

Klimarelevante Maßnahmen der Abfallwirtschaft

Schriftenreihe, Heft 3/2013



Erfolgskontrolle klimarelevanter Maßnahmen der Abfallwirtschaft in Abfallverbänden des Freistaates Sachsen

Dr.-Ing. Steffen Wagner, Heiko Ibold
Dr. Barbara Zeschmar-Lahl
Prof. Dr.-Ing. Manfred Born (em.)

1	Einführung und Aufgabenstellung	8
2	Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise	10
3	Datenerhebung und -auswertung	12
3.1	Abfallmengenströme und Behandlungssysteme der örE	12
3.2	Daten zu Eigenschaften überlassener Abfälle	14
3.3	Daten zu den relevanten Entsorgungsanlagen	24
3.4	Last- und Gutschriften	25
3.4.1	Elektrischer Strom	25
3.4.2	Weitere verwendete Energieträger	29
3.4.3	Wärmeenergie (Fernwärme)	29
3.4.4	Dampf	30
3.4.5	Klinkererzeugung	30
3.4.6	Eisenmetallschrott	31
3.4.7	Nichteisenmetalle	32
3.4.8	Gutschriften für weitere Stoffe	32
3.4.9	Ammoniumhydroxid und weitere Chemikalien (Betriebs- und Hilfsstoffe)	33
3.4.10	Ablagerung von MBA-Rotterest	34
3.4.11	Transportbedingte Emissionen	34
4	Berechnung der Klimarelevanz	35
4.1	Methodik	35
4.2	Ergebnisse	37
4.2.1	Abfallbehandlungssystem des AWVC	37
4.2.2	Abfallbehandlungssystem des Vogtlandkreises	38
4.2.3	Abfallbehandlungssystem des ZAW	41
4.3	Vergleich der Ergebnisse mit denen der Vorgängerstudie	44
4.4	Sensitivitätsanalyse	45
5	Berechnung der Energieeffizienz	50
5.1	Methodik	50
5.2	Ergebnisse	53
5.2.1	Energieeffizienz der Abfallbehandlungsanlagen	53
5.2.2	Energieeffizienz der Abfallbehandlungssysteme	59
5.3	Vergleich der Ergebnisse mit denen der Vorgängerstudie	67
6	Handlungsempfehlungen	70
6.1	Handlungsempfehlungen für den Freistaat Sachsen	70
6.2	Handlungsempfehlungen für örE, Anlagenbetreiber	71
7	Zusammenfassung und Ausblick	71
7.1	Zusammenfassung	71
7.2	Ausblick	73
	Quellenverzeichnis	74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Bilanzgrenzen für die Berechnungen zur Klimarelevanz (schematische Darstellung)	11
Abbildung 2:	Abfallbehandlungssystem des AWVC (2011/12)	13
Abbildung 3:	Abfallbehandlungssystem des Vogtlandkreises (2011)	13
Abbildung 4:	Abfallbehandlungssystem des ZAW (2011)	14
Abbildung 5:	Entwicklung des Heizwertes und des biogenen Anteils im Restabfall bei Vorwegnahme verschiedener Wertstofffraktionen [KÜGLER 2009]	18
Abbildung 6:	Themenbereiche für die Erhebung von Anlagendaten	24
Abbildung 7:	Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung [BECKMANN et al. 2002, dort Abb. 2]	48
Abbildung 8:	Berechnung des energetischen Netto-Wirkungsgrades von Abfallbehandlungsanlagen nach der VDI-Richtlinie 3460 [VDI 2007]	51
Abbildung 9:	Bilanzkreise zur Ermittlung des Netto-Wirkungsgrades thermischer Anlagen nach der VDI-Richtlinie 3460	51
Abbildung 10:	Berechnung des energetischen Netto-Wirkungsgrades von Abfallbehandlungssystemen	52
Abbildung 11:	Bilanzkreise zur Ermittlung des Netto-Wirkungsgrades von Abfallbehandlungssystemen.....	53
Abbildung 12:	Bilanzierung einer Abfallverbrennungsanlage mit Stromerzeugung	53
Abbildung 13:	Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit Stromerzeugung	54
Abbildung 14:	Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit überwiegend Dampfproduktion.....	55
Abbildung 15:	Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit überwiegend Dampfproduktion.....	55
Abbildung 16:	Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit Prozesswärmeerzeugung	56
Abbildung 17:	Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit Fernwärmeerzeugung	57
Abbildung 18:	Bilanzierung eines Kohlekraftwerkes mit geringer Wärmeauskopplung	58
Abbildung 19:	Bilanzierung eines Kohlekraftwerkes mit höherer Wärmeauskopplung	58
Abbildung 20:	Masse- und Energiebilanz der MPS (AWVC)	60
Abbildung 21:	Energiebilanz der energetischen Verwertung der Ersatzbrennstoffe aus der MPS (vereinfacht)	61
Abbildung 22:	Bilanzierung für das Abfallbehandlungssystem MPS (AWVC)	61
Abbildung 23:	Vergleich des Abfallbehandlungssystems MPS (AWVC) mit anderen Systemen	62
Abbildung 24:	Masse- und Energiebilanz der MBS (Vogtlandkreis) (vereinfacht)	63
Abbildung 25:	Energiebilanz der energetischen Verwertung der Ersatzbrennstoffe aus der MBS (vereinfacht)	63
Abbildung 26:	Bilanzierung für das Abfallbehandlungssystem MBS (Vogtlandkreis)	64
Abbildung 27:	Vergleich des Abfallbehandlungssystems MBS (Vogtlandkreis) mit anderen Systemen	64
Abbildung 28:	Masse- und Energiebilanz der MBA (ZAW) (vereinfacht)	65
Abbildung 29:	Energiebilanz der energetischen Verwertung der Ersatzbrennstoffe aus der MBA (vereinfacht)	66
Abbildung 30:	Bilanzierung für das Abfallbehandlungssystem MBA (ZAW)	66
Abbildung 31:	Vergleich des Abfallbehandlungssystems MBA (ZAW) mit anderen Systemen.....	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Mengenrelevante Abfallarten im Input der untersuchten Anlagen 2007 [BIWA, BZL 2009] und 2011 bzw. 2012	15
Tabelle 2:	Vergleich der spezifischen Erfassungsquoten vor und nach Systemumstellung am Beispiel Gelbe Tonne plus in Leipzig (Pilotversuch, Erfassungszeitraum 9/2004 bis 1/2006) [BÜNEMANN 2011]	16
Tabelle 3:	Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls der Stadt Leipzig 2003/2004 und 2010 [SHC 2006, 2010]	17
Tabelle 4:	Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls des Landkreises Leipzig 2011 im Vergleich zum Restabfall der Stadt Leipzig 2010 [SHC 2012, SHC 2010, INTECUS 2011]	19
Tabelle 5:	Vergleich der Zusammensetzung des Restabfalls aus Haushalten der Stadt Dresden	20
Tabelle 6:	Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls des ZAOE 2010/2011 im Vergleich zu 1999/2000 [INTECUS 2011]	21
Tabelle 7:	Verwendete Datensätze für Abfälle (bezogen auf Frischsubstanz)	23
Tabelle 8:	Rücklauf der Fragebögen im Rahmen der Datenerhebung bei Anlagenbetreibern	25
Tabelle 9:	Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern, Stand: 1.8.2012 [AGEB 2012]	26
Tabelle 10:	Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommixes, Stand 04/2012	27
Tabelle 11:	CO ₂ -Emissionen aus der Stromerzeugung in Deutschland und Sachsen [UBA 2012a, SMWA 2012]	28
Tabelle 12:	Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien [StaLa, o. J., ergänzt]	28
Tabelle 13:	Last- und Gutschriften für den Verbrauch von Erdgas, Heizöl EL, Dieseltreibstoff und Steinkohle nach ProBas [2012] sowie Braunkohle nach [GEMIS 4.7.1]	30
Tabelle 14:	Last- und Gutschriften für den Betriebsmittelverbrauch der Rauchgasreinigung	34
Tabelle 15:	Modellierung des Inputs der MPS (AWVC) für 2012 (fünf Monate, hochgerechnet auf ein Jahr)	37
Tabelle 16:	Modellierung des Outputs der MPS (AWVC) 2012	37
Tabelle 17:	Ergebnis der Klimarelevanzberechnung für das Abfallbehandlungssystem des AWVC	38
Tabelle 18:	Modellierung des Inputs der MBS (Vogtlandkreis) für 2011	39
Tabelle 19:	Modellierung des Outputs der MBS (Vogtlandkreis) für 2011	39
Tabelle 20:	Ergebnis der Klimarelevanzberechnung für das Abfallbehandlungssystem des Vogtlandkreises	40
Tabelle 21:	Modellierung des Inputs der MBA (ZAW) für 2011	41
Tabelle 22:	Modellierung des Outputs der MBA (ZAW) für 2011	42
Tabelle 23:	Ergebnis der Klimarelevanzberechnungen für das Abfallbehandlungssystem des ZAW	43
Tabelle 24:	Veränderung des Bilanzergebnisses der MBS Vogtland bei Berücksichtigung eines Energieaustauschverhältnisses E für Ersatzbrennstoffe > 1 (Hu Steinkohle = 28.557 MJ/Mg)	49
Tabelle 25:	Energiebedarf der Zwischenlager und Aufbereitungsanlagen	59

Abkürzungsverzeichnis

a. n. g.	anderweitig nicht genannt
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AKW	Atomkraftwerke
AöF	Abfälle von öffentlichen Flächen
ASA	Arbeitsgemeinschaft stoffspezifische Abfallbehandlung
AUF	Aufbereitungsanlage
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
AWVC	Abfallwirtschaftsverband Chemnitz
BAA	Brennstoff aus Abfällen
BAT-Wert	Best Available Technique-Wert
BDSV	Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIWA	Büro Ibold Wagner Apitz
BLfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt
BMLFUW	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft
BRef	Best Available Technique (BAT) Reference Document
BZL	Büro Zeschmar-Lahl
C	Kohlenstoff
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CaO ₂	Calciumperoxid
C _{bio}	Kohlenstoff biogen
C _{fossil}	Kohlenstoff fossil
C-Gehalt	Kohlenstoffgehalt
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid (Kohlendioxid)
CO ₂ -Äq.	CO ₂ -Äquivalent
CO _{2, fossil}	CO ₂ fossil
EBS	Ersatzbrennstoffe
ElektroG	Elektro- und Elektronikgesetz
Fe	Eisenmetalle
FS	Frischsubstanz
FuE	Forschung und Entwicklung
FZKA	Forschungszentrum Karlsruhe
g	Gramm
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
Gew.-%	Gewichtsprozent
GJ	Gigajoule
GJ _{end}	Gigajoule, Endenergie
GT+	Gelbe Tonne plus
GWh	Gigawattstunde
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial – Treibhauswirkung einzelner Gase im Vergleich zu CO ₂)
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
haFr	heizwertangereicherte Fraktion
hmä GA	hausmüllähnlicher Gewerbeabfall
Hu	unterer Heizwert
IBA	Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft und Energietechnik
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control

KEK	Kreisentwicklungskonzept
kg	Kilogramm
kg/(E*a)	Kilogramm pro Einwohner und Jahr
kJ	Kilojoule
kWh	Kilowattstunde
kWh _{el}	Kilowattstunde, elektrisch
kWh _{end}	Kilowattstunde, Endenergie
KWK	Kreislaufwirtschaftskonzept
LAK-E	Länderarbeitskreis Energiebilanzen
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LK	Landkreis
LVP	Leichtverpackung
Ma.-%	Masseprozent
MBA	Mechanisch-biologische Aufbereitungsanlage
MBS	Mechanisch-biologische Stabilisierungsanlage
Mg	Megagramm (= 1.000 kg = 1 t)
Mg/a	Megagramm/Jahr
Mio.	Millionen
MJ/Mg	Megajoule pro Megagramm
MPS	Mechanisch-physikalische Stabilisierungsanlage
MVA	Müllverbrennungsanlage
MWAT	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern
MWh	Megawattstunde
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NaHCO ₃	Natriumhydrogencarbonat
NaOH	Natriumhydroxid
NE	Nichteisenmetalle
NKO	Nicht Kompostierbares
NStNVP	nichtstoffgleiche Nichtverpackungen
örE	öffentlich rechtliche Entsorgungsträger
PPK	Papier, Pappe, Kartonagen
ProBAS	Datenbank des Umweltbundesamtes
REA-Gips	Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen
RoHS	restriction of hazardous substances (RoHS-Richtlinie)
RTO	Regenerative thermische Oxidationsanlage
SBS	Sekundärbrennstoff
SCHW	Schwerstoff
SEMBA	Stoffbilanzen mechanisch-biologischer Anlagen
SHC	Sabrowski-Hertrich-Consult GmbH
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
SMWA	Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit
StaLa	Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen
StNVP	stoffgleiche Nichtverpackung
TJ	Terajoule
TS	Trockensubstanz
TUM/ATZ	Technische Universität München/ATZ Entwicklungszentrum Sulzbach-Rosenberg
TWh	Terawattstunde
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VP	Verpackung
WEEE	Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE-Richtlinie)
ZEM	Zementwerk

1 Einführung und Aufgabenstellung

Die derzeit zu beobachtenden Klimaveränderungen gehören weltweit zu den größten Herausforderungen. Klimawandel und damit verbundene Auswirkungen beschäftigen eine Vielzahl beteiligter Akteure in Politik, Wirtschaft ... - in allen Bereichen des gesellschaftlichen Lebens. Das Ziel aller Bestrebungen besteht darin, die Emission klimarelevanter Gase als eine der Hauptursachen für den derzeitigen Klimawandel zu minimieren und damit die Veränderungen der klimatischen Verhältnisse einzudämmen bzw. wenigstens zu verlangsamen.

Der Freistaat Sachsen beteiligte sich frühzeitig an den Aktivitäten zur Reduzierung der Emissionen klimarelevanter Gase. Mit dem Klimaschutzprogramm 2001 [SMUL 2001] wurden Ziele für den Freistaat und Maßnahmen zur Erreichung der Ziele für verschiedene Handlungsfelder formuliert. Demzufolge sollten die CO₂-Emissionen bis 2010 um 2,5 Mio. Mg reduziert werden, bezogen auf das Jahr 1998. Auf der Grundlage des Klimaschutzberichtes 2005 [SMUL 2005] und der bis dahin erreichten Ergebnisse wurden die Klimaschutzziele mit dem Aktionsplan 2008 [SMUL 2008], der dazugehörigen Berichterstattung [SMUL 2010] und dann mit dem Energie- und Klimaprogramm 2011 [SMUL 2011], das bisher im Entwurf vorliegt, neu justiert. Laut Energie- und Klimaprogramm ist vorgesehen, die CO₂-Emissionen außerhalb des Emissionshandelssektors bis 2020 um 25 % zu senken, bezogen auf das Jahr 2006.

Im Klimaschutzprogramm 2001 und im Aktionsplan 2008 ist die Abfallwirtschaft mit Zielvorgaben und Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen verankert. Das Klimaschutzprogramm 2001 benennt

- die Nutzung der Energie aus Restabfällen,
- die stoffliche Verwertung von Abfällen,
- die energetische Verwertung des Deponiegases und
- die thermische Behandlung/energetische Verwertung/mechanisch-biologische Behandlung von Restabfällen

als im Bereich „Abfallwirtschaft“ umzusetzende Arbeiten.

Im Zeitraum 2001 bis 2003 wurde im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) ein Forschungsvorhaben zum Thema „Klimarelevanz der Abfallwirtschaft im Freistaat Sachsen“ bearbeitet [BIWA, BZL 2003]. Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurden klimarelevante Auswirkungen der oben benannten Maßnahmen sächsischer öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger (örE) ermittelt.

Der Aktionsplan 2008 enthält für die Abfallwirtschaft zwei konkrete Maßnahmen, nämlich die Untersuchungen zur Klimarelevanz der Abfallwirtschaft zu verifizieren und eine Bioabfallverwertungsstrategie für den Freistaat Sachsen zu entwickeln. Beide Maßnahmen wurden durch entsprechende FuE-Vorhaben umgesetzt. Die Entwicklungen auf dem Gebiet der Klimarelevanz wurden im LfULG-Vorhaben untersucht [BIWA, BZL 2009]. Im Mittelpunkt des Vorhabens standen wiederum die den örE überlassenen Abfälle und deren Entsorgung sowie die Verwertung kompostierbarer Abfälle. In den Untersuchungen wurden zudem die klimarelevanten Auswirkungen der Verwertung von Wertstoffen abgeschätzt.

Die im Jahr 2009 abgeschlossene Studie „Klimarelevanz und Energieeffizienz“ (im Folgenden Vorgängerstudie) hat ergeben, dass

- die Entsorgung der überlassenen sächsischen Abfälle über die Systeme der örE für das Jahr 2007 zu Klimaentlastungen von etwa 9.300 Mg CO₂-Äq. geführt hat,
- die Bioabfallverwertung (zu 98,5 % über Kompostierung) mit Klimabelastungen von rund 12.000 Mg CO₂-Äq. verbunden war,
- die Verwertung der in der Landesbilanz ausgewiesenen Mengen an PPK, Altglas, Fe-Metall und Leichtverpackungen mit Klimaentlastungen von 70.600 bis 146.000 Mg CO₂-Äq. verbunden gewesen sein könnten und
- dass die von den örE installierten Systeme zur Entsorgung von überlassenen Abfällen die Energieeffizienz einer Müllverbrennungsanlage mit Kraft-Wärme-Kopplung in der Regel nicht erreichen.

Auf der Grundlage der Studienergebnisse wurden unter Klimarelevanz- und Energieeffizienzaspekten u. a. Optimierungspotenziale für die Entsorgung der überlassenen Abfälle festgestellt. Nach Veröffentlichung der Studienergebnisse haben einige örE Anstrengungen unternommen, ihre Systeme klimaentlastender und energieeffizienter zu gestalten.

Vor diesem Hintergrund wurde ein drittes FuE-Vorhaben zur Klimarelevanz der sächsischen Abfallwirtschaft umgesetzt, dessen Ergebnisse der vorliegende Bericht darstellt und in dessen Fokus Veränderungen der Klimarelevanz und der Energieeffizienz bei der Entsorgung überlassener Abfälle in drei sächsischen örE standen, wobei von den örE bzw. den Betreibern der Erstbehandlungsanlagen folgende Maßnahmen umgesetzt wurden:

■ Abfallwirtschaftsverband Chemnitz (AWVC):

- Einsatz effizienterer Nachzerkleinerungsaggregate
- direkte Aufbereitung von Leichtgut ohne Trocknung (Abschaltung eines Trockners und einer Aufbereitungslinie)
- optimierte Sortierung getrockneter Teilströme
- Erweiterung der Brennstoff-Palette, Anpassung der Brennstoffqualitäten an Markterfordernisse, Ausschleusungsmöglichkeiten für Zwischenprodukte
- Aufbau neuer gekapselter Verladestationen

■ Vogtlandkreis:

- Einsatz energieeffizienterer Einzeltechnik

■ Zweckverband Abfallwirtschaft Westsachsen (ZAW):

- Einsatz energieeffizienterer Einzeltechnik
- Umstellung einer Thermischen Oxidationsanlage (RTO) und der Blockheizkraftwerke von Erdgas auf Deponiegas (Eigenversorgung Strom und Wärme)
- Bereitstellung von Strom durch eine Photovoltaikanlage (Eigenversorgung Strom)

Zudem wurden bei allen örE viele verschiedene und z. T. neue Entsorgungswege für die Outputstoffe der Erstbehandlungsanlagen genutzt. