



Forschungszentrum Karlsruhe
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 7277

Kohlendioxidemissionen einer Sonderabfallverbrennungsanlage

T. Reinhardt, U. Richers, H. Suchomel
Institut für Technische Chemie

März 2007

Forschungszentrum Karlsruhe

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7277

Kohlendioxidemissionen einer Sonderabfallverbrennungsanlage

T. Reinhardt*, U. Richers, H. Suchomel**

Institut für Technische Chemie

* "Gemeinsame Forschungsstelle Industrielle Stoffkreisläufe", eine Kooperation der
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, der Technischen Universität Darmstadt und der HIM
GmbH.

** HIM GmbH, Biebesheim

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2007

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

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

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-072770

Zusammenfassung

Kohlendioxidemissionen und Kohlenstoffbilanz einer Sonderabfallverbrennungsanlage

Das Kyoto-Protokoll von 1997 sieht als verbindliches Gesamtziel die Emissionsminderung klimawirksamer Gase vor; für die Industriestaaten wurden individuelle Minderungsziele festgelegt. Außerdem ist ein Handel mit zertifizierten Emissionsreduktionen als ökonomischer Mechanismus zum Erreichen dieser Minderungsziele ein weiterer Bestandteil des Kyoto-Protokolls. Die Grundlage für ein Handelssystem mit Treibhausgasemissionszertifikaten in Europa wurde mit der Richtlinie 2003/87/EG geschaffen. Die Umsetzung der Richtlinie erfolgte in Deutschland durch das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) sowie ergänzende Gesetze und Verordnungen. Abfallverbrennungsanlagen werden zwar von diesem Gesetz bislang nicht erfasst, eine spätere Berücksichtigung ist allerdings möglich. Grundsätzlich wird aber auch die Abfallwirtschaft zukünftig verstärkt im Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt und der Rohstoffproblematik diskutiert werden.

In diesem Zusammenhang kommt dem Anteil sog. regenerativer Materialien im Abfall eine große Bedeutung zu. Die Verbrennung dieser Materialien wird als CO₂-neutral angesehen und die resultierenden CO₂-Emissionen müssen nicht durch Emissionszertifikate gedeckt werden. Da sich aber die Zuteilung der Emissionszertifikate am Umfang der gesamten CO₂-Emissionen orientiert, können nicht benötigte Zertifikate am Markt veräußert werden.

Der Anteil regenerativer Materialien im Hausmüll beträgt bis zu 65 % (bezogen auf die Feuchtsubstanz); sie stellen 50 - 60 % des Kohlenstoffinventars. Entsprechende Information für Sonderabfälle fehlen bislang. Um einen besseren Überblick über die Situation bei der Sonderabfallverbrennung zu erhalten, wurde ein Forschungsprojekt an der Anlage der HIM GmbH in Biebesheim durchgeführt. Diese Anlage mit einer Gesamtkapazität von ca. 16 t/h verfügt über 2 identische Verbrennungslinien. Diese sind jeweils mit einer Drehrohrfeuerung, einer Nachbrennkammer und einem Kessel ausgestattet. Die Rauchgasreinigung umfasst Sprühtrockner, Elektrofilter, ein vierstufiges Wäschersystem und ein Flugstromverfahren.

Im Rahmen des durchgeführten Projekts wurden über einen ausgedehnten Zeitraum die CO₂-Emissionen gemessen und der Abfallinput in die Verbrennungsanlage gesichtet. Für die Berechnung der Kohlenstoffbilanz wurde der Bedarf an Hilfschemikalien in der Rauchgasreinigung, der Heizölverbrauch und die Emissionen anderer kohlenstoffhaltiger Substanzen berücksichtigt. In weiteren Untersuchungen wurde der Anteil an regenerativen Materialien im Sonderabfall mit Hilfe der ¹⁴C-Analytik experimentell bestimmt.

Hochgerechnet auf ein vollständiges Betriebsjahr resultiert aus der Verbrennung von 123.204 t Sonderabfall eine als CO₂ emittierte Kohlenstoffmenge von 24.177 t pro Jahr. Aus der Kohlenstoffbilanz ergibt sich ferner, dass nur 230 t Kohlenstoff als Heizöl oder als Additiv der Rauchgasreinigung in den Bilanzraum eintreten, so dass der überwiegende Anteil des Kohlenstoffs dem verbrannten Abfall zugeordnet werden kann. Der Massenanteil des Kohlenstoffs im verbrannten Sonderabfall (bezogen auf die Feuchtsubstanz) beträgt rund 20 % (Restmüll: 20 – 30 %).

Auf der Basis der ¹⁴C-Analyse ergibt sich, dass der Anteil des regenerativen Kohlenstoffs am Gesamtkohlenstoff im verbrannten Sonderabfall im Bereich von 10 % liegt. Unter Berücksichtigung des im Vergleich mit Kunststoffen und anderen Materialien aus fossilen Rohstoffen geringeren Massenanteils von Kohlenstoff in erneuerbaren Materialien kann ein Anteil von bis zu 8 % des Inputs als regenerativ klassifiziert werden. Für die betrachtete Anlage konnte kein Ansatzpunkt für eine direkte Minderung der Kohlendioxidemissionen identifiziert werden.

Abstract

Carbon Dioxide Emissions and Carbon Balance of a Hazardous Solid Waste Incineration Plant

The Kyoto-Protocol defines global as well as individual binding goals for the reduction of so-called "green-house-gas" emissions. Trading of certificated emission rights is one of the instruments to achieve these goals. Within the EU, trading of certificated emission rights is regulated by the directive 2003/87/EU. In Germany, this directive was transferred into national legislation by release of the Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) and additional laws and ordinances. At time, waste incineration plants are not subject of these regulations, but have to be considered as possible in the near future. Nevertheless, waste management has to be discussed in regard of its contribution to the greenhouse effect and in the context of the sustainable management of resources.

In this situation the knowledge of the amount of so-called renewable materials in waste to be incinerated is essential: The incineration of renewable materials is regarded as "CO₂-neutral" and certificated emission rights are not necessary. Since certificated emission rights are allocated on the basis of the total CO₂ emission, not required emission rights can be sold at the market.

The amount of renewable material within municipal solid waste is in the range of 65 % - representing 50 - 60 % of the total carbon. Suitable information for hazardous waste is not available yet. To get a better idea about the situation regarding hazardous waste incineration, an investigation had been performed at the plant of the HIM GmbH in Biebesheim, Germany. This plant has two identical incineration lines for hazardous waste with a total capacity of about 16 t/h. Each line is equipped with a rotary kiln furnace, followed by a secondary combustion chamber and a boiler. The flue gas cleaning is performed by means of a spray-dryer, an electrostatic filter, a four stage scrubber system and an entrained flow reactor system.

In this investigation, carbon dioxide emissions have been measured and the waste input materials were monitored. For calculating a carbon balance the need of auxiliary chemicals in the flue gas cleaning system, the consumption of fuel oil and the emissions of other carbon containing substances had to be considered. In an additional experiment, the classification of the amount of renewable materials in hazardous waste was performed by measuring the fraction of ¹⁴C in the emitted carbon dioxide.

The data for the carbon mass balances were collected over a longer period. Calculated for a whole year of operation a total amount of 123.204 t hazardous waste had been incinerated and about 24.177 t of carbon was emitted as carbon dioxide. Since only about 230 t of carbon entered the system as fuel oil or additive, most of the carbon derived from waste material. Based on this balance the total amount of carbon in hazardous waste was calculated to be about 20 % (residual household waste: 20 – 30 %).

On the basis of ¹⁴C-measurement the amount of renewable carbon in the emitted carbon-dioxide was determined to be about 10 %. Taking into account the wider range of carbon in renewable organic matter – compared to plastics and other materials arising from fossil carbon sources – a fraction of up to 8 % of the waste input can be classified as renewable.

The work carried out showed no possibilities for directly accessible reductions of carbon dioxide by optimization of plant operation, for example by reducing the consumption of fuel oil or carbon containing additive, which is used in the flue gas cleaning system.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Aufgabenstellung	2
3	Grundlagen der Klimaproblematik	4
3.1	Klima	4
3.2	Treibhauseffekt	5
3.3	Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt	7
3.4	Treibhauspotential	9
3.5	Globaler Stoffkreislauf: Kohlenstoff	10
3.6	Klimamodelle und –prognosen	11
4	Politische Aktivitäten und rechtliche Vorschriften	13
4.1	Kyoto-Protokoll	13
4.2	Europäische Umsetzung und Emissionshandel	14
4.3	Nationale Umsetzung des Emissionshandels	17
4.3.1	Nationaler Allokationsplan (NAP)	18
4.3.2	Zuteilungs-Gesetz und Zuteilungs-Verordnung	19
4.4	Weitere Rechtsvorschriften	20
4.4.1	Abfallrecht	20
4.4.2	Bundesimmissionsschutzrecht	21
5	Grundlagen der Sonderabfallverbrennung	21
5.1	Die Anlage am Standort Biebesheim	22
6	CO₂-Emissionen der Anlage	26
6.1	Messung der CO₂-Emissionen	27
6.2	Ergebnisse der CO₂-Messungen	28
7	Bestimmung des regenerativen Kohlenstoffanteils	31
7.1	Vergleich der Möglichkeiten für die Bestimmung des Anteils regenerativer Materialien im Abfall	33
7.1.1	Direkte Bestimmung durch Analyse der Abfälle	33
7.1.2	Bestimmung mit einer Modellrechnung	33
7.1.3	Bestimmung über Isotopenmessung	34
7.2	Bestimmung des Anteils regenerativer Materialien im Abfallinput der Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim	36
7.2.1	Auswertung verfügbarer Abfalldaten	36
7.2.2	Sichtung der Abfälle und Abschätzung des Anteils regenerativer Materialien mittels Modellbildung	37
7.2.3	Bestimmung des Anteils regenerativer Materialien mittels Radio-Carbonmethode	40
8	Kohlenstoffbilanz der Anlage Biebesheim	40
9	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	44
10	Literatur	47

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Strahlungsbilanz der Erde.	6
Abbildung 2:	Absorptionsbanden verschiedener Treibhausgase für den Bereich infraroter Wärmestrahlung	7
Abbildung 3:	Atmosphärische Konzentration von Spurengasen und deren Veränderung über die Zeit an ausgewählten Beobachtungsstandorten	8
Abbildung 4:	Schema der Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim	23
Abbildung 5:	Teilansicht des Abfalllagers am Standort Biebesheim.....	23
Abbildung 6:	Seitenansicht des Drehrohrofens.....	24
Abbildung 7:	Emissionsgrenzwerte (Tagesmittelwerte) im Vergleich zu Messdaten für die Anlage in Biebesheim.....	26
Abbildung 8:	Schema eines NDIR-Analysators.....	27
Abbildung 9:	CO ₂ -Konzentrationen im Reingas der Linie 1 am Standort Biebesheim.....	29
Abbildung 10:	Gemittelte CO ₂ -Konzentrationen, Rauchgasvolumenströme und berechnete CO ₂ -Emissionen.....	31
Abbildung 11:	Marktpreisentwicklung und Handelsvolumen für EU- Emissionsberechtigungen.....	32
Abbildung 12:	"Suess-Effekt" überlagert vom "Bomb- Peak"	35
Abbildung 13:	Bandbreite der Ergebnisinterpretation der Radio-Carbonmethode.....	36
Abbildung 14:	Charge mit erkennbar hohem Anteil regenerativer Materialien.	38
Abbildung 15:	Bilanzraum für die Kohlenstoffbilanz.....	41
Abbildung 16:	Kohlenstoffbilanz für die Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim - bezogen auf ein Betriebsjahr.....	42
Abbildung 17:	Kohlenstoffbilanz für die Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim - bezogen auf 1 Tonne Abfall.....	43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Spezifisches Treibhauspotential (Global Warming Potential), bezogen auf CO ₂ , bei Zeithorizonten von 20, 100 und 500 Jahren	9
Tabelle 2:	Anteil der gewichteten Treibhausgasemissionen an den Gesamtemissionen der Industriestaaten in 1990	10
Tabelle 3:	Handelsperioden und Nationale Allokationspläne.....	18
Tabelle 4:	Emissionswerte der Sonderabfallverbrennungsanlage Biebesheim.....	25
Tabelle 5:	Kohlenstoffgehalt – fossil und biogen (bzw. regenerativ) - in ausgewählten Abfällen	34
Tabelle 6:	Parameter der Deklarationsanalyse und Identifikationsanalyse bei der Entsorgung von Abfällen am Standort Biebesheim.....	37
Tabelle 7:	Abschätzung des Anteils regenerativer Materialien bzw. des regenerativen C-Inventars im Abfallinput der SAV in Biebesheim.	39
Tabelle 8:	Ergebnisse der experimentellen 14C-Bestimmung.....	40

1 Einleitung

Die kontroverse Diskussion in Deutschland über die Abfallentsorgung, insbesondere die Abfallverbrennung, erstreckt sich über Jahrzehnte und ist noch nicht beendet. Die Ursache für diesen langen Zeitraum sind einerseits verschiedene Aspekte mit Umweltbezug. Andererseits gehören äußere Rahmenbedingungen wie neue europäische Richtlinien oder die weltweite Rohstoffproblematik dazu.

Bis heute bilden die Diskussionen über die Emissionen aus Verbrennungsanlagen, die in den 80er Jahren begonnen haben, einen Mittelpunkt. Einen weiteren Aspekt stellten die Kosten der Abfallbehandlung dar. Auch geänderte politische Auffassungen waren die Basis für intensive Diskussionen über abfallwirtschaftliche Themen und die Entwicklung neuer Entsorgungstechniken. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang die TA Siedlungsabfall [TA Si] mit der Forderung nach einer weitgehenden thermischen Behandlung von Abfällen, die nach einem Regierungswechsel durch die Ablagerungsverordnung [AbfAbIV] mit Förderung der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung weitgehend ersetzt worden ist.

Heute werden abfallwirtschaftliche Themen zusätzlich unter dem Einfluss von Klimaproblematik, Emissionshandel und Ressourcenproblematik diskutiert. Neben Umweltgesichtspunkten durch direkte Ressourcenschonung bekommen wirtschaftliche Argumente aufgrund der gestiegenen Rohstoffpreise eine wachsende Bedeutung.

Die aufgeführten Aspekte und Rahmenbedingungen mit Einfluss auf die Diskussion um die Abfallwirtschaft sind nicht unabhängig voneinander, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Außerdem ist zu beachten, dass sich die Debatten über einzelne Themen, u.a. aufgrund neuer europäischer Richtlinien, wiederholen.

Geführt werden diese Diskussionen überwiegend im Zusammenhang mit der Entsorgung von Hausmüll (Siehe z.B. [Dehoust 2002] [Dehoust 2005] [Johnke 2003] [Johnke 2004]). Auf der anderen Seite ist zusätzlich die Entsorgung von Abfällen aus Gewerbe- und Industriebetrieben zu berücksichtigen, zu denen auch die sogenannten Sonderabfälle gehören.

Geht man von einer allgemeinen Vorstellung über Sonderabfälle aus, so stammen diese Abfälle vorwiegend aus gewerblichen Unternehmungen. Sonderabfälle können bedingt durch ihre chemischen Zusammensetzung oder Konsistenz in der Regel nicht zusammen mit Restmüll aus privaten Haushalten entsorgt werden. Außerdem müssen an die Überwachung und Entsorgung von Sonderabfällen aufgrund ihrer eventuell schädlichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt besondere Anforderungen gestellt werden. Eine genaue Definition von Sonderabfällen gibt es in bundesdeutschen Rechtsvorschriften allerdings nicht, so dass für eine genauere Beschreibung die physikalischen und chemischen Eigenschaften und Vorschriften aus dem Abfallrecht herangezogen werden müssen.

Diese Charakterisierung von Sonderabfällen ergibt sich auch aus § 15 Abs. 3 Satz 2 des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes [KrW-/AbfG]. Entsprechend diesem Paragraphen können die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger solche Abfälle von ihrer Beseitigungspflicht ausnehmen, die "nach Art, Menge oder Beschaffenheit nicht mit den in Haushaltungen anfallenden Abfällen beseitigt werden können". Aufgrund dieses Ausschlusses von der kommunalen Hausmüllentsorgung sind die Abfallbesitzer selbst verpflichtet, eine ordnungsmäßige Entsorgung dieser Sonderabfälle durchzuführen.

In der Regel werden von dem öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger Abfälle von der Beseitigungspflicht ausgenommen, die in der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) [AVV] als besonders überwachungsbedürftige bzw. gefährliche Abfälle aufgelistet sind. Zu diesen Abfällen gehören z.B. Galvanikschlämme, Säuren, Laugen, Ölschlämme, Farbreste, verunreinigte Lösungsmittel.

Für Sonderabfälle existieren, wie für andere Abfälle auch, unterschiedliche Entsorgungswege. U.a. stellen die Deponierung über- und untertage, die physikalisch-chemische Behandlung oder die Verbrennung im technischen Maßstab genutzte Entsorgungswege dar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit steht die Verbrennung im Mittelpunkt.

Für das Jahr 2002 führt das Statistische Bundesamt [DESTATIS 2005] insgesamt 184 thermische Abfallbehandlungsanlagen auf, von denen 61 Anlagen Industriebetrieben zugeordnet werden. Die Entsorgungswirtschaft betreibt 123 Anlagen, die in 60 Müllheizkraftwerke, 27 Spezialanlagen für die Verbrennung von Abfällen und 36 sonstige Anlagen zur thermischen Behandlung (z.B. Pyrolyseanlagen) unterteilt werden. Verbrennungsanlagen für Sonderabfall werden nicht exakt ausgewiesen.

Weitere Informationen über Sonderabfallverbrennungsanlagen werden vom Umweltbundesamt [UBA 2001] und von der Prognos AG [Prognos 2000] bereit gestellt, die nicht vollständig identisch sind. Danach existieren in Deutschland ca. 30 größere Anlagen zur Sonderabfallverbrennung mit einer Gesamtkapazität von ca. 1 Mio. t pro Jahr. Diese Anzahl erfasst sowohl betriebseigene als auch öffentlich zugängliche Standorte. Im Gegensatz zu den öffentlich zugänglichen Hausmüllverbrennungsanlagen liegen über Verbrennungsanlagen für Sonderabfälle nicht für jeden Standort genaue Informationen vor. Dies gilt insbesondere für kleine Anlagen, die für die Entsorgung betriebsinterner Abfälle genutzt werden. Aufgrund der teilweise stark variierenden Heizwerte ist zusätzlich eine genaue Angabe der jährlichen Verbrennungskapazität problematisch. Folglich ist eine genaue Statistik über einzelne Standorte mit Verbrennungskapazitäten eigentlich nicht möglich.

Die Anzahl der Anlagen und die Gesamtkapazität hat sich in der Vergangenheit nur wenig verändert. Eine der letzten Neubauten stellt die Anlage am Standort Ebenhausen dar, die nach Planungsbeginn 1987 im Jahr 1995 in Betrieb ging [Fürmaier 1993]; der Neubau ersetzt eine am Standort bestehende Anlage. Außerdem wurden in der Vergangenheit an den Standorten Ford-Werke Köln (1994), Schweinfurt (1997), Niederkassel (1998), Salzgitter (Ende 1999), Böhlen (2000) und Schwabach (2005) Sonderabfallverbrennungsanlagen still gelegt. Neue Großanlagen, geplant Anfang der 90er Jahre, wurden aufgrund zurückgehender Sonderabfallmengen nicht errichtet.

Im Jahr 1997 wurden im Bundesgebiet insgesamt 811.000 t Abfälle in Sonderabfallverbrennungsanlagen verbrannt [Prognos 2000]. Im Jahr 2003 wurden insgesamt 1,3 Mio. t Sonderabfälle verbrannt, davon ca. 0,2 Mio. t in Hausmüllverbrennungsanlagen [EUWID 2005].

2 Aufgabenstellung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde dargestellt, dass die Abfallwirtschaft in Deutschland verstärkt unter Aspekten des Klimaschutzes und der Ressourcenproblematik betrachtet wird. Außerdem stellt die Verbrennung von Sonderabfällen einen festen Bestandteil der deutschen Abfallentsorgung dar.

Aufgrund der lang andauernden Diskussionen um die Abfallentsorgung ist auch die Sonderabfallverbrennung im Zusammenhang mit dem Klimaschutz und der CO₂-Problematik zu betrachten. Die Sonderabfallverbrennung mit einer jährliche Kapazität im Bereich von 1 Mio. t stellt im Vergleich zur thermischen Restmüllverbrennung mit ca. 16 Mio. t/Jahr nur einen relativ geringen Anteil an der thermischen Abfallbehandlung dar, aber die Emissionen der Sonderabfallverbrennung leisten ebenfalls einen Beitrag zum steigenden Inventar von Treibhausgasen in der Atmosphäre und den in diesem Zusammenhang diskutierten Veränderungen des Weltklimas. Eine Auseinandersetzung mit dieser Thematik ist daher geboten, wobei die Emission des Treibhausgases Kohlendioxid im Mittelpunkt steht.

Um eine Aussage über den Beitrag der Sonderabfallverbrennung zur CO₂-Problematik treffen zu können, ist es zunächst erforderlich, die emittierte CO₂-Menge zu ermitteln. Im Rahmen der Emissionsüberwachung wird CO₂ allerdings nicht gemessen. Eine mathematische Bestimmung, wie bei Kraftwerken anhand der bekannten Zusammensetzung der Kohle möglich, ist durch die sehr unterschiedlich zusammengesetzten Sonderabfälle nicht durchführbar. Somit stellt die Bestimmung der CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit der verbrannten Abfallmenge eine erste Aufgabe dar.

Vor dem Hintergrund des Klimaschutzes ist aber nicht nur die emittierte CO₂-Menge von Interesse, sondern ergänzend auch der Anteil des regenerativen Kohlenstoffs im Brennstoff bzw. Abfall. Das bei der Verbrennung regenerativer Materialien freigesetzte CO₂ führt nicht zu einer Erhöhung des CO₂-Inventars in der Atmosphäre, da zuvor die gleiche Menge CO₂ im Zuge der Bildung dieser regenerativen Materialien aus der Atmosphäre entnommen wurde. Dieser Anteil der CO₂-Emissionen findet daher auch keine Berücksichtigung im Rahmen des Emissionshandels.

Sonderabfälle stammen aus den unterschiedlichsten Quellen und weisen verschiedenste Eigenschaften auf; der regenerative Kohlenstoffanteil im Abfallinput einer Sonderabfallverbrennungsanlage ist daher sehr schwierig einzuschätzen. Aufgrund der Dominanz von Produktionsabfällen aus Industrie und Gewerbe sowie des Fehlens von Küchen- und Gartenabfällen ist davon auszugehen, dass der Anteil regenerativen Kohlenstoffs deutlich unter dem in Hausmüll liegt, der sich aktuellen Untersuchungen zufolge in der Größenordnung von 120 [Rolland 2003] – 146 [Dehoust 2005] g C_{org}/kg Restmüll (bezogen auf die Feuchsubstanz) bewegt. Auf der anderen Seite werden regenerative Materialien wie Papier, Pappe oder Holz u.a. als Verpackung auch bei besonders überwachungsbedürftigen Abfällen eingesetzt, so dass ein messbarer regenerativer Anteil durchaus vorhanden sein kann. Wissenschaftliche Untersuchungen zu dieser Fragestellung bei der Sonderabfallverbrennung existieren bisher nicht.

Allerdings können die CO₂-Emissionen einer Sonderabfallverbrennungsanlage nicht immer direkt dem Abfallinput zugeordnet werden. Beispielsweise ist zu berücksichtigen, dass bei der Verbrennung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen mit bestimmtem Chlorgehalt die einzuhaltende Mindesttemperatur - entsprechend den rechtlichen Anforderungen - von 850 auf 1100 °C steigt [17. BImSchV]. Da diese geforderten Mindesttemperaturen deutlich über den Anforderungen der Hausmüllverbrennung liegen, kann es im Zuge der Sonderabfallverbrennung erforderlich sein, fossile Brennstoffe zur Sicherung der Mindesttemperaturen einzusetzen. Der daraus resultierende Anteil an den CO₂-Emissionen ist entsprechend zu berücksichtigen.

Außerdem werden in der Rauchgasreinigung von Abfallverbrennungsanlagen kohlenstoffhaltige Hilfsstoffe eingesetzt. Zum Einsatz kommen verschiedene Aktivkohlen oder -kokse, die sowohl einzeln als auch im Gemisch mit Calcium-Verbindungen verwendet werden. Die Verwendung der kohlenstoffhaltigen Hilfsstoffe dient vorwiegend der Begrenzung von Dioxin¹- und Quecksilberemissionen.

Der Einsatz fossiler Brennstoffe und kohlenstoffhaltiger Hilfsstoffe ist aber nicht nur im Zusammenhang mit der CO₂-Problematik von Bedeutung, sondern stellt vor dem Hintergrund einer allgemeinen Ressourcenknappheit mit steigenden Rohstoff- und Energiepreisen insbesondere auch eine ökonomische Komponente des Anlagenbetriebes dar.

¹ Diese umgangssprachliche Bezeichnung beschreibt die Stoffgruppe von polychlorierte Dibenzodioxinen und polychlorierte Dibenzofuranen, die insgesamt 210 verschiedene Substanzen umfasst.

Beide Aspekte sind letztendlich als Motivation anzusehen, neben der Untersuchung der CO₂-Emissionen auch eine Kohlenstoffbilanz für eine Sonderabfallverbrennungsanlage zu erstellen, die alle relevanten Stoffströme berücksichtigt.

