasche und Stäube berechnet sich wie folgt:

$$1. \quad \varepsilon \text{ Abfall}_{i,p} = \varepsilon \text{ Reg}_{i,p} + \varepsilon \text{ Flugst}_{i,p} \quad (\text{Gleichung 12})$$

$$2. \quad C \text{ Reg}_{i,p} = \varepsilon \text{ Abfall}_{i,p} \cdot (1 - \tau \text{ Flugst}_{i,p}) \quad (\text{Gleichung 13})$$

$$0,9 \cdot S + 0,2 \cdot (GR - S)$$

$$3. \quad C \text{ Flugst}_{i,p} = \varepsilon \text{ Abfall}_{i,p} \cdot \tau \text{ Flugst}_{i,p} \quad (\text{Gleichung 14})$$

$$0,1 \cdot S + 0,8 \cdot (GR - S)$$

- ε = Fracht an Schwermetallen in und aus dem Prozess
 i = jeweilige Abfallart
 p = jeweiliges Schwermetall mit partikelgebundenen Emissionen
 np = jeweiliges Schwermetall mit nicht-partikelgebundenen Emissionen
 τ = Transferfaktor
 S = Anorganische Grobfraction (insbes. Sand) im Abfall
 GR = Glührückstand
 RGS = Reingasstaub
 $C \text{ RGS}$ = Staubanteil im Reingas, hier $7,5 \text{ mg/m}^3$

Hierbei ergibt sich der Output für das Reingas wie folgt:

$$4. \quad C_{\text{Reingas}_{i,p}} = \frac{\varepsilon_{\text{Abfall}_{i,p}} \cdot \tau_{\text{Flugst}_{,p}} \cdot C_{\text{RGS}} \cdot \tau_{\text{RGS}_p} + \varepsilon_{\text{Abfall}_{i,np}} \cdot \tau_{\text{Reingas}_{np}}}{0,1 \cdot S + 0,8 \cdot (GR - S)} \quad (\text{Gleichung 15})$$

Die obigen Berechnungen führen zu Schwermetallwerten im Regenerat und im Staub und in der weiteren Berechnung zu Schwermetallemissionen aus dem Prozess. Diese Berechnung kann für alle zu betrachtenden Abfallarten durchgeführt werden und führt daher zu abfallspezifischen Ergebnissen.

Zusätzlich wird im Rahmen dieser Berechnung auch der Anteil an Bettasche (β) bestimmt, der sich aus der jeweiligen Abfallbehandlung ergeben würde. Dieser wird wie folgt berechnet:

$$5. \quad \beta = 0,9 \cdot S + 0,2 \cdot (GR - S) \quad (\text{Gleichung 16})$$

Für die einzusetzenden Transferfaktoren waren keine Datengrundlagen im Genehmigungsantrag für die SRG-Anlage vorhanden. Daher wurde ersatzweise auf Daten einer vergleichbaren Wirbelschichtanlage zurückgegriffen (64). Gleichzeitig wurde der Antragsteller im Rahmen des Genehmigungsverfahrens von der Genehmigungsbehörde befragt, welche diesbezügliche Prozesskenndaten er über die vorhandene Schüttgutregenerieranlage er mitteilen könne, um ggf. die getroffenen Annahmen weiter einzuzugrenzen.

Die Daten zu den Abfallarten wurden eigenen Datenbeständen und der Datenbank des Landes NRW entnommen

3.6.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der obigen Berechnungen im Sinne der vorgegebenen Aufgabenstellung ausgewertet.

Hierfür wird zunächst untersucht, welche der in Tabelle 38 genannten Abfallarten voraussichtlich in der umgebauten SRG-Anlage ordnungsgemäß und schadlos behandelt werden können.

Die Abfallarten, die ordnungsgemäß und schadlos behandelt werden können, werden anschließend einer Hauptzweckprüfung unterzogen. Hierbei ist zu untersuchen, ob der Hauptzweck auf die Verwertung oder die Beseitigung gerichtet ist.

Die Abfallarten, für die nach materieller Hauptzweckprüfung die Behandlung in der SRG-Anlage als Verwertungsmaßnahme eingestuft werden könnte, werden anschließend einer vergleichenden Betrachtung mit konventionellen Entsorgungsverfahren der Beseitigung (Sonderabfallverbrennung) unterzogen, um zu untersuchen, ob die Verwertung in der umgebauten SRG-Anlage die umweltverträglichere Lösung darstellen würde.

3.6.3.1 Schadlosigkeit und Ordnungsgemäßheit

Im Folgenden werden die obigen Berechnungen nach dem Prüfungsgesichtspunkt Schadlosigkeit/Ordnungsgemäßheit ausgewertet. Hierfür wird mit der oben dargestellten Methode eine Prognose durchgeführt, ob mit der jeweiligen Abfallart eine Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach § 5 Abs. 1, 17. BImSchV angenommen werden kann. Sicherlich ist eine Prüfung auf Schadlosigkeit und Ordnungsgemäßheit einer Maßnahme umfassender auszulegen und hat weitere Aspekte und Parameter einzubeziehen. Im Rahmen der Ausarbeitung (63) wurde nur eine Emissionsprognose erstellt, da selbige eine Mindestvoraussetzung für die Schadlosigkeit und Ordnungsgemäßheit einer Maßnahme darstellen dürfte.

Die Auswertung erfolgt getrennt für das Schwermetall Quecksilber (Hg) und die anderen relevanten Schwermetallen. Diese Trennung wurde erforderlich, weil für Hg relativ häufig Grenzwertüberschreitungen auftreten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dem verwandten Rechenmodell keine Quecksilbersenke in der Rauchgasreinigung (RGR) der umgebauten SRG-Anlage unterstellt wurde.

Die folgende Tabelle 39 zeigt die erhaltenen Ergebnisse in aggregierter Darstellungsform. Die detaillierten Daten sind in (63) dokumentiert.

Tabelle 39 macht deutlich, dass es für die Beurteilung des Genehmigungsantrags von großer Bedeutung ist, wie und ob der Quecksilber-Input in die RGR auch bewältigt werden kann. Hierzu wären vertiefte Prüfungen erforderlich gewesen, die nicht Gegenstand der Untersuchung waren.

Zwar war nach obiger Prüfung in der Mehrheit der Fälle ein negatives Ergebnis festzustellen. Es scheint aber möglich, Quecksilber durch entsprechende technische Maßnahmen entsprechend dem Stand der Technik aus dem Rauchgas abzutrennen und auszuschleusen. In diesem Fall würde sich das Gesamtergebnis deutlich verändern.

Tabelle 39: Ergebnisse der Einzelfallberechnungen zur Prüfung der Ordnungsgemäßheit/Schadlosigkeit anhand von ausgewählten Proben (Nein: keine Einzelprobe positiv, Ja: alle Einzelproben positiv, in Einzelfällen Ja: weniger als die Hälfte der Einzelproben positiv, in Einzelfällen Nein: weniger als die Hälfte der Einzelproben negativ)

ASN	Bezeichnung	Ordnungsgemäß /Schadlos ?	
		(ohne Hg)	(wg. Hg)
54701	Sandfangrückstände	in Einzelfällen Nein	in Einzelfällen Nein
54702	Öl- und Benzinabscheiderinhalte	Ja	Ja
54703	Schlamm aus Öltrennanlagen	Nein	Nein
54704	Schlamm aus Tankreinigung und Faßwäsche	Nein	Nein
94704	Sandfangrückstände aus der Kanalisation	in Einzelfällen Nein	in Einzelfällen Ja
94801	Schlämme aus industrieller Abwasserreinigung	in Einzelfällen Nein	in Einzelfällen Ja
31435	verbrauchte Filter- und Aufsaugmassen mit schädlichen Verunreinigungen	in Einzelfällen Nein	in Einzelfällen Ja
31440	Strahlmittelrückstände mit schädlichen Verunreinigungen	Ja	in Einzelfällen Ja
31425/ 31426	Kernsand/Formsand	in Einzelfällen Ja	Ja
31401	Gießereialsand	Ja	in Einzelfällen Nein
31439	Mineralische Rückstände aus der Gasreinigung	Nein	Nein
31402	Putzereisandrückstände, Strahlsandrückstände	in Einzelfällen Ja	in Einzelfällen Ja
31428	verbrauchte Ölbinder	Nein	Nein
31449	Strahlmittelrückstände	Ja	Ja
31626	Schlamm aus NE-Metallurgie	Ja	ja
31621	Kalkschlamm mit schädlichen Verunreinigungen	in Einzelfällen Nein	in Einzelfällen Ja
31616	Schlamm aus Gießereien	Ja	Ja
12303	Ziehmittelrückstände	Nein	Ja
14402	Gerbereischlämme	Nein	Ja
35101	Eisenhaltiger Staub ohne schädliche Verunreinigungen	Ja	Nein
31217	Filterstaub, NE-metallhaltig	in Einzelfällen Ja	in Einzelfällen Nein
35315	sonstige NE-metallhaltige Abfälle (ohne Al- und Mg-Abfälle)	in Einzelfällen Ja	in Einzelfällen Ja
35317	Aluminiumhaltiger Staub	Ja	Ja
59507	Katalysatoren und Kontaktmassen	Ja	Ja

Unterstellt, dass es für die Quecksilberthematik z.B. **durch Auflagen im Genehmigungsbescheid** eine befriedigende Lösung gibt, sind die folgenden Abfallarten in einer oder mehreren Proben so beschaffen gewesen, dass eine ordnungsgemäße und schadlose Behandlung in der geplanten SRG-Anlage zu erwarten war:

- 54701 Sandfangrückstände
- 54702 Öl- und Benzinabscheiderinhalte
- 94704 Sandfangrückstände aus der Kanalisation
- 94801 Schlämme aus industrieller Abwasserreinigung
- 31435 verbrauchte Filter- und Aufsaugmassen mit schädlichen Verunreinigungen
- 31440 Strahlmittelrückstände mit schädlichen Verunreinigungen
- 31425/ 31426 Kernsand/Formsand
- 31401 Gießereialsand
- 31402 Putzereisandrückstände, Strahlsandrückstände
- 31449 Strahlmittelrückstände
- 31626 Schlamm aus NE-Metallurgie
- 31621 Kalkschlamm mit schädlichen Verunreinigungen
- 31616 Schlamm aus Gießereien
- 31217 Filterstaub, NE-metallhaltig
- 35315 sonstige NE-metallhaltige Abfälle (ohne Al- und Mg-Abfälle)
- 35317 Aluminiumhaltiger Staub
- 59507 Katalysatoren und Kontaktmassen.

3.6.3.2 Hauptzweckprüfung

Im Folgenden wird untersucht, ob insbesondere für die ordnungsgemäß und schadlos zu entsorgenden Abfälle diese Behandlung im Hauptzweck als Verwertung oder als Beseitigung einzustufen ist.

Die Hauptzweckprüfung auf der materiellen Ebene umfasst die Mengen- und Schadstoffbetrachtung und die ökonomische Betrachtung.

Im Rahmen der Mengenbetrachtung wird untersucht, ob im für eine stoffliche Verwertungsmaßnahme relevanten Umfang verwertbare Abfälle erzeugt werden (Regenerat). Im Rahmen der Diskussion innerhalb der LAGA wurde hierfür das Abgrenzungskriterium 50 % vorgeschlagen. Dieses Kriterium kann aber nicht, wie die weitere Diskussion hierzu gezeigt hat, schematisch eingesetzt werden. Vielmehr ist hierfür eine verständige Würdigung des Einzelfalls durchzuführen und insbesondere auch die ökonomische Betrachtung (siehe 3.6.3.3) einzubeziehen.

Im Rahmen der Schadstoffbetrachtung wird untersucht, ob die aus der jeweiligen Abfallart erzeugten Regenerate die von der LAGA festgelegten Z2-Grenzwerte einhalten. Hierbei wird jeder Grenzwert einzeln betrachtet. Eine Überschreitung der Grenzwerte ist gleichbedeutend mit einer nicht gegebenen Verwertbarkeit des Regenerats. In diesem Fall wird daher unterstellt, dass eine Verwertungsmöglichkeit im beantragtem Zielpfad nicht mehr gegeben ist und dadurch die Hauptzweckprüfung negativ ausfallen muss.

Die folgende Tabelle zeigt die erhaltenen Ergebnisse aggregiert. Die Mengenbetrachtung und die Schadstoffbetrachtung werden getrennt dargestellt.

Tabelle 40: Ergebnisse der Einzelfallberechnungen zur Hauptzweckprüfung anhand von ausgewählten Proben (Nein: keine Einzelprobe positiv, Ja: alle Einzelproben positiv, in Einzelfällen Ja: weniger als die Hälfte der Einzelproben positiv, in Einzelfällen Nein: weniger als die Hälfte der Einzelproben negativ)

ASN	Bezeichnung	Verwertung gegeben ?	
		Mengenbetr.	Schadstoffbetr.
54701	Sandfangrückstände	in Einzelfällen Ja	in Einzelfällen Ja
54702	Öl- und Benzinabscheiderinhalte	Nein	Ja
54703	Schlamm aus Öltrennanlagen	Nein	Nein
54704	Schlamm aus Tankreinigung und Faßwäsche	Nein	Nein
94704	Sandfangrückstände aus der Kanalisation	in Einzelfällen Nein	in Einzelfällen Nein
94801	Schlämme aus industrieller Abwasserreinigung	Nein	in Einzelfällen Ja
31435	verbrauchte Filter- und Aufsaugmassen mit schädlichen Verunreinigungen	Nein	in Einzelfällen Ja
31440	Strahlmittelrückstände mit schädlichen Verunreinigungen	Nein	in Einzelfällen Nein
31425/ 31426	Kernsand/Formsand	Ja	in Einzelfällen Nein
31401	Gießereialsand	Ja	Ja
31439	Mineralische Rückstände aus der Gasreinigung	Ja	Nein
31402	Putzereisandrückstände, Strahlsandrückstände	Ja	Ja
31428	verbrauchte Ölbinder	Nein	Nein
31449	Strahlmittelrückstände	Ja	Ja
31626	Schlamm aus NE-Metallurgie	Nein	Ja
31621	Kalkschlamm mit schädlichen Verunreinigungen	Nein	in Einzelfällen Ja
31616	Schlamm aus Gießereien	in Einzelfällen Ja	Ja
12303	Ziehmittelrückstände	Nein	Nein
14402	Gerbereischlämme	Nein	Nein
35101	Eisenhaltiger Staub ohne schädliche Verunreinigungen	Nein	Nein
31217	Filterstaub, NE-metallhaltig	Nein	Nein
35315	sonstige NE-metallhaltige Abfälle (ohne Al- und Mg-Abfälle)	Nein	in Einzelfällen Ja
35317	Aluminiumhaltiger Staub	Nein	Ja
59507	Katalysatoren und Kontaktmassen	in Einzelfällen Ja	in Einzelfällen Ja

Die Ergebnisse der Tabelle 40 sind im Folgenden in die wirtschaftliche Betrachtung einzubringen.

3.6.3.3 Wirtschaftliche Betrachtung

Für die neu beantragten Abfallarten liegen die Marktpreise zur Annahme zwecks Entsorgung ab Werkstor Entsorgungsanlage in folgendem Bereich:

Als kostengünstigste Variante ist gegenwärtig die industrielle Mitverbrennung zu nennen. So dürfte die Mitverbrennung im Zementwerk Zuzahlungen von 100 bis 200 DM/Mg (FS) verursachen. Exemplarisch für diesen Entsorgungsweg seien Schlämme aus Öltrennanlagen genannt, z.B. im belgischen Obourg.

Eine weitere relativ kostengünstige Entsorgungsvariante ist die Mitverbrennung in existierenden Kraftwerken. Hier sind Preise von 200 bis 300 DM/Mg im Gespräch. Exemplarisch für diesen Entsorgungsweg seien Schlämme aus der Tankreinigung in einem Kraftwerk im Märkischen Kreis genannt.

Die Entsorgung über CPBs führt zu Mischabfällen, die in verschiedene Zielpfade der Endbeseitigung gehen. Hierzu gehören auch Deponien. Die Marktpreise liegen hier im Bereich von <100 bis 300 DM/Mg.

Die Preise für die Sonderabfallverbrennung hängen insbesondere vom Heizwert bzw. vom Aschegehalt ab. Niedriger Heizwert und hoher Aschegehalt führt zu hohen Annahmepreisen. Die Marktpreise für die Sonderabfallverbrennung liegen bei 500 - 800 DM/Mg. Exemplarisch genannt für diesen Entsorgungsweg seien alle im Antrag der SRG-Lage enthaltenen Abfallarten, die einen hohen Organikanteil aufweisen, wenn gleichzeitig ein entsprechendes Schadstoffpotenzial im Abfall enthalten ist. Aber auch die Abfälle ASN 94801, 54703, 31435, 31621 und 31626 werden in der Regel der Sonderabfallverbrennung angedient.

Insgesamt liegt daher der Marktpreis für die meisten der neu beantragten Abfälle, je nach Konsistenz und Schadstoffbeschaffenheit, im Preiskorridor von 100 bis 800 DM/Mg.

Neben den Marktpreisen, die aktuell für die alternativen Entsorgungswege zu veranschlagen wären, sind die Erlöse, die für die erzeugten Regenerate gezahlt werden, in die wirtschaftliche Betrachtung einzubeziehen.

Für Regenerate, die in der Bauwirtschaft als Sekundärbaustoff abgesetzt werden sollen, sind Erträge im Bereich von 5 bis 15 DM/Mg frei Baustelle erzielbar. Es sind aber auch Marktentwicklungen vorstellbar, bei denen die Erträge gegen Null gehen. Für die Marktentwicklung wird sicherlich auch der Ausgang des in Überarbeitung befindlichen Verwertungserlasses zu Massenabfällen in NRW (65) von Bedeutung sein.

Insgesamt wird also deutlich, dass die Wertschöpfung des Behandlungsprozesses nicht primär in den Erlösen für das erzeugte Regenerat liegt. Vielmehr dominiert der Kostenanteil, der zur Verminderung des Schadstoffpotenzials erforderlich ist. Dies zeigt auch der Kosten-

bereich der gegenwärtig praktizierten Entsorgung der beantragten Abfallarten (Marktpreise). Selbige würden nicht in diesem relativ hohen Bereich liegen, wenn nicht ein entsprechendes hohes Schadstoffpotenzial zu bewältigen wäre.

Die obige Kostenstruktur macht daher deutlich, dass ein relativ kostenintensiver Prozess genutzt wird, um ein im sehr niedrigen Erlösbereich liegenden Stoff zu erzeugen. Dies berechtigt wiederum, die Mengenbetrachtung nach dem 50 %-Kriterium durchzuführen (s.o.). Wobei die Einzelergebnisse bei errechneten Zahlenwerten im engeren Bereich um dieses Entscheidungskriterium verständlich zu werten sind.

Werden die oben genannten Kostenniveaus für die konventionelle Entsorgung der in Tabelle 38 aufgeführten Abfallarten näher differenziert, so sind insbesondere die Abfälle, die gegenwärtig schwerpunktmäßig der kostenintensiven Sonderabfallverbrennung angedient werden, näher zu betrachten. Auch hier ist anzunehmen, dass diese Marktsituation bzw. Zuordnung der Abfallarten mit dem jeweils gegebenen Schadstoffpotenzial der Abfälle in Verbindung steht. Diese Aspekte werden daher in die Ergebnisfindung unterstützend mit einbezogen.

Die Mengen- und Schadstoffbetrachtung sowie die wirtschaftliche Betrachtung führen daher zu einem Gesamtergebnis. Die folgenden Abfallarten sind eindeutig im Hauptzweck als Verwertungsmaßnahme einzustufen.

- 31425 /31426 Kernsande / Formsande
- 31401 Gießereialsande

Für Einzelproben (also für Einzelchargen) der folgenden Abfallarten konnte im Hauptzweck eine Verwertungsmaßnahme bestätigt werden. Voraussetzung im Einzelfall ist natürlich der Nachweis der Ordnungsgemäßheit/Schadlosigkeit, die nach den vorliegenden Untersuchungen für Einzelproben nachgewiesen werden konnte:

- 54701 Sandfangrückstände
- 94704 Sandfangrückstände aus der Kanalisation
- 31402 Putzereisandrückstände, Strahlsandrückstände
- 31449 Strahlmittelrückstände
- 31616 Schlamm aus Gießereien
- 59507 Katalysatoren und Kontaktmassen.

3.6.3.4 Umweltverträglichere Maßnahme

Die Alternative zur beantragten Verwertung der in Tabelle 38 aufgeführten Abfälle wäre eine Beseitigung in einer konventionellen Sonderabfallverbrennungsanlage.

Die obige Prüfung zeigt, dass für einige Abfallarten eine Behandlung in der Anlage der SRG Lage ordnungsgemäß und schadlos erfolgen kann, in Abhängigkeit von der Schadstoffbelastung des einzelnen Abfalls. Die Hauptzweckprüfung zeigte wiederum zwei Fallgruppen: für zwei Abfallarten ergibt sich ein eindeutig positives Ergebnis, für eine begrenzte Teilmenge weiterer Abfallarten konnte in Einzelfällen (bei hohem mineralischen Anteil und niedrigen Schadstoffbelastungen) festgestellt werden, dass der Hauptzweck der Maßnahme in der Verwertung liegen *kann*.

Für alle beiden Fallgruppen wird im Folgenden näher untersucht, ob die Verwertung in der Anlage der SRG Lage gegenüber einer Beseitigung in einer Sonderabfallverbrennungsanlage die umweltverträglichere Lösung darstellt.

Die folgende Tabelle zeigt für eine Sonderabfallverbrennungsanlage (SVA) im Einzugsbereich der SRG Lage, welche Ergebnisse für eine typische Abfallart im Heizwertbereich von 15.000 MJ/Mg erhalten werden. Die Ergebnisse der Tabelle 41 wurden auf der Basis einer stoffstromanalytischen Modellierung der SVA mittels ökobilanzieller Berechnungsmethoden erhalten (Methodenergänzung).

Tabelle 41: Bilanz für eine Sonderabfallverbrennungsanlage (SVA) im Einzugsbereich der SRG Lage, basierend auf Daten dieser Anlage und Daten aus den Emissionsberichten 1996 und 1997

Emissionen Luftpfad	lokal	global	jeweils pro Mg Abfall
Humantoxizität/Ökotoxizität			
• Summe carcinogene Stoffe	1,57E+07	-2,89E+08	m ³ /Mg
• Summe toxische Schwermetalle	1,37E+08	-3,52E+08	m ³ /Mg
Treibhauspotenzial (GWP)	nicht relevant	4,57E+08	mg CO ₂ -Äq./Mg
Photooxidanzienbildungspotenzial (POCP)	1,16E+02	-2,30E+05	mg Ethylen-Äq./Mg
Versauerungspotenzial (AP)	5,04E+05	-1,54E+06	mg SO ₂ -Äq./Mg

Die negativen globalen Ergebnisse zeigen, dass bei der Behandlung heizwertreicher Abfälle die Gutschriften aus der Energiebereitstellung die Auswirkungen der Abfallverbrennung überkompensieren. Es kommt hiernach zu einer **lokalen** Umweltbelastung, aber zu einer **globalen** Umweltentlastung.

Für die SRG Lage werden die lokalen Umweltauswirkungen bei der gegebenen Rauchgasreinigung nicht deutlich unterschiedlich zu den lokalen Auswirkungen der Sonderabfallverbrennung ausfallen.

In der bilanziellen, globalen Betrachtung stellt sich die Frage nach den zu erzielenden Gutschriften.

Die Antragsunterlagen der SRG Lage sehen zwar Stromauskopplungen vor. Selbige werden aber aus der Nachverbrennung gewonnen, die weitgehend durch externe Energieeinspeisung (Erdgas) getragen wird. Die Energiebilanz der Anlage wird somit im Sinne einer Umweltbelastung als Zahlenwert positiv ausfallen.

Im Folgenden wird der Einfachheit halber der für den Antragsteller günstigste mögliche Fall unterstellt, dass nämlich die Energiebilanz neutral ausfällt, was bei der eingesetzten hochwertigen Energieart eine sehr optimistische Annahme darstellt. In diesem Fall hängt das bilanzielle Ergebnis zentral davon ab, welche Gutschriften für das erzeugte Regenerat einzurechnen sind. Im Falle eines minderwertigen, nicht einer Ressourcenknappheit unterworfenen Baustoffs fallen die Gutschriften minimal aus. Somit würde in diesem Fall die Beseitigung die umweltverträglichere Maßnahme darstellen. Dies sähe anders aus, wenn ein hochwertigerer mineralischer Stoff erzeugt würde, wie dies für die Regenerierung von Altsanden für den Einsatz in der Gießereiwirtschaft beispielsweise der Fall wäre. Für diese Fallgruppe ist daher die Behandlung und Erzeugung eines Regenerats die umweltverträglichere Lösung.

Für die zweite Fallgruppe ist die Betrachtung weiter zu differenzieren. Die in Fallgruppe 2 enthaltenen Abfallarten werden nicht durchgängig hohe Heizwerte aufweisen. Es ist mit Heizwerten (H_u), folgt man den vorliegenden Daten, von 500 bis i.d.R. < 20.000 MJ/Mg zu rechnen.

Sinkt der Heizwert eines Abfalls unterhalb von etwa 7.000 MJ/Mg (H_u), so tritt der energetische, sprich ökologische, Vorteil einer Verbrennung in einer SVA in den Hintergrund. Hierbei ist das in der SVA gegenüber der klassischen MVA höhere Temperaturniveau im Verbrennungsraum einzubeziehen.

Für Abfallarten mit Heizwerten deutlich oberhalb von 7.000 MJ/Mg würde i.d.R. die SVA oder eine vergleichbare thermische Behandlung die umweltverträglichere Lösung darstellen.

Für die folgenden Abfallarten ist davon auszugehen, dass die SVA in Einzelfällen die umweltverträglichere Lösung darstellt:

- 54701 Sandfangrückstände
- 94704 Sandfangrückstände aus der Kanalisation
- 31616 Schlamm aus Gießereien.

3.6.4 Fazit SRG-Anlage

Im folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der dargestellten Untersuchung zusammengefasst:

1. Die eingehende Defizitanalyse der Antragsunterlagen zeigte, dass wesentliche Datengrundlagen zur Beschreibung des Prozesses der Schüttgutregenerierung in der umzubauenen Anlage in Lage nicht verfügbar waren. Hierdurch konnte auf der Basis von Angaben des Antragstellers eine Prognose der Eignung des Prozesses für den beantragten Zweck nicht vorgenommen werden.
2. Es musste daher mit Literaturwerten vergleichbarer Anlagen gearbeitet werden, um die Eignungsprognose durchzuführen.
3. Die Prüfung auf Ordnungsgemäßheit und Schadlosigkeit der Behandlung der beantragten Abfallarten zeigte, dass für die meisten belasteten Abfallarten Schwierigkeiten auftreten werden, den Quecksilbergrenzwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sicher einzuhalten. Auf die mittlerweile erfolgte Absenkung des Tagesmittelwertes auf $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sei an dieser Stelle nachrichtlich hingewiesen.

Die Quecksilberproblematik ließe sich mit entsprechenden behördlichen Auflagen lösen. Daher wurden Berechnungen mit Quecksilberabscheideleistungen nach dem Stand der Technik durchgeführt.

4. Für die folgenden Abfallarten kann eindeutig festgestellt werden, dass eine ordnungsgemäße und schadlose Behandlung gegeben ist, im Hauptzweck eine Verwertung vorliegt und eine alternativ zu betrachtende Entsorgung in am Markt konkurrierenden Beseitigungsanlagen nicht die umweltverträglichere Lösung darstellt:
 - 31425 /31426 Kernsande / Formsande
 - 31401 Gießereialtsande
5. Für die folgenden Abfallarten kann in Einzelfällen die Zusammensetzung oder Belastung so beschaffen sein, dass ebenfalls die in Punkt 4 genannten Kriterien für eine Verwertung erfüllt werden:
 - 31402 Putzereisandrückstände, Strahlsandrückstände
 - 31449 Strahlmittelrückstände
 - 59507 Katalysatoren und Kontaktmassen

Allerdings wäre hierfür sicherzustellen, dass nur Chargen dieser Abfallarten in der Schüttgutregenerieranlage in Lage angenommen werden dürfen, die einen hohen verwertbaren Sandanteil und geringe Schadstoffbelastungen aufweisen. Dies könnte über eine in der Genehmigung fixierte Qualitätskontrolle und einen entsprechenden Anforderungs- bzw. Grenzwertkatalog erfolgen.

6. Für die folgenden Abfallarten kann in Einzelfällen die Zusammensetzung oder Belastung so beschaffen sein, dass ebenfalls die in Punkt 4 genannten Kriterien für eine Verwertung erfüllt werden:

- 54701 Sandfangrückstände
- 94704 Sandfangrückstände aus der Kanalisation
- 31616 Schlamm aus Gießereien

Allerdings wäre hierfür sicherzustellen, dass nur Chargen dieser Abfallarten in der Schüttgutregenerieranlage in Lage angenommen werden dürfen, die einen hohen verwertbaren Sandanteil, geringe Schadstoffbelastungen und darüberhinaus niedrige Heizwerte aufweisen. Dies könnte ebenfalls über eine in der Genehmigung fixierte Qualitätskontrolle und einen entsprechenden Anforderungs- bzw. Grenzwertkatalog erfolgen.

7. Es hat sich gezeigt, dass der in den Antragsunterlagen vorgeschlagene Grenzwertkatalog zu hohe Werte enthielt, um die genannten Verwertungsziele sicherzustellen. Er wäre neu zu fassen und durch Mindestanforderungen bezüglich des Sandanteils (bzw. eines Grobkornanteils) zu ergänzen. Ferner sollten eindeutige Bezugswerte für den Wassergehalt und Glühverlust vorgegeben werden. Insgesamt scheint es daher sinnvoll, für den Input neben Konzentrationen auch Frachtgrenzwerte festzulegen oder sogar nur letztere zu fixieren.

8. Der Umfang des in den Antragsunterlagen vorgeschlagene Grenzwertkatalog ist in der Regel ausreichend. Es ist zu beachten, dass in Einzelfällen dieser Grenzwertkatalog nicht ausreichend sein kann, da bei der vorgenommenen Prüfung einzelne Proben mit sehr hohen Konzentrationen an anderen bisher nicht berücksichtigten Metallen aufgefallen sind (z.B. Vanadium, Kupfer oder Zinn). Hierfür könnte eine Ergänzung um eine summarische Regelung in Form eines „Auffangtatbestandes“ eine Lösung darstellen.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die SFA, unterstützt mit ökobilanziellen und ökonomischen Methoden, eine komplexe Bewertungshierarchie, wie es das KrW-/AbfG für die Abgrenzungsfrage vorgibt, auch für komplexe Einzelfälle bewältigen kann. **Der beantragte erweiterte Abfallkatalog wurde nicht genehmigt.**

3.7 Berechnung einer Emissionsprognose und Überprüfung eines Abfallkataloges am Beispiel einer Altholzverbrennungsanlage

Diese Untersuchung sollte dazu dienen zu prüfen, ob die beantragten relevanten Abfälle (siehe die folgende Tabelle) in einer geplanten Holzverbrennungsanlage schadlos verwertet werden können (66).

3.7.1 Aufgabenstellung

Für die Berechnung der SFA war es erforderlich, die geplante Verbrennungsanlage für Holzabfälle zu modellieren und ein entsprechendes Rechenprogramm zu erstellen. Die Transferfaktoren für die Verbrennungsanlage wurden aus Messungen an einer bereits in Betrieb befindlichen vergleichbaren Anlage ermittelt und mit den Lieferspezifikationen der Neuanlage abgeglichen.

Es wird eine SFA für den Reinluftpfad und die relevanten festen Austragspfade (Stäube, Aschen) gerechnet.

Tabelle 42: Beantragte Abfallschlüsselnummern nach EAK

ASN	Bezeichnung
15 01 99 D1	Verpackungen mit schädlichen Verunreinigungen
17 02 99 D1	Holz mit schädlichen Verunreinigungen

3.7.2 Systemmodellierung

Die Berechnung der SFA erfolgt für die Medianwerte der Datenkollektive. Zusätzlich wird eine Spitzenwertanalyse durchgeführt. Geprüft wird schwerpunktmäßig der Luftpfad anhand der Grenzwerte der 17. BImSchV. Die immissionsrechtliche Beurteilung der Rechenergebnisse erfolgt in Form einer virtuellen Teilstrombetrachtung. Dabei wird berechnet und geprüft, ob für die untersuchten einzelnen Abfallarten in der geplanten Verbrennungsanlage im Abgasteilstrom, der aus der Abfallverbrennung resultiert, die Grenzwerte des § 5 Abs. 1 der 17. BImSchV eingehalten werden.

Zusätzlich wird der Feststoffpfad getrennt nach Filterstaub und Rostasche berechnet und anhand von Grenzwerten für den angedachten Verwertungsweg bewertet.

Im beantragten Kraftwerk wird ein Brennstoffmix auf Holzbasis nach §1, Sp.1, Nr. 1.3 und 1.2 Anhang zur 4. BImSchV eingesetzt, welcher sich aus der Gesamtheit der beantragten Abfallschlüsselnummern zusammensetzt. Hierfür wurde ebenfalls eine SFA durchgeführt. Diese Ergebnisse werden den Ergebnissen der SFA bei ausschließlichem Einsatz einer der beiden genannten besonders überwachungsbedürftigen Abfälle gegenübergestellt.

Die betrachteten Stoffe sind die Halogene Chlor und Fluor sowie das Element Schwefel; weiter die Schwermetalle Cadmium, Thallium, Quecksilber, Antimon, Arsen, Blei, Chrom, Kobalt, Kupfer, Mangan, Nickel, Vanadium und Zinn.

Die geplante Verbrennungsanlage besteht aus dem Feuerungsraum, dem Kessel, der Rauchgasreinigung und den diversen Nebenanlagen. Der Brennstoff wird einerseits stückig über ein spezielles Dosiersystem (Spreader Stocker) auf den Rost geworfen. Die kleinteiligen Bestandteile verbrennen bereits in der Wurfparabel, die größeren Teile werden getrocknet und verbrennen auf dem Rost. Der Rost ist als Vorschubrost gewählt. Die verbleibende Asche wird am Ende der Roststrecke in einen Nassentascher abgeworfen. Neben der Verbrennung von stückigem Material besteht die Möglichkeit der Verbrennung von Holzstaub, der über Düsen oberhalb der Rostebene eingeblasen wird. Die folgende Tabelle gibt wichtige Betriebsparameter aus den Antragsunterlagen wieder.

Tabelle 43: Wichtige Betriebskenngrößen und erwartete Emissionswerte für die geplante Holzverbrennungsanlage

Betriebsparameter	Wert	Einheit
Lastzustand	100	%
Feuerungswärme	60	MW
Dampfleistung, max. dauernd	20	kg/s
Zulässiger Betriebsdruck	80	bar
Überhitzer-Austrittsdruck	68	bar
Überhitzer-Dampf Temperatur	450	°C
Speisewassertemperatur	110 – 120	°C
Abgastemperatur	155 – 175	°C
Holzdurchsatz	13,5	Mg/h
Heizwert (Hu)	16	MJ/kg
Abgasvolumen (f.)	88.000	m ³ /h
Abgasvolumen (tr.)	75.000	m ³ /h
Bezugssauerstoffgehalt	5	%
Schadstoffe	Wert	Einheit
CO	80	mg/m ³
Restliche Parameter der 17. BImSchV	< Grenzwerte	

Der Kessel ist dreizügig ausgebildet. Der erste Zug stellt einen sog. Leerzug dar; im zweiten Zug ist der Dampfüberhitzer angebracht und im dritten Zug der Economizer. Der Dampf wird im Rahmen der Kraft-Wärme-Kopplung genutzt. Die Rauchgase werden über einen Gewe-

befilter gereinigt. Der Staubgehalt ist hierdurch auf Werte $< 10 \text{ mg/m}^3$ zu reduzieren. Der Gewebefilter wird als Adsorptionsfilteranlage unter Verwendung eines handelsüblichen Adsorbens z.B. auf Basis von Kalkhydrat / Herdofenkoks betrieben (67). Hierdurch wird eine Reduktion von HCl- und Dioxin-Emissionen sowie die Abscheidung von flüchtigen Schwermetallen erreicht. Zusätzlich erfolgt eine Rauchgaszirkulation (20 %) und der Betrieb einer SNCR-Entstickung mittels Eindüsung einer wässrigen Harnstofflösung.

3.7.2.1 Verwendetes Modell

Die skizzierte Verbrennungseinheit wird als idealisierter Rührkessel betrachtet. Die gesamte Betriebseinheit wird entsprechend der folgenden Abbildung modelliert.

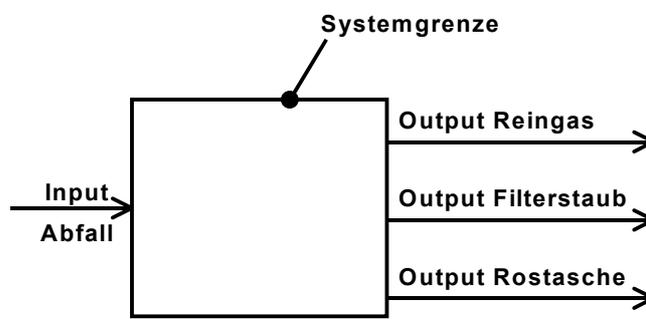


Abb. 11: Modell für Stoffflussanalyse der betrachteten Holzverbrennungsanlage

Der Input wird für jeden einzelnen Abfall getrennt betrachtet. Als Output fallen die Stoffströme bzw. Güter an:

- Reingas,
- Filterstaub,
- Rostasche.

Die Rauchgasrückführung wird innerhalb der Systemgrenzen angesetzt. Es wird im Modell unterstellt, dass sie in ihrem Umfang nicht variiert. Insgesamt wird von einem erreichten Gleichgewichtszustand der Systemkomponenten des Modells ausgegangen.

Für die organischen Schadstoffe wird eine beinahe vollständige Mineralisierung unterstellt, so dass diese Stoffgruppe im Modell keine Bedeutung hat.

3.7.2.2 Randbedingungen und mathematische Beziehungen

Die folgenden Berechnungsterme beschreiben den Prozess der zu betrachtenden Holzverbrennungsanlagen:

$$F_{\text{Reingas},i,p} = F_{\text{In},i,p} \cdot T_{\text{f Reingas},p} \quad (\text{Gleichung 17})$$

$$F_{\text{Staub},i,p} = F_{\text{In},i,p} \cdot T_{\text{f Staub},p} + K_p \quad (\text{Gleichung 18})$$

$$F_{\text{Rostasche},i,p} = F_{\text{In},i,p} \cdot T_{\text{f Rostasche},p} \quad (\text{Gleichung 19})$$

Für die Rauchgaszirkulation gilt:

$$F_{\text{Reingas},i,p} + F_{\text{rez},i,p} = F_{\text{In},i,p} \cdot T_{\text{f Reingas},p} + F_{\text{rez},i,p} \quad (\text{Gleichung 20})$$

Also kann die rezirkulierte Fracht gekürzt werden und daher außerhalb der Betrachtung bleiben.

Weiter gilt:

$$C_{\text{Reingas},i,p} = F_{\text{Reingas},i,p} / H_{u_i} \cdot R_{V_e} \quad (\text{Gleichung 21})$$

$$C_{\text{Staub},i,p} = F_{\text{Staub},i,p} / S_{\text{t}} \quad (\text{Gleichung 22})$$

$$C_{\text{Rostasche},i,p} = F_{\text{Rostasche},i,p} / R_{\text{A}} \quad (\text{Gleichung 23})$$

i = Index für zu betrachtende Abfallarten

p = Index für zu betrachtende Elemente / Parameter

K = durch die Additivdosierung eingebrachte Fracht

H_u = unterer Heizwert des Abfalls in MJ/Mg

R_{V_e} = energiebezogenes Rauchgasvolumen des Prozesses in m^3/MJ

S_{t} = Staubanfall aus Rauchgasreinigung in kg / h

R_{A} = Rostascheanfall in kg / h

F_{rez} = rezirkulierte Fracht

3.7.3 Datengrundlagen für die Berechnungen der Stoffflussanalyse

In diesem Kapitel wird zunächst die Ableitung der Datengrundlage für die anschließend darzustellenden Berechnungsergebnisse dokumentiert. Für die SFA sind entsprechend der Systemmodellierung die folgenden Daten zu ermitteln:

- energiespezifische Abgasmenge,
- Transferfaktoren,
- Daten zu den Abfallqualitäten.

3.7.3.1 Energiespezifische Abgasmenge

Die energiespezifische Abgasmenge wird für den in den Antragsunterlagen dargelegten Betriebszustand von 5 % Sauerstoff im Reingas bestimmt.

Für diesen Bezugssauerstoffgehalt ergibt sich entsprechend den Betriebserfahrungen an der vorhandenen Verbrennungsanlage ein Zahlenwert von $0,345 \text{ m}^3/\text{MJ}$ (68).

3.7.3.2 Transferfaktoren

Die folgende Tabelle zeigt die an der vorhandenen Altholzverbrennungsanlage durch Bilanzmessungen ermittelten Transferfaktoren. Die Reingasmessungen wurden im März 2000 vom TÜV Bayern durchgeführt. Die HCl-Werte wurden anhand der kontinuierlichen Messeinrichtung ermittelt. Die Werte der Ascheanalysen wurden im Juni 2000 von der LGA Nürnberg im Rahmen der Erstellung von Deklarationsanalysen sowie durch regelmäßige Eigenanalysen ermittelt. Die Brennstoffinputanalysen wurden im Rahmen von kontinuierlichen Routinekontrollen durch ein Betriebslaboratorium erstellt. Der Abgleich mit der Lieferspezifikation für die Neuanlage ergab, daß es sich hierbei für die relevanten Komponenten um eine baugleiche Ausführung handelte.

Tabelle 44: Transferfaktoren der vorhandenen Holzverbrennungsanlage (68)

Parameter	Transferfaktor Reingas	Transferfaktor Staub aus RGR	Transferfaktor Rostasche
Chlor	7,98E-02	9,30E-01	6,60E-03
Fluor	8,17E-03	8,47E-02	8,76E-03
Cadmium	4,79E-03	7,43E-01	2,04E-01
Thallium	-	-	-
Quecksilber	3,79E-03	1,42E+00	1,47E-02
Antimon	-	-	-
Arsen	7,90E-04	6,71E-01	1,01E-01
Blei	3,00E-05	4,32E-01	1,85E-01
Chrom	7,73E-04	8,24E-01	2,44E-01
Kobalt	-	-	-
Kupfer	1,61E-03	6,30E-01	4,54E-01
Mangan	1,79E-04	1,39E+00	3,55E-01
Nickel	1,45E-02	4,83E-01	1,72E+00
Vanadium	-	-	-
Zinn	1,61E-03	5,75E-01	8,94E-01

Die Elemente Antimon, Kobalt und Vanadium wurden an der vorhandenen Anlage nicht bestimmt. Die folgende Tabelle enthält Angaben zu Transferfaktoren aus einer vergleichbaren Anlage (69). Diese Daten werden ersatzweise für die folgende Berechnung herangezogen. Für Thallium wurden die gleichen Transferfaktoren wie für Cadmium angesetzt.

Tabelle 45: Transferfaktoren, nicht in Neumarkt bestimmt, * = Schätzung

Parameter	Transferfaktor Rein- gas (69)	Transferfaktor Staub aus RGR *	Transferfaktor Rosta- sche *
Thallium	4,79E-03	7,43E-01	2,04E-01
Antimon	3,00E-05	5,00E-01	5,00E-01
Kobalt	5,00E-04	5,00E-01	5,00E-01
Vanadium	6,00E-05	5,00E-01	5,00E-01

3.7.3.3 Daten zu den Abfallqualitäten

Die Abfalldaten wurden im wesentlichen aus zwei Quellen entnommen:

- eigene Daten,
- ABANDA.

Schließlich wurde noch ein Datensatz einbezogen, der aus den Routinekontrollen des Brennstoffmixes durch den Betreiber der vorhandenen Anlage zusammengestellt wurde. Die Datensätze werden jeweils getrennt ausgewiesen und berechnet.

Tabelle 46: Abfalldaten nach BZL – ASN 15 01 99 D1 Verpackungen mit schädlichen Verunreinigungen (n = 64)

Parameter		n*	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90-Quantil	Anzahl Proben mit Wert 0
Eigenschaften:								
Heizwert	MJ/Mg	47	8.780	58.140	24.085	21.400	36.624	
Brennwert	MJ/Mg	26	9.750	43.500	28.488	25.850	41.550	
Zusammensetzung (FS):								
Trockensubstanz	%	36	66,7	100,0	94,8	96,5	99,4	
Wassergehalt	%	28	0,0	23,3	4,7	3,5	9,2	
Glührückstand	%	18	0,9	79,2	16,3	3,9	45,5	
Elementaranalyse (FS):								
Chlor	%	37	0,01	20,0	1,33	0,20	2,66	0
Fluor	%	6	0,01	0,42	0,11	0,05	0,26	0
Schwefel	%	22	0,10	5,00	0,71	0,20	1,98	0
Schadstoffe, anorganisch (FS):								
Cadmium	mg/kg	16	0,00	1.000	66,0	0,00	27,2	9
Thallium	mg/kg	6	0,00	50,00	8,63	0,00	25,9	4
Quecksilber	mg/kg	16	0,00	1.000	62,9	0,01	2,20	8
Antimon	mg/kg	8	0,00	680	93,0	1,87	238	4
Arsen	mg/kg	11	0,00	50,0	4,89	0,00	3,65	8

Parameter		n*	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90-Quantil	Anzahl Proben mit Wert 0
Blei	mg/kg	11	0,00	200	22,5	0,00	22,4	6
Chrom (gesamt)	mg/kg	12	0,00	130	24,4	4,55	70,8	2
Kobalt	mg/kg	2	0,00	50,0	25,0	25,0	45,0	1
Kupfer	mg/kg	16	0,00	1.000	90,0	9,05	155	4
Mangan	mg/kg	2	23,6	75,0	49,3	49,3	69,9	0
Nickel	mg/kg	4	0,00	428	121	27,5	314	1
Vanadium	mg/kg	3	0,00	50,0	25,0	25,0	45,0	1
Zinn	mg/kg	3	8,65	163	76,4	57,9	142	0

Tabelle 47: Abfallarten nach ABANDA (STAT 277) – ASN 15 01 99 D1 Verpackungen mit schädlichen Verunreinigungen (n = 67) (70)

Parameter		n*	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90-Quantil	Anzahl Proben mit Wert 0
Eigenschaften:								
Heizwert	MJ/Mg	44	4.000	40.000 ^{a)}	25.801	20.420	30.000 ^{a)}	
Brennwert	MJ/Mg	17	9.734	45.170	26.064	23.087	44.388	
Zusammensetzung (FS):								
Trockensubstanz	%	12	32,6	98,5	89,3	92,4	97,1	
Wassergehalt	%	7	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	
Glührückstand	%	18	0,9	79,2	16,3	3,9	45,5	
Elementaranalyse (FS):								
Chlor	%	67	0,01	8,49	1,15	0,18	3,46	
Fluor	%	19	0,01	0,10	0,04	0,03	0,06	
Schwefel	%	60	0,01	4,00	0,29	0,08	0,68	
Schadstoffe, anorganisch (FS):								
Cadmium	mg/kg	44	0,10	26,0	1,64	0,50	4,46	
Thallium	mg/kg	38	0,10	20,0	1,25	0,60	1,00	
Quecksilber	mg/kg	54	0,01	194	4,87	1,00	1,57	
Antimon	mg/kg	7	0,60	60,0	10,7	3,30	27,0	
Arsen	mg/kg	43	0,10	20,0	3,38	1,00	10,0	
Blei	mg/kg	50	0,10	1.400	72,2	14,0	128	
Chrom (gesamt)	mg/kg	48	0,10	830	62,7	17,0	85,0	
Kobalt	mg/kg	4	0,90	50,0	15,9	6,35	38,0	
Kupfer	mg/kg	51	1,10	1.200	80,1	20,0	182	
Mangan	mg/kg	1	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	
Nickel	mg/kg	44	1,00	2.500	78,5	5,00	90,6	
Vanadium	mg/kg	5	1,00	20,0	8,84	1,70	20,0	
Zinn	mg/kg	6	1,00	35,0	14,8	13,5	29,0	

^{a)} angenommen, da inplausible Werte in LUA-Auswertung

Tabelle 48: Abfalldaten nach BZL – ASN 17 02 99 D1 Holz mit schädlichen Verunreinigungen (n = 240)

Parameter		n*	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90-Quantil	Anzahl Proben mit Wert 0
Eigenschaften:								
Heizwert	MJ/Mg	46	6.700	38.500	19.704	17.391	30.912	
Brennwert	MJ/Mg	25	7.400	42.800	22.228	19.400	38.000	
Zusammensetzung (FS):								
Trockensubstanz	%	72	26,3	99,9	90,5	92,8	99,3	
Wassergehalt	%	62	0,1	73,7	10,2	8,1	20,2	
Glührückstand	%	14	0,2	37,1	6,1	2,5	10,3	
Elementaranalyse (FS):								
Chlor	%	55	0,00	13,2	0,67	0,12	1,73	
Fluor	%	21	0,00	3,63	0,28	0,01	0,72	
Schwefel	%	47	0,01	2,57	0,30	0,13	0,61	
Schadstoffe, anorganisch (FS):								
Cadmium	mg/kg	43	0,00	290	7,32	0,40	1,21	14
Thallium	mg/kg	22	0,00	41,2	5,51	1,00	25,7	8
Quecksilber	mg/kg	44	0,00	485	29,5	0,37	4,50	6
Antimon	mg/kg	21	0,00	49,0	4,78	0,29	11,5	8
Arsen	mg/kg	34	0,00	760	33,5	1,85	26,6	7
Blei	mg/kg	35	0,00	315	40,4	12,0	80,2	2
Chrom (gesamt)	mg/kg	39	0,00	3.068	260	20,0	832	2
Kobalt	mg/kg	12	0,00	44,0	9,25	5,00	19,5	4
Kupfer	mg/kg	42	0,00	1.099	82,1	15,5	134	4
Mangan	mg/kg	14	20,0	117	64,0	68,5	91,2	0
Nickel	mg/kg	26	0,00	60,1	10,7	10,0	20,5	4
Vanadium	mg/kg	12	0,00	3,00	1,34	1,37	2,90	2
Zinn	mg/kg	18	0,00	180	27,5	8,00	89,3	4

Tabelle 49: Abfallarten nach ABANDA (STAT 279) – ASN 17 02 99 D1 Holz mit schädlichen Verunreinigungen (n = 14) (71)

Parameter		n*	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90-Quantil	Anzahl Proben mit Wert 0
Eigenschaften:								
Heizwert	MJ/Mg	10	17.400	26.300	19.642	18.700	22.088	
Brennwert	MJ/Mg	3	19.300	29.200	23.200	21.100	27.580	
Zusammensetzung (FS):								
Trockensubstanz	%	4	91,7	99,2	94,7	93,9	97,6	
Wassergehalt	%	4	0,8	22,3	8,8	6,1	17,4	
Glührückstand	%	0						
Elementaranalyse (FS):								
Chlor	%	9	0,01	0,60	0,14	0,07	0,33	
Fluor	%	5	0,01	0,72 ^{a)}	0,06 ^{a)}	0,25	0,03 ^{a)}	
Schwefel	%	8	0,10	0,43	0,20	0,16	0,35	
Schadstoffe, anorganisch (FS):								
Cadmium	mg/kg	13	0,02	1.750	135	0,70	1,00	
Thallium	mg/kg	7	0,01	1,80	0,63	0,50	1,32	
Quecksilber	mg/kg	13	0,05	5,35	0,64	0,13	0,67	
Antimon	mg/kg	2	0,50	2,00	1,25	1,25	1,85	
Arsen	mg/kg	13	0,01	27,3	5,03	1,70	9,40	
Blei	mg/kg	12	0,20	124	27,2	14,5	61,1	
Chrom (gesamt)	mg/kg	9	1,30	350	50,80	5,00	127	
Kobalt	mg/kg	1	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	
Kupfer	mg/kg	14	0,04	215	33,7	11,5	86,2	
Mangan	mg/kg	0						
Nickel	mg/kg	12	0,05	11,6	5,59	3,65	10,9	
Vanadium	mg/kg	1	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	
Zinn	mg/kg	2	0,50	7,00	3,75	3,75	6,35	

^{a)} angenommen, da inplausible Werte in LUA-Auswertung

Tabelle 50: Abfalldaten Anlagenbetreiber (Brennstoffmix, angeliefert an der existierenden Anlage) – mit Inputbeschränkung

Parameter		n*	Min.	Max.	Mittelwert	Median	90-Quantil	Anzahl Proben mit Wert 0
Eigenschaften:								
Heizwert	MJ/Mg	0				15.000 ^{a)}		
Brennwert	MJ/Mg	0						
Zusammensetzung (FS):								
Trockensubstanz	%	0						
Wassergehalt	%	170	10,4	56,0	34,2	34,6	40,6	
Glührückstand	%	0			16,3 ^{b)}	3,9 ^{b)}		
Elementaranalyse (FS):								
Chlor	%	165	0,010	0,119	0,039	0,033	0,073	0
Fluor	%	170	0,000	0,008	0,001	0,001	0,002	0
Schwefel	%	50	0,007	0,025	0,017	0,015	0,024	0
Schadstoffe, anorganisch (FS):								
Cadmium	mg/kg	142	0,09	0,65	0,32	0,30	0,53	0
Thallium	mg/kg	0						
Quecksilber	mg/kg	150	0,01	0,24	0,08	0,07	0,18	0
Antimon	mg/kg	0						
Arsen	mg/kg	159	0,13	4,3	0,95	0,69	2,5	0
Blei	mg/kg	159	12,7	122	48,0	40,2	84,0	0
Chrom (gesamt)	mg/kg	168	5,0	51,4	15,6	13,6	25,7	0
Kobalt	mg/kg	0						
Kupfer	mg/kg	166	3,6	60,7	11,3	9,1	18,0	0
Mangan	mg/kg	170	48,0	186	79,4	76,3	97,8	0
Nickel	mg/kg	170	1,3	19,2	3,1	2,6	4,1	0
Vanadium	mg/kg	0						
Zinn	mg/kg	170	0,09	68,0	1,9	1,2	2,5	0

^{a)} angenommen

^{b)} übernommen von 15 01 99 D1 für Berechnung Anteil Staub bzw. Asche/Schlacke

3.7.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die erhaltenen Berechnungsergebnisse für den virtuellen Teilstrom, der aus der Verbrennung der beantragten Abfallarten resultiert, dargestellt. Für die Bewertung wurden die folgenden Prüfwerte herangezogen:

- Reingas: 17. BImSchV, wie im Erlass des MUNLV (72)
- Staub sowie Asche/Schlacke: nach LAGA: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen – Technische Regeln –, hier: Zuordnungswerte für Feststoffuntersuchungen (= Z-Werte).

Die Bedeutung der einzelnen Z-Werte zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 51: Bedeutung der Zuordnungswerte (Z-Werte) nach LAGA

Z 0	<ul style="list-style-type: none"> • Böden sind uneingeschränkt nutzbar • wenn der Boden aus einer Bodenbehandlung stammt, ist der Einbau in besonders sensible Flächen nicht zulässig wie z.B. Kinderspielplätze, Bolzplätze, Schulhöfe (nicht versiegelt, Klein- und Hausgärten, Trinkwasserschutzgebiete (Zone I und II))
Z 1	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzlich gelten die Z 1.1-Werte. • Die Z 1.2-Werte gelten nur für Regionen mit mächtigen Deckschichten oberhalb des Grundwasserleiters. • Eingeschränkter offener Einbau möglich. Ein Einbau ist zulässig in <ul style="list-style-type: none"> - Park- und Freizeitanlagen - unbefestigten vegetationsarmen Flächen - unversiegelten Industrie-, Gewerbe- und Lagerflächen - bergbaulichen Rekultivierungsgebieten - nicht agrarisch genutzte Ökosysteme. • Ausgenommen hiervon sind: <ul style="list-style-type: none"> - Trinkwasserschutzgebiete (Zone III) - Heilquellenschutzgebiete - Überschwemmungsgebiete - Wohngebiete mit agrarischer Nutzung - Gebiete mit einem Grundwasserflurabstand von weniger als 1 m - Gebiete mit Staunässe
Z 2	<ul style="list-style-type: none"> • Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen möglich; z.B.: <ul style="list-style-type: none"> - Verwendung als Lärmschutzwall mit mineralischer Oberflächenabdichtung. - als Straßendamm unter einer wasserundurchlässigen Fahrbahndecke • Ausgenommen hiervon sind Trinkwasserschutzgebiete, Überschwemmungsgebiete, Gebiete mit Grundwasserständen über 1 m und Gebiete mit Staunässe. • Bei Überschreitung des Z2 beginnt die abfallrechtliche Überwachung. Hier ist für den Boden ein Entsorgungs- und Verwertungsnachweis zu führen.

3.7.4.1 Ergebnisse für ASN 15 01 99 D1 und 17 02 99 D1

Die folgenden Tabellen zeigen die Ergebnisse für die genannten Abfalldatenkollektive. Die Abfalldaten wurden in ihrer gesamten Streubreite ohne Eingriffe in den Datenbestand in die Rechnung eingegeben.

Tabelle 52: Ergebnisse SFA unter Verwendung der eigenen Abfalldaten für den ASN 15 01 99 D1 (n = 64)

Reingas MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	21,6	10	negativ				
HF, Tages-MW	0,52	1,0					
Cd/TI	0,000	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,03					
Summe SM	0,07	0,5					
Staub MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	0	1		5		10	
Quecksilber	0	0,5		2		10	
Arsen	0	20		30		100	
Blei	0	100		300		600	
Chrom	175	50	negativ	150	negativ	400	
Kupfer	266	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	619	40	negativ	100	negativ	400	negativ
Asche/Schlacke MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	0	1		5		10	
Quecksilber	0	0,5		2		10	
Arsen	0	20		30		100	
Blei	0	100		300		600	
Chrom	63	50	negativ	150		400	
Kupfer	232	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	2.669	40	negativ	100	negativ	400	negativ
Reingas 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	288	60,0	negativ				
HF, Tages-MW	4,6	4,0	negativ				
Cd/TI	0,050	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,05					
Summe SM	0,92	0,5	negativ				

Staub 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	226			5	negativ	10	negativ
Quecksilber	35			2	negativ	10	negativ
Arsen	27			30		100	
Blei	108			300		600	
Chrom	652			150	negativ	400	negativ
Kupfer	1.092			150	negativ	600	negativ
Nickel	2.310			100	negativ	400	negativ
Asche/Schlacke 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	75			5,0	negativ	10,0	negativ
Quecksilber	0			2,0		10,0	
Arsen	5			30		100	
Blei	56			300		600	
Chrom	235			150	negativ	400	
Kupfer	955			150	negativ	600	negativ
Nickel	9.963			100	negativ	400	negativ

Tabelle 53: Ergebnisse SFA unter Verwendung der Abfalldaten nach ABANDA (STAT-277) für den ASN 15 01 99 D1

Reingas MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	20,4	10	negativ				
HF, Tages-MW	0,35	1					
Cd/TI	0,001	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,03					
Summe SM	0,02	0,5					
Staub MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	17	1	negativ	5	negativ	10	negativ
Quecksilber	66	0,5	negativ	2	negativ	10	negativ
Arsen	31	20	negativ	30	negativ	100	
Blei	282	100	negativ	300		600	
Chrom	653	50	negativ	150	negativ	400	negativ
Kupfer	587	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	113	40	negativ	100	negativ	400	

Asche/Schlacke MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	6	1	negativ	5	negativ	10	
Quecksilber	1	0,5	negativ	2		10	
Arsen	6	20		30		100	
Blei	146	100	negativ	300		600	
Chrom	235	50	negativ	150	negativ	400	
Kupfer	513	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	485	40	negativ	100	negativ	400	negativ
Reingas 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	392	60	negativ				
HF, Tages-MW	0,70	4					
Cd/TL	0,004	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,05					
Summe SM	0,25	0,5					
Staub 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	37			5	negativ	10	negativ
Quecksilber	25			2	negativ	10	negativ
Arsen	75			30	negativ	100	
Blei	618			300	negativ	600	negativ
Chrom	783			150	negativ	400	negativ
Kupfer	1.282			150	negativ	600	negativ
Nickel	489			100	negativ	400	negativ
Asche/Schlacke 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	12			5	negativ	10	negativ
Quecksilber	0			2		10	
Arsen	14			30		100	
Blei	322			300	negativ	600	
Chrom	282			150	negativ	400	
Kupfer	1.121			150	negativ	600	negativ
Nickel	2.111			100	negativ	400	negativ

Tabelle 54: Ergebnisse SFA unter Verwendung der eigenen Abfalldaten für den ASN 17 02 99 D1

Reingas MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	16,0	10	negativ				
HF, Tages-MW	0,14	1					
Cd/TI	0,001	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,03					
Summe SM	0,04	0,5					
Staub MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	21	1	negativ	5	negativ	10	negativ
Quecksilber	38	0,5	negativ	2	negativ	10	negativ
Arsen	89	20	negativ	30	negativ	100	
Blei	374	100	negativ	300	negativ	600	
Chrom	1.186	50	negativ	150	negativ	400	negativ
Kupfer	702	50	negativ	150	negativ	600	negativ
Nickel	347	40	negativ	100	negativ	400	
Asche/Schlacke MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	7	1	negativ	5	negativ	10	
Quecksilber	0	0,5		2		10	
Arsen	16	20		30		100	
Blei	194	100	negativ	300		600	
Chrom	427	50	negativ	150	negativ	400	negativ
Kupfer	614	50	negativ	150	negativ	600	negativ
Nickel	1.499	40	negativ	100	negativ	400	negativ
Reingas 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	230	60	negativ				
HF, Tages-MW	9,8	4	negativ				
Cd/TI	0,021	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,05					
Summe SM	0,22	0,5					

Staub 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	27			5	negativ	10	negativ
Quecksilber	192			2	negativ	10	negativ
Arsen	536			30	negativ	100	negativ
Blei	1.041			300	negativ	600	negativ
Chrom	20.599			150	negativ	400	negativ
Kupfer	2.527			150	negativ	600	negativ
Nickel	298			100	negativ	400	
Asche/Schlacke 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	9			5	negativ	10	
Quecksilber	2			2		10	
Arsen	98			30	negativ	100	
Blei	541			300	negativ	600	
Chrom	7.413			150	negativ	400	negativ
Kupfer	2.209			150	negativ	600	negativ
Nickel	1.286			100	negativ	400	negativ

Tabelle 55: Ergebnisse SFA unter Verwendung der Abfalldaten nach ABANDA (STAT-279) für den ASN 17 02 99 D1

Reingas MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	8,9	10	negativ				
HF, Tages-MW	3,2	1					
Cd/TI	0,001	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,03					
Summe SM	0, 01	0,5					
Staub MEDIAN		Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	37	1	negativ	5	negativ	10	negativ
Quecksilber	13	0,5	negativ	2	negativ	10	negativ
Arsen	82	20	negativ	30	negativ	100	
Blei	451	100	negativ	300	negativ	600	
Chrom	296	50	negativ	150	negativ	400	
Kupfer	521	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	127	40	negativ	100	negativ	400	

Asche/Schlacke MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	12	1	negativ	5	negativ	10	negativ
Quecksilber	0	0,5		2		10	
Arsen	15	20		30		100	
Blei	234	100	negativ	300		600	
Chrom	107	50	negativ	150		400	
Kupfer	456	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	548	40	negativ	100	negativ	400	negativ
Reingas 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	74	60	negativ				
HF, Tages-MW	9,1	4	negativ				
Cd/TL	0,002	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,05					
Summe SM	0,51	0,5					
Staub 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	13			5	negativ	10	negativ
Quecksilber	17			2	negativ	10	negativ
Arsen	111			30	negativ	100	negativ
Blei	466			300	negativ	600	
Chrom	5.096			150	negativ	400	negativ
Kupfer	960			150	negativ	600	negativ
Nickel	93			100		400	
Asche/Schlacke 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	4			5		10	
Quecksilber	0			2		10	
Arsen	20			30		100	
Blei	242			300		600	
Chrom	1.832			150	negativ	400	negativ
Kupfer	840			150	negativ	600	negativ
Nickel	402			100	negativ	400	negativ

3.7.4.2 Ergebnisse für ASN 15 01 99 D1 und 17 02 99 D1 mit Inputbeschränkung

Der Betreiber der geplanten Altholzverbrennungsanlage hat die in Tabelle 56 wiedergegebenen Inputbegrenzungen für Halogene, Schwefel und Schwermetalle beantragt. Hierdurch

möchte er sicherstellen, dass keine Abfälle mit hohen Schadstoffbelastungen in seine Verbrennungsanlage gelangen.

Im Verlauf der Berechnungen stellte sich heraus, dass es zusätzlich erforderlich ist, auch eine Inputbeschränkung für Nickel festzulegen. Daher haben wir einen derartigen Wert ermittelt (200 mg/kg TS) und in die obige Rechnung integriert. Mit den dargestellten Inputbeschränkungen wurden die vorhandenen Datensätze für ASN 15 01 99 D1 und 17 02 99 D1 überarbeitet. Es wurden alle Werte herausgenommen, die die Inputgrenzwerte überschreiten. Die beantragten Inputgrenzwerte beziehen sich auf Trockensubstanz. Um sie vergleichbar zu machen bzw. auf die vorhandene Datenbasis anwenden zu können, wurden sie auf einen mittleren Wassergehalt von 35 % (Median des Brennstoffmixes, vgl. Tabelle 50) umgerechnet.

Diese rechnerische Vorgehensweise entspricht der Konsequenz einer exakten Vorgabe des anzuliefernden Brennstoffes auf Basis von Liefervereinbarungen und Deklarationsanalysen.

Tabelle 56: Inputbeschränkungen für Brennmaterial stückig, max. 13,5 Mg/h; Zusammensetzung gemäß Formular 3/Ausbaustufe II, Blatt 1.1

Parameter	Einheit in TS	Maximalwert	Einheit in FS	Maximalwert
				bei 35 % Feuchte
Chlor (Elementaranalyse)	% TS	0,20	% FS	0,13
Fluor (Elementaranalyse)	% TS	0,02	% FS	0,013
Schwefel	% TS	0,04	% FS	0,026
Arsen	mg/kg TS	10	mg/kg FS	6,5
Blei	mg/kg TS	200	mg/kg FS	130
Cadmium	mg/kg TS	1,0	mg/kg FS	0,65
Chrom (gesamt)	mg/kg TS	100	mg/kg FS	65
Kupfer	mg/kg TS	100	mg/kg FS	65
Quecksilber	mg/kg TS	0,4	mg/kg FS	0,26

Das Ergebnis dieser Berechnung ist in den folgenden beiden Tabellen dokumentiert.

Tabelle 57: Ergebnisse SFA unter Verwendung der eigenen Abfalldaten für den ASN 15 01 99 D1 – mit Inputbeschränkung

Reingas MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	10,8	10	negativ				
HF, Tages-MW	0,13	1					
Cd/TI	0,000	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,03					
Summe SM	0,03	0,5					
Staub MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	0	1		5		10	
Quecksilber	0	0,5		2		10	
Arsen	0	20		30		100	
Blei	0	100		300		600	
Chrom	79	50	negativ	150		400	
Kupfer	103	50	negativ	150		600	
Nickel	113	40	negativ	100	Negativ	400	
Asche/Schlacke MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	0	1		5		10	
Quecksilber	0	0,5		2		10	
Arsen	0	20		30		100	
Blei	0	100		300		600	
Chrom	28	50		150		400	
Kupfer	90	50	negativ	150		600	
Nickel	485	40	negativ	100	Negativ	400	negativ
Reingas 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	13,2	60					
HF, Tages-MW	0,15	4					
Cd/TI	0,033	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,05					
Summe SM	0,15	0,5					

Staub 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	4			5		10	
Quecksilber	0,3			2		10	
Arsen	3			30		100	
Blei	54			300		600	
Chrom	304			150	Negativ	400	
Kupfer	155			150	Negativ	600	
Nickel	270			100	Negativ	400	
Asche/Schlacke 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	1,3			5		10	
Quecksilber	0,004			2		10	
Arsen	0,6			30		100	
Blei	28			300		600	
Chrom	109			150		400	
Kupfer	135			150		600	
Nickel	1.165			100	negativ	400	negativ

Tabelle 58: Ergebnisse SFA unter Verwendung der eigenen Abfalldaten für den ASN 17 02 99 D1 – mit Inputbeschränkung

Reingas MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	9,7	10					
HF, Tages-MW	0,09	1					
Cd/TI	0,001	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00	0,03					
Summe SM	0,03	0,5					
Staub MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	0	1		5		10	
Quecksilber	10	0,5	negativ	2	negativ	10	
Arsen	48	20	negativ	30	negativ	100	
Blei	361	100	negativ	300	negativ	600	
Chrom	473	50	negativ	150	negativ	400	negativ
Kupfer	392	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	347	40	negativ	100	negativ	400	

Asche/Schlacke MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	0	1		5		10	
Quecksilber	0,1	0,5		2		10	
Arsen	8,8	20		30		100	
Blei	187	100	negativ	300		600	
Chrom	170	50	negativ	150	negativ	400	
Kupfer	343	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	1.499	40	negativ	100	negativ	400	negativ
Reingas 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	15,96	60					
HF, Tages-MW	0,14	4					
Cd/TI	0,021	0,05					
Reingas 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
Hg; Tages-MW	0,00	0,05					
Summe SM	0,09	0,5					
Staub 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	10			5	negativ	10	
Quecksilber	9			2	negativ	10	
Arsen	86			30	negativ	100	
Blei	678			300	negativ	600	negativ
Chrom	631			150	negativ	400	negativ
Kupfer	700			150	negativ	600	negativ
Nickel	298			100	negativ	400	
Asche/Schlacke 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	3			5		10	
Quecksilber	0,1			2		10	
Arsen	16			30		100	
Blei	353			300	negativ	600	
Chrom	227			150	negativ	400	
Kupfer	612			150	negativ	600	negativ
Nickel	1.286			100	negativ	400	negativ

3.7.4.3 Vergleich mit den sonstigen zur Verbrennung beantragten Abfällen

Zusätzlich zu den genannten besonders überwachungsbedürftigen Abfällen werden auch eine Reihe weiterer Holzabfallarten eingesetzt. Dies erfolgt in Form eines von einem Vorlieferanten zusammengestellten Brennstoffmixes (vgl. Tabelle 50). Hierbei verpflichtet sich der Lieferant, die Vorgaben des Betreibers einzuhalten, insbesondere im Hinblick auf die für die geplante Holzverbrennungsanlage beantragten Inputbeschränkungen. Diese Lieferungen werden vom Auftraggeber routinemäßig kontrolliert. Mit den aggregierten Daten dieses vermischten Abfallinputs wurde ebenfalls geprüft, welche Resultate die Stoffflussanalyse liefert.

Tabelle 59: Ergebnisse SFA unter Verwendung der Abfalldaten des Betreibers für Brennstoffmix – mit Inputbeschränkung

Reingas MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	5,06	10					
HF, Tages-MW	0,02	1					
Cd/Tl	0,0003	0,05					
Hg; Tages-MW	0,00005	0,03					
Summe SM	0,015	0,5					
Staub MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	10,6	1	negativ	5	negativ	10	negativ
Quecksilber	4,5	0,5	negativ	2	negativ	10	
Arsen	21,4	20	negativ	30		100	
Blei	809	100	negativ	300	negativ	600	negativ
Chrom	523	50	negativ	150	negativ	400	negativ
Kupfer	267	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	58,0	40	negativ	100		400	
Asche/Schlacke MEDIAN	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/kg) Z0	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	3,5	1	negativ	5		10	
Quecksilber	0,06	0,5		2		10	
Arsen	3,9	20		30		100	
Blei	421	100	negativ	300	negativ	600	
Chrom	188	50	negativ	150	negativ	400	
Kupfer	233	50	negativ	150	negativ	600	
Nickel	250	40	negativ	100	negativ	400	

Reingas 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom	Prüfwert (mg/m ³)	Bewertung				
HCl, Tages-MW	11,3	60					
HF, Tages-MW	0,03	4					
Cd/TI	0,0005	0,05					
Hg; Tages-MW	0,0001	0,05					
Summe SM	0,026	0,5					
Staub 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	4,4			5		10	
Quecksilber	2,8			2	negativ	10	
Arsen	18,5			30		100	
Blei	406			300	negativ	600	
Chrom	237			150	negativ	400	
Kupfer	127			150		600	
Nickel	22,4			100		400	
Asche/Schlacke 90-QUANTIL	Ergebnis im Teil- strom			Prüfwert (mg/kg) Z1.1	Bewertung	Prüfwert (mg/kg) Z2	Bewertung
Cadmium	1,5			5		10	
Quecksilber	0,04			2		10	
Arsen	3,4			30		100	
Blei	211			300		600	
Chrom	85			150		400	
Kupfer	111			150		600	
Nickel	96,5			100		400	

3.7.5 Fazit der SFA für eine Altholzverbrennungsanlage

Die obigen Ergebnisse ergeben folgendes Fazit:

1. Die Inputbeschränkungen für die genannten Abfallarten 15 01 99 D1 und 17 02 99 D1 sind wichtig, damit die bei diesen Abfallarten auftretenden höher belasteten Einzelchargen erkannt und einer anderweitigen Verwertung oder Beseitigung zugeführt werden.
2. Für die Inputbeschränkung ist es erforderlich, auch einen Wert für Nickel aufzunehmen. Es wurde ein Wert von 200 mg/kg TS bzw. 130 mg/kg FS vorgeschlagen.
3. Unter der Voraussetzung einer funktionierenden Inputkontrolle, die seitens der Vorlieferanten sicherzustellen ist, ergeben sich aus der Stoffflussanalyse keine Beanstandungen für den Luftpfad (im Teilstrom des einzelnen Abfalls betrachtet). Die geplante Anlage ist in der Lage, die genannten Abfälle schadlos zu verwerten.

4. Die im Teilstrom des einzelnen Abfalls für den Luftpfad festgestellten Überschreitungen für HCl (bzw. gemessene anorganische Chlorverbindungen) weisen darauf hin, dass dem Thema Chlor/PVC bei der Eingangskontrolle auf der Ebene der Vorlieferanten eine besondere Bedeutung beizumessen ist. Bezogen auf die durchgeführte Berechnung sind die Grenzwertüberschreitungen insoweit zu relativieren, als der Transferfaktor für Chlor bei einem mittleren Betriebsmitteleinsatz ermittelt wurde (Kalk, Herdofenkoks). Durch Erhöhung des Betriebsmitteleinsatzes verringert sich der Transferfaktor ins Reingas und dadurch auch die Reingaskonzentration. HF ist analog zu betrachten.
5. Die Berechnungen für das aufbereitete Abfall-Inputgemisch ergaben für den Luftpfad auch für die Elemente Chlor und Fluor keine Beanstandungen.
6. Die Ergebnisse für die anfallenden Stäube und Aschen zeigen, dass eine Verwertung im Straßen- und Wegebau oder vergleichbare Verwertungspfade nicht gewählt werden sollte. Der Antragsteller sollte Verwertungswege wählen, für die die ermittelten Belastungen kein Problem darstellen.

4 Kritische Analyse und Ausblick

Gerade das Praxisbeispiel (SRG-Anlage) hat gezeigt, dass die SFA für komplexere abfallrechtliche Beurteilungsfragen, je nach Einzelfall, mit weiteren Bewertungsmethoden zu kombinieren ist. Welche Methoden hierfür grundsätzlich in Frage kommen, ist im Kapitel 2 dieser Ausarbeitung grundsätzlich beschrieben worden.

4.1 Leistungsgrenzen der SFA

Die Praxisbeispiele haben, bei aller positiven Bewertung der gewonnenen Resultate auch einen Erfahrungsschatz über die Leistungsgrenzen und kritischen Randbedingungen für den Einsatz der Methode SFA angesammelt.

So ist die Belastbarkeit der gewonnenen Resultate von der jeweils durchgeführten Modellbildung abhängig. Ein interessantes Beispiel für dieses Problem ist oben für die Verwertung im Zementprozess beschrieben worden. So führt die Modellierung über die sog. „Black-box-Gleichung“ zu deutlich anderen Ergebnissen, als wenn die Modellierung über die Gleichung „Einbindegrad-mal-Abscheideleistung“ durchgeführt wird.

Für die Modellbildung ist es wichtig, die Wahl der Systemgrenzen korrekt durchzuführen. Die Systemgrenzen sind so zu wählen, dass der Prozess vollständig bilanziert wird.

Ein zweiter kritischer Punkt stellt die jeweils verwendete Datengrundlage dar. Hier unterscheidet sich die SFA zwar grundsätzlich nicht von den anderen hier erwähnten Bewertungsmethoden, dennoch verdient dieser Punkt in der praktischen Anwendung hohe Beachtung. Als Problemlösung hat sich in den dargestellten Praxisbeispielen, neben der Validierung der eingesetzten Daten die Durchführung einer sog. Sensitivitätsbetrachtung bewährt. Im Rahmen dieser Sensitivitätsbetrachtung sind die verwendeten Datengrundlagen zu variieren. So wurde oben dargestellt, wie die Transferfaktoren vom jeweiligen Standard der betrachteten Anlage abhängen. Im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung kann beispielsweise die Bandbreite vorhandener Anlagen durchgerechnet werden. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen dann, wie sensibel das Gesamtergebnis auf derartig veränderte Inputdaten reagiert.

Daher ist im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung zu untersuchen, ob ein Ergebnis stabil bleibt, wenn die jeweils gegebenen Bandbreiten der Daten (oder die Bandbreite der Datenunsicherheiten) berücksichtigt wird.

Ein weiterer kritischer Punkt bei der Durchführung von Stoffflussanalysen ist die Stabilität des Prozesses selbst. Dieser Aspekt gilt genaugenommen weniger für die eigentliche SFA, sondern für die Ermittlung der Basisdaten bei der Untersuchung bzw. Bilanzierung einer Anlage. Die hierfür durchzuführenden Bilanz-Messungen sollten zu einem Zeitpunkt durchge-

führt werden, an dem der Prozess insgesamt einen Gleichgewichtszustand erreicht hat. Auch dieses Problem kann gut am Beispiel der Verwertung von Abfällen im Zementprozess erläutert werden. Dort bauen sich, wenn der Prozess angefahren wird (oder wenn beispielsweise Inputmaterialien variiert werden) über sog. innere und äußere Kreisläufe die Gleichgewichtszustände erst über Stunden und zum Teil Tage auf. Eine Messung zum Zeitpunkt der sich aufbauenden Kreisläufe erfasst den Prozess außerhalb seines Gleichgewichtszustandes.

Schließlich haben sich in den beschriebenen Anwendungsfällen der SFA Bewertungsprobleme ergeben, die den Chemismus einzelner Elemente betreffen. So hängt beispielsweise die Flüchtigkeit von Elementen in einem thermischen Prozess auch von deren chemischer Verbindung ab. So sind Chloride in der Regel besonders flüchtig. Durch Veränderungen der chemischen Zusammensetzung eines Abfallstoffes könnte auf diesem Weg auch die Flüchtigkeit einzelner Elemente beeinflusst werden.

Dieses Problem kann eintreten, wenn die SFA in Form von Analogiebetrachtungen zwischen dem Anlagenverhalten mit Regelbrennstoff oder Abfall A zu Abfall B eingesetzt wird. In derartigen Anwendungsfällen ist dieser Aspekt daher im Rahmen der Sensitivitätsanalyse mit abzudecken. In Einzelfällen kann dies dazu führen, dass die Durchführung eines ergänzenden Messprogramms anzuraten sind.

Letztlich wird in den Diskussionen um die Reproduzierbarkeit von SFA-Ergebnissen auf die Ungenauigkeiten bei durchzuführenden Messungen (Emissionen/Transferfaktoren oder Abfallanalysen) hingewiesen.

Die Durchführung repräsentativer Analysen von Abfallgemischen ist in der Tat ein zu beachtendes und komplexes Thema. Hierüber ist an anderer Stelle viel untersucht und nachgedacht worden.

Für den Fall der Messungen an Anlagen bietet die SFA ein probates Kontrollmittel, um die Belastbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu prüfen. Die Messergebnisse können zu Stoffbilanzen umgerechnet werden. Da die Stoffbilanzen aufgehen müssen, also die Summe des Input auch als Summe des Outputs wieder auftauchen muss, ergibt sich hierüber eine Kontrolle der Messergebnisse. Sollten zu große Bilanzdifferenzen auftreten, kann dies ein Hinweis auf Messungenauigkeiten oder Messfehler sein, kann aber auch ein Hinweis darauf sein, dass der Prozess sich noch nicht im Gleichgewicht befand. Unabhängig von der Ursache für die beobachtete Bilanzdifferenz sind derartige Daten dann zu verwerfen.

4.2 Kombination mit anderen Methoden

Die SFA besticht im Praxistest aufgrund ihrer methodisch überschaubaren Struktur. Es konnte zudem gezeigt werden, dass die SFA für viele Bewertungen an der rechtlichen Schnittstelle zwischen Beseitigung und Verwertung, der Schadlosigkeitsanalyse und der Hochwertigkeitsforderung des KrW-/AbfG eingesetzt werden kann.

Dennoch kann eine umfassende Bewertungsaufgabe nach beispielsweise § 5 Abs. 5 KrW-/AbfG, also die vergleichende Bewertung unterschiedlicher abfallwirtschaftlicher Maßnahmen und die Erkennung der „umweltverträglicheren Maßnahme“ mit der SFA alleine nicht geleistet werden (vgl. Kap. 3.6, Fallbeispiel SRG-Anlage).

Hierfür kann in Ergänzung dann auf die Ökobilanz bzw. die ökobilanziell gestützte Untersuchung zurückgegriffen werden. Die Ökobilanz selbst, in ihrer umfassenden Form, kann nur Teile der ganze Bandbreite der aus Umweltschutzsicht zu betrachtenden Gesichtspunkte erfassen und bewerten (s.u.). Dennoch stellt die Ökobilanz sicherlich den umfänglichsten methodischen Ansatz zur Bewertung ökologischer Fragestellungen dar. Der Aufwand für die Durchführung einer Ökobilanz ist allerdings erheblich.

Im Rahmen eines Projektes für das nordrheinwestfälische Umweltministerium (73) wurde versucht, durch Erarbeitung eines einfachen ökobilanziellen Rechenprogramms (auf EXCEL-Basis) die Anwendbarkeit der Methode für die abfallrechtliche Praxis nutzbar zu machen. Hierzu fanden Testberechnungen und Arbeitsgespräche mit Mitarbeitern aus Immissionschutzbehörden in NRW statt. Die Einführung ökobilanzieller Methoden in die Entscheidungspraxis ist nur begrenzt gelungen, da trotz einer sehr weitgehenden Vereinfachung das Rechenprogramm komplex blieb. Ein weiteres Anwendungsproblem lag in der Tatsache begründet, dass ohne ein Grundverständnis für derartige Berechnungen die Validität der Inputdaten nur schwer beurteilt werden kann.

Daher bleibt die Ökobilanz sicherlich für die Bewertung herausragender Einzelfälle als Methode der Wahl erhalten, sie wird sich aber nicht in die konkrete abfallrechtliche Praxis einführen lassen.

Aber auch die Ökobilanz hat ihre Leistungsgrenzen und auch ihre methodisch bedingten Grenzen ihrer Aussagefähigkeit. Dies wird insbesondere an der Schnittstelle zur Umweltverträglichkeitsuntersuchung deutlich. Gerade die unmittelbaren Auswirkungen auf die Nachbarschaft einer Anlage werden über die Ökobilanz nicht abgebildet. Hier bietet die Umweltverträglichkeitsuntersuchung eine geeignetes ergänzendes Methodeninventar, um diese Lücke zu schließen.

Die Umweltverträglichkeitsuntersuchung ist für die Realisierung von neuen Anlagen im Bereich der Abfallwirtschaft gesetzlich vorgeschrieben. Aber auch wesentliche Änderungen von existierenden Anlagen (beispielsweise für die Erweiterung des Annahmekatalogs) können behördlicherseits mit der Forderung auf Durchführung einer Umweltverträglichkeitsuntersuchung verbunden werden.

Ökobilanz und Umweltverträglichkeitsuntersuchung stellen daher eine wichtige methodische Ergänzung für die Bewertung abfallwirtschaftlicher Maßnahmen dar. Beide Methoden sollten im übrigen für die Generierung ihrer Basisdaten auf die stoffflussanalytische Berechnung und Bilanzierung des betrachteten Prozesses aufbauen. Somit wird sich die weitere Bewertungsdiskussion für die genannten abfallrechtlichen Fragen nicht so sehr auf eine Entscheidung nach der richtigen Bewertungsmethode weiterentwickeln. Es hat sich nämlich in allen Praxisbeispielen gezeigt, auch bei der Durchführung komplexer Ökobilanzen (74, 75, 76), dass zunächst der zu betrachtende Prozess fachgerecht zu bilanzieren ist.

Daher wird die SFA zukünftig die Basismethode für die Bewertung abfallwirtschaftlicher Fragen darstellen und wird in Einzelfällen durch ergänzende Methoden zu erweitern sein. So ist es letztlich daher auch zu verstehen, dass Nordrhein-Westfalen als erstes Bundesland die SFA verbindlich als Beurteilungsmethode in seine immissionschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren eingeführt hat (72).

5 Gesamtfazit

Die Abgrenzung Verwertung zu Beseitigung (Abgrenzungsfrage) und die Umsetzung des Hochwertigkeitsgebots des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (für die Verwertung) bereitet erhebliche Probleme, – wobei man zwischen den rein rechtlichen Problemen und den eher naturwissenschaftlichen Problemen unterscheiden muss.

Es sollte mit diesem Beitrag eine naturwissenschaftliche Bewertungsmethode vorgestellt werden, die für viele dieser Fragestellungen eingesetzt werden kann: die Stoffflussanalyse (SFA).

Weiter sollte anhand von ausgewählten Praxisbeispielen die Leistungsfähigkeit aber auch die Leistungsgrenzen dieser Methode erläutert werden.

Im Rahmen einer abschließenden kritischen Analyse wurde ein Ausblick gegeben werden, wie sich die SFA in Kombination mit anderen Bewertungsmethoden zur Bearbeitung der Abgrenzungsfrage und des Hochwertigkeitsgebots in der Abfallwirtschaft einsetzen lässt.

Es zeigte sich anhand der vorgestellten Praxisbeispiele, dass die Stoffflussanalyse ein geeignetes Instrument darstellt, um die Abgrenzungsfrage und das Hochwertigkeitsgebot zu bearbeiten. Mit Hilfe der SFA sind beispielsweise die folgenden Anwendungsmöglichkeiten für Bewertungsprobleme zur Abfallmitverbrennung gegeben:

- Es kann prognostiziert werden, ohne dass der neu beantragte Abfall bereits eingesetzt wird im Rahmen eines Belastungsversuchs zur Feststellung, ob im „Abfallabgesteilstrom“ die Grenzwerte der 17. BImSchV eingehalten werden.
- Es kann für eine Anzahl von relevanten Abfallstoffen für in Rede stehende Prozesse errechnet werden, ob der Einsatz voraussichtlich ohne (Grenzwerte eingehalten) oder mit Beanstandungen verlaufen wird. Hierdurch ergibt sich eine *Positivliste*, für die ein beschleunigtes Genehmigungsverfahren durchgeführt werden könnte. Ebenfalls ergibt sich eine *Negativliste*, für die eine vertiefte Einzelfallprüfung erforderlich ist, sofern der Antragsteller auf den Einsatz des negativ gelisteten Abfalls besteht.
- Es besteht die Möglichkeit, für die Qualitätsüberwachung Maximalwerte (für den Abfallinput) abzuleiten, die eine ordnungsgemäße und schadlose Mitverbrennung sicherstellen.
- Es können dem Antragsteller im Falle von nicht möglicher Genehmigung des beantragten Abfalleinsatzes Kenngrößen mitgegeben werden, in wieweit er seinen Prozess optimieren muss (betrieblich oder durch Nachrüstung), um eine behördliche Zustimmung erteilt zu bekommen.
- Es besteht die Möglichkeit, vorgelegte Gutachten und Untersuchungsbefunde auf Plausibilität und Stimmigkeit zu prüfen.

- Es besteht die Möglichkeit, die erforderliche Festlegung von sog. „Mischgrenzwerten“ zu unterstützen, da die SFA erlaubt, sowohl die Situation im Abgasteilstrom aus Regelbrennstoffen, als auch im Abgasteilstrom aus Abfällen zu berechnen.
- Es besteht die Möglichkeit, das Emissionsniveau als Basisdatensatz für Prüfungen nach § 5 Abs. 5 zu berechnen.

Je nach Fallkonstellation ist die SFA durch weitere Bewertungsmethoden zu ergänzen.

Es wird empfohlen, dass sich die weitere Bewertungsdiskussion für die genannten abfallrechtlichen Fragen nicht so sehr auf eine Entscheidung nach der „richtigen“ naturwissenschaftlichen Bewertungsmethode weiterentwickeln. Es hat sich nämlich in allen mir bekannten Praxisbeispielen gezeigt, auch bei der Durchführung komplexer Ökobilanzen, dass zunächst der zu betrachtende Prozess fachgerecht zu bilanzieren ist. Ohne dieses Fundament kann keine fachgerechte Entscheidungshilfe für die angesprochenen Bewertungsfragen gefunden werden.

Für größere Vorhaben wird die Umweltverträglichkeitsuntersuchung durchzuführen sein, dies folgt allein aus der formalen rechtlichen Situation. Aber auch die UVU an der Schnittstelle von Verwertung und Beseitigung sollte auf der Basis einer fachlich soliden Bilanzierung des Prozesses durchgeführt werden.

Daher wird die SFA zukünftig die Basismethode für die Bewertung abfallwirtschaftlicher Fragen darstellen und wird in Einzelfällen durch ergänzende Methoden zu erweitern sein. So ist es letztlich daher auch zu verstehen, dass Nordrhein-Westfalen als erstes Bundesland die SFA verbindlich als Beurteilungsmethode in seine immissionschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren eingeführt hat (72).

6 Literaturverzeichnis

- 1 Lübke-Wolff G. (Hrsg): Umweltverträgliche Abfallverwertung. Nomos Verlagsgesellschaft Baden-Baden 2000
- 2 Baccini P., Brunner P.H.: Metabolism of the Anthroposphere. Springer-Verlag, Heidelberg, 1991
- 3 Fehringer R., Rechberger H., Pesonen H.-L., Brunner P.H.: Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich (ASTRA), Endbericht im Auftrag der ARGE Thermik, Wien, November 1997
- 4 Rechberger H.: Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Stoffbilanzen in der Abfallwirtschaft. Wiener Mitteilungen Wasser * Abwasser * Gewässer Band 158, Wien 1999
- 5 DIN EN ISO 14042, Punkt 5.3.2:
„Die nachstehenden Anforderungen gelten für die Auswahl der Wirkungskategorien, Indikatoren und Modelle:
 - a) Die Auswahl der Wirkungskategorien, Indikatoren und Charakterisierungsmodelle muss in Übereinstimmung mit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz-Studie stattfinden;
 - b) die Quellen für Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle müssen angegeben werden;
 - c) die Auswahl der Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle muss begründet werden;
 - d) für die Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren müssen korrekte und beschreibende Namen vorgesehen werden;
 - e) die Auswahl der Wirkungskategorien muss unter Berücksichtigung des Ziels und des Untersuchungsrahmens einen umfassenden Satz von mit dem zu untersuchenden Produktsystem verbundenen Umweltthemen widerspiegeln;
 - f) der Umweltwirkungsmechanismus und das Charakterisierungsmodell, das die Sachbilanzergebnisse zum Wirkungsindikator in Beziehung setzt und die Grundlage für die Charakterisierungsfaktoren liefert, müssen beschrieben werden;
 - g) es muss beschrieben werden, warum die Anwendung des Modells für die Ableitung des Indikators im Zusammenhang mit Ziel und Untersuchungsrahmen der Studie als geeignet angesehen wird.“
- 6 Lahl U., Kossina I., Angerer T., Zeschmar-Lahl B.: Unterschiedliche Ansätze zur Bewertung von Ökobilanzen am Beispiel der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. In: Wiemer K., Kern M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung IV. Witzhausen-Institut, 578-605, 2000
- 7 Lahl U., Zeschmar-Lahl B., Nottrodt A., Barin I.: Arbeitshilfe Kreislaufwirtschaft, erstellt im Auftrag des Landesumweltamtes NRW, November 1998
- 8 Lahl U., Zeschmar-Lahl B., Weiler, C.: Studie zu den abfallwirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der im Arbeitsentwurf einer Abfallverwaltungsvorschrift (AbfallVwV) vertretenen Rechtspositionen. August 2000

- 9 Schachermayer E., Bauer G., Ritter E., Brunner P.H.: Messung der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage. Bundesministerium für Umwelt, Wien: Monographien, Bd. 56, 1995
- 10 Brunner P.H. et al.: Güter- und Stoffbilanz der MVA Wels, ÖWAV-Bericht, 1997, hier: Tab. 441
- 11 MURL NRW: Arbeitshilfe Hochwertige und schadlose Verwertung für gewerbliche und industrielle Abfälle. Düsseldorf, März 2000, und darauf aufbauend: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Düsseldorf: Arbeitshilfe Stoffflussanalyse für abfallrechtliche Beurteilungsfragen bei Genehmigungsanträgen zur Mitverbrennung von Abfällen in Industrieanlagen. Juli 2000
- 12 Lahl U., Zeschmar-Lahl B., Angerer T.: Entwicklungspotenziale der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. Eine ökologische Analyse. Umweltbundesamt, Wien; Monographien, Band 125, Juni 2000
- 13 INFA GmbH, Ahlen, BZL GmbH, Oyten: Wissenschaftliche Beratung bei der Genehmigung der ConTherm-Anlage der VEW AG, im Auftrag des MURL NRW und der VEW Energie AG/Edelhoff Umweltservice GmbH & Co. KG, März, 2000
- 14 Ragossing, A., Nelles, M., Tesch, H., Hofer, M., Lorber, K.E.: Restabfallsplitting bzw. Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung vor der Verbrennung (MBRVV) im AWZ Halbenrain. Montanuniversität Leoben, August, 1999
- 15 ABANDA des LUA NRW, Entsorger, DPU
- 16 Fehringer R., Rechberger H., Pesonen H.-L., Brunner P.H.: Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich (ASTRA), Endbericht im Auftrag der ARGE Thermik, Wien, November 1997
- 17 BZL GmbH: Umfrage unter den MVA-Betreibern in Baden-Württemberg. Schreiben vom 21.03.2000 und entsprechende Antwortschreiben
- 18 Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen. Artikel 2 – Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen – (30. BImSchV). Beschluss des Bundeskabinetts vom 31. Januar 2001.
- 19 Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen und über biologische Abfallbehandlungsanlagen. Artikel 1 – Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (AbfAbIV). Beschluss des Bundeskabinetts vom 31. Januar 2001.
- 20 Lahl U., Zeschmar-Lahl B.: TOC-Grenzwerte (Eluat) für das nachsorgearme Deponieren von Restabfällen. Bewertung von Eluaten und Sickerwässern (organische Stoffe) aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung und der anschließenden Deponierung der Reststoffe/vorbehandelten Abfälle. ATV-Projekt Nr. 26/97, Dezember, 1997
- 21 Zeschmar-Lahl B., Jager J., Ketelsen K., Lahl U., Scheidl K., Steiner M., Heckmann A.: Mechanisch-biologische Abfallbehandlung in Europa. Hrsg.: VKS e.V., A.S.A. e.V., Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, 2000

- 22 aus: Harant M: „Stoffflussanalyse bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung vor der Deponierung“, Dissertation am Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben, Februar, 1999
- 23 gerechnet nach Nelles, Harant, Hofer et al: Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung vor der Deponie. Montanuniversität Leoben. Leoben, 1997
- 24 Mittelwert aus Untersuchungen von Ketelsen et al. (IBA Hannover): 22 Proben. Pers. Mitteilung, März, 2000
- 25 White, P.R., Franke, M., Hindle, P.: Integrated solide waste management – a lifecycle inventory. Blackie Academic & Professionals 1995
- 26 Zimmermann, P., et al.: Ökoinventare von Entsorgungsprozessen – Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen. ETH Zürich, ESU-Reihe 1/96
- 27 IFEU: Vergleich der Auswirkungen verschiedener Verfahren der Restabfallbehandlung auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit, Heidelberg, 1992
- 28 Gallenkemper, B., Braungart, M. et al.: Untersuchung zur Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit von Substitut-Brennstoffen. Rethmann Entsorgung, Dieselstr. 3, 44805 Bochum, 1999
- 29 Rentz O., Sasse H., Karl U., Schleef H.-J., Dorn R.: Maßnahmen zur Emissionsminderung bei stationären Quellen in der Bundesrepublik Deutschland. Band II: Minderung von Schwermetallemissionen. UBA-TEXTE 26/98, hier Tab. 5-11
- 30 Durch das Urteil des Bundesverwaltungsgerichts vom 15.06.2000 (BVerwG 3 C 4.00) hat sich die Meinung des Bundesumweltministeriums in dem wichtigen Teilbereich der Beurteilung der Mischabfälle durchgesetzt.
- 31 TÜV Umwelt, Regionalgruppe Anlagentechnik und Zuverlässigkeit, Labor Filderstadt Auftragsnummer 950004809, 1996
- 32 Proben aus den Jahren 1996–1999 der Firmen W., S., E., M. u.a., Quelle UVM Baden-Württemberg
- 33 AVG: Mitteilung von 23.5.2000
- 34 Reiter, B., Stroh, R.: Behandlung von Abfällen in der Zementindustrie. Umweltbundesamt Österreich, Monographien Band 72, Wien, 1995
- 35 Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Düsseldorf: Arbeitshilfe Stoffflussanalyse für abfallrechtliche Beurteilungsfragen bei Genehmigungsanträgen zur Mitverbrennung von Abfällen in Industrieanlagen. Juli 2000, hier: Anhang
- 36 Hessische Sonderabfallverbrennungsanlage: DPU: Zwischenbericht vom März 2000
- 37 Transferfaktoren einer Hamburger Sonderabfallverbrennungsanlage. AVG: Mitteilung von 23.5.2000 an BZL GmbH
- 38 siehe z.B. Bronstein/Semandjew: „Taschenbuch der Mathematik“
- 39 LAGA – Länderarbeitsgemeinschaft Abfall 1997: Maßstäbe und Kriterien für die energetische Verwertung von Abfällen in Zementwerken. Entwurf 31.10.1997
- 40 Lahl U., Zeschmar-Lahl, B., Weiler, C.: „Anforderungen an Ersatzbrennstoffe aus Abfällen für die Zementindustrie“. Studie im Auftrag des Umwelt- und Verkehrsministeriums Baden-Württemberg, 2000

- 41 Lahl U., Zeschmar-Lahl, B., Weiler, C.: Beurteilung der Umweltverträglichkeit von thermischen Entsorgungsmaßnahmen. Studie im Auftrag des MURL NRW, 1999; und darauf aufbauend: Ministerium für Umwelt, und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Arbeitshilfe "Stoffflussanalyse bei abfallrechtlichen Beurteilungsfragen"
- 42 Gallenkemper, B., Braungart, M. et al.: Untersuchung zur Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit von Substitut-Brennstoffen. Rethmann Entsorgung, Dieselstr. 3, 44805 Bochum, 1999
- 43 Winkler, Landesumweltamt NRW, diverse Publikationen, u.a. WINKLER H.-D.: Praxis der energetischen Verwertung von Abfällen in Nordrhein-Westfalen. In: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.): Zementwerke – NOx-Minderung – Abfallverwertung. Fachtagung am 2.7.1998 in Wackersdorf, Dokumentation, S. 65–98, 1998
- 44 Goosman, D., Constans, D., Woodford, J. et. al.: Metal Equilibration and Process Capture Efficiencies in Cement Kilns. AWMA International Specialty Conference on Waste Combustion in Boilers an Industrial Furnaces March, 1993
- 45 Modell Dr. Graf AG, Gerlafingen (CH)/BUWAL (CH): Beschreibung zum Stoffflussmodell des Zementwerks DR. GRAF AG (BESCHREI.DOC), und Stoffmodell in EXCEL (STOFLMOD.XLS), 20.1.2000
- 46 Fehring R., Rechberger H., Brunner H.P.: Positivlisten für Reststoffe in der Zementindustrie: Methoden und Ansätze (PRIZMA). Endbericht, im Auftrag der Vereinigung der österreichischen Zementindustrie. Wien, im Dezember 1999
- 47 Sprung S.: Technologische Probleme beim Brennen des Zementklinkers, Ursachen und Lösungen. Schriftenreihe der Zementindustrie (VDZ), Heft 43.
- 48 Merian. E.: Metals and their Compounds in the Environment. Verlag Chemie, Weinheim, 1991
- 49 VEBA: Knobloch W., Uckermann B.: Energetische Verwertung in Kraftwerken. VDI - 29.1.1997
- 50 BUWAL: Richtlinie Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. Bern 1998
- 51 Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V.: Informationen zum RAL-Gütezeichen Sekundärbrennstoffe. Entwurfsfassung Juni 2000
- 52 Lahl, U., Zeschmar-Lahl, B.: Emissionsprognose für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen im geplanten Heizwerk Mindener Industriehafen. Studie erstellt im Auftrag von ENERGOS ASA, 13.3.2000
- 53 R. Skjaeveland (ENERGOS): Mail vom 17.12.1999 und vom 28.01.2000
- 54 R. Skjaeveland (ENERGOS): Mail vom 21.12.1999
- 55 Fax Herr Wohlwend, MVA Bielefeld-Herford, 10-3-2000
- 56 PHYLLIS database biomass: <http://www.ecn.nl/phyllis/>
- 57 LUFA Bonn, zit. in: Poletschny, Verwertung biologischer Abfälle, Hrsg.: Wiemer/Kern, 1994, S. 79
- 58 LUFA Speyer, zit. in: Müllhandbuch Kz. 6563, S. 5
- 59 Klärschlammqualität der Kläranlagen in NRW, Basis Jahresmittelwerte der Einzelanlagen; Quelle: LUA-Kataster, Recherche IFEU, Mail vom 10.3.2000

- 60 INFA GmbH, Ahlen/BZL GmbH, Oyten: Leitfaden Energetische Verwertung. Studie im Auftrag des MURL NRW, 1999/2000
- 61 Heering B.-M. , Heering M., Grüneklee E.: Schwermetallentfrachtung durch das Trockenstabilisierverfahren. Wasser und Abfall 4, 20 – 23, 1999
- 62 IBA GmbH: Daten aus der wissenschaftlichen Begleitforschung an den drei niedersächsischen Demonstrationsanlagen; Veröffentlichung in Vorbereitung
- 63 Lahl, U., Zeschmar-Lahl, B.: Abfallwirtschaftliches Gutachten für die Bezirksregierung Detmold zum Änderungsgenehmigungsantrag der Sandregenerierung (SRG) Lage vom 28.05.1998. 26. Januar 1999
- 64 Tauber C.: Einzeluntersuchungen zum Einfluss heutiger Kraftwerkstechnik auf die Entstehung von Flugaschen und deren Umweltbeeinflussungen insbesondere durch Spurenelemente. Verlag TÜV-Rheinland, 1988
- 65 Leuchs W. (LUA NRW): Verwertung von Massenabfällen in NRW. Situation – Probleme – Problemlösungen. Tagungsband des 11. Aachener Kolloquiums Abfallwirtschaft im Dezember 1997, RWTH Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft, 1998
- 66 BZL GmbH: Abschlußbericht Stoffflussanalyse für einen Antrag nach BImSchG – BE 80-1 – Ausbaustufe II, neues Kraftwerk. Auftraggeber: PFLEIDERER Holzwerkstoffe GmbH & Co. KG. Oyten, den 30. März 2001
- 67 Siehe Kapitel 1.4 (Maßnahmen zum Umweltschutz) des Genehmigungsantrags Pfeleiderer Werk Rheda vom Februar 2001 und e-Mail vom 06.03.2001 (Herr Santak)
- 68 Mitteilung Herr Santak (Pfeleiderer): Schreiben vom 22.02.2001
- 69 BZL GmbH: Emissionsprognose für den Einsatz von Sekundärbrennstoffen im geplanten Heizwerk Mindener Industriehafen. Studie erstellt im Auftrag von ENERGOS ASA, 13.3.2000
- 70 Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Abfallanalysendatenbank. Auswertung ‚Abgleich von Analysen, Regelwerken und Statistiken‘. STAT-277, L_150199D1.PFD, 07.03.2001
- 71 Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen: Abfallanalysendatenbank. Auswertung ‚Abgleich von Analysen, Regelwerken und Statistiken‘. STAT-277, L_170299D1.PFD, 07.03.2001
- 72 Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Düsseldorf: Arbeitshilfe Stoffflussanalyse für abfallrechtliche Beurteilungsfragen bei Genehmigungsanträgen zur Mitverbrennung von Abfällen in Industrieanlagen. Juli 2000
- 73 Lahl U., Zeschmar-Lahl B., Nottrodt A., Barin I.: Arbeitshilfe Kreislaufwirtschaft, erstellt im Auftrag des Landesumweltamtes NRW, November 1998, Fassung vom März 2000
- 74 IBA GmbH, Hannover, BZL GmbH, Oyten, CUTEC GmbH, Clausthal-Zellerfeld: Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen. F + E- Vorhaben Nr. 1471 114 im Auftrag des BMBF/UBA, 1998
- 75 BZL GmbH: Defizitanalyse Ökobilanzen DSD. Rohstoffliche Verwertung von getrennt erfassten LVP-Verpackungen oder Mitbenutzung der Restmülltonne? Erstellt im Auftrag der Landbell AG. Oyten, den 16. Mai 2001

- 76 Lahl U., Zeschmar-Lahl B., Angerer T.: Entwicklungspotenziale der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung. Eine ökologische Analyse. Umweltbundesamt, Wien; Monographien, Band 125, Juni 2000