Die erläuterte Aufgabenstellung wurden im Rahmen einer Kooperation zwischen der HIM GmbH, der TU Darmstadt und dem Forschungszentrum Karlsruhe aufgegriffen. Im Mittelpunkt der Arbeiten stand die Sonderabfallverbrennungsanlage, die von der HIM GmbH am Standort Biebesheim betrieben wird.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Hintergründe der CO₂-Problematik und die Grundlagen des Emissionshandels erläutert. In weiteren Abschnitten werden die Technik der Sonderabfallverbrennung und die Anlage am Standort Biebesheim beschrieben. Im Anschluss an die Vorstellung der experimentellen Arbeiten werden die Ergebnisse vorgestellt, die auch eine messtechnische Bestimmung des regenerativen Kohlenstoffanteiles umfassen. Eine Diskussion und Zusammenfassung bilden den Abschluss der Arbeit.

3 Grundlagen der Klimaproblematik

3.1 Klima

Der Begriff Klima beschreibt die Gesamtheit von meteorologischen Erscheinungen, die für den durchschnittlichen Zustand der Erdatmosphäre verantwortlich sind. Die Abgrenzung des Klimabegriffs vom Wetter und der Witterung ergibt sich aus den betrachteten Zeithorizonten und Regionen. Das Klima erfasst Zeiträume, die mehr als 30 Jahre umfassen [Schönwiese 1994]. Das Wetter und die Witterung beschränken sich dagegen zeitlich auf wenige Stunden bis zu einigen Monaten. Außerdem bezieht sich der Klimabegriff abweichend von Wetter und Witterung in der Regel auf große Regionen, wie mehrere Staaten oder Erdteile.

Das Klima auf der Erde wies im Verlauf der rund 4 Milliarden Jahren erdgeschichtlicher Entwicklung mehrfach drastische Veränderungen auf, die im wesentlichen auf die komplexen Wechselwirkungen und evolutionäre Prozesse in der Biosphäre zurück zu führen waren [Press 1985]. Im Vergleich dazu haben sich die stofflichen Eigenschaften der Atmosphäre während der letzten Einmillionen Jahre nicht mehr grundlegend verändert [Graedel 1994] [Heintz 1996]. Dennoch konnten für diesen Zeitraum Schwankungen der mittleren globalen Temperaturen zwischen 9 °C und 16 °C nachgewiesen werden. Für diese Klimaschwankungen können verschiedene Ursachen angeführt werden [UBA 2004/1]:

- Veränderung der so genannten geostrophysikalischen Parameter wie Solarkonstante, Erdbahnelemente u.a.
- Veränderungen der Erdoberfläche
- Änderungen des Energiehaushaltes im System "Erdoberfläche und Atmosphäre"
- Änderungen des Stoffhaushaltes der Atmosphäre

Das menschliche Individuum erfährt das Weltklima als einen nahezu stationären Zustand, der – gemessen an der Lebenserwartung des einzelnen Menschen oder auch über mehrere Generationen hinweg – keinen größeren Veränderungen zu unterliegen scheint. Tatsächlich sind es aber gerade anthropogene Aktivitäten, die – insbesondere seit Beginn der Industrialisierung – zu empfindlichen Veränderungen im globalen Stoffhaushalt der Atmosphäre beigetragen haben.

Die steigenden Konzentrationen klimawirksamer Spurengase, der so genannten Treibhausgase, sind in diesem Zusammenhang als eine der möglicherweise wichtigsten anthropogen verursachten Änderungen anzusprechen [UBA 2004/2]. Gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter sind die Konzentrationen von Kohlendioxid (CO₂) weltweit um ca. 30 %, von Methan (CH₄) um 145% und von Distickstoffoxid (N₂O) um 15 % gestiegen. Zusätzlich gelangten auch völlig neue Stoffe wie z.B. Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FKW), wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆) in die Atmosphäre.

Da neben Wasserdampf gerade die genannten Spurengase für den Temperaturhaushalt der Atmosphäre und insbesondere für den so genannten Treibhauseffekt verantwortlich sind, können die anthropogen verursachten Veränderungen in der Zusammensetzung der Atmosphäre auch zu Änderungen im Klimasystem der Erde beitragen. In seinem Sachstandsbericht von 2001 stellte das "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC) fest, dass die mittlere globale Lufttemperatur in den letzten 100 Jahren um 0,4 bis 0,8 °C angestiegen ist. Die Konzentrationszunahme der Treibhausgase wird mit dem Anstieg der bodennahen Temperatur in Verbindung gebracht [IPCC 2001].

Dabei ist insbesondere die Dynamik der durch den Menschen verursachten Veränderung von Bedeutung. Die Biosphäre wird zwar definiert als ein stabiles, komplexes, sich anpassendes und sich entwickelndes Lebenssystem [Lovelock 1979] [Margulis 1986], wie dieses System aber auf die Veränderungen durch die menschliche Zivilisation tatsächlich reagieren wird, ist weithin unbekannt. Es mehren sich aber die Anzeichen, dass diese Reaktionen in durchaus bedrohlicher Form letztendlich auf die Menschheit zurückfallen werden [UBA 2004/2].

3.2 Treibhauseffekt

Der Treibhauseffekt bezeichnet die Rolle, die Wasserdampf und Wolken, aber auch Kohlendioxid, Methan und weitere Spurengase (u. a. N₂O und O₃) im Strahlungs- bzw. Energiehaushalt der Erde spielen. Die physikalischen Grundlagen sind schon seit über einhundert Jahren bekannt: Kelvin (thermodynamische Temperaturskala) und vor allem Arrhenius (Treibhauseffekt) müssen als Pioniere auf diesem Gebiet genannt werden [Arrhenius 1896][Flohn 1990].

Die Sonne emittiert Strahlung hauptsächlich im Bereich des sichtbaren Lichts, d.h. in einem Wellenlängenbereich bis etwa 3,5 µm. Die Intensität dieser kurzwelligeren Sonnenstrahlung beträgt oberhalb der Erdatmosphäre 1.368 W/m² (Solarkonstante). Im Durchschnitt "erhält" die Atmosphäre aufgrund der Kugelgestalt der Erde aber nur ein Viertel bzw. 342 W/m² dieser Strahlung [Kasang 2004].

Der Treibhauseffekt lässt sich mit einer Strahlungsbilanz verdeutlichen, die in Abbildung 1 dargestellt wird. Da auf der Erde ein stationäres Gleichgewicht herrscht, müssen die 342 W/m², die im Mittel auf der Erde ankommen, auch wieder von der Erde abgestrahlt werden. 107 W/m² werden von Luft, Wolken und Erdoberfläche reflektiert und gleich wieder in den Weltraum abgegeben. Weitere 235 W/m² werden absorbiert, davon 67 W/m² von Spurengasen, Staub und Wolken in der Atmosphäre und 168 W/m² von der Erdoberfläche selbst. Die Absorption hat eine Thermalisierung zur Folge. Dadurch erhalten Atmosphäre und Erde eine gewisse Temperatur, die sie wieder als Temperaturstrahlung abgeben müssen. Diese Abstrahlung erfolgt im langwelligen Infrarotbereich. Der größere Anteil der gesamten zuvor absorbierten und wieder abgegebenen Strahlung wird von Wasserdampf und verschiedenen Spurengasen ("Treibhausgasen") in der Atmosphäre absorbiert. Nur 40 W/m² der Strahlung verlassen ungehindert die Atmosphäre durch "offene Strahlungsfenster" in Wellenlängenbereichen, in denen keine Absorption stattfindet (vergleiche Abbildung 2).

Die Atmosphäre thermalisiert wiederum die vom Erdboden aufgenommene Strahlung, und wird dadurch wärmer. Damit gibt sie ihrerseits mehr Temperaturstrahlung ab, und zwar, und das ist entscheidend, in alle Richtungen, also praktisch je zur Hälfte nach oben und unten. Die Hälfte, die wieder nach unten abgegeben wird ist genau der zusätzliche Energiefluss, der den Treibhauseffekt ausmacht: Die nach unten gehende Strahlung trifft wieder auf den Erdboden, wird dort erneut absorbiert, und ihre Energie thermalisiert. Der Erdboden wird dadurch wärmer und gibt seinerseits mehr Temperaturstrahlung ab. Dieser Vorgang muss solange wiederholt gedacht werden, bis die gesamte abgegebene Strahlung den ursprünglichen 342 W/m^2 entspricht. Die Summe der durch den Erdboden absorbierten Strahlung beträgt derzeit 492 W/m^2 (Anteil der einfallenden Sonnenstrahlung: 168 W/m^2 ; Rückstrahlung aus der Atmosphäre: 324 W/m^2) und entspricht damit 144% der gesamten einfallenden Sonnenstrahlung. Dieser Strahlungsbetrag erhöht sich, wenn durch steigende Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre weitere "Strahlungsfenster" geschlossen werden.

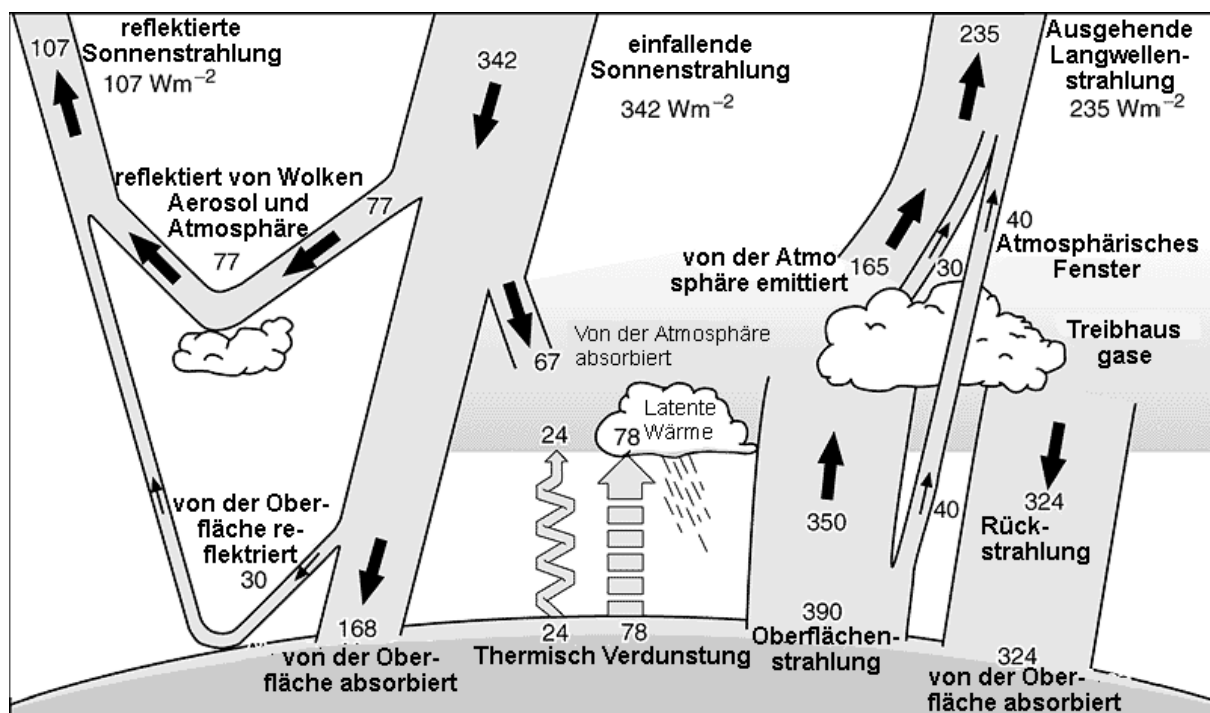


Abbildung 1: Strahlungsbilanz der Erde [Kiehl 1997][IPCC 2001] (Erläuterung siehe Text).

Neben dem Energietransport durch Strahlung tragen in diesem System auch noch die Bewegung der Luftmassen (Konvektion) und der physische Kontakt mit anderen Luftmassen bzw. mit der Erdoberfläche (Konduktion) sowie das Verdampfen und Kondensieren von Wasserdampf zum Energie- bzw. Wärmetransport bei.

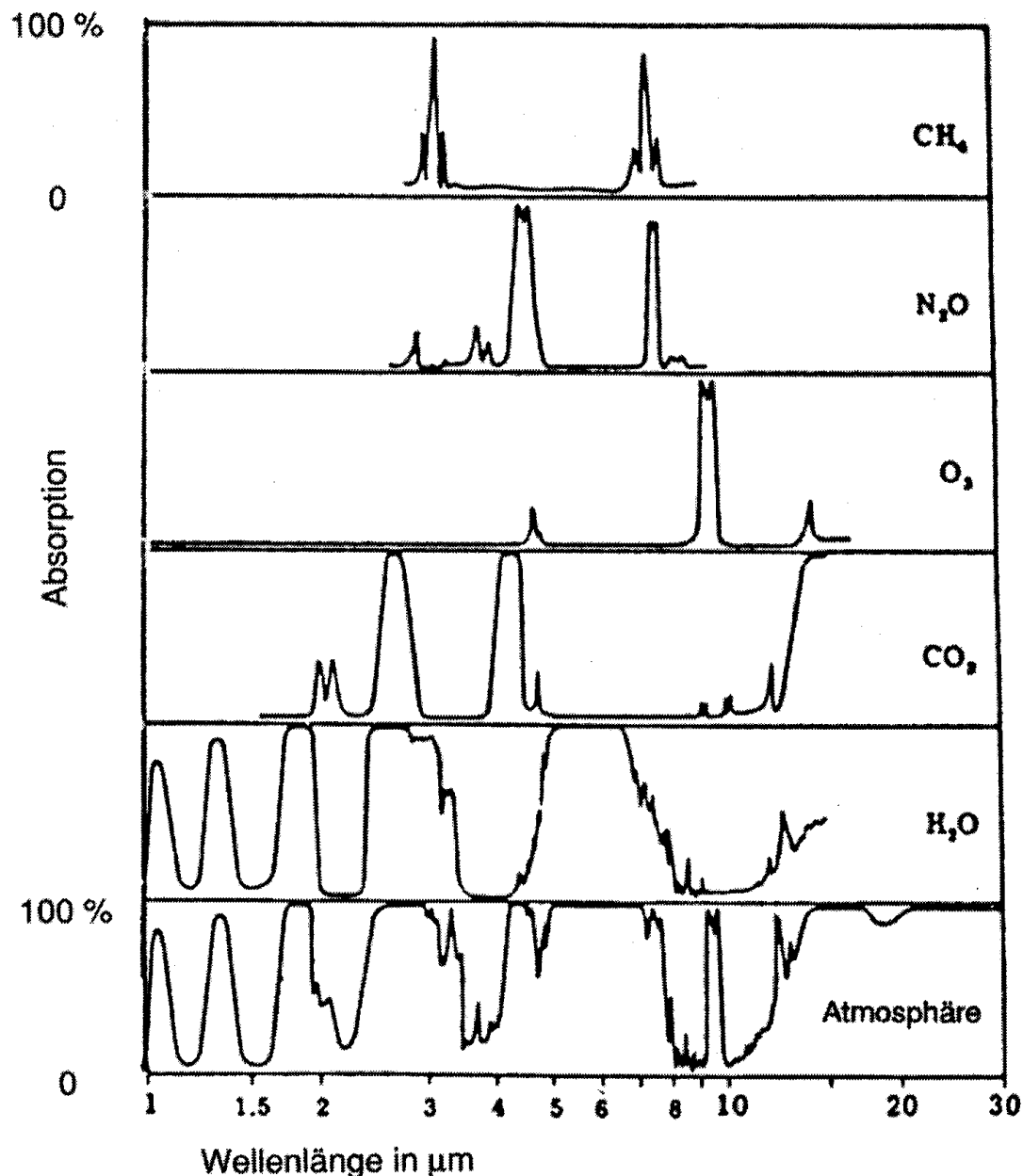


Abbildung 2: Absorptionsbanden verschiedener Treibhausgase für den Bereich infraroter Wärmestrahlung [Schönwiese 1988].

3.3 Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt

Die Biosphäre der Erde in ihrer heutigen Form ist ohne den Treibhauseffekt nicht denkbar. Die durchschnittliche Temperatur an der Erdoberfläche beträgt heute +15 °C, ohne den Treibhauseffekt läge sie bei -18 °C [Weber 1991] [Schönwiese 1988] [UBA 2004/2].

Der Treibhauseffekt ist als Produkt der evolutionären Prozesse in der Biosphäre fortlaufenden Veränderungen unterworfen, allerdings vollziehen sich diese Veränderungen normalerweise in Zeiträumen, die sich der Wahrnehmung durch den Menschen entziehen. Dies änderte sich erst durch die Aktivitäten des Menschen, insbesondere seit dem Beginn der Industrialisierung vor rund 200 Jahren. Die Dynamik der Wirkungen dieser Aktivitäten auf die Biosphäre und insbesondere auf das Klima und den Treibhauseffekt sind jetzt zumindest messtechnisch erfassbar.

In modellhaften Ansätzen zur Bestimmung von Art, Ausmaß und Geschwindigkeit der durch den Menschen verursachten Veränderungen wird als Bezugspunkt der quasi stationäre Zustand der Biosphäre in Abwesenheit anthropogener Einflüsse bzw. im vorindustriellen Zeitalter als "natürlicher" Zustand angenommen. Der Treibhauseffekt in seiner "natürlichen" Form wird erstmals von [Arrhenius 1896] beschrieben. Der "natürliche Treibhauseffekt" wird den durch den Menschen verursachten zusätzlichen Wirkungen eines "anthropogenen Treibhauseffektes" gegenüber gestellt.

Dieser viel diskutierte anthropogene Treibhauseffekt verstärkt den natürlichen Treibhauseffekt. Als Ursachen des anthropogenen Treibhauseffektes werden die durch den Menschen verursachten Emissionen an Treibhausgasen (u.a. CO₂, CH₄, N₂O und FCKW) und deren Akkumulation in der Atmosphäre angesehen [Kasang 2004]. Allein von 1995 bis 2002 ist die CO₂-Konzentration über Mitteleuropa um 3,3 % gestiegen [Philipona 2004]. Der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre hatte zu Beginn des 19. Jahrhunderts rund 280 ppm betragen; bis zum Jahr 2000 war er auf rund 368 ppm gestiegen [IPCC 2001]. Die Abbildung 3 zeigt den Konzentrationsanstieg für verschiedene Spurengase.

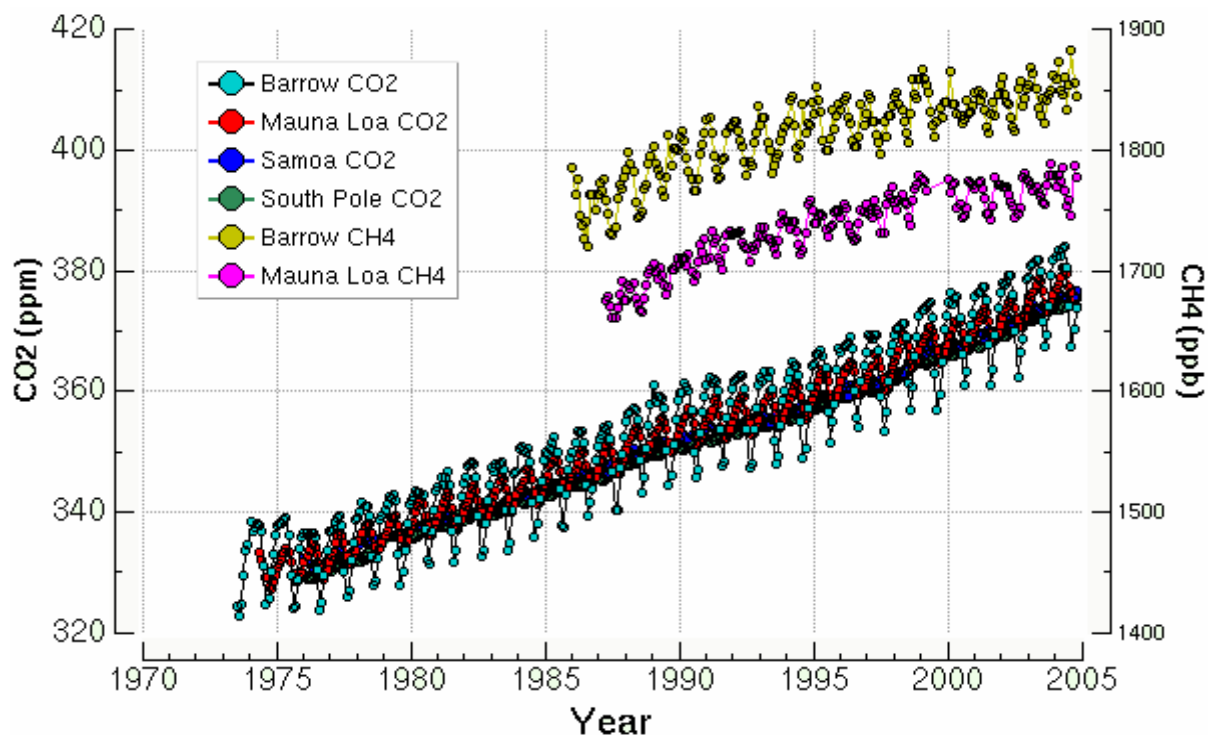


Abbildung 3: Atmosphärische Konzentration von Spurengasen und deren Veränderung über die Zeit an ausgewählten Beobachtungsstandorten [CMDL 2005].

Als wesentliche Quelle anthropogener Treibhausgasemissionen sind folgende Sektoren anzusprechen [Hütsch 1998] [BMU 2001]:

- Energie (Energieumwandlungssektor, Industrie, Verkehr; Förderung, Aufbereitung und Verteilung von Brennstoffen)
- Industrieprozesse (Chemische und Metallindustrie, Zementindustrie)
- Landwirtschaft (Viehzucht, Reisanbau, Dünger)
- Entsorgung (Abwasser und Abfall)

Die Effekte dieser anthropogenen Treibhausgasemissionen auf den Strahlungs- und Temperaturhaushalt der Erde werden durch einen weiteren anthropogen verursachten Effekt, das "global dimming" - die zunehmende Reflektion der Sonnenstrahlung an Aerosolen und Staubpartikeln in der oberen Atmosphäre -, teilweise kompensiert [Stanhill 2001].

3.4 Treibhauspotential

Der Begriff Treibhauspotential wurde als gemeinsamer Index für die Klimawirkung verschiedener Treibhausgase definiert: Das Treibhauspotential (eng: Global Warming Potential, kurz GWP) ist ein zeitabhängiger Index, mit dem der Strahlungsantrieb auf Massenebene eines bestimmten Treibhausgases in Relation zu dem Strahlungsantrieb von CO₂ gesetzt wird [Ahrens 1999]. Das Treibhauspotential gibt an, um wie viel stärker oder schwächer ein bestimmtes Gas im Vergleich zu CO₂ zum Treibhauseffekt beiträgt. Das Treibhauspotential von CO₂ ist per Definition 1.

In einem Bericht des IPCC aus dem Jahr 1995 wird das Treibhauspotential verschiedener Treibhausgase auf einen Zeithorizont von 100 Jahren bezogen. Danach hat beispielsweise ein Kilogramm Methan eine um den Faktor 21 höhere Klimawirksamkeit als ein Kilogramm CO₂ [IPCC 1995]. Das Kyoto Protokoll von 1997 (siehe Kapitel 4.1) nimmt diese Gewichtung der Klimawirksamkeit von Treibhausgasen auf. In Tabelle 1 sind jeweils spezifische Treibhauspotentiale für verschiedene Treibhausgase für 3 Bezugszeiträume aufgeführt. Der Unterschied in den Zeithorizonten beim Treibhauspotential beruht auf der unterschiedlichen Persistenz der verschiedenen Treibhausgase in der Atmosphäre.

Tabelle 1: Spezifisches Treibhauspotential (Global Warming Potential), bezogen auf CO₂, bei Zeithorizonten von 20, 100 und 500 Jahren [Houghton 1995].

Gas	20-Jahren GWP	100-Jahren GWP	500-Jahren GWP
Kohlendioxid, CO ₂	1	1	1
Methan, CH ₄	56	21	6.5
Lachgas	280	310	170
HFC-23	9.100	11.700	9.800
HFC-125	4.600	2.800	920
HFC-134a	3.400	1.300	420
HFC-143a	5.000	3.800	1.400
HFC-152a	460	140	42
HFC-227ea	4.300	2.900	950
HFC-236fa	5.100	6.300	4.700
HFC-4310mee	3.000	1.300	400
CF ₄	4.400	6.500	10.000
C ₂ F ₆	6.200	9.200	14.000
C ₄ F ₁₀	4.800	7.000	10.100
C ₆ F ₁₄	5.000	7.400	10.700
SF ₆	16.300	23.900	34.900

Der Anteil der mit dem jeweiligen Treibhauspotential gewichteten Treibhausgasemissionen an den Gesamtemissionen der Industriestaaten (nach Anlage I der Klimarahmenkonvention [Klimarahmenkonvention]) für das Jahr 1990 ist in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Anteil der gewichteten Treibhausgasemissionen an den Gesamtemissionen der Industriestaaten (nach Anlage I Klimarahmenkonvention) in 1990 [Brockmann 1999] [Schleich 2004]

Treibhausgas	Anteil (in %)
Kohlendioxid, CO ₂	81,20
Methan, CH ₄	13,70
Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe	4,00
Distickstoffoxid	0,56
Schwefelhexafluorid	0,30
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe	0,29

Obwohl andere Spurengase ein individuell höheres relatives Treibhauspotential besitzen, trägt das Kohlendioxid aufgrund der erheblichen emittierten Mengen wesentlich zum anthropogenen Treibhauseffekt bei [IPCC 2001] [Stachowitz 2005].

3.5 Globaler Stoffkreislauf: Kohlenstoff

Das globale Kohlenstoffinventar beträgt rund 75 Millionen Gt C. Der mit 99,8 % weitaus größte Anteil des Kohlenstoffs ist in der Erdkruste, der Lithosphäre gespeichert: Rund 60 Mio. Gt C ist in den Carbonatgesteinen – insbesondere Calcit und Dolomit – der Erdkruste enthalten. In sog. Kerogenen – fossilen organischen Stoffen, beispielsweise Ölschiefer – sind weitere rund 15 Mio. Gt C gebunden. Auch die Lagerstätten der klassischen fossilen Energieträger (Kohle, Erdgas und Erdöl) sind Bestandteil der Lithosphäre, die darin gespeicherte Kohlenstoffmenge ist mit 5.000 – 10.000 Gt C aber vergleichsweise gering [Lucius 2004]. In den Gashydrat-Lagerstätten am Grunde der Tiefsee werden ca. 10.000 Gt C vermutet [Treude 2003].

In den Weltmeeren (Hydrosphäre) sind rund 39.000 Gt Kohlenstoff in Form von physikalisch gelöstem Kohlendioxid, sowie als gelöste Hydrogencarbonat- und Carbonat-Ionen gebunden. In der Atmosphäre sind weitere 760 Gt Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid enthalten. In der belebten Biomasse auf dem Land, im Boden, im Wasser oder in der Luft, der sog. Biosphäre, sind rund 800 Gt Kohlenstoff enthalten.

Weltweit wurden 1997 rund 27 Gt CO₂ durch menschliche Aktivitäten emittiert; bezogen auf den darin enthaltenen Kohlenstoff waren dies rund 7,4 Gt C. Die Kohlendioxid-Emission aus (fossilen) Brennstoffen belief sich 1999 auf rund 22 Gt CO₂ bzw. 6,0 Gt C [USDOE 2003].

Gemessen am globalen Kohlenstoffinventar erscheint dieser anthropogene Emissionsbeitrag vernachlässigbar gering. Allerdings ändert sich dieses Bild, wenn die Verteilung des Kohlenstoffinventars in den verschiedenen Subsystemen der Erde und Mobilität sowie Austausch des Kohlenstoffs in und zwischen diesen Subsystemen betrachtet wird [Lucius 2004]:

Obwohl hinsichtlich der Speicherkapazität dominierend, ist der in der Lithosphäre gespeicherte Kohlenstoff auch in erdgeschichtlichen Maßstäben "langfristig" festgelegt und nimmt fast gar nicht am globalen Kohlenstoffkreislauf teil. Die Zuflussrate, durch Gesteinsbildung (Metamorphose) oder Bildung von Lagerstätten (Erdöl, Kohle), und die Abflussrate, durch Gesteinsverwitterung, stehen mit jeweils rund 0,2 Gt C/a im Gleichgewicht.

Im Gegensatz dazu findet zwischen der Atmosphäre, Hydrosphäre und Biosphäre ein, gemessen an den gespeicherten Kohlenstoffmengen in diesen Subsystemen, bedeutender Stoffaustausch statt. Angetrieben wird dieser Austausch durch die Aktivitäten der verschiedenen Lebewesen in der Biosphäre, insbesondere durch die Prozesse der Assimilation (in erster Linie Photosynthese) und Dissimilation (Atmung, Vergärung).

Rund 120 Gt C/a werden in Form von Kohlendioxid durch die grünen Pflanzen auf dem Festland im Zuge der Photosynthese aus der Atmosphäre entnommen und in energiereichen chemischen Verbindungen "fixiert". Durch die Pflanzenatmung sowie nach dem Konsum dieser Kohlenhydrate, Fette und Proteine und dem Abbau durch die verschiedenen Destruenten werden jeweils rund 60 Gt C/a als Kohlendioxid in die Atmosphäre freigesetzt. Über vergleichbare Prozesse in den Weltmeeren werden jährlich rund 90 Gt C zwischen Atmosphäre und Hydrosphäre ausgetauscht. Charakteristisch für diesen Stoffaustausch ist, dass er weitestgehend im Gleichgewicht steht.

Erst vor diesem Hintergrund wird der Stellenwert des durch anthropogene Aktivitäten und den Verbrauch fossiler Kohlenstoffverbindungen verursachten jährlichen Eintrags von 27 Gt Kohlendioxid bzw. 7,4 Gt C in dieses System deutlich. Nur ein Teil wird in natürlichen Senken in den Weltmeeren und an Land fixiert:

- Rund 30 % der Kohlendioxidfracht werden den Ozeanen zugeführt.
(2,2 Gt C/a – z.T. durch lösen im Meerwasser und "fixieren" in der aquatischen Biomasse mittels Photosynthese).
- 23 % werden an Land festgelegt (1,7 Gt C/a – überwiegend durch die Photosynthese der grünen Pflanzen).

Rund 47 % der Fracht (3,5 Gt C/a) werden aber der Atmosphäre zugeführt und erhöhen den Kohlenstoff- bzw. Kohlendioxid-Gehalt der Atmosphäre. Bezogen auf den Gesamt-Kohlenstoffgehalt der Atmosphäre entspricht der jährliche netto-Eintrag einem Zuwachs von etwa 0,5 % [USDOE 2003]. Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre hat im Frühjahr 2004 erstmals mehr als 380 ppm betragen

3.6 Klimamodelle und –prognosen

Unter den Fachleuten herrscht bislang noch keine Einigkeit über die Wechselwirkungen der veränderten Spurengaskonzentrationen in der Atmosphäre sowie den Einfluss dieser Wechselwirkungen auf das Weltklima. Die langen Zeiträume, die im Rahmen der Diskussion um Klimaänderungen zu betrachten sind, erfordern für die Ableitung von Prognosen den Einsatz von Computermodellen.

Hochentwickelte Simulationsprogramme lassen einen Zusammenhang zwischen der beobachteten Erwärmung und dem gestiegenen CO₂-Gehalt in der Atmosphäre wahrscheinlich erscheinen: Während des 20. Jahrhunderts hat sich die durchschnittliche Oberflächentemperatur der Erde tatsächlich um 0,6 °C erhöht; die beobachtete Erwärmung kann nicht alleine aufgrund natürlicher Einflussfaktoren (z.B. Sonnenaktivität) erklärt werden [IPCC 2001]. Dem Kohlendioxid wird in diesem Zusammenhang zwar eine verstärkende, aber keine ursächliche Funktion zugesprochen.

Eine Betrachtung der Klimaveränderungen während der letzten 500 Mio. Jahre lässt sogar den Schluss zu, dass Kohlendioxid nahezu keinen Einfluss auf das globale Klimageschehen in erdgeschichtlichen Zeiträumen hatte. Die Emission klimawirksamer Gase durch anthropogene Aktivitäten wird danach nicht als ursächlich, sondern als mitverantwortlich für die beobachtete Erwärmung der Erde betrachtet [Veizer 2002].

Vorausschauende Szenarien gehen von einem fortgesetzten Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre aus, wobei – abhängig vom zukünftigen Emissionsverhalten – zum Ende des 21. Jahrhunderts Werte zwischen 500 und max. 1.000 ppm prognostiziert werden. Das Weltklima würde sich in diesem Zeitraum um weitere 1,5 bis 5°C erwärmen (Bezugsbasis ist das Jahr 2000), wobei regionale Unterschiede möglich sind [Watson 2001]. Die gestiegene Temperatur hätte ein Abschmelzen der Polkappen zur Folge, wodurch in den nächsten 100 Jahren der Meeresspiegel um 0,2 – 0,8 m steigen würde. Eine mögliche weitere Konsequenz der gestiegenen Temperaturen wäre ein Rückgang der Niederschlagsmengen z.B. in Mitteleuropa, Zentralasien, Indien und Südamerika.

Auch für den Fall, dass es im Laufe des 21. Jahrhunderts und in der Folgezeit gelänge, die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre durch eine Verminderung der CO₂-Emissionen zu stabilisieren, würde erst während der nächsten 1.000 Jahre mit einer allmählichen Stabilisierung der Temperatur auf hohem Niveau zu rechnen sein. Das durch die erhöhten Temperaturen bedingte Abschmelzen der Polkappen würde sich dagegen über mehrere Jahrtausende fortsetzen und zu einem fortgesetzten Anstieg des Meeresspiegels führen. Ein Effekt auf die z.B. für Nord- und Mitteleuropa klimarelevanten Meeresströmungen (Golfstrom) gilt allerdings als unwahrscheinlich [IPPC 2001].

Für die mittel- und langfristigen Effekte auf das Weltklima liegen jedoch auch abweichende Hypothesen vor:

- Eine Studie der TU Berlin geht davon aus, dass einer fortgesetzten Erwärmung über die nächsten 200 – 300 Jahre eine drastische Abkühlung und eine neuerliche Eiszeit folgen werden. Als Ursache wird die durch die erhöhten Temperaturen und die gestiegene CO₂-Konzentration stimulierte Biosphäre angesehen, die – nach einer Erschöpfung der fossilen Energieträger und dem ausbleibenden CO₂-"Nachschub" - das in der Atmosphäre vorhandene CO₂ binnen weniger Jahre verbrauchen würde [Arlt 2003].
- Eine im Auftrag des Pentagon angefertigte Studie weist sogar auf die (allerdings nach Meinung der Autoren unwahrscheinliche) Möglichkeit hin, dass in Folge der (momentanen) Klimaerwärmung bereits in wenigen Jahren das abschmelzende Eis am Nordpol und in Grönland zu einer Störung der thermohalinen Meeresströmungen im Atlantik (Golfstrom) führen könnte. Der Ausfall dieser "europäischen Zentralheizung" hätte - diesem Szenario folgend - bereits nach 2010 eine drastische Abkühlung und eine Verringerung der Niederschlagsmengen in Skandinavien bzw. Nord-, West- und Mitteleuropa zur Folge. Nach 2020 wären dann bereits weite Bereiche Skandinaviens und Nordeuropas durch eiszeitliche Klimabedingungen geprägt [Schwartz 2003]. Neuesten Erkenntnissen zufolge hat sich bereits während der letzten 50 Jahre die Kapazität des Golfstroms um rund 30 % vermindert [Bryden 2005].

Festzuhalten bleibt: Der Anstieg insbesondere der Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre binnen der letzten 200 Jahre ist in erster Linie auf anthropogene Aktivitäten zurück zu führen. Kohlendioxid trägt in der Atmosphäre zum sog. Treibhauseffekt bei und ist daher für die beobachtete Erwärmung der Atmosphäre mitverantwortlich zu machen. Obwohl die langfristigen Effekte auf das Weltklima noch nicht sicher bewiesen sind, sprechen die Indizien für eine fortgesetzte Erwärmung der Atmosphäre und die dadurch bedingten Folgen auf die Ökosysteme der Erde.

4 Politische Aktivitäten und rechtliche Vorschriften

Die Menschheit ist sich der möglichen Konsequenzen einer fortgesetzten Emission klimawirksamer Spurengase durchaus bewusst. In der letzten Dekade des 20. Jahrhunderts wurden weltweit konkrete Initiativen gestartet, um einer möglicherweise drohenden Klimakatastrophe entgegenzuwirken bzw. die prognostizierten Effekte abzuschwächen.

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Vorgaben und Rechtsvorschriften zur Einschränkung der Emission von Treibhausgasen auf weltweiter, europäischer und nationaler Ebene vorgestellt. Den Abschluss bildet ein Abschnitt über die wichtigsten deutschen Rechtsvorschriften im Zusammenhang mit der Sonderabfallverbrennung.

4.1 Kyoto-Protokoll

Mit dem Rahmenabkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen wird der internationale Klimaschutz begründet [Klimarahmenkonvention]; der Antrag zu dieser Konvention wurde am 09. Mai 1992 in bei der UN in New York angenommen und auf dem Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung in Rio de Janeiro 1992 verabschiedet.

Auf der 3. Vertragsstaatenkonferenz der UN-Klimarahmenkonvention wurde im Dezember 1997 in Kyoto das sogenannte Kyoto-Protokoll [Kyoto Protokoll] angenommen. Das Kyoto-Protokoll ist das wichtigste der globalen Umweltabkommen und besitzt als Baustein einer wirksamen "global governance" Modell- und Symbolwirkung.

Erstmals werden für die Industrieländer konkrete und verbindliche Ziele zur Reduktion ihrer Treibhausgas-Emissionen festgelegt. Das Kyoto-Protokoll verpflichtet die Industriestaaten nach Anlage I der Klimarahmenkonvention den Ausstoß klimaschädlicher Gase bis 2012 in der Summe um 5% gegenüber 1990 zu senken.

Die nach der Anlage A des Kyoto-Protokolls zu berücksichtigenden Treibhausgase sind Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC) und Schwefelhexafluorid (SF₆) [Kyoto Protokoll]. Als relevante Sektoren bzw. Gruppen von Quellen dieser Treibhausgase werden Energie, Produktionsprozesse, Verwendung von Lösungsmitteln und anderen Erzeugnissen, Landwirtschaft und Abfallwirtschaft genannt.

In der Anlage B des Kyoto-Protokolls werden den Vertragsparteien (Industriestaaten nach Anlage I der Klimarahmenkonvention) darüber hinaus individuelle Emissionsbegrenzungs- oder Emissionsreduktionsverpflichtungen zugeteilt.

Die notwendigen Emissionsminderungen können in erster Linie durch technische, organisatorische und politische Maßnahmen auf nationaler Ebene herbeigeführt werden. Daneben sieht das Kyoto-Protokoll aber auch s.g. projektbezogene "flexible Mechanismen" vor:

- "Clean Development Mechanism" (CDM) – Emissionsminderungs-Projekte unter Beteiligung von Partnern aus Industriestaaten (nach Anlage I der Klimarahmenkonvention) und nicht-Industriestaaten
- "Joint Implementations" (JI) – Gemeinschaftsprojekte von Partnern aus Industriestaaten

Im Rahmen dieser Projekte werden Emissionsminderungen zwar außerhalb der nationalen Grenzen erzielt, können aber auf die nationalen Minderungsziele der jeweiligen Partner aus Industriestaaten angerechnet werden.

Darüber hinaus sieht das Kyoto-Protokoll den Handel mit zertifizierten Emissionsminderungen sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene vor.

Das Protokoll musste von mindestens 55 Unterzeichnerstaaten der Klimarahmenkonvention, auf die mindestens 55 % der Treibhausgasemissionen der Industriestaaten (nach Anlage I der Klimarahmenkonvention) nach dem Stand von 1990 entfallen, ratifiziert werden. Erst nachdem auch Russland Ende Oktober 2004 das Protokoll ratifiziert hatte waren hierfür die Voraussetzungen erfüllt. Mehr als sieben Jahre nach seiner Annahme durch die Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention trat das Kyoto-Protokoll am 16. Februar 2005 in Kraft.

Rund 150 Staaten beabsichtigen die Ratifizierung. Neben der Mehrzahl der Industriestaaten hat auch die überwältigende Mehrheit der Schwellen- und Entwicklungsländer das Protokoll ratifiziert, darunter China, Indien und Brasilien. Von den Industrieländern beabsichtigen lediglich die USA und Australien das Protokoll nicht zu ratifizieren. Australien will allerdings seine Emissionen freiwillig um den im Protokoll vorgesehenen Prozentsatz vermindern.

Die EU-Mitgliedstaaten haben mit der Entscheidung (2002/358/EG) des Rates vom 25. April 2002 über die Genehmigung des Protokolls von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen [2002/358/EG] das Protokoll angenommen. Am 31.05.2002 wurden die Ratifikationsurkunden bei der UN hinterlegt. Der deutsche Bundestag hat am 27. April 2002 das "Gesetz zu dem Protokoll von Kyoto vom 11. Dezember 1997 zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (Kyoto-Protokoll)" verabschiedet und damit dem Kyoto-Protokoll und den daraus erwachsenden nationalen Verpflichtungen zur Minderung der Emission von Treibhausgasen zugestimmt [BMU 2002].

Die Entscheidung des Rates 2002/358/EG umfasst darüber hinaus ein Lastenausgleichsabkommen ("burden-sharing", Anhang II), das die Verpflichtungen zur Verminderung der Emissionen der Gemeinschaft unter den Mitgliedsstaaten verteilt. In der Anlage B des Kyoto-Protokolls verpflichtet sich die europäische Staatengemeinschaft, ihre Treibhausgasemissionen bis zur Zielperiode von 2008 bis 2012 gegenüber dem Stand von 1990 in der Summe um 8% zu reduzieren. Im Rahmen des Lastenausgleichsabkommens übernimmt Deutschland die Verpflichtung, bis zur Zielperiode von 2008 bis 2012 seine Treibhausgasemissionen um 21 % gegenüber dem Niveau von 1990 zu reduzieren; dies entspricht rund 75 % der vereinbarten Emissionsminderungen innerhalb der EU. Das individuelle nationale Minderungsziel der Bundesrepublik Deutschland nach dem Kyoto-Protokoll beträgt dagegen nur 8%.

4.2 Europäische Umsetzung und Emissionshandel

Nach der Annahme des Kyoto-Protokolls durch die EU mit der Entscheidung 2002/358/EG des Rates der EU waren für die konkrete Umsetzung des Kyoto-Protokolls weitere europäische Rechtsvorschriften notwendig.

Im sechsten Aktionsprogramm der Gemeinschaft für die Umwelt, das mit der Entscheidung Nr. 1600/2002/EG des Europäischen Parlaments und des Rates [1600/2002/EG] eingeführt wurde, wird die Klimaänderung als vorrangiger Maßnahmenbereich definiert und die Einrichtung eines gemeinschaftsweiten Systems für den Emissionshandel bis 2005 gefordert. In dem Programm wird bekräftigt, dass die Gemeinschaft sich zu einer 8%igen Verringerung ihrer Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2008-2012 gegenüber dem Stand von 1990 verpflichtet hat und dass die globalen Treibhausgasemissionen längerfristig gegenüber dem Stand von 1990 um etwa 70 % gesenkt werden müssen.

Die europäische Union hat im Dezember 2002 im Ministerrat und im Juli 2003 im EU-Parlament die "Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der

Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG² des Rates" [2003/87/EG] beschlossen .

Mit der Richtlinie 2003/87/EG wurde zum 01. Januar 2005 ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten mit festen Zeiträumen bzw. Handelsperioden von 3 Jahren (2005 bis 2007) bzw. 5 Jahren Dauer (2008 bis 2012 und alle weiteren) in der Europäischen Gemeinschaft geschaffen.

Ziel der europäischen Richtlinie ist die Schaffung eines Umweltschutzzinstruments zur kostenwirksamen Verringerung von Treibhausgasemissionen, das es der Union ermöglicht, ihren Verpflichtungen aus dem Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen und dem Kyoto-Protokoll nachzukommen. Der Grundgedanke des Emissionshandels besteht darin, die Emission von Treibhausgasen kostenpflichtig zu machen, indem die Emission solcher Gase an den Besitz einer Genehmigung und einer ausreichenden Anzahl Emissionsberechtigungen geknüpft wird. Zentraler Mechanismus dieses Emissionshandels ist die absolute Mengenbeschränkung der Emissionsberechtigungen, das sog. cap and trade-System, wodurch der Emissionshandel als umweltpolitisches Steuerungsinstrument wirkt.

Um das reibungslose Funktionieren des Binnenmarktes zu gewährleisten und dem Auftreten von Wettbewerbsverzerrungen, die sich aus der Einrichtung getrennter nationaler Handelssysteme ergeben könnten, entgegen zu wirken schreibt die Richtlinie einheitliche Strukturen zur Organisation und Überwachung des Emissionshandels vor:

- Genehmigung: Die durch den Emissionshandel erfassten Anlagen benötigen eine Genehmigung zur Emission von Treibhausgasen. Sie überwachen ihren Ausstoß von Treibhausgasen und erstatten darüber Bericht.
- Zuteilung und Gesamtmenge der Berechtigungen: Die Mitgliedstaaten stellen für jede Handelsperiode einen Nationalen Allokationsplan (NAP) auf. Aus diesem sollte hervorgehen, wie viele Zertifikate sie insgesamt für diesen Zeitraum zuzuteilen beabsichtigen und wie sie die Zertifikate zu verteilen gedenken.
- Zuteilungsmethode: Für den Zeitraum 2005-2007 teilen die Mitgliedstaaten mindestens 95 %, für den Zeitraum 2008-2012 mindestens 90 % der Berechtigungen kostenlos zu.
- Sanktionen: Die Mitgliedstaaten sollen Vorschriften über Sanktionen festlegen, die bei einem Verstoß gegen die EU Richtlinie Emissionshandel zu verhängen sind und deren Durchsetzung gewährleisten.
- Übertragung, Abgabe und Löschung von Zertifikaten: Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass die Zertifikate übertragbar sind zwischen den Marktteilnehmern innerhalb der EU bzw. der EU und Marktteilnehmern in Drittländern, in denen die Zertifikate anerkannt werden.
- Register: Die Mitgliedstaaten sorgen für die Einrichtung und Aktualisierung eines nationalen Emissionsregisters, um die genaue Verbuchung von Vergabe, Besitz, Übertragung und Löschung von Zertifikaten zu gewährleisten.
- Berichterstattung durch die Mitgliedstaaten: Die Mitgliedstaaten legen der EU-Kommission jedes Jahr einen Bericht über die Anwendung der Emissionshandels-Richtlinie vor.

² Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie). Umgesetzt in Deutschland in wesentlichen Teilen mit dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG).

Im Anhang I der Emissionshandelsrichtlinie wird der Geltungsbereich dieser Richtlinie zunächst auf Betriebe und Anlagen der Energiewirtschaft und ausgewählter energieintensiver Wirtschaftssparten sowie auf das Treibhausgas Kohlendioxid begrenzt. Die Richtlinie sieht aber die Möglichkeit vor, weitere Bereiche zu berücksichtigen:

Nach Artikel 24 haben die Mitgliedsstaaten das Recht, ab der zweiten Handelsperiode (2008 bis 2012) neben weiteren Tätigkeiten und Anlagen den Handel mit Emissionszertifikaten auch auf solche Treibhausgase auszuweiten, die nicht im Anhang I genannt sind. Ferner soll nach Absatz 16 der Präambel "diese Richtlinie die Mitgliedstaaten nicht daran hindern, nationale Handelssysteme zur Regelung der Treibhausgasemissionen aus anderen als den aufgeführten ... Tätigkeiten oder Anlagen ... einzuführen".

Die Abfallwirtschaft im Allgemeinen und speziell die Kohlendioxidemissionen aus Abfallverbrennungsanlagen sowie Methanemissionen aus Deponien finden aber im Rahmen des Emissionshandelssystems in der Gemeinschaft vorerst noch keine Berücksichtigung. Dennoch ergeben sich aus dem Emissionshandel Chancen auch für die Abfallwirtschaft; zu nennen ist in diesem Zusammenhang die (Mit)-Verbrennung von Abfällen oder aus diesen gewonnenen Sekundärbrennstoffen bzw. der regenerativen Anteile in diesen Materialien in solchen Anlagen, die vom Emissionshandel berücksichtigt werden [Geres 2005/2], sowie ein Engagement in Projekten auf internationaler Ebene im Rahmen des sog. CDM, beispielsweise bei der Erfassung und Verbrennung/Verwertung von Deponiegas [Geres 2005/1].

Für die Umsetzung der Richtlinie 2003/87/EG gibt es auf europäischer Ebene eine Reihe von Rechtsvorschriften und "Anleitungen" für die Mitgliedstaaten:

- Im Oktober 2004 wurde die als "Linking Directive" bezeichnete Richtlinie 2004/101/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der EU im Sinne der projektbezogenen Mechanismen des Kyoto-Protokolls vom Rat der Europäischen Union endgültig angenommen [2004/101/EG]; sie ist seit dem 13.11.2004 in Kraft. Damit wurde eine Verbindung zwischen den projektbezogenen flexiblen Mechanismen des Kyoto Protokolls (CDM, JI) und dem Emissionshandelssystem der EU geschaffen. Dies ermöglicht allen am EU Emissionshandel beteiligten europäischen Unternehmen, Gutschriften aus weltweit durchgeführten Projekten zur Verringerung der Treibhausgasemissionen auf ihre eigenen Verpflichtungen anzurechnen.
- Eine "Register-Verordnung" über die Buchung der zugeteilten und gehandelten Emissions-Zertifikate soll sicherstellen, dass der Handel nicht nur innerhalb der Mitgliedstaaten, sondern auch zwischen Betreibern in verschiedenen Mitgliedstaaten funktioniert [EU-RegVo].
- "Monitoring-Guidelines" regeln, wie die CO₂-Emissionen der Anlagen erfasst werden sollen [K(2004)130 endgültig]
- Die "Anleitung der Kommission zur Erstellung der Nationalen Allokationspläne" legt dar, worauf bei der Erstellung dieser Pläne zu achten ist [K(2003)830 endgültig].

4.3 Nationale Umsetzung des Emissionshandels

Wie jede europäische Richtlinie muss auch die Richtlinie 2003/87/EG [2003/87/EG] von jedem Mitgliedstaat der EU in nationales Recht umgesetzt werden. In Deutschland wurde zu

diesem Zweck das "Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft" (Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz - TEHG) [TEHG] verabschiedet, das am 15. Juli 2004 in Kraft getreten ist.

Das TEHG regelt die grundlegenden Strukturen der nationalen Umsetzung des Emissionshandels (Genehmigung, Emissionsberichte und Überwachung, Verfahren für den Allokationsplan und die Zuteilung, Verwaltung und Handel der Zertifikate, Sanktionen) und ermächtigt die Bundesregierung zum Erlass von konkretisierenden Rechtsverordnungen.

Außerdem regelt das TEHG die Schaffung einer entsprechenden Aufsichtsbehörde für die Umsetzung, Organisation und der vielfältigen Aufgaben, die mit dem TEHG und dem zugeordneten Regelwerk bewältigt werden müssen. Mit dem TEHG wird die Rechtsgrundlage für die Schaffung der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) beim Umweltbundesamt in Dessau geschaffen.

Diese nationale zuständige Behörde zur Umsetzung der marktwirtschaftlichen Klimaschutzinstrumente Emissionshandel sowie projektbasierten Mechanismen des Kyoto-Protokolls nimmt ein breites Aufgabenspektrum wahr, das in der EU-Emissionshandelsrichtlinie, im Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) und weiteren Rechtsvorschriften definiert wird: Sie verteilt die Zertifikate, löscht Zertifikate in dem Umfang, wie CO₂ ausgestoßen worden ist, überwacht die Konten für den Zertifikatehandel und verhängt – falls die Verpflichtungen verfehlt werden - die erforderlichen Sanktionen. Gemäß § 22 TEHG erhebt die Deutsche Emissionshandelsstelle kostendeckende Gebühren für die Wahrnehmung ihrer Aufgaben. Die Emissionshandels-Kostenverordnung [EHKostV] enthält Bestimmungen über Gebühren, die an die Deutsche Emissionshandelsstelle zu leisten sind und sieht Möglichkeiten der Kostenermäßigung und Kostenbefreiung vor.

Die DEHSt arbeitet eng mit den Unternehmen der Deutschen Wirtschaft zusammen, deren Anlagen dem EU-Emissionshandel unterliegen, und unterstützt die in diesem Bereich tätigen sachverständigen Stellen. Darüber hinaus ist die DEHSt Kontaktstelle für das Bundesumweltministerium, für die Bundesländer und die zuständigen Landes-Immissionsschutzbehörden. Ziel ist es, neben den zentralen Steuerungsaufgaben zuverlässigen Service für die teilnehmenden Unternehmen, für sachverständige Stellen sowie Behörden zu bieten. Die DEHSt arbeitet vorwiegend elektronisch mit ihren Partnern zusammen. Das betrifft die Antragstellung und Zuteilung der Zertifikate ebenso wie das Kontomanagement und die Emissionsberichterstattung [DEHSt 2005].

Die später von der EU verabschiedete Linking Directive [2004/101/EG] war ebenfalls in deutsches Recht umzusetzen; das deutsche Projekt-Mechanismen-Gesetz (ProMechG) [ProMechG] vom 30.09.2005 enthält die entsprechenden Rechtsgrundlagen für die Durchführung von CDM- und JI-Projekten. Die Projekt-Mechanismen-Gebührenverordnung (ProMechGebV) [ProMechGebV] enthält Bestimmungen über Gebühren, die die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) für Amtshandlungen nach dem Projekt-Mechanismen-Gesetz (ProMechG) erhebt. Die ProMechGebV tritt zeitgleich mit dem ProMechG in Kraft.

Allgemein erfordert die Umsetzung des Emissionshandels eine umfassende Datengrundlage zu den einzelnen Anlagen, die an diesem System teilnehmen. Vor diesem Hintergrund sieht die vom Bundeskabinett verabschiedete Datenerhebungsverordnung 2012 [DEV 2012] vor, die bisher noch nicht vorliegenden Daten zur Berechnung der CO₂-Emissionen bei den teilnehmenden Unternehmen zu erheben. Die Teilnahme an der Datenerhebung ist für einen Teil der Bestandsanlagen verpflichtend. Betreiber von Anlagen, die in der zweiten Handelsperiode erstmalig am Emissionshandel teilnehmen, sind gebeten, sich freiwillig an der Datenerhebung zu beteiligen.

4.3.1 Nationaler Allokationsplan (NAP)

Die EU-Emissionshandelsrichtlinie und folglich das TEHG sehen für die Zuteilung der Emissionsberechtigungen an die betroffenen Anlagen bzw. Anlagenbetreiber ein kompliziertes, mehrstufiges Verfahren vor, in dessen Mittelpunkt der Nationale Allokationsplan (NAP) steht. Der NAP enthält die materiellen Regeln, nach denen Emissions-Berechtigungen den Anlagenbetreibern zugeteilt werden und wie viele Emissionsberechtigungen jeder Anlagenbetreiber voraussichtlich erhalten soll.

Für jede einzelne der nach Emissionshandelsrichtlinie bzw. TEHG vorgesehenen Handelsperioden wird ein neuer NAP im Vorfeld erstellt. Die Handelsperioden und die jeweiligen NAP sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Handelsperioden und Nationale Allokationspläne.

Handelsperiode	Zeitraum	Nationaler Allokationsplan
1. Handelsperiode	2005 bis 2007	NAP I [NAP I]
2. Handelsperiode	2008 bis 2012	NAP II [NAP II]
spätere Handelsperiode	jeweils 5 Jahre	

Das Verfahren für die Zuteilung der Emissionsberechtigungen beginnt mit einem Entwurf des NAP durch die Bundesregierung für die jeweilige Handelsperiode, der daraufhin der EU-Kommission zur Prüfung vorgelegt wird. Für die erste Handelsperiode war als Stichtag für die Übermittlung des NAP I an die Kommission der 31. März 2004 einzuhalten, für alle weiteren Handelsperioden müssen die Pläne jeweils 18 Monate vor Beginn des jeweiligen Zeitraums veröffentlicht und an die Kommission übermittelt sein. Der NAP II für die Handelsperiode 2008 - 2012 wurde durch das Bundeskabinett am 28. Juni 2006 beschlossen und fristgerecht zum 30. Juni 2006 in Brüssel vorgelegt.

Der NAP basiert jeweils auf einer Erhebung der tatsächlichen Emissionen von Kohlendioxid in den Bestandsanlagen während eines Referenzzeitraums, der s.g. "Basisperiode" in der Vergangenheit, bzw. einer Abschätzung der zukünftigen Emissionen solcher in Bau befindlichen oder geplanten Anlagen. Für bestehende Anlagen, die vor dem 01.01.2000 in Betrieb genommen wurden, umfasst die Basisperiode die Jahre 2000 – 2002 (NAP I) bzw. 2000 – 2005 (NAP II). Im NAP I waren bei einer Inbetriebnahme in 2000 die Jahre 2001 – 2002, bei einer Inbetriebnahme in 2001 die Jahre 2001 – 2003, und bei einer Inbetriebnahme in 2002 die Jahre 2002 – 2003 als Basisperiode zu berücksichtigen. Nach dem NAP II gilt für Anlagen, die in den Jahren 2000 bis 2002 in Betrieb gegangen sind, als Basisperiode der Zeitraum von der Inbetriebnahme bis einschließlich des Jahres 2005. Für das Jahr der Inbetriebnahme erfolgt eine Hochrechnung der Emissionen auf ein volles Betriebsjahr.

Diese "historischen" Emissionen dienen als Bezugsgröße für die Festlegung der möglichen Emissionen in der jeweiligen Handelsperiode ("grandfathering"). Hierzu wird auf die historischen Emissionen ein "Erfüllungsfaktor" (NAP I: 0,9709 für alle Bestandsanlagen; NAP II: 0,9875 für Industrieanlagen, 0,85 für Anlagen der Energiewirtschaft) angewendet. Aufgrund einer Sonderregelung im NAP I ("Optionsregel") war darüber hinaus die Anwendung eines Ausgleichsfaktors von 0,9538 für einen Teil der Bestandsanlagen notwendig.

Sowohl nach NAP I als auch NAP II erhalten Neuanlagen mit hocheffizienter Technologie eine kostenlose Zuteilung von 100 % der Emissionsberechtigungen auf der Grundlage von BAT-Benchmarks und Auslastungsprognosen (NAP I) bzw. Standardauslastungsfaktoren

(NAP II). Neuanlagen sind für einen Zeitraum von 14 Jahren von der Anwendung eines Erfüllungsfaktors befreit.

Werden Altanlagen, die bereits eine Zuteilung von Emissionsberechtigungen erhalten haben, durch Neuanlagen ersetzt, so können die Emissionsberechtigungen im Umfang der Zuteilung für die Altanlage für einen Zeitraum von 4 Jahren auf die Neuanlage übertragen werden. Anschließend ist die Neuanlage für einen Zeitraum von 14 Jahren (NAP II) bzw. 10 Jahren (NAP II) von der Anwendung eines Erfüllungsfaktors befreit.

In der laufenden Zuteilungsperiode 2005 bis 2007 (NAP I) stehen jährlich Emissionsberechtigungen im Umfang von 499 Mio. t CO₂ zur Verfügung. Die Minderungsleistung für den Sektor Energie und Industrie gegenüber der Basisperiode betragen rund 10 Mio. t CO₂ pro Jahr. Für die Zuteilungsperiode 2008 – 2012 (NAP II) stehen Emissionsberechtigungen jährlich nur noch im Umfang von 482 Mio. t CO₂ zur Verfügung; die Minderungsleistung im Sektor Energie und Industrie soll auf 15 Mio. t CO₂ pro Jahr gegenüber der Bezugsperiode 2000 – 2002 steigen.

Darüber hinaus bestanden beim NAP I weitere Sonderregelungen, die teilweise beim NAP II keine Gültigkeit mehr haben. Eine zusammenfassende Darstellung der jeweiligen Unterschiede kann der Literatur entnommen werden [Schöpe 2006].

4.3.2 Zuteilungs-Gesetz und Zuteilungs-Verordnung

Der nationale Allokationsplan (NAP) der Bundesregierung stellt, nach Zustimmung der europäischen Kommission, die Grundlage für das sogenannte Zuteilungs-Gesetz dar, das von der Bundesregierung erlassen wird. Erst dieses Gesetz legt fest, auf welcher Grundlage die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) beim Umweltbundesamt Entscheidungen im Einzelfall zu treffen hat.

Der Entwurf eines Zuteilungs-Gesetzes für den NAP I (Handelsperiode 2005 – 2007) wurde als "Gesetz über den nationalen Zuteilungsplan für Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2005 bis 2007 ZuG 2007 - Zuteilungsgesetz 2007" [ZuG 2007] am 21. April 2004 durch das Bundeskabinett beschlossen und am 28. Mai 2004 in der vom Vermittlungsausschuss beschlossenen Fassung durch den Bundestag angenommen. Nachdem der Gesetzentwurf vom Bundesrat ebenfalls in den Vermittlungsausschuss verwiesen wurde, dort aber kein konsensfähiger Beschluss gefasst werden konnte, ist das Gesetz am 09. Juli 2004 mit der Stimmenmehrheit der Regierungskoalition im Bundestag verabschiedet worden.

Das ZuG 2007 trat am 31. August 2004 in Kraft. Die betroffenen Anlagenbetreiber hatten danach bis zum 20. September 2004 Gelegenheit, die Zuteilungsanträge an die Deutsche Emissionshandelsstelle zu stellen. Die Zertifikate wurden bzw. werden jeweils in Jahrestanchen bis zum 28. Februar des jeweiligen Jahres ausgegeben. Danach sind die Zertifikate innerhalb der EU frei handelbar.

Jeweils zum 30. April eines Jahres (erstmalig 2006) hat ein Anlagenbetreiber eine Anzahl von Berechtigungen an die zuständige Behörde abzugeben, die den durch seine Tätigkeit im vorangegangenen Kalenderjahr verursachten Emissionen entspricht.

Für die erste Handelsperiode 2005 bis 2007 wurden insgesamt 2.060 Anträge auf Zuteilung von Emissionsberechtigungen an die DEHSt gestellt; insgesamt nehmen aber nur 1.860 Anlagen aus der Energiewirtschaft und energieintensiven Industriesparten am Emissionshandel teil. Dennoch überstieg die Menge der beantragten Emissionsberechtigungen die für die Jahre 2005 bis 2007 vorgesehene Maximalmenge (1,485 Mio. t CO₂) um insgesamt 42 Mio. t – entsprechend rund 2,8 %. Diese Überschreitung des Budgets resultiert u.a. aus der sehr starken Nutzung der s.g. "Optionsregel" nach § 7 Abs. 12 in Verbindung mit § 11 ZuG 2007. Danach hatten die Betreiber bestehender Anlagen die Möglichkeit, den

Umfang der beantragten Emissionsberechtigungen nicht auf der Basis der "historischen" Emissionen der Bezugsjahre 2000 – 2002, sondern anhand der in den kommenden Jahren geplanten Produktionsmenge zu bestimmen. Diese Regelung, die eine der Forderungen der Industrie bei den Verhandlungen über den Umfang der Emissionsberechtigungen im Frühjahr 2004, führte dazu, dass bei der Zuteilung von Emissionsberechtigungen für Altanlagen (auf Basis der historischen Emissionen) und zur Wahrung der Obergrenze der zu verteilenden Berechtigungen ("cap") ein veränderter "Erfüllungsfaktor" bzw. ergänzender Ausgleichsfaktor von 0,9538 angesetzt wird, der den Umfang der zugeteilten Emissionsberechtigungen weiter reduziert.

Ergänzt wird das Zuteilungsgesetz durch die Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen (Zuteilungsverordnung 2007 – ZuV 2007) [ZuV 2007], die seitens der Bundesregierung am 04. August 2004 als Entwurf verabschiedet wurde. Die Zuteilungsverordnung trat ebenfalls am 31. August 2004 in Kraft und regelt die technischen Details der Berechnung und Zuordnung der Emissionsberechtigungen.

4.4 Weitere Rechtsvorschriften

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Rechtsvorschriften beziehen sich auf den Emissionshandel und betreffen somit sehr unterschiedliche Branchen der Wirtschaft. Für Errichtung und Betrieb technischer Anlagen, wie z.B. eine Sonderabfallverbrennungsanlage, sind sehr unterschiedlichen Rechtsgebiete, Normen, und andere Vorschriften zu berücksichtigen.

Die nationalen Vorschriften stehen in der Regel in einem direktem Zusammenhang mit Richtlinien, Entscheidungen oder anderen rechtlichen Vorgaben auf europäischer Ebene. Bereits existierende nationale Vorschriften müssen bei Änderung der europäischen Vorgaben auf nationaler Ebene angepasst werden.

Die folgende Darstellung beschränkt sich auf eine kurze Darstellung der wesentlichen Vorschriften und Zusammenhänge aus dem deutschen Abfall- und Bundesimmissionsschutzrecht.

4.4.1 Abfallrecht

Im Mittelpunkt des deutschen Abfallrechts steht das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) [KrW-/AbfG], das 1994 erlassen worden ist. Das Gesetz enthält u.a. wichtige Bestimmungen für den Umgang mit Abfällen, wie zum Beispiel die Hierarchie von Vermeidung, Verwertung und Beseitigung. Außerdem sind die Anforderungen an eine thermische Verwertung im KrW-/AbfG festgelegt.

Das KrW-/AbfG wird durch zahlreiche Verordnungen ergänzt, die den Abfallerzeuger, den Abfallentsorger, spezifische Abfallarten, die Abfalldeponierung und andere Themen betreffen. Im Zusammenhang mit der Organisation der Sonderabfallverbrennung kommt der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) [AVV] eine große Bedeutung zu; sie enthält eine europaweit einheitliche Liste von Abfällen. Insgesamt enthält die AVV 839 Abfallarten, von denen 405 mit einem "*" als gefährlich, d.h. als besonders überwachungsbedürftig Abfälle, gekennzeichnet sind.

Außerdem ist die Abfallablagerungsverordnung (AbfAbIV) [AbfAbIV] hervorzuheben, die seit dem 1. Juni 2005 eine Vorbehandlung von Abfällen vor der Ablagerung auf Deponien fordert. Aufgrund dieser Verordnung hat sich die Situation bei der thermischen Behandlung von Restmüll und Sonderabfall umfassend geändert.

4.4.2 Bundesimmissionsschutzrecht

Mit dem Bundesimmissionsschutzrecht sollen allgemein Atmosphäre, Boden, Wasser, Menschen, Tiere und sonstige Sachgüter vor nachteiligen Umwelteinwirkungen geschützt werden. Neben dem direkten Schutz ist auch die Vorbeugung gegen negative Auswirkungen Bestandteil des Bundesimmissionsschutzrechts.

Im Mittelpunkt steht das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [BImSchG], dessen Geltungsbereich nicht nur technische Anlagen, sondern z.B. auch Kraftfahrzeuge oder Luftfahrzeuge erfasst.

Das BImSchG enthält nur allgemein abgefasste Vorschriften und keine detaillierten Anforderungen wie zum Beispiel Emissionsgrenzwerte. Zu den wesentlichen Inhalten des Gesetzes gehört die Forderung nach einer Genehmigung für technische Anlagen, die schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen oder in anderer Weise die Nachbarschaft negativ beeinflussen können. Außerdem fordert das BImSchG in § 5 u.a. die bevorzugte Abfallvermeidung bzw. die Verwertung und einen sparsamen und effizienten Umgang mit Energie.

Verordnungen zum BImSchG schreiben u.a. vor, welche technischen Anlagen aus verschiedenen Wirtschaftsbereichen einer bundesimmissionsschutzrechtlichen Genehmigung bedürfen und wie das Genehmigungsverfahren durchzuführen ist.

Außerdem existieren Verordnungen zum BImSchG, die genaue Anforderungen an den Betrieb von bestimmten technischen Anlagen enthalten. Für die Verbrennung von Abfällen ist die "Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen- 17. BImSchV" [17. BImSchV] maßgeblich, die 1990 erlassen wurde und in der Vergangenheit mehrfach geändert wurde. Die Verordnung enthält sowohl Emissionsgrenzwerte, als auch Anforderungen an Temperaturen und technische Ausrüstungen der Verbrennungsanlage.

Zwischen einer thermischen Verwertung und einer thermischen Beseitigung von Abfällen gibt es in der Verordnung keine Unterschiede. Für die Sonderabfallverbrennung sind allerdings die speziellen Anforderungen an die Verbrennungstemperaturen zu berücksichtigen. Bei der Verbrennung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen mit bestimmten Chlorgehalt steigt die einzuhaltende Verbrennungstemperatur von 850 auf 1100 °C.

Die Anforderungen der 17. BImSchV aus dem Jahr 1990 wurden im Jahr 2000 weitgehend in die "Richtlinie 2000/76/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen" [2000/76/EG] übernommen und gelten zukünftig für alle europäischen Abfallverbrennungsanlagen. Ein detaillierter Vergleich zeigt, dass die 17. BImSchV bereits seit der Aktualisierung 1999 für Quecksilber einen schärferen Grenzwert (0,03 mg/m³) enthält als die europäische Richtlinie 2000/76/EG (0,05 mg/m³).

5 Grundlagen der Sonderabfallverbrennung

Der Begriff "Sonderabfall" wird, wie bereits oben im Text erläutert, seit vielen Jahren verwendet, aber eine exakte Definition enthalten insbesondere bundesdeutsche Rechtsvorschriften nicht. Allgemein wird davon ausgegangen, dass es sich bei Sonderabfällen um Abfälle aus Produktionsprozessen oder Industrieunternehmen handelt, an deren Entsorgung besondere Anforderungen zu stellen sind. In Abhängigkeit der jeweiligen Eigenschaften der Sonderabfälle kann die Entsorgung durch Ablagerung auf geeigneten Deponien, durch Behandlung in chemisch-physikalischen Anlagen sowie durch Verbrennung in spezialisierten Anlagen erfolgen. In Deutschland existieren ca. 30 größere Sonderabfallverbrennungsanlagen mit einer Gesamtkapazität im Bereich von 1 Mio. t pro Jahr.

Für die Verbrennung von Sonderabfällen stehen Anlagen in unterschiedlichen Größen und mit verschiedenen Feuerungstechniken zur Verfügung, deren Auswahl durch die Eigenschaften der zu verbrennenden Abfälle bestimmt wird. Im Fall der größeren Sonderabfall-

Verbrennungsanlagen besteht für eine kombinierte Verbrennung von festen, flüssigen oder pastösen Abfällen die Feuerung an über 20 Standorten aus einem Drehrohrofen mit nachgeschalteter Brennkammer und Abhitzekeessel zur Wärmenutzung. Neben öffentlich zugänglichen Anlagen dieser Art für die überregionale Abfallentsorgung existieren z.B. bei der Bayer AG oder BASF AG auch betriebseigene Anlagen. Die Entwicklung dieser Technologie wurde entscheidend durch die BASF in Ludwigshafen beeinflusst [Leib 1963] [Joschek 1995]. Die Anlage der HIM GmbH am Standort Biebesheim, die in Abschnitt 5.1 genauer beschrieben wird, entspricht dem typischen Aufbau einer Drehrohranlage.

Neben den Anlagen mit Drehrohrtechnik existieren mehrere statische Brennkammern für die Verbrennung von Abgasen und flüssigen Abfällen. Zu den flüssigen Abfällen zählen auch Abwässer die aufgrund ihrer Toxizität nicht in eine biologischen Abwasserbehandlungsstufe gelangen dürfen.

5.1 Die Anlage am Standort Biebesheim

Die HIM GmbH betreibt an Standorten in Hessen und Baden-Württemberg verschiedene Anlagen für die Entsorgung von Abfällen. Die Entwicklung der HIM GmbH geht auf die 1972 gegründete "Industriemüllgesellschaft mbH" zurück, die 1974 aufgrund einer Veränderung bei den Gesellschaftern in "HIM Hessische Industriemüll GmbH" umbenannt wurde. Die Übernahme der Sonderabfallentsorgung Baden-Württemberg GmbH im Jahr 2000 führte zum heutigen Firmennamen HIM GmbH [König 2002]. Neben der Abfallentsorgung und Altlastensanierung bilden abfalltechnische Beratungsleistungen und Schulungen die wichtigsten Geschäftsbereiche der HIM GmbH.

Am Standort Biebesheim betreibt die HIM GmbH eine Anlage zur Verbrennung von Sonderabfällen. Der prinzipielle Aufbau der Verbrennungsanlage am Standort Biebesheim entspricht dem üblichen Aufbau von Sonderabfallverbrennungsanlagen mit Drehrohrfeuerung.

Die Abbildung 4 zeigt den Aufbau einer der beiden Verbrennungslinien am Standort Biebesheim, die im Dezember 1981 [HIM 2006/1] in Betrieb gegangen sind. Ende der 80er Jahre wurde im Rahmen der Diskussion um die TA Abfall [TA Abfall] eine Umschichtung der Sonderabfallentsorgung von der Deponie zur Verbrennung diskutiert [Erbach 1987]. Die Planungen für eine dritte Verbrennungslinie [Erbach 1988] [Erbach 1990] am Standort Biebesheim wurden Anfang der 90er Jahre eingestellt [König 2002].

Die thermische Gesamtleistung einer Verbrennungslinie wird mit 17,5 MW angegeben [HIM 2006/1]. Die Darstellung in Abbildung 4 erfasst allerdings nicht alle Bereiche der Anlage, denn die Verbrennung von Sonderabfällen erfordert im Vergleich zu der Verbrennung von Hausmüll eine aufwändige Eingangskontrolle, Logistik und Lagertechnik. Neben einem Bunker sind für die zur Verbrennung vorgesehenen Abfälle Fass- und Tanklager notwendig [Schöner 1990/1].

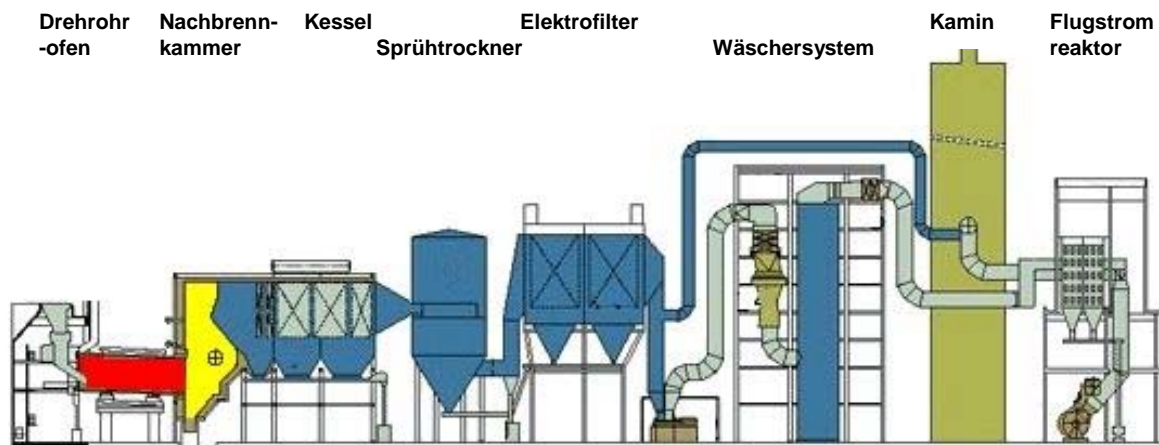


Abbildung 4: Schema der Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim ([HIM 2006/1] angepasst).

Ältere Informationen zur Vorbehandlung und Lagerung der Abfälle am Standort Biebesheim enthält [Suchomel 1994/1]. Auf die Problematik der Abfalllagerung, die auch mit dem Immissionsschutzrecht und Wasserrecht verknüpft ist, wird im Rahmen dieses Textes nicht im Detail eingegangen. In Abbildung 5 ist ein Teil des Abfalllagers am Standort Biebesheim zu sehen.



Abbildung 5: Teilansicht des Abfalllagers am Standort Biebesheim [HIM 2006/2].

Die zentrale Einheit der Verbrennungsanlage ist der Drehrohr-ofen, dem die zu verbrennenden Abfälle über die Stirnseite zugeführt werden. Die Länge des Ofens wird mit 11 m, der innere Durchmesser mit 3,6 m und die Neigung mit 3° angegeben. Eine Seitenansicht des Drehrohr-

ofens zeigt Abbildung 6. In Abhängigkeit von den Abfalleigenschaften werden die Abfälle in das Drehrohr eingedüst oder über eine Schurre mit einer vorgeschalteten Schleuse aufgegeben. Die Aufgabe der Abfälle erfolgt nicht beliebig, sondern nach einem genau festgelegten Verbrennungsfahrplan [HIM 2006/1] [Suchomel 1994/2].



Abbildung 6: Seitenansicht des Drehrohrofens [HIM 2006/2].

Die Verweilzeit der festen Stoffe im Drehrohr beträgt 30 bis 40 Minuten. Bei Temperaturen im Bereich von ca. 1200 °C entsteht vorwiegend eine zähflüssige Schlacke mit einem guten Ausbrand, die gezielte Zugabe von schlackebildenden Abfällen vermindert den Verschleiß des Ausmauerungsmaterials.

Die bei der Verbrennung der Abfälle als Rückstand anfallende Schlacke und die entstandenen Rauchgase gelangen in die angeschlossene Nachbrennkammer. Die Schlacke fällt nach unten in ein Wasserbad und wird anschließend ausgetragen. Die Eigenschaften der Schlacke gestatten eine Verwertung. [Suchomel 1994/2]

Der vollständige Ausbrand der im Drehrohr gebildeten Rauchgase wird in der Nachbrennkammer durch zusätzliche Brenner und Vorrichtungen für eine weitere Luftzufuhr sichergestellt. Außerdem wird in die Nachbrennkammer Ammoniakwasser eingedüst, um die Stickoxidemissionen weiter zu reduzieren (SNCR-Verfahren). Die Temperaturen in der Nachbrennkammer erreichen ca. 950 °C. [HIM 2006/1]

Anschließend werden die Rauchgase im Abhitzeessel auf ca. 290 °C abgekühlt; die gewonnene Wärmeenergie wird zur Dampferzeugung genutzt. Für die Auslegung und Konstruktion einer Sonderabfallverbrennungsanlage allgemein bilden das Drehrohr, Nachbrennkammer und Abhitzeessel eine Einheit. Die Dampfparameter des Kessels am Standort Biebesheim werden mit 290 °C und 26 bar (280 °C, 25,5 bar [Erbach 1984]) angegeben. Die Dampfturbinen- und Generatorleistung beträgt 4,3 MW. [HIM 2006/1]

Vom Kessel gelangen die Rauchgase in eine mehrstufige Rauchgasreinigungsanlage, in der die im Rauchgas enthaltenen Stäube und Schadstoffe abgetrennt werden. In der ersten Verfahrensstufe, einem Sprühtrockner, werden mit der restlichen Wärmeenergie der Rauchgase die eingedüsten neutralisierten Absalzungen aus dem Wäschersystem eingedampft. Bei

diesem Prozess sinkt die Rauchgastemperatur von 290 auf etwa 180 °C, und es entstehen feste Salzpartikel. Im nachfolgenden Elektrofilter werden diese Salzpartikel gemeinsam mit dem bei der Verbrennung gebildeten Flugstaub aus dem Rauchgas abgetrennt und anschließend einer Untertagedeponie zugeführt. [HIM 2006/1]

Die nächste Stufe der Rauchgasreinigungsanlage bildet ein mehrstufiges Wäschersystem. Hier werden überwiegend HCl und SO₂ sowie HF, Feinstäube und Aerosole aus dem Rauchgas abgetrennt. [HIM 2006/1]

Abweichend von der Darstellung in Abbildung 4 wird für die Abscheidung der Flugstäube und der Salzpartikel in älteren Beschreibungen der Anlage ein Zyklon erwähnt [Erbach 1988]. Neben der Staubabscheidung wurde auch das Wäschersystem geändert [Erbach 1989] [Schöner 1990/2].

Die letzte Rauchgasreinigungsstufe am Standort Biebesheim bildet heute ein Flugstromverfahren. Diese Rauchgasreinigungsstufe wurde im Sommer 1993 nachgerüstet [Suchomel 1994/2] und dient der Abscheidung von Dioxinen, Furanen sowie Restmengen an Quecksilber und sauren Schadgasen (SO₂, HCl usw.). Hier wird ein Gemisch aus Kalziumhydroxid und Aktivkohle für eine chemische Reaktion bzw. Adsorption der Schadstoffe dem Rauchgasstrom zugeführt. Mit einem nachfolgenden Gewebefilter wird das Additiv aus dem Rauchgas wieder abgetrennt, verbrauchtes Additiv wird dem Drehrohrofen zur thermischen Behandlung zugeführt. Anschließend werden die Rauchgase über einen 75 m hohen Kamin mit einer Temperatur von 110 °C an die Atmosphäre abgegeben. [HIM 2006/1]

Die einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen wurden in der Vergangenheit immer weiter verschärft. Seit 1990 werden in Deutschland die Emissionsgrenzwerte durch die Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV) [17. BImSchV] vorgegeben. Eine Übersicht mit älteren Vorschriften und entsprechenden Messwerten für die Anlage am Standort Biebesheim zeigt die Tabelle 4.

Tabelle 4: Emissionswerte der Sonderabfallverbrennungsanlage Biebesheim [Erbach 1991].

Genehmigte und gemessene Werte, jeweils in mg/m ³						
	PFB	TÜV	TAL	TÜV	BIV	TÜV
	1882	1983	1986	1987	1990	1990
Stoff						
Staub	75	51	30	21	10	< 0,5
CO	100	44	100	17	50	< 12
HCl	100	23	50	29	10	< 1
SO ₂	200	101	100	44	50	< 6
HF	5	0,4	2	1,6	1	< 0,6
C _{org}	50	8	20	19	10	< 6
PFB: Planfeststellungsbeschluß TÜV: Technischer Überwachungsverein TAL: Technische Anleitung Luft BIV: 17. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz						

Der aktuelle Aufbau der Rauchgasreinigung, dargestellt in Abbildung 4, ermöglicht eine deutliche Unterschreitung der aktuellen Emissionsgrenzwerte, insbesondere aufgrund des nachgerüsteten Flugstromverfahrens. Einen Vergleich der gemessenen Schadstoffkonzentrationen

am Standort Biebesheim, gemittelt für das Jahr 2002, mit den rechtlich geforderten Emissionsgrenzwerten zeigt Abbildung 7.

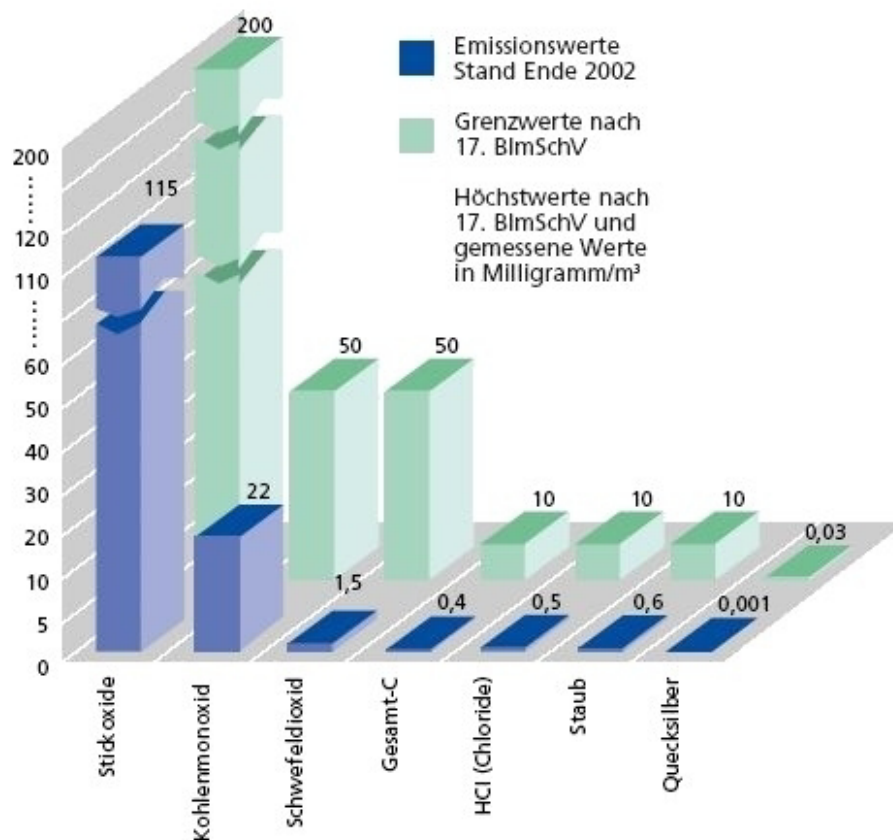


Abbildung 7: Emissionsgrenzwerte (Tagesmittelwerte) im Vergleich zu Messdaten für die Anlage in Biebesheim [HIM 2006/1] angepasst).

6 CO₂-Emissionen der Anlage

Für die Bestimmung der Kohlendioxidemissionen aus großtechnischen Verbrennungsanlagen stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Für Kraftwerke können die Kohlendioxidemissionen beispielsweise auf Grundlage des Brennstoffeinsatzes und unter Berücksichtigung eines brennstoffspezifischen Standardemissionsfaktors sowie eines anlagen- bzw. technologiespezifischen Oxidationsfaktors berechnet werden. Die Berechnungsvorschriften sind in der Emissionshandelsrichtlinie [2003/87/EG] sowie der Zuteilungsverordnung [ZuV 2007] definiert. Bezüglich einer sachlichen Diskussion der Berechnungsmethoden sowie der Betrachtung möglicher Unsicherheiten und einer statistischen Bewertung wird auf folgende Literatur verwiesen [Köhler 2003] [Bockamp 2004] [Prenzel 2004]. Dieser Ansatz war aufgrund des heterogenen und in keiner Weise standardisierten Brennstoffs Abfall für die Sonderabfallverbrennungsanlage in Biebesheim nicht durchführbar.

Als alternative Methode musste daher auf die direkte Messung der Kohlendioxidemissionen ausgewichen werden; sowohl die Emissionshandelsrichtlinie als auch die Zuteilungsverordnung 2007 enthalten Vorgaben zur Messung der CO₂-Emissionen [2003/87/EG] [ZuV 2007]. Entsprechend den Anforderungen aus der 17. BImSchV, dritter Teil (Messung und Überwachung) [17. BImSchV] ist die Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim mit einer Emissionsüberwachung ausgerüstet. Vor dem Kamin werden die

Rauchgasbestandteile Staub, TOC, HCl, SO₂, NO_x, CO und O₂ sowie das Schwermetall Quecksilber kontinuierlich gemessen. Außerdem wird die Emission von Dioxinen sowie von weiteren Schwermetallen und anderen Schadstoffen in diskontinuierlichen Messungen bestimmt. Informationen über die in Deutschland eingeführte Praxis bei der Emissionsüberwachung an genehmigungsbedürftigen Anlagen findet man z.B. in [UMEG 2001].

6.1 Messung der CO₂-Emissionen

Für die Erfassung von CO₂ im Rauchgas war an der Anlage in Biebesheim, wie allgemein üblich, keine messtechnische Einrichtung vorgesehen, so dass für die Messung der CO₂-Konzentration im Rahmen der hier geschilderten Untersuchungen zunächst ein geeignetes Messgerät installiert werden musste

Für diese Messungen stand ein Messgerät der Firma Hartmann & Braun (Typ URAS 3k) zur Verfügung. Das Gerät wurde nach einer Wartung und Rekalibrierung beim Hersteller an der Verbrennungslinie 1 der Anlage im Messraum am Kamin aufgebaut. Für die Messungen konnte der aufbereitete Rauchgasteilstrom verwendet werden, der die ständig installierten Rauchgasanalysegeräte verlässt. Die Messwerte wurden im Abstand von 20 sec. auf einem Datenlogger/Digitalschreiber (Endress+Hauser, Ecograph A) abgespeichert.

Das Messprinzip des installierten Gerätes beruht auf der nichtdispersiven Infrarot-Absorption (NDIR-Verfahren), dessen prinzipieller Aufbau in Abbildung 8 dargestellt ist.

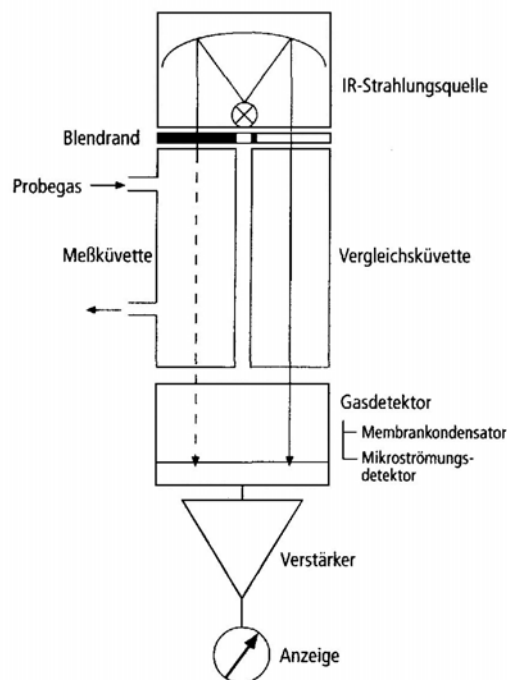


Abbildung 8: Schema eines NDIR-Analysators [Thomé-K. 2004].

Bei diesem Verfahren wird die Absorption im infraroten Wellenlängenbereich der zu bestimmenden Rauchgaskomponente ausgenutzt. Nach dem NDIR-Messprinzip arbeitende Analysatorgeräte sind mit zwei Küvetten ausgerüstet. Die Messküvette wird vom Rauchgas durchströmt, die Vergleichsküvette ist mit einem Inertgas (z.B. N₂) gefüllt. Die erforderliche Selektivität wird durch den Gasdetektor erreicht, der mit dem Messgas gefüllt ist. Durch den Einbau eines Blendenrades verursachen die abwechselnd den Detektor erreichenden unterschiedlichen Lichtintensitäten ein Messsignal, das in eine Wechselspannung umgesetzt

wird. Diese Wechselfspannung dient als Maß für die Konzentration der gesuchten Komponente.

Das beschriebene NDIR-Verfahren eignet sich auch für die Konzentrationsbestimmung anderer Rauchgaskomponenten. In Abhängigkeit vom Hersteller und Rauchgaskomponente werden abweichend von Abbildung 8 zusätzliche Filter installiert.

Während der Untersuchungen wurde das Messgerät wöchentlich kalibriert, wobei für die Einstellung des Nullpunktes reiner Stickstoff, und für das Justieren des Messbereichsendpunktes ein Prüfgas mit 20 Vol.-% CO₂ (entsprechend dem max. Wert des Messbereichs) in reinem Stickstoff verwendet wurden.

Dem NDIR-Messprinzip immanent ist eine Querempfindlichkeit zu solchen Gaskomponenten, die im identischen Wellenlängenbereich IR-Strahlung absorbieren (Vergleiche Kapitel 3.2, Abbildung 2). Im Zusammenhang mit der Messung der CO₂-Konzentration im Reingas einer Sonderabfallverbrennungsanlage sind insbesondere die Gaskomponenten Wasser(dampf), Distickstoffmonoxid und Kohlenmonoxid zu berücksichtigen. Das Konzentrationsniveau für den Summenparameter "Stickoxide" (NO_x) im Reingas der SAV in Biebesheim bewegt sich im Bereich von 0,004 bis max. 0,008 Vol.-% - und für die Komponente Kohlenmonoxid im Bereich von 0,001 bis max. 0,004 Vol.-%. Der Einfluss dieser "Begleitgase" auf die CO₂-Messung (bis max. 14 Vol.-%) kann vernachlässigt werden.

Die relative Luftfeuchtigkeit im Reingas vor dem Kamin beträgt rund 20 % - das entspricht rund 65 g Wasser pro m³ bzw. einem Anteil von rund 8 Vol.-%. Im Zuge der Messgasaufbereitung wird das Messgas u.a. auch gekühlt (5°C) und das entstehende Kondensat abgeführt. Die im Messgas verbleibende Wassermenge beträgt rund 5 g/m³ bzw. rund 1 Vol.-%. Bei dem gewählten Messbereich bis 20 Vol.-% CO₂ kann ein störender Effekt dieses Wasseranteils auf die CO₂-Messung ebenfalls vernachlässigt werden [Zornig 2005]. Auf eine Kompensation dieser Störgröße am Messgerät wurde verzichtet.

Der Messwert der CO₂-Messung unterliegt ferner einem Einfluss durch Druckschwankungen der Atmosphäre. Der atmosphärische Luftdruck am Standort der SAV in Biebesheim wurde für die Dauer der Untersuchung werktäglich protokolliert. Die protokollierten Werte wurden für die rechnerische Korrektur der gemessenen CO₂-Konzentrationen herangezogen.

Anhand der ermittelten Konzentrationswerte und unter Berücksichtigung der Abluftvolumina (Daten aus der kontinuierlichen "Reingasüberwachung" der SAV) wurden die emittierten Kohlendioxidfrachten berechnet.

6.2 Ergebnisse der CO₂-Messungen

Mit der installierten Messtechnik und der angeschlossenen Datenerfassung wurde die CO₂-Konzentrationen im Reingas der Verbrennungslinie 1 am Standort Biebesheim über einen zusammenhängenden Zeitraum von 140 Tagen gemessen und ausgewertet. In Abbildung 9 sind die CO₂-Konzentrationen (Rohdaten) im Reingas, beispielhaft für drei Zeitfenster (A,B, und C) von jeweils 7 Tagen, während der Messkampagnen dargestellt.

Entsprechend der Darstellungen in Abbildung 9 schwankt die CO₂-Konzentration im Abgas relativ stark und erreicht Konzentrationswerte im Bereich zwischen min. 4 und max. 14 Vol.-%. Die Berechnung des Mittelwertes ergab eine Konzentration von ca. 9,2 Vol.-%.

Aus den gemessenen Daten der CO₂-Konzentration im Abgas kann in Verbindung mit Informationen über den Rauchgasvolumenstrom die CO₂-Fracht berechnet werden, die pro Zeiteinheit die Anlage verlässt. Die Abbildung 10 zeigt Daten für die Kohlendioxidkonzentration, den Rauchgasvolumenstrom und die resultierende CO₂-Fracht bzw. -Emission auf der Basis von Stundenmittelwerten für die entsprechenden in Abbildung 9 dargestellten Zeitfenster.

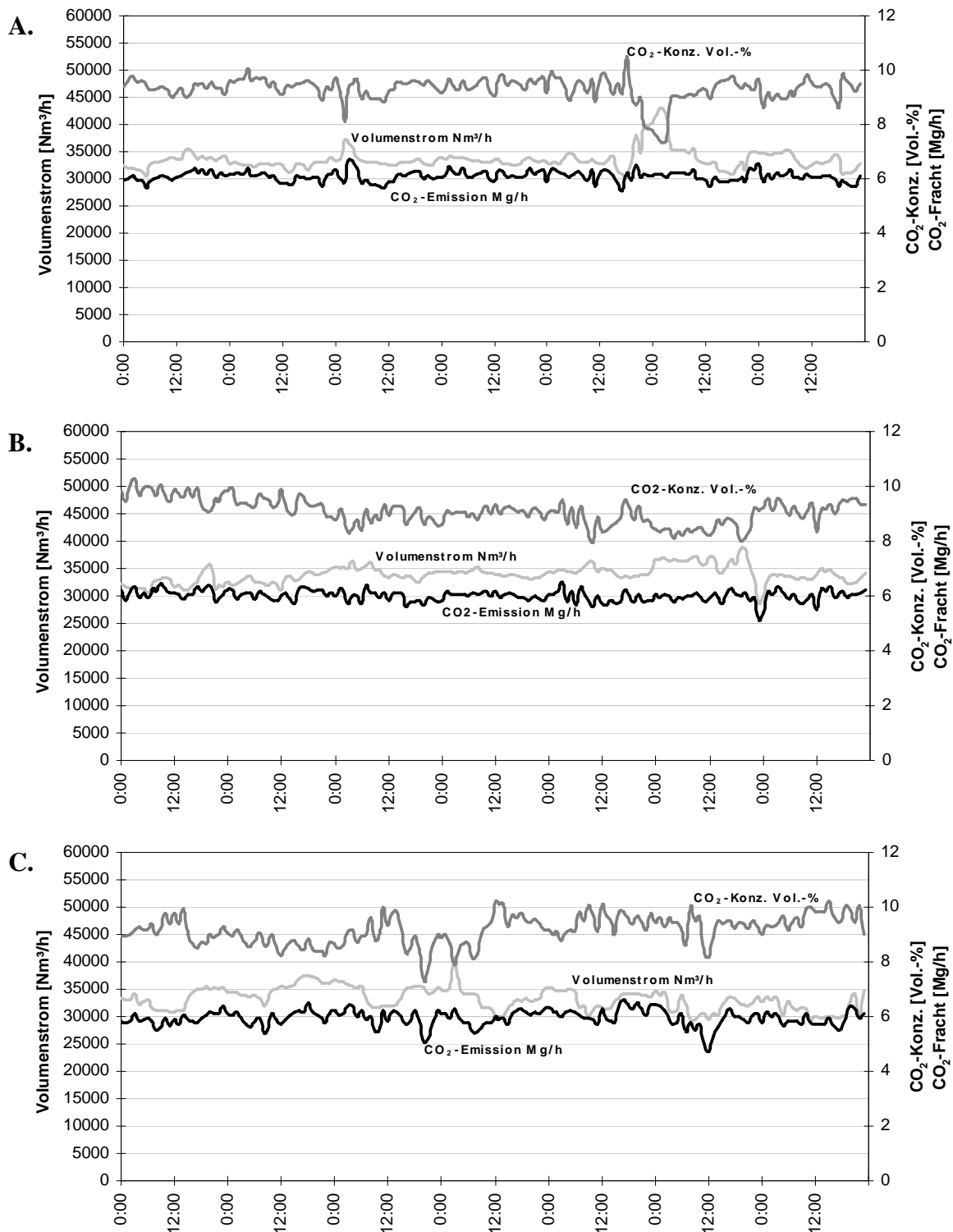


Abbildung 10: Gemittelte CO₂-Konzentrationen, Rauchgasvolumenströme und berechnete CO₂-Emissionen.

Wie in Abbildung 10 dargestellt, variiert der Volumenstrom für das trockene Rauchgas an der Linie 1 während der Untersuchungen in einem Bereich von 30.000 bis 40.000, in Spitzen bis 45.000 Nm³/h. Für die CO₂-Fracht errechnet sich ein Schwankungsbereich von 4,9 bis 6,9 t/h.

Ein Vergleich der Daten aus den verschiedenen Zeitfenstern (A, B, und C) in Abbildung 10 zeigt eine weitgehende Übereinstimmung. Die mathematische Mittelwertbildung für die ausgewählten Zeitfenster ergab Werte im Bereich von 33.219 bis 33.924 Nm³/h für den Rauchgasvolumenstrom. Für die CO₂-Fracht wurden 6,09, 5,95 und 6,01 t/h als Mittelwerte errechnet.

Für die Berechnung der Kohlenstoffbilanz in Kapitel 8 wird daher von 6,0 t CO₂/h ausgegangen.

7 Bestimmung des regenerativen Kohlenstoffanteils

Im Rahmen der Diskussion um den Klimaschutz und den Emissionshandel kommt dem Anteil sog. regenerativer Materialien im Brennstoff einer Verbrennungsanlage eine große Bedeutung zu. Das in den Kapiteln 4.2 und 4.3 erläuterte Handelssystem mit Treibhausgasemissionszertifikaten bzw. Emissionsberechtigungen für Treibhausgase hebt auf die Emission solcher Anteile der Treibhausgase ab, die aus der technischen Umsetzung fossiler Energie- bzw. Kohlenstoffträger (Erdöl, Erdgas, Kohle) resultieren und deren Freisetzung zu einer netto-Zunahme der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre führt [2003/87/EG] [ZuG 2007].

Die Anteile aus "nachwachsenden" oder "regenerativen" Rohstoffen bzw. Energieträgern (Biomasse, Faul- oder Biogas, etc.) bleiben unberücksichtigt, denn diese Stoffe bewirken keine netto-Zunahme der Treibhausgase, sie sind "CO₂-neutral".

Im Rahmen des Emissionshandels werden Anlagen, die unter das Emissionshandels-Regime fallen, mit Emissionsberechtigungen auf der Basis ihrer jeweiligen gesamten Treibhausgasemissionen ausgestattet. Diese Berechtigungen sind allerdings nur für die Anteile der Emissionen aus fossilen Energie- bzw. Kohlenstoffträgern aufzuwenden. Die nicht benötigten Emissionsberechtigungen können veräußert werden; dem Anteil regenerativer Materialien in Brennstoffen kommt daher neben dem ökologischen auch zunehmend ein ökonomischer Stellenwert zu.

EU-Emissionsberechtigungen werden am Spotmarkt der Energie-Börse "European Energy Exchange" (EEX) in Leipzig gehandelt. Der bislang höchste Marktpreis von 30 € für die Emissionsberechtigung von 1 t CO₂ bzw. CO₂-Equivalent wurde im Mai 2006 erreicht. Der aktuelle Marktpreis (Stand August 2006) beträgt rund 16 € pro t CO₂. Abbildung 11 gibt einen Überblick über die Entwicklung des Marktpreises und des Handelsvolumens im Sommer 2006 [EEX 2006].

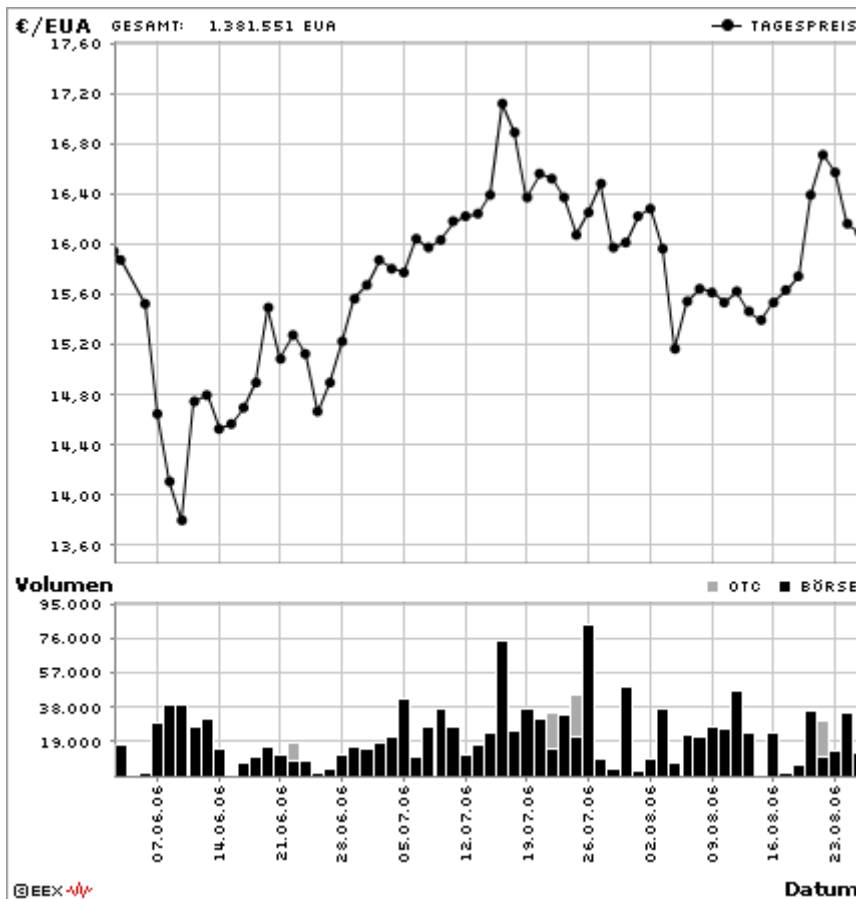


Abbildung 11: Marktpreisentwicklung und Handelsvolumen für EU-Emissionsberechtigungen [EEX 2006].

In Abfällen, die in Sonderabfallverbrennungsanlagen verbrannt werden, können regenerative Materialien wie z.B. Pappe, Papier und Holz u.a. in Form von Verpackungen, verunreinigten Betriebsmittel oder als Bindemittel enthalten sein. Abweichend zur Verbrennung von Hausmüll sind dagegen regenerative Anteile aus Küchen- oder Gartenabfällen nicht zu erwarten.

In den folgenden Abschnitten werden zunächst die verschiedenen Möglichkeiten für die Bestimmung der regenerativen Anteile im Abfall vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der eigenen Arbeiten dargestellt, die am Standort Biebesheim durchgeführt wurden.

7.1 Vergleich der Möglichkeiten für die Bestimmung des Anteils regenerativer Materialien im Abfall

7.1.1 Direkte Bestimmung durch Analyse der Abfälle

Der direkte Weg zur Bestimmung des regenerativen Kohlenstoffanteils im Abfallinput einer Verbrennungsanlage führt über die chemische Analyse der Abfälle. Die Analytik von Abfällen in Verbindung mit der vorangehenden Probenahme stellt aufgrund der in vielen Fällen sehr inhomogenen Eigenschaften der Abfälle eine besondere Problematik dar, die Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten (siehe z.B. [Thomanetz 2002] [Spuziak 1998]) ist. Auch befassen sich verschiedene technische Merkblätter, wie z.B. die "Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie

abgelagerten Materialien" der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) [LAGA PN 98] oder die "Richtlinie Abfallanalytik" [Richtlinie Abfallanalytik] des Landesamtes für Umwelt und Geologie des Freistaates Sachsen, mit dieser Thematik.

Die Bestimmung der regenerativen Anteile im Abfällen, die im Rahmen dieser Arbeit im Mittelpunkt stehen, ist eine zusätzliche Fragestellung. Diese Problematik wird derzeit von verschiedenen Organisationen und Gremien diskutiert.

Die Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz (Münster) hat das existierende RAL-Gütezeichen 724 für Sekundärbrennstoffe [RAL-GZ 724] [Flamme 2006] aufgrund der zuvor dargestellten zunehmenden Bedeutung des regenerativen Anteils mit dem RAL-Gütezeichen "Bestimmung des biogenen Anteils in Sekundärbrennstoffen gemäß RAL-GZ 724 und anderen festen Ersatzbrennstoffen" [RAL-GZ 727] ergänzt.

Die Entwicklung und Definition geeigneter Methoden zur (chemisch) analytischen Bestimmung des Anteils der regenerativen Materialien in den Ersatzbrennstoffen ist u.a. Gegenstand der Arbeit einer Fachgruppe beim Europäischen Komitee für Normung (CEN/TC 343). Bereits im Jahr 2002 wurde dieses von der Europäischen Kommission beauftragt, einen Satz von Technischen Spezifikationen über die Verwendung von Ersatzbrennstoffen bzw. "Solid Recovered Fuels" (SRF) zur energetischen Verwertung in Abfallverbrennungs- und -mitverbrennungsanlagen zu entwickeln. Eine Zusammenstellung der standardisierten Verfahren zur Bestimmung des regenerativen Anteils in EBS soll bis Ende 2006 in Form einer "Technischen Spezifikation" (CEN/TS 15440) veröffentlicht werden. Als geeignete Methoden werden u.a. "selektive Auflösung" unter Verwendung von Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid sowie "händische Sortierung" diskutiert [Zeschmar-Lahl 2006].

Als nationales Spiegelgremium befasst sich beim Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN) im NA 062 Normenausschuss Materialprüfung (NMP) der Arbeitsausschuss Sekundärbrennstoffe (NA 062-05-83 AA) ebenfalls mit dieser Frage.

7.1.2 Bestimmung mit einer Modellrechnung

Der Weg über eine Modellrechnung basiert auf Literaturdaten und nicht wie im vorangehenden Abschnitt auf Messwerten. Grundvoraussetzung für eine Modellrechnung ist die quantitative und qualitative Charakterisierung des Materialgemischs in einem jeweiligen Abfall, ggf. durch vorausgegangene Sortierung oder Sichtung. Anschließend kann anhand ausgewählter Abfallchargen, deren regenerative Anteile bekannt sind, der regenerative Anteil im Abfallinput der Anlage bestimmt werden.

Eine Quelle für die erforderlichen Daten der regenerativen Anteile ist die Liste des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbands [OEWAV 2004] über Kohlenstoffgehalte und biogene Anteile in ausgewählten Abfällen entsprechend der ÖNORM S 2100. Die Zuordnung des biogenen Anteils erfolgt in Abhängigkeit von der österreichischen Abfallschlüsselnummer. Die überwiegende Anzahl der in der Liste aufgeführten Abfälle, insgesamt 52 von 64 Abfällen, enthält entweder nur biogenen (regenerativen) oder fossilen Kohlenstoff. Die restlichen Abfälle sind in der Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Kohlenstoffgehalt – fossil und biogen (bzw. regenerativ) - in ausgewählten Abfällen [OEWAV 2004].

Bezeichnung	C fossil	C biogen
Staub und Schlamm aus der Spannplattenerzeugung	0 - 5%	95 - 100%
Spanplattenabfälle	0 - 5%	95 - 100%
Holz, ölimprägniert	2%	98%
Rückstände aus der Altpapierverarbeitung	5%	95%
Altpapierrejekt (Rückstände aus Altpapierverarbeitung)	40%	60%
Altreifen,-granulat	73%	27%
Kunststoffabfälle	97%	3%
Hausmüll und hausmüllähnl. Gewerbeabfall	45%	55%
Schlamm aus der biologischen Abwasserbehandlung der Zellstoff- und Papierherstellung	5%	95%
Rechengut aus Rechenanlagen von Kraftwerken	0 - 5%	95 - 100%
Heizwertreiche Fraktion (MBA)	56%	44%

7.1.3 Bestimmung über Isotopenmessung

Der überwiegende Teil des im Abfallinput enthaltenen Kohlenstoffinventars wird im Zuge der Verbrennung in Kohlendioxid überführt und als solches mit den sonstigen Abgasen des Verbrennungsprozesses in die Umwelt freigesetzt. Eine Möglichkeit, dieses freigesetzte Kohlendioxid den ursprünglich im Abfall enthaltenen fossilen bzw. regenerativen Materialien zu zuordnen bietet die sogenannten Radio-Carbonmethode. Grundlage dieser Methode, die verbreitet zur Altersbestimmung archäologischer Funde aus organischen Materialien eingesetzt wird, ist die Bestimmung der Zerfallsereignisse des instabilen Kohlenstoffisotops ^{14}C pro Zeiteinheit.

Das ^{14}C -Isotop wird in der oberen Atmosphäre unter dem Einfluss energiereicher Strahlung aus ^{14}N gebildet. Das ^{14}C -Isotop wird durch Luftsauerstoff zu $^{14}\text{CO}_2$ oxidiert und als solches von der Biosphäre aufgenommen. Der Anteil des ^{14}C im Vergleich zum "normalen" ^{12}C beträgt 1 zu $1,2 \times 10^{12}$; belebte Materie enthält die beiden Isotope in eben diesem Verhältnis, das für den Zeitraum der Menschheitsgeschichte als konstant betrachtet werden kann. Nach dem Tod nimmt der Anteil des ^{14}C in der Biomasse aufgrund des Zerfalls des instabilen Isotops und der ausbleibenden Ergänzung durch Stoffwechselfvorgänge stetig ab (Halbwertszeit ca. 5730 a), so dass die Restaktivität mit dem Alter der Probe korreliert.

Fossile Energieträger und alle aus diesen gewonnenen synthetischen Stoffe enthalten aufgrund des Alters von mehreren Millionen Jahren keine ^{14}C -Anteile mehr. Folglich erscheint für die Ermittlung der vergleichsweise "jungen" regenerativen organischen Anteile im Materialgemisch z.B. eines Ersatzbrennstoffs die Radiocarbon-Methode vielversprechend. Die Bestimmung der Zerfallsereignisse in der Materialprobe erlaubt einen Rückschluss auf den Anteil regenerativen Kohlenstoffs; 12,88 Zerfallsereignisse/(Minute · gC) entsprechen 100 pmC (percent modern carbon) bzw. der natürlichen Ausgangsbelastung im Bezugsjahr 1950 [Stuiver 1977].

Die Radiocarbon-Methode wird auch im Zusammenhang mit der Charakterisierung von Brennstoffen aus festen Abfällen auf europäischer Ebene (CEN/TC 343) diskutiert [Zeschmar-Lahl 2006].

Allerdings wird die Interpretation der Ergebnisse dieser Analyseverfahren durch zwei anthropogene Effekte und deren Einfluss auf den ^{14}C -Anteil der Atmosphäre erschwert: Der sog. "Suess-Effekt" beschreibt die allmähliche Verdünnung des atmosphärischen ^{14}C -Anteils durch Freisetzung von ^{12}C aus fossilen Energieträgern (die aufgrund ihres Alters kein ^{14}C enthalten) [Stuiver, 1981]. Außerdem bewirkten die nach dem 2. Weltkrieg und bis Mitte der 60er Jahre durchgeführten atmosphärischen A-Bomben-Tests annähernd eine Verdopplung des ^{14}C -Anteils in der Atmosphäre, die erst allmähliches und überwiegend durch Pufferung in den Ozeanen abklingt [Levin 2004]. Dieser Effekt wird als "bomb-peak" bezeichnet und ist mit dem Suess-Effekt aus der Abbildung 12 ersichtlich.

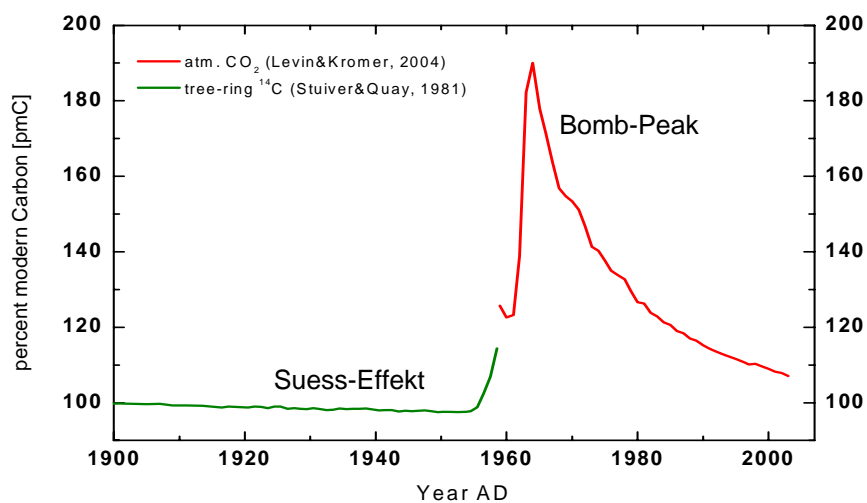


Abbildung 12: "Suess-Effekt" (Linie bis ca. 1955) [Stuiver, 1981] – überlagert vom "Bomb-Peak" (Linie ab ca. 1955) [Levin, 2004]; [Kromer, 2005]

Den möglichen Einfluss dieser Effekte auf die Interpretation eines ^{14}C -Messergebnisses verdeutlicht Abbildung 13. Das in diesem Beispiel gewählte Analyseergebnis von 30 pmc erlaubt, in Abhängigkeit des vermuteten Alters bzw. der Wuchsdauer von Holz bzw. Zellstoff als biogene Komponente (hier: 1, 20, 40 u. 70 Jahre sowie Ernte vor dem "bomb-peak") und der damit variierenden Ausgangskonzentration des ^{14}C (bis zu 140 pmc), eine Bandbreite für den fossilen Probenanteil im Bereich von 69 – 77 %.

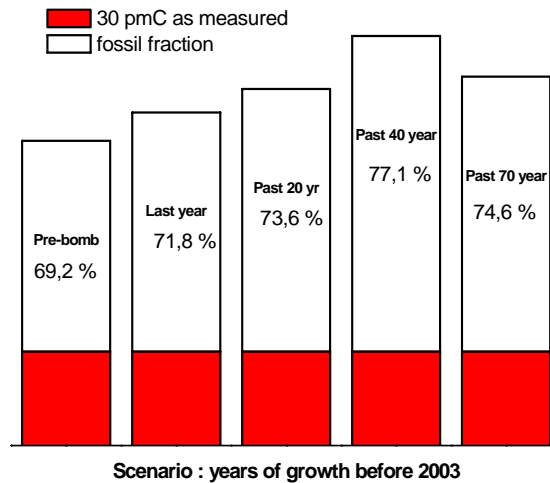


Abbildung 13: Bandbreite der Ergebnisinterpretation der Radio-Carbonmethode [Kromer 2005].

7.2 Bestimmung des Anteils regenerativer Materialien im Abfallinput der Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim

7.2.1 Auswertung verfügbarer Abfalldaten

Im Unterschied zu Hausmüll existieren für die rund 230 verschiedenen Sonderabfälle, die regelmäßig am Standort Biebesheim entsorgt werden, sog. Deklarationsanalysen. Diese beschreiben typische Eigenschaften der zu entsorgenden Abfälle und gehen über die Charakterisierung durch die Abfallschlüsselnummer bzw. die Abfallbezeichnung nach Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) hinaus. Die Konformität einer jeden einzelnen entsorgten Abfallcharge mit der entsprechenden Deklarationsanalyse wird dann nochmals im Rahmen der sog. Identifikationsanalyse überprüft, wobei der Umfang der zu überprüfenden Parameter grundsätzlich identisch ist. Lediglich bei solchen Abfällen, die entsprechend der Deklarationsanalyse weniger als 50 mg/kg PCB und Hg enthalten, wird auf eine Überprüfung des tatsächlichen PCB- und Hg-Gehaltes verzichtet. Einen Überblick bzgl. der analysierten Parameter verschafft Tabelle 6.

Tabelle 6: Parameter der Deklarationsanalyse und Identifikationsanalyse bei der Entsorgung von Abfällen am Standort Biebesheim.

Parameter	Analyseverfahren	Deklarationsanalyse	Identifikationsanalyse
Aussehen	organoleptisch	X	X
Konsistenz	organoleptisch	X	X
Geruch	organoleptisch	X	X
Mischbarkeit bzw. Reaktion mit anderen Abfällen	u.a. Temperatur	X	X
pH-Wert	Schnelltest/Elektrode	X	X
Heizwert	Kalorimeter	X	X
Chlor	RFA/IC	X	X
Schwefel	RFA/IC	X	X
Phosphor	RFA/IC	X	X
Brom	RFA/IC	X	X
Iod	RFA/IC	X	X
Fluor	Potentiometrisch/IC	X	X
PCB	GC	X	Falls in der Deklaration Werte über 50 mg/kg ermittelt wurden
Schlammgehalt	Zentrifuge	X	X
Hg	Schnelltest/AAS	X	Falls in der Deklaration Werte über 50 mg/kg ermittelt wurden

Ein erster Ansatz zur Ermittlung des Anteils regenerativer Materialien bzw. Kohlenstoffs im Abfallinput sah eine Analyse dieses Datenpools vor. Tatsächlich sind aber die im Zuge der vorgenannten Analysen regelmäßig erfassten Parameter vollständig auf die Belange des Betriebes der Verbrennungsanlage ausgelegt. Kohlenstoff wird im Rahmen dieser Analysen nicht berücksichtigt; der bestehende Datenpool war im Sinne der Bestimmung eines Anteils an Kohlenstoff und insbesondere regenerativer Materialien ungeeignet.

7.2.2 Sichtung der Abfälle und Abschätzung des Anteils regenerativer Materialien mittels Modellbildung

In einem zweiten Ansatz wurden zunächst auf Basis der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV) solche Abfälle (Feststoffe) identifiziert, die aufgrund ihrer Herkunft und Bezeichnung das Vorkommen regenerativer Materialanteile wahrscheinlich erscheinen ließen. Die so gewonnene Liste von Abfällen wurde mit den Betriebsunterlagen der SAV am Standort Biebesheim verglichen und die in dieser Anlage entsorgten Massen der gelisteten Abfälle ermittelt.

Gestützt auf Erfahrungswerte seitens des Betriebspersonals wurde diesen Abfällen in einer modellhaften Annahme zunächst typische Anteile TS (Trockensubstanz) sowie Anteile nativer Organik (insbesondere Papier, Pappe und Holz) an der TS zugeordnet. Der C-Anteil in dieser Teilfraktion wurde einheitlich mit 0,45 angenommen. Da eine Sortieranalyse aufgrund der speziellen Eigenschaften der betrachteten Sonderabfälle nicht möglich war, wurden die getroffenen Annahmen im Rahmen einer ausgedehnten Sichtung entsprechender Abfallchargen nach deren Abwurf in den Bunker verifiziert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

Aus dieser Abschätzung geht eine Masse an Kohlenstoff aus regenerativen Materialien im Anlageninput von rund 3.300 t/a hervor. Dies entspricht einer Kohlendioxidmenge von rund 12.000 t/a, die auf die Verbrennung von regenerativen Materialien zurückzuführen wäre. Unter Bezug auf die gesamte freigesetzte CO₂-Menge von rund 90.000 t/a entspricht dies einem Anteil von etwa 13 %, der nicht fossilen Quellen zuzuordnen wäre.

Im Rahmen der Sichtung der Abfälle wurden insgesamt nur 7 Chargen (75 t bzw. 1,6 % der Abfälle im betrachteten Zeitraum) identifiziert, die erkennbar hohe Anteile regenerativer Stoffe, häufig Kartonagen und Sägemehl, enthielten (Abbildung 14). Im Einzelfall wurde der Anteil regenerativer Materialien auf bis zu 50 % geschätzt. Die geschätzte Masse der visuell identifizierten Stoffe lag in der Summe bei nur 18 t bzw. 0,4 % des Anlageninputs im betrachteten Zeitraum. Häufig entziehen sich aber die tatsächlich enthaltenen organischen Abfallbestandteile der visuellen Identifikation. So wurde beispielsweise seitens der Abfallerzeuger bestätigt, dass u.a. den "vorgemischten Abfällen" (AVV-Nr. 190204*) erhebliche Mengen Sägemehl als Bindemittel zugesetzt werden. Obwohl keine der Chargen dieses Abfalls im Rahmen der Sichtung durch einen hohen Anteils regenerativer Materialien aufgefallen war, scheint vor diesem Hintergrund die getroffene Annahme eines regenerativen Materialanteils von 30 % (Siehe Tabelle 7) dennoch plausibel.



Abbildung 14: Charge mit erkennbar hohem Anteil regenerativer Materialien.

Tabelle 7: Abschätzung des Anteils regenerativer Materialien bzw. des regenerativen C-Inventars im Abfallinput der SAV in Biebesheim.

Abfall-schlüssel-Nr.	Bezeichnung (Herkunft)	Entsorgte Menge (t/a)	Anteil-TS/Masse (t/a)	Anteil native Organik/Masse (t/a)	Anteil regenerativer C/Masse (t/a)
070413*	feste Abfälle (aus der HZVA von org. Pflanzenschutzmitteln...) die gefährliche Stoffe enthalten	24	0,7/16,8	0,6/10,1	0,45/4,5
070513*	feste Abfälle (aus der HZVA von Pharmazeutika) die gefährliche Stoffe enthalten	35	0,7/24,5	0,6/14,7	0,45/6,6
110302*	Andere Abfälle (aus Härteprozessen)	44	0,7/30,8	0,6/18,5	0,45/8,3
130501*	feste Abfälle aus Sandfanganlagen und Öl-/Wasserabscheidern	460	0,5/230	0,7/161	0,45/72,5
130508*	Abfallgemische aus Sandfanganlagen und Öl-/Wasserabscheidern	474	0,3/142,2	0,7/99,5	0,45/44,8
140604*	Schlämme oder feste Abfälle, die halogenierte Lösemittel enthalten	98	0,1/9,8	0,5/4,9	0,45/2,2
140605*	Schlämme oder feste Abfälle, die andere Lösemittel enthalten	230	0,1/23	0,5/11,5	0,45/5,2
150110*	Verpackungen, die Rückstände gefährlicher Stoffe enthalten	863	0,8/690	0,5/345	0,45/155,3
150202*	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	2273	0,5/1136,5	0,3/341	0,450,45/153
160305*	organische Abfälle (die nicht anderswo verzeichnet sind), die gefährliche Stoffe enthalten	350	0,7/245	0,6/147	0,45/66,2
160708*	ölbaltige Abfälle (die nicht anderswo verzeichnet sind)	2893	0,6/1438,8	0,5/719,4	0,45/323,7
160709*	Abfälle (die nicht anderswo verzeichnet sind), die sonstige gefährliche Stoffe enthalten	1369	0,7/958,3	0,6/575	0,45/258,7
170204*	Glas, Kunststoff und Holz, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind (Bau- und Abbruchabfälle)	127	0,9/114,3	0,3/34,3	0,45/15,4
170903*	sonstige Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich gemischte Abfälle), die gefährliche Stoffe enthalten	100	0,9/70	0,3/21	0,45/9,5
180103*	Abfälle (Klinikabfälle), an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden	468	0,7327,6	0,6/196,6	0,45/88,5
180104	Abfälle (Klinikabfälle), an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (z. B. Wund- und Gipsverbände, Wäsche, Einwegkleidung, Windeln)	248	0,7/173,6	0,6/104,2	0,45/46,9
190204*	vorgemischte Abfälle (aus Abfallbehandlungsanlagen), die wenigstens einen gefährlichen Abfall enthalten	18385	0,7/12869,5	0,3/3860,9	0,45/1737,4
190209*	feste brennbare Abfälle (aus Abfallbehandlungsanlagen), die gefährliche Stoffe enthalten	968	0,7/677,6	0,3/203,3	0,45/91,5
190810*	Fett- und Ölmischungen aus Ölabscheidern mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 08 09 fallen	390	0,9/351	0,5/175,5	0,45/78,9
190811*	Schlämme aus der biologischen Behandlung von industriellem Abwasser, die gefährliche Stoffe enthalten	111	0,2/22,2	0,6/13,3	0,45/6,0
191211*	sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, die gefährliche Stoffe enthalten	765	0,7/535,5	0,6/321,3	0,45/144,6
Summe regenerativer Kohlenstoff					3319,7

7.2.3 Bestimmung des Anteils regenerativer Materialien mittels Radio-Carbonmethode

Um eine repräsentative Aussage bezüglich des Anteils des in den CO₂-Emissionen der SAV in Biebesheim enthaltene ¹⁴C-Isotops treffen zu können, wurden an insgesamt 5 Terminen Querschnittsproben aus dem Abgas der SAV gewonnen. Hierzu wurde jeweils über einen Zeitraum von 14 Tagen ein Teilstrom des für die routinegemäße Reingasmessung aufbereiteten Abgases mit einer Rate von ca. 0,5 l/h durch einen Glasbehälter mit 1 Liter 1N NaOH geleitet. Unter Berücksichtigung der im Abgas der SAV gemessenen CO₂-Konzentration wurde über den Probenahmezeitraum jeweils bis zu 6 g des im Abgas enthaltenen CO₂ in der Waschlösung absorbiert.

Die auf diese Weise hergestellten Proben wurden zeitnah durch das Radiocarbon-Labor am Institut für Umweltphysik an der Heidelberger Akademie der Wissenschaften hinsichtlich des Gehalts an ¹⁴C untersucht. Die Ergebnisse der ¹⁴C-Bestimmung bzw. die daraus abgeleiteten Anteile regenerativen Kohlenstoffs für die verschiedenen Proben sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Ergebnisse der experimentellen ¹⁴C-Bestimmung (Siehe Text).

Probe	pmc100	pmc110	pmc140
I	13,72 ±0,11	12,47	9,80
II	17,44 ±0,11	15,86	12,46
III	11,46 ±0,09	10,42	8,19
IV	12,63 ±0,10	11,48	9,02
V	11,93 ±0,08	10,85	8,52

Es ist jeweils der prozentuale regenerative C-Anteil der jeweiligen Probe auf der Basis der natürlichen Ausgangsbelastung (pmc100), sowie die berechneten Werte für erhöhte Ausgangsbelastungen (pmc110 und pmc140) in Abhängigkeit einer unterschiedlich langen Wachstumsdauer von Holz (als Ausgangsmaterial für Zellstoff und Papier) bis zur Ernte dargestellt. Unter Berücksichtigung der bestehenden forstwirtschaftlichen Praktiken erscheint eine Wachstumsdauer von 40 Jahren für den für die Herstellung von Zellstoff und Papier verwendeten Rohstoff Holz sinnvoll [Göttsching, 2006]. Der auf dieser Basis (pmc140) ermittelte regenerative C-Anteil in den Proben bewegt sich im Bereich von 8,2 – 12,5 %.

Der prozentuale Massenanteil von Kohlenstoff in organischen Materialien auf der Basis fossiler Rohstoffe (z.B. Kunststoffe auf der Basis von Erdöl) beträgt bis zu 90 %. In regenerativen Materialien beträgt der Massenanteil des Kohlenstoffs dagegen meist zwischen 40 und 50 %. Unter Berücksichtigung dieser Verhältnisse kann der Massenanteil regenerativer Materialien im Abfallinput der Anlage in Biebesheim bis zu 8 % (bezogen auf TS) betragen.

8 Kohlenstoffbilanz der Anlage Biebesheim

Eine Stoffbilanz erfasst alle Stoffeinträge in, bzw. Stoffausträge aus einem System und ermöglicht auf diesem Weg eine Übersicht über den Stoffhaushalt. Allgemein ist eine detaillierte Stoffbilanz ein wichtiges Werkzeug für die Analyse des Betriebs einer technischen Anlage und ggf. die Identifikation möglicher Optimierungspotentiale.

Für eine aussagekräftige Stoffbilanz ist zunächst der Bilanzraum zu definieren. Für die Kohlenstoffbilanz der Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim wurde die gesamte zur Verfügung stehende Verbrennungskapazität (zwei Linien) ausgewählt, den betrachteten Bilanzraum zeigt Abbildung 15.

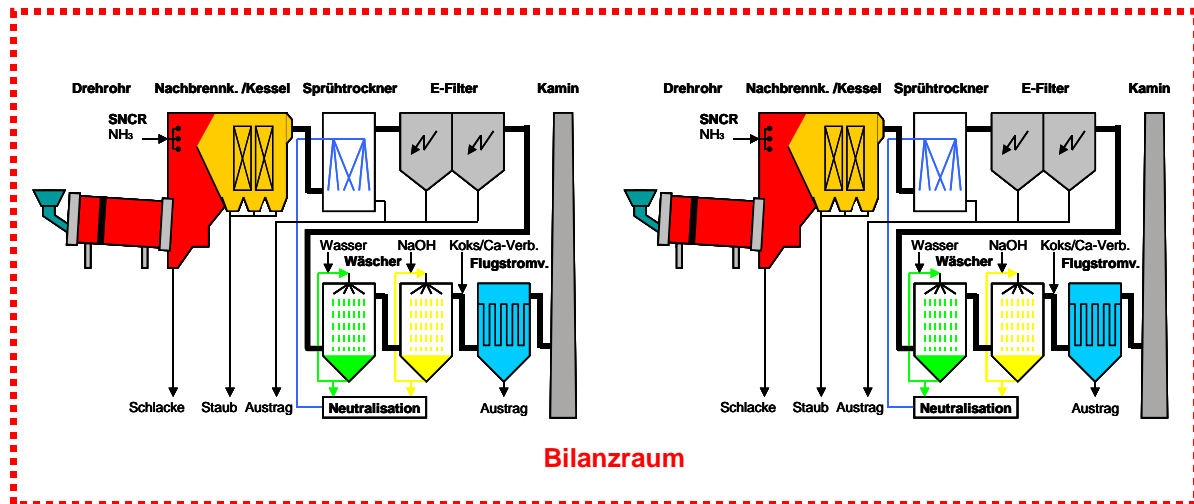


Abbildung 15: Bilanzraum für die Kohlenstoffbilanz.

Zu dem definierten Bilanzraum gehören sowohl 2 Drehrohre, 2 Nachbrennkammern und Kessel als auch die komplette Rauchgasreinigung beider Linien. Für eine vollständige Kohlenstoffbilanz der Anlage müssen alle in den Bilanzraum eintretenden und austretenden Stoffströme berücksichtigt werden, die Kohlenstoff enthalten.

Zu diesen Stoffströmen zählen in erster Linie die Abfälle, die in der Anlage verbrannt werden. Ergänzend ist das Heizöl zu berücksichtigen, das ggf. über Brenner zur Einhaltung von Mindesttemperaturen den Drehrohren bzw. den Nachbrennkammern zugeführt wird. Zusätzlich ist das Additiv bzw. Adsorbens für die Flugstromreaktoren zu berücksichtigen. Das Additiv, ein Gemisch aus Aktivkohle und einer Calciumverbindung, wird in den Tuchfiltern aus dem Rauchgas abgeschieden. Ein größerer Teilstrom wird erneut der Rauchgasreinigung zugeführt, ein kleinerer Teilstrom wird abgezogen und anschließend in den Drehrohren verbrannt. Weitere Stoffströme (NaOH, HCl, Na₂S) treten zwar in den Bilanzraum ein, spielen aber unter dem Aspekt Kohlenstoff keine Rolle.

Im Fall der austretenden Stoffströme steht das Rauchgas im Mittelpunkt, das neben CO₂ und CO auch organische Kohlenstoffverbindungen, erfasst als Summenparameter "total organic carbon" – kurz TOC, enthält. Außerdem ist Kohlenstoff in den festen Rückständen der Anlage enthalten. Zu diesen Rückständen zählen der eigentliche Verbrennungsrückstand, die Schlacke aus den Drehrohren, sowie der Staub aus den Kesseln (Kesselasche) und der Austrag aus den Sprühtrocknern und Elektrofiltern.

Für eine Kohlenstoffbilanz müssen für die genannten Stoffströme sowohl Informationen über den Massenstrom als auch über die jeweiligen Kohlenstoffkonzentrationen vorliegen. Die Daten für die CO₂- bzw. C-Emissionen am Kamin basieren auf den Ergebnissen der eigenen Messungen, die in Abschnitt 6.2 dargestellt wurden. Weitere Informationen zu den verbrannten Abfallmengen, zum Heizölverbrauch und Betriebsmitteleinsatz (Additiv für Flugstromreaktor) sowie über das Aufkommen an Rückständen (Schlacke, Stäube) wurden dem Betriebstagebuch entnommen. Der Kohlenstoffgehalt dieser Stoffströme wurde teilweise aus der Literatur entnommen: Der C-Anteil im Additiv der Flugstromreaktoren (bei einem A-

Kohle Anteil im Additiv von 30 %) wurde mit rund 25 Gew.-%, und der C-Anteil im leichten Heizöl mit 85,5 Gew.-% angesetzt. Teilweise konnte auf die Ergebnisse der chemischen Analysen zurück gegriffen werden, die im Rahmen der Betriebsroutine zur Materialcharakterisierung durchgeführt werden (Schlacke, Kesselasche, Filterstaub, Absalzungen aus der Rauchgaswäsche): Der gesamte C-Anteil in der Schlacke aus den Drehrohren beträgt im Mittel rund 3,5 Gew.-%, wobei der Anteil organischer Kohlenstoffverbindungen (gemessen als TOC) unter 1 Gew.-% ist. Die Verhältnisse für die Kesselasche sind vergleichbar. Im Austrag der Sprühtrockner und der Elektro-Filter ist Kohlenstoff nur in Spuren vorhanden.

Im betrachteten Untersuchungszeitraum waren aus der Linie 1 während 123 Tagen Anlagenbetrieb 17.095 t CO₂ über das Abgas emittiert worden. Im selben Zeitraum wurden 23.862 t feste und flüssige Abfälle verbrannt und 24,1 t Heizöl verbraucht. Ferner wurden 29,5 t Additiv für den Flugstromreaktor (30% A-Kohle) verbraucht und anschließend im Drehrohrofen verbrannt.

Bezogen auf das vollständige Betriebsjahr der gesamten Anlage am Standort Biebesheim war bei einem Durchsatz von 123.204 t Abfall insgesamt eine CO₂-Menge von ca. 88.590 t emittiert worden. Davon entfielen auf den Einsatz von Heizöl (125 t/a im regulären Betrieb, rund 100 t/a für den Anfahrbetrieb nach Revisionsstillständen) ca. 705 t des emittierten CO₂, rund 148 t resultieren aus der A-Kohle im verbrauchten Additiv.

Die resultierenden Kohlenstoffströme zeigt schematisch Abbildung 16. Eine Veranschaulichung als Sankey-Diagramm war aufgrund der zum Teil sehr großen Zahlenwerte nicht möglich.

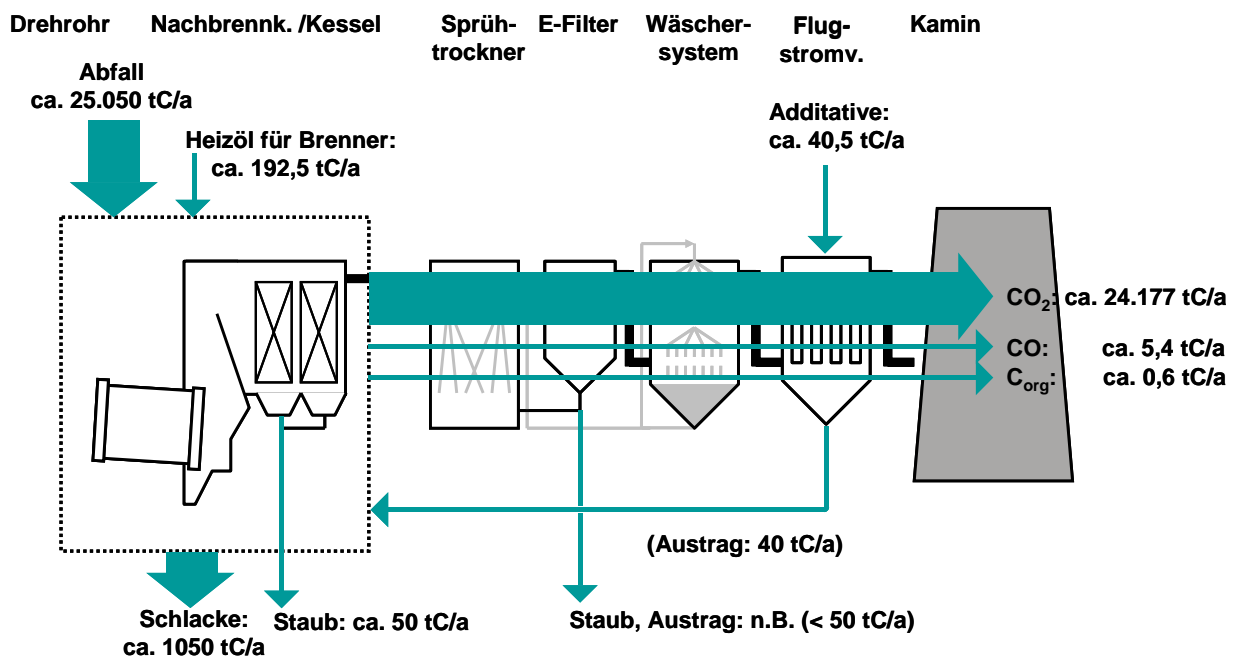


Abbildung 16: Kohlenstoffbilanz für die Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim - bezogen auf ein Betriebsjahr.

Über das Abgas werden rund 24.183 t C freigesetzt, davon 24.177 t C als CO₂, 0,6 t C als TOC und 5,4 t C als CO. Mit der Schlacke (insgesamt 29.500 t) werden rund 1.050 t C

ausgetragen - davon sind max. 300 t Kohlenstoff organischen Ursprungs. In 3.080 t Kesselasche werden rund 50 t C ausgetragen. Der C-Anteil in den Absalzungen der Rauchgaswäsche (ca. 5.500 t) ist gering.

In der Summe verlassen während des vollständigen Betriebsjahres rund 25.283 t C den Bilanzraum. Da über die verschiedenen Betriebsmittel (Heizöl, Additiv) nur rund 233 t C in den Bilanzraum eingetragen werden müssen ca. 25.050 t C in Form der verschiedenen Abfälle in den Bilanzraum eintreten. Über weitere Betriebsstoffe werden rund 1.500 t andere Elemente (Na, S, Cl) in das System eingetragen.

Neben den auf ein Betriebsjahr bezogenen Kohlenstoffströmen sind für Vergleiche ergänzend die auf eine Tonne Abfall bezogenen Stoffströme von Bedeutung. Aufgrund der stark schwankenden Zusammensetzung des Abfallinputs ist hier als Bezugszeitraum ein Betriebsjahr sinnvoll; für die weiteren Berechnungen wurde von einem Durchsatz von 123.204 t/a (s.o.) ausgegangen. In Abbildung 17 sind die Daten bezogen auf 1 Tonne Abfall dargestellt.

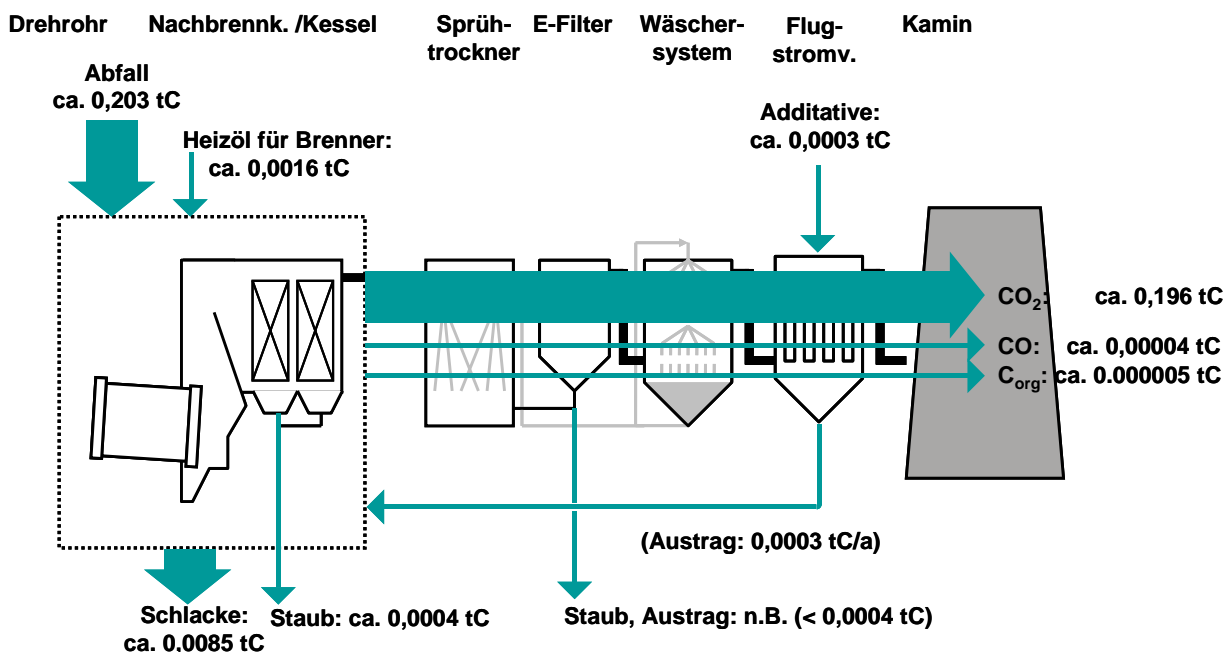


Abbildung 17: Kohlenstoffbilanz für die Sonderabfallverbrennungsanlage am Standort Biebesheim - bezogen auf 1 Tonne Abfall.

Pro 1.000 kg Abfall werden über das Abgas rund 196 kg C, überwiegend als CO₂, freigesetzt. Lediglich rund 0,005 kg C werden als TOC und 0,044 kg C als CO freigesetzt. Weiterhin werden pro 1.000 kg Abfall mit der Schlacke (insgesamt 239 kg) rund 8,5 kg C ausgetragen - davon sind max. 2,4 kg Kohlenstoff organischen Ursprungs. In 25 kg Kesselasche werden rund 0,4 kg C ausgetragen. Der C-Anteil in den Absalzungen der Rauchgaswäsche (ca. 45 kg) ist gering.

In der Summe verlassen je 1.000 kg Abfall rund 205 kg C den Bilanzraum. Da über die verschiedenen Betriebsmittel (Heizöl, Additiv) lediglich nur rund 1,9 kg C in den Bilanzraum eingetragen werden müssen über 203 kg C in Form der verschiedenen Abfälle in den Bilanzraum eintreten. Über weitere Betriebsstoffe werden rund 12 kg andere Elemente (Na, S, Cl) in das System eingetragen.

Der ermittelte Kohlenstoffgehalt (ca. 20 %) der verbrannten Sonderabfälle ist ähnlich dem Kohlenstoffgehalt von Hausmüll; dieser liegt im Bereich von 22 [Dehoust 2005] bis 26 % [Rolland 2003] – mit dem Unterschied, dass der regenerative Kohlenstoffanteil im Hausmüll ca. 50 – 60 Gew.-% beträgt, im Sonderabfall entsprechend den Erkenntnissen der vorliegenden Untersuchung dagegen nur ca. 10 Gew.-%.

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Abfallentsorgung ist in Deutschland seit vielen Jahren ein Thema in zahlreichen Diskussionen, die von wechselnden und neuen Aspekten beeinflusst werden. Aufgrund steigender Rohstoffpreise bildet der Ressourcenschutz ein zentrales Thema. Außerdem bekommt der Klimaschutz, der mit dem Treibhauseffekt und der CO₂-Problematik verknüpft ist, eine steigende Bedeutung.

Das Kyoto-Protokoll von 1997, das auf der Klimarahmenkonvention der UN aufbaut, bildet den wesentlichen Hintergrund für diese Entwicklungen. Im Kyoto-Protokoll wurden für die Industrieländer zum ersten Mal konkrete und verbindliche Verpflichtungen zur Reduktion ihrer Treibhausgas-Emissionen festgelegt. Die Europäische Gemeinschaft hat das Kyoto-Protokoll angenommen und die damit verbundenen Forderungen durch entsprechende Entscheidungen, Richtlinien und andere Dokumente in geltendes Recht umgesetzt. Im Mittelpunkt dieser Rechtsvorschriften steht die Schaffung eines Handelssystems mit Emissionszertifikaten bzw. Berechtigungen für die Emission von Treibhausgasen. Durch Umsetzung der europäischen Anforderungen in deutsches Recht bestehen nationale Verpflichtungen für die Minderung von Treibhausgasen.

Der Kreis der für eine Teilnahme an dem Handelssystem für Emissionszertifikate zu verpflichtenden Industriesparten und Anlagen wird von der EU nicht bis in die letzten Details vorgeschrieben, so dass den Mitgliedsländern Gestaltungsspielräume bleiben. In Deutschland wurde über die Teilnahme der Abfallverbrennungsanlagen diskutiert; das BMU sprach sich für eine Berücksichtigung aus.

Eine Teilnahme am Emissionshandel erfordert Kenntnisse über die CO₂-Emissionen der in Frage kommenden Anlage. Für die Abgabe von CO₂ an die Atmosphäre sind Zertifikate erforderlich, allerdings nur für die Emissionen aus fossilen Energie- bzw. Kohlenstoffträgern. CO₂ aus regenerativen Brennstoffen bzw. Brennstoffanteilen, wie z.B. Papier, Holz usw. kann ohne Zertifikate emittiert werden. Für die Verbrennung von Hausmüll wurde der Anteil der regenerativen Bestandteile im Abfallbrennstoff mehrfach untersucht. Dagegen fehlt eine entsprechende Untersuchung für Abfälle aus Industriebetrieben und Produktionsanlagen, die allgemein auch als Sonderabfälle bezeichnet werden. Diese Abfälle können aufgrund ihrer Eigenschaften in der Regel nicht gemeinsam mit Hausmüll entsorgt werden.

Dieser Themenkomplex war Gegenstand eines Projektes, das im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der HIM GmbH, der Universität Darmstadt und dem Forschungszentrum Karlsruhe durchgeführt wurde. Im Mittelpunkt der Arbeiten stand die großtechnische Sonderabfallverbrennungsanlage der HIM GmbH am Standort Biebesheim, die mit zwei identischen Verbrennungslinien ausgerüstet ist. Jede Verbrennungslinie ist mit einem Drehrohrofen mit Nachbrennkammer ausgestattet; zur Wärmenutzung ist ein Kessel installiert. In einer mehrstufigen Rauchgasreinigungsanlage werden Schadstoffe aus dem Rauchgas abgeschieden, so dass die Emissionsgrenzwerte deutlich unterschritten werden.

In einem ersten Schritt waren die CO₂-Emissionen der Anlage zu ermitteln, die am Standort Biebesheim - wie an vielen anderen großtechnischen Verbrennungsanlagen - im normalen Betrieb nicht gemessen werden. Eine Berechnung der CO₂-Emissionen auf der Basis von Brennstoffmengen und -eigenschaften, die bei Kraftwerke möglich ist, scheiterte an den zur

Verfügung stehenden Informationen. Die Daten aus den Deklarationsanalysen der einzelnen Abfälle erwiesen sich für eine Berechnung als nicht ausreichend.

Für die Bestimmung der CO₂-Emissionen wurde ein Messgerät installiert, kalibriert und mit einer elektronischen Datenerfassung ausgerüstet. Die Messungen, ausgeführt über einen Zeitraum von mehreren Monaten, ergaben im Mittel einen CO₂-Anteil im Rauchgas von 9,2 Vol.-%.

In einem weiteren Arbeitsschritt war der Anteil der regenerativen Bestandteile im Abfall und deren Beitrag zu den Kohlendioxidemissionen zu bestimmen. Die vorliegenden Daten sowie eine in Augenscheinnahme der Abfälle führten nicht zu belastbaren Aussagen.

Für zuverlässige Informationen war eine messtechnische Bestimmung notwendig, die mit Hilfe der Radio-Carbonmethode durchgeführt wurde. Das CO₂ aus einem kleinen Teilstrom des Rauchgases wurde in Natronlauge absorbiert und die resultierende Probe durch das Radiocarbon-Labor am Institut für Umweltp Physik an der Heidelberger Akademie der Wissenschaften untersucht. Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass der Anteil an Kohlenstoff aus regenerativen organischen Materialien im Sonderabfall ca. 10 % beträgt. Der regenerative Anteil ist damit deutlich geringer als im Restmüll privater Haushalte.

Ergänzend ist die Kohlenstoffbilanz einer Sonderabfallverbrennungsanlage von Interesse, die neben den verbrannten Abfällen auch kohlenstoffhaltige Hilfsstoffe erfasst. Zu diesen Hilfsstoffen gehört Heizöl, welches nach Erfordernis zur Einhaltung vorgeschriebener Mindesttemperaturen eingesetzt wird. Außerdem wird ein kohlenstoffhaltiges Adsorbens in der Rauchgasreinigung eingesetzt. Die Kohlenstoffbilanz zeigt, dass die Hilfsstoffe nur einen sehr geringen Beitrag zu den gesamten CO₂-Emissionen der Anlage leisten; er liegt bei weniger als 1 %. Folglich würde ein Ersatz der fossilen Hilfsstoffe wie Heizöl durch regenerative Energieträger nur einen minimalen Effekt auf den klimawirksamen Anteil der Kohlendioxidemissionen haben. Eine Diskussion dieser Ergebnisse mit der HIM GmbH ergab keine weiteren direkten betriebs- und feuerungstechnischen Möglichkeiten zur Minderung der CO₂-Emissionen (z.B. durch verminderten Heizöleinsatz) am Standort Biebesheim.

Durch einen Vergleich von Kraftwerken mit Abfallverbrennungsanlagen können anhand der durchgeführten Arbeiten und der erzielten Ergebnisse neben diesen anlagenspezifischen Erkenntnissen ergänzende Aussagen abgeleitet werden.

In Kraftwerken werden große Mengen von Kohle und anderen fossilen Energieträgern mit dem Ziel der Erzeugung von elektrischer Energie bzw. Wärme verbrannt. Die Verbrennung von Restmüll, Sonderabfall oder aufbereiteten Abfallfraktionen wird dagegen von mindestens zwei Motiven geleitet. Zwar kann bei der Abfallverbrennung Strom bzw. Wärme gewonnen werden, im Mittelpunkt dieser Aktivität steht aber die umweltverträgliche Entsorgung von Abfällen. Maßgeblich sind in diesem Zusammenhang u.a. die Anforderungen gemäß Abfallablagerversordnung (AbfAbIV), die eine Deponierung von kohlenstoffhaltigen Abfällen weitgehend untersagt.

Für Kraftwerke ergeben sich Einsparungen bei den CO₂-Emissionen, wenn Strom bzw. Wärme durch den Einsatz effizienterer Technologien erzeugt oder fossile Brennstoffe durch regenerative Brennstoffe ersetzt werden. Die direkten CO₂-Emissionen aus der Abfallverbrennung würden aufgrund der Forderungen aus der Abfallablagerversordnung nur zurückgehen, wenn der Abfallinput verringert wird. Die Vorgabe einer Minderung der CO₂-Emissionen für Abfallverbrennungsanlagen käme einer Massenbegrenzung der verbrannten Abfallmenge gleich. Geht man von einer Erfüllung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes [KrW-/AbfG] und der gebotenen Hierarchie von Vermeidung, Verwertung und Beseitigung aus, so ist diese Forderung nach einer CO₂-Minderung durch die Minderung der Abfallmengen bereits rechtlich umgesetzt.

Ungeachtet dieser rechtlichen Argumentation ist andererseits eine indirekte Minderung von CO₂-Emissionen bei der Verbrennung der unvermeidbaren Abfälle denkbar, indem durch eine gesteigerte Energieausbeute solche fossilen Energieträger eingespart werden, die andernfalls in Kraftwerken zur Erzeugung dieser Energie hätten verbrannt werden müssen. Dieser Ansatz war der Ausgangspunkt für den (nicht weiter verfolgten) Vorschlag seitens des BMU, die Abfallverbrennung beim Emissionshandel zu berücksichtigen. Die Anlagenbetreiber hätten verpflichtet werden sollen, mögliche Erlöse aus dem Verkauf nicht benötigter Emissions-Berechtigungen (50 - 60 % des Kohlenstoffinventars im Hausmüll sind regenerativen Ursprungs) in Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu investieren.

Den möglichen Beitrag solcher Maßnahmen im Bereich der Abfallverbrennung vor dem Hintergrund des Klimaschutzes relativiert ein Vergleich der verbrannten Abfallmengen einerseits und fossiler Brennstoffe andererseits. In deutschen Sonderabfallverbrennungsanlagen werden pro Jahr ca. 1 Mio. t Abfälle verbrannt; diese Menge ist seit mehreren Jahren weitgehend konstant. Werden die Erkenntnisse aus den hier dargestellten Untersuchungen auf diese Abfallmenge übertragen, so resultiert daraus eine CO₂-Emission von rund 720.000 t/a. Die verbrannte Hausmüllmenge ist mit ca. 16 Mio. t/Jahr deutlich größer, und aufgrund der aktuellen Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Konzept 2020 (Ablagerungsverbot vorbehandelter Siedlungsabfälle) sind hier zukünftig Steigerungen zu erwarten. Bei einem C-Anteil von 22 - 26 % (bezogen auf die FS) [Dehoust 2005][Rolland 2003] resultieren aus der Verbrennung dieser Hausmüllmenge 13 - 15 Mio. t CO₂/a. Die verbrannten Abfallmengen und resultierenden CO₂-Emission sind im Vergleich zu den Kohlemengen, die zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden, dennoch gering. Im Jahr 2005 waren dies ca. 62 Mio. t Steinkohle und ca. 188 Mio. t Braunkohle. Der Nationale Allokationsplan 2008 – 2012 sieht alleine für den Bereich der Energieerzeugung und –umwandlung ein jährliches Budget von 205 Mio. t CO₂ vor, wobei zusätzliche Mengen durch Sonderregelungen gedeckt werden. Die CO₂-Emissionen der Energiewirtschaft im Jahr 2004 haben vorläufigen Erhebungen zufolge rund 380 Mio. t betragen [NAP II]. Es wird deutlich, dass die Abfallverbrennung im Allgemeinen und die Sonderabfallverbrennung im Speziellen verglichen mit den anderen Verbrennungsprozessen nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in Deutschland bei der Verbrennung von Sonderabfällen keine großen Einsparungen bei den CO₂-Emissionen und folglich keine signifikanten Beträge zur Einhaltung der deutschen Klimaschutzziele zu erreichen sind.

10 Literatur

- [1600/2002/EG] Beschluss Nr. 1600/2002/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Juli 2002 über das sechste Umweltaktionsprogramm der Europäischen Gemeinschaft. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 242/11, vom 09.2002.
- [17. BImSchV] Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes 17. BImSchV - Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen. 14. August 2003.
- [2000/76/EG] Richtlinie 2000/76/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, Nr. L 332 vom 28.12.2000.
- [2002/358/EG] Entscheidung 2002/358/EG des Rates vom 25. April 2002 über die Genehmigung des Protokolls von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderung. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, Nr. L130 vom 25. April 2002.
- [2003/87/EG] Richtlinie 2003/87/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, Nr. L275 vom 25.10.2003.
- [2004/101/EG] Richtlinie 2004/101/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Oktober 2004 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft im Sinne der projektbezogenen Mechanismen des Kyoto-Protokolls. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, Nr. L338/18 vom 13. 11.2004.
- [K(2003)830 endgültig] Mitteilung der Kommission über Hinweise zur Unterstützung der Mitgliedstaaten bei der Anwendung der in Anhang III der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates aufgelisteten Kriterien sowie über die Bedingungen für den Nachweis höherer Gewalt. Kommission der Europäischen Gemeinschaft, Brüssel, den 07.01.2004.
- [K(2004)130 endgültig] Entscheidung der Kommission vom 29.01.2004 zur Festlegung von Leitlinien für Überwachung und Berichterstattung betreffend Treibhausgasemissionen gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Kommission der Europäischen Gemeinschaft, Brüssel, den 29.01.2004.
- [EU-RegVo] Verordnung (EG) Nr. 2216/2004 der Kommission vom 21. Dezember 2004 über ein standardisiertes und sicheres Registrierungssystem gemäß der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Entscheidung 280/2004/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. Amtsblatt der Europäischen Union, L386/1 vom 21. Dezember 2004.
- [AbfAbIV] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen AbfAbIV - Abfallablagerungsverordnung. 20. Februar 2001.
- [AVV] Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis AVV - Abfallverzeichnis-Verordnung. 10. Dezember 2001.

- [Ahrens 1999] Ahrens, C. D.: "Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment". 6th ed., 1999, Thomson Brooks/Cole Publishing Company, Belmont CA.
- [Arlt 2003] Arlt, W.: "Verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Verringerung des Anstiegs von Kohlendioxid in der Luft".
Chemie Ingenieur Technik, 75 (2003) Heft 4, S. 340 – 348.
- [Arrhenius 1896] Arrhenius, S.: "On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground". Philosophical Magazine, 41 (1896) pp. 237-276.
- [BImSchG] Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge
BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz. Fassung vom 26. September 2002.
- [BMU 2001] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:
"Treibhausgas-Monitoring-Bericht 2001 der Bundesrepublik Deutschland über ein System zur Beobachtung der Emissionen von CO₂ und anderen Treibhausgasen entsprechend der Ratsentscheidung 1999/296/EG". Berlin, 2001.
- [BMU 2002] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: "Gesetz zu dem Protokoll von Kyoto vom 11. Dezember 1997 zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (Kyoto-Protokoll) vom 27. April 2002".
Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2002 Teil II Nr. 16, ausgegeben zu Bonn am 2. Mai 2002.
- [Bockamp 2004] Bockamp, S.: "Die technische Umsetzung des CO₂-Emissionshandels".
VGB PowerTech, 84 (2004) Heft 3, S. 27 – 37.
- [Brockmann 1999] Brockmann, K.L.; Stronzik, M.; Bergmann H.: "Emissionsrechtehandel – eine neue Perspektive für die deutsche Klimapolitik nach Kioto". Schriftenreihe des Zentrums für Europäische Wirtschaftsforschung. Umwelt und Ressourcenökonomie. Physica-Verlag, Heidelberg 1999.
- [Bryden 2005] Bryden, H.L.; Longworth, H.R.; Cunningham; S.A.: "Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N". Nature, 438 (2005) S. 655-657.
- [CMDL 2005] Global Monitoring Division of the National Oceanic and Atmospheric Administration: "Observatory Measurements".
<http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/insitu.html>. Stand: 2005.
- [Dehoust 2002] Dehoust, G.; Gebhardt, P.; Gärtner, S.: "Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschonung". Gutachten im Auftrag der Interessengemeinschaft der Betreiber Thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD). Darmstadt, den 04. April 2002.
- [Dehoust 2005] Dehoust G.; Wiegmann, K.; Fritsche, U.; Stahl, H.; Jenseit, W.; Herold, A.; Cames, M.; Gebhardt, P.; Vogt, R.; Giegrich, J.: "Statusbericht zum Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz und mögliche Potentiale". Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Forschungsbericht 205 33 314. UBA-FB III. August 2005.
- [DEHSt 2005] Deutsche Emissionshandelsstelle: "Anwendung und Berechnung der anteiligen Kürzung der Zuteilungsmengen für die erste Zuteilungsperiode nach §4 Absatz 4 ZUG-2007". Umweltbundesamt – Deutsche Emissionshandelsstelle, Berlin 2005.
- [DESTATIS 2005] Statistisches Bundesamt: "Umwelt Abfallentsorgung".
Fachserie 19/Reihe 1. Wiesbaden, Juli 2005.

- [DEV 2012]: Verordnung über die Erhebung von Daten zur Aufstellung des nationalen Zuteilungsplans für die Zuteilungsperiode 2008 bis 2012 (Datenerhebungsverordnung 2012 – DEV 2012) vom 11. Juli 2006. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2006 Teil I Nr. 33, ausgegeben zu Bonn am 19. Juli 2006.
- [EEX 2006] <http://www.eex.de/index.php>. Stand: August 2006.
- [EHKostV] Kostenverordnung zum Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz und zum Zuteilungsgesetz 2007 (Emissionshandelskostenverordnung 2007 – EHKostV 2007). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 46, ausgegeben zu Bonn am 31. August 2004.
- [Erbach 1984] Erbach, G.: "Hessische Industrie-Müll-Beseitigungsanlage". VGB Kraftwerkstechnik, 64 (1984) Heft 11, S. 1015-1019.
- [Erbach 1987] Erbach, G.: "Thermische Behandlung von Sondermüll". in: VDI (Hrsg.): "Sondermüll - Thermische Entsorgung und Alternativen". VDI Bericht 664. Tagung in Saarbrücken, 7.-8. Okt. 1987.
- [Erbach 1988] Erbach, G.: "Verbrennung von Sonderabfällen in Biebesheim". In: K.J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): "Behandlung von Sonderabfällen 2". EF-Verlag, Berlin 1988. S. 741-761.
- [Erbach 1989] Erbach, G.; Schöner, P.: "Erfahrungen mit der Sonderabfallverbrennungsanlage in Biebesheim nach 7 Jahren Betrieb". Abfallwirtschaftsjournal, 1 (1989) Heft 12, S. 25-33.
- [Erbach 1990] Erbach, G.; Schöner, P.; Suchomel, H.; Conrady, K.: "Einsatz von Drehrohrofenanlagen zur Verbrennung von Sonderabfällen am Beispiel der Sondermüllverbrennungsanlage der Hessischen Industriemüll GmbH in Biebesheim". In: K.J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): "Müllverbrennung und Umwelt 4". EF-Verlag, Berlin 1990, S. 173-191.
- [Erbach 1991] Erbach, G.; Hess, H.: "Zur Situation der Entsorgung organischer Sonderabfälle in Deutschland". Entsorgungspraxis, 9 (1991) Heft 12, S. 766-769.
- [EUWID 2005] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Bis 2010 bundesweit leichter Rückgang der Sonderabfallmengen". EUWID, Nr. 43 vom 25.10.2005, S. 5.
- [Flamme 2006] Flamme, S.: "Gütezeichen für Sekundärbrennstoffe". Zement Kalk Gips, 58 (2006) Heft 8, S. 51-59.
- [Flohn 1990] Flohn, H. (Hrsg.): "Treibhauseffekt der Atmosphäre: Neue Fakten und Perspektiven". VS - Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 1990.
- [Fürmaier 1993] Fürmaier, B.: "Die neue Sonderabfallverbrennungsanlage in Ebenhausen". Umwelt, 23 (1993) Heft 10, S. E19-E31.
- [Geres 2005/1] Geres, R.; Grimm, B.; Rothe, M.; Santen, H.; Treder, M.: "Emissionshandel und Abfallwirtschaft. Teil 1: Chancen und Risiken von internationalen Klimaschutzprojekten mit dem flexiblen Instrumenten CDM und JI in der Praxis". Müll und Abfall 37 (2005) Heft 4 S. 178 – 187.
- [Geres 2005/2] Geres, R.; Grimm, B.; Rothe, M.; Santen, H.; Treder, M.: "Emissionshandel und Abfallwirtschaft. Teil 2: Ausgewählte Beispiele und Handlungsoptionen für nationale Klimaschutzprojekte in der Abfallwirtschaft". Müll und Abfall 37(2005) Heft 5 S. 178 – 187.

- [Graedel 1994] Graedel, T.E.; Crutzen, P.J. (Hrsg.): "Chemie der Atmosphäre - Bedeutung für Klima und Umwelt". Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford 1994.
- [Heintz 1996] Heintz, A.; Reinhardt, G.A. (Hrsg.): "Chemie und Umwelt - Ein Studienbuch für Chemiker, Physiker, Biologen und Geologen" 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1996.
- [HIM 2006/1] HIM GmbH: "Die Sonderabfallverbrennungsanlage der HIM in Biebesheim". Firmenschrift. Homepage des Unternehmens, www.him.de, sav.pdf. Stand: Februar 2005.
- [HIM 2006/2] HIM GmbH: Homepage des Unternehmens, www.him.de. Stand: Februar 2005.
- [Houghton 1995] Houghton, J.T.; Meira-Filho, L.G.; Callender, B.A.; Harris, N.; Kattenberg, A.; Maskell, K.: "The Science of Climate Change - Contribution of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1995.
- [Hütsch 1998] Hütsch, B.W.: "Sources and sinks of methan in German agroecosystems in context of the global methan budget". *Agribiological Research*, 51 (1998) pp. 75 – 87.
- [IPCC 2001] Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J.; Noguer, M.; van der Linden, P.J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C.A.(eds.): "Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York (NY), USA, 2001.
- [Johnke 2003] Johnke, B.: "Abfallverbrennung - ein Beitrag zum Klimaschutz in Deutschland". In: K.J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): "Optimierungspotential der Abfallverbrennung". TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky. Neuruppin 2003. S. 307-316.
- [Johnke 2004] Johnke, B.: "Die Zukunft der thermischen Abfallbehandlung". *VGB Kraftwerkstechnik*, 84 (2004) Heft 10, S. 86-88.
- [Joschek 1995] Joschek, H.-I.; Dorn, I.-H.; Kolb, T.: "Der Drehrohrofen". *VGB Kraftwerkstechnik*, 75 (1995) Heft 4, S. 370-379.
- [Kasang 2004] Kasang, D.: "Klimawandel und Wasserkreislauf". www.hamburger-bildungsserver.de/welcome.phtml?unten=/klima/klimafolgen/wasser. Zugriff: 12.05.04).
- [Kiehl 1997] Kiehl, J. T.; Trenberth, K. E.: "Earth's Annual Global Mean Energy Budget". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78 (1997) pp. 197-208.
- [Klimarahmenkonvention] Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, 09.05.1992; BGBl, 1993 II, 1783.
- [Köhler 2003] Köhler, D.: "Emissionsinventar von Kraftwerken – Berechnungsmethoden und Unsicherheiten". *BWK*, 55 (2003), S. 63 – 66.
- [König 2002] König, J.: "Zeitreise 30 Jahre HIM ". *Umweltmagazin*, 32 (2002) Heft 12, S. 14.
- [Kromer 2005] Kromer B.; Levin I.: Persönliche Mitteilungen. Herr Dr. Kromer ist Leiter des Radiocarbon-Labors am Institut für Umweltpophysik der Heidelberger Akademie der Wissenschaften.

- [KrW-/AbfG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. KrW-/AbfG - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. 27. September 1994.
- [Kyoto Protokoll] Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, 11.12.1997; BGBl. 2002 II, 966.
- [LAGA PN 98] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: "LAGA PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen, Stand: Dezember 2001". Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 32, 2002.
- [Leib 1963] Leib, H.; Womann, H.: "Verfahren und Anlage zum Verbrennen flüssiger oder teigiger Stoffe". Patentschrift 1254801. Anmeldung 15. Mai 1963.
- [Levin 2004] Levin I, Kromer B.: "The Tropospheric $^{14}\text{CO}_2$ level in Mid-Latitudes of the Northern Hemisphere (1959-2003)". Radiocarbon, 46 (2004) 3, pp. 1261-1272.
- [Lovelock 1979] Lovelock, J.: "GAIA: A New Look at Life on Earth". Oxford University Press 1979, p.8.
- [Lucius 2004] Lucius, E.R.; Hildebrand, K.; Lochte, K.; 2004. "Der globale Kohlenstoffkreislauf als System". Praxis der Naturwissenschaften, 53 (2004) 3, S. 6 – 13.
- [Margulis 1986] Margulis, L.; Sagan, D.: "Microcosmos: four billion years of microbial evolution". Summit Books. New York 1986.
- [NAP I] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: "Nationaler Allokationsplan für die Bundesrepublik Deutschland 2005 – 2007". Berlin, 31. März 2004.
- [NAP II] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: "Nationaler Allokationsplan 2008-2012 für die Bundesrepublik Deutschland". Berlin, 28. Juni 2006.
- [OEWAV 2004] Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband (OEWAV): "Liste aus Betreiberangaben und Literaturangaben zu Kohlenstoffgehalten und biogenen Anteilen von Ersatzbrennstoffen". Wien. 4. August 2004.
- [Philipona 2004] Philipona, R.; Dürr, B.; Marty, C.; Ohmura, A.; Wild, M.: "Radiative forcing - measured at Earth's surface - corroborate the increasing greenhouse effect". Geophysical Research Letters, 31 (2004) 3, L03202.
- [Prenzel 2004] Prenzel, H.: "Statistische Bewertung von Kenngrößen bei der CO_2 -Zertifizierung für den Emissionszertifikatehandel". VGB PowerTech, 84 (2004) Heft 10, S. 80 – 85.
- [Press 1985] Press, F.; Siever, R.: "Earth". 4th Edition. Freeman-Company, New-York 1985, pp. 3-14.
- [Prognos 2000] Prognos AG: "Branchen-Report Entsorgungswirtschaft. Der Markt für die Entsorgungsleistungen bis zum Jahr 2010. Teilreport B. Sonderabfälle". Basel, Juli 2000.
- [RAL-GZ 724] RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.: "Sekundärbrennstoffe. Gütesicherung RAL-GZ 724". Ausgabe Juni 2001, Beuth-Verlag, Berlin.

- [RAL-GZ 727] RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.:
"Bestimmung des biogenen Anteils in Sekundärbrennstoffen gemäß RAL-GZ 724
und anderen festen Ersatzbrennstoffen. Gütesicherung RAL-GZ 727".
Ausgabe Januar 2006, Beuth-Verlag, Berlin.
- [Richers 1995] Richers, U.: "Thermische Behandlung von Abfällen in Drehrohröfen - eine
Darstellung anhand der Literatur". Forschungszentrum Karlsruhe,
Wissenschaftliche Berichte, FZKA 5548, September 1995.
- [Richtlinie Abfallanalytik] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie: "Richtlinie
Abfallanalytik: Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen". Dezernat für
Öffentlichkeitsarbeit, Dresden, 1998.
- [Rolland 2003] Rolland, C.; Scheibengraf, M.: "Biologisch abbaubarer Kohlenstoff im
Restmüll". Umweltbundesamt, Berichte BE-236. Wien, 2003.
- [Schleich 2004] Schleich, J.; Betz, R.; Bradke, H.; Walz, R.: "Der Allokationsplan". In: M.
Lucht, G. Spangardt (Hrsg.): "Emissionshandel - ökonomische Prinzipien, rechtliche
Regelungen und technische Lösungen für den Klimaschutz". Springer-Verlag,
Heidelberg 2004, S. 101 – 116.
- [Schöner 1990/1] Schöner, P.: "Sondermüllentsorgung - Organisation". VDI Bildungswerk,
Seminar 43-16-10: "Abfallwirtschaft und Entsorgung", Düsseldorf, 1.-2. März 1990.
- [Schöner 1990/2] Schöner, P.: "Improvement of the Emission Control System of a Hazardous
Waste Incinerator Based on Nine Year Operation Experience". Incineration
Conference 1990, 14.-18. May, San Diego, Californien, USA.
- [Schönwiese 1988] Schönwiese, C.-D.; Diekmann, B.: "Der Treibhauseffekt – der Mensch
ändert das Klima". Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart 1988.
- [Schönwiese 1994] Schönwiese, C.-D.: "Klima im Wandel: Von Treibhauseffekt, Ozonloch
und Naturkatastrophen". Rowohlt Taschenbuch-Verlag, Reinbek bei Hamburg,
1994.
- [Schöpe 2006] Schöpe, M.; von Zitzewitz, E.; Florowski, A.: "Nationaler Allokationsplan 2
(2008 bis 2012)". Umwelt, (2006) Heft 7 – 8, Sonderteil II – VIII.
- [Schwartz 2003] Schwartz, P.; Randall, D.: "An Abrupt Climate Change Scenario and Its
Implications for United States National Security". A report commissioned by the
U.S. Defense Department.
http://www.ems.org/climate/pentagon_climate_change.html. October 2003. Zugriff
am 15.04.2004.
- [Spuziak 1998] Spuziak-Salzenberg, D.; Riemer, S.; Bayley-Blackwedel, B.; Bär, G.:
"Probenaufbereitungssystem zur Qualitätssicherung für Abfälle zur energetischen
(stofflichen) Verwertung". Entsorgungspraxis, 16 (1998) Heft 10, S. 36-40.
- [Stachowitz 2005] Stachowitz, W.H.: "Carbon Trading with Landfill Gas (LFG) and carbon
credits: JI- and CDM-Projects". Sardinia 2005 – Sustainable Landfilling,
13th - 15th of June. Teolo, Italy.
- [Stanhill 2001] Stanhill, G.; Cohen, S.: "Global Dimming: a review of the evidence for a
widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its
probable causes and possible agricultural consequences". Agricultural and Forest
Meteorology, 107, pp. 255-278.
- [Stuiver 1977] Stuiver, M.; Polach, H.A.: "Discussion Reporting of 14C Data".
Radiocarbon, 19 (1977) 3, pp. 355–363.

- [Stuiver 1981] Stuiver, M.; Quay, P. D.: "Atmospheric ^{14}C changes resulting from fossil fuel CO_2 release and cosmic ray flux variability".
Earth and Planetary Science Letters, 53 (1981) pp. 349–362.
- [Suchomel 1994/1] Suchomel; H.: "Vorbehandlung und Lagerung von Sonderabfällen". VDI Bildungswerk, Seminar 43-54-108: "Verbrennungsanlagen für Sonderabfall", Mannheim, 26.-27. Januar 1994.
- [Suchomel 1994/2] Suchomel; H.: "Schlackemengen und -merkmale aus der Sonderabfallverbrennung mit Drehrohrofen bei flüssigem Schlackeabzug". Müll und Abfall, Beiheft 31, Februar 1994, Erich Schmidt Verlag Berlin.
- [TA Abfall] Zweite allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen. TA Abfall. 12.März 1991.
- [TA Si] Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz) vom 14. Mai 1993. Bundes-Anzeiger Nr. 99a vom 29.05.1993.
- [TEHG] Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft (Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz – TEHG). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 35, ausgegeben zu Bonn am 14. Juli 2004.
- [Thomanetz 2002] Thomanetz, E.: "Das Märchen von der repräsentativen Abfallprobe". Müll und Abfall, 34 (2002) Heft 3, S. 136-142.
- [Thomé-K. 2004] Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Kreislaufwirtschaft". EF-Verlag Berlin 1994.
- [Treude 2003] Treude, T.; Boetius, A.; Knittel, K.; Wallmann, K.; Jørgensen, B.B.: "Anaerobic oxidation of methane above gas hydrates at Hydrate Ridge, NE Pacific Ocean". Marine Ecology Progress Series, 264 (2003), pp. 1-14.
- [UBA 2001] Umweltbundesamt: "Adressen der öffentlich zugänglichen und betriebseigenen Sonderabfall- und Rückstandsverbrennungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland". Stand: Januar 2001.
- [UBA 2004/1] Umweltbundesamt: "Klimaänderung - Festhalten an der vorgefassten Meinung?". Fachgebiet "Schutz der Erdatmosphäre". Berlin, Mai 2004.
- [UBA 2004/2] Umweltbundesamt: "Globaler Klimawandel - Klimaschutz". Fachgebiet "Schutz der Erdatmosphäre". Berlin, Mai 2004.
- [UMEG 2001] Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg: "Luftreinhaltung: Leitfaden zur Emissionsüberwachung". Forschungsbericht 297 44 849. UBA FB 000105. Veröffentlicht als: Texte 78/2001. Umweltbundesamt Berlin 2001.
- [USDOE 2003] United States Department of Energy: "Carbon Sequestration - Technology Roadmap and Program Plan". Office of Fossil Energy, Washington, March 12, 2003.
- [Veizer 2002] Veizer, J.: "Four billion years of the carbon cycle: What's in it for us?". VGB Power Tech, 82 (2002) Heft 8, S. 40–44.
- [Watson 2001] Watson, R.T.: "Synthesis Report - An Assessment of the Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC)". Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.

[Weber 1991] Weber, G: "Treibhauseffekt: Klimakatastrophe oder Medienpsychose?". Dr. Böttiger Verlags-GmbH, Wiesbaden 1991, S. 253.

[Zeschmar-Lahl 2006] Zeschmar-Lahl, B.: Persönliche Mitteilung. Frau Dr. Lahl ist Mitarbeiterin im DIN-NMP 583 und dessen nationale Delegierte in der Working Group 3 ("Sampling, sample reduction and supplementary test methods") des CEN/TC 343.

[Zorning 2005] Herr Zorning, ABB, Frankfurt, persönliche Mitteilung, Juli 2006.

[ZuG 2007] Gesetz über den Nationalen Zuteilungsplan für Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2005 – 2007 (Zuteilungsgesetz 2007 – ZuG 2007). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 45, ausgegeben zu Bonn am 30. August 2004.

[ZuV 2007] Verordnung über die Zuteilung von Treibhausgas-Emissionsberechtigungen in der Zuteilungsperiode 2005 – 2007 (Zuteilungsverordnung 2007 – ZuV 2007). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2004 Teil I Nr. 46, ausgegeben zu Bonn am 31. August 2004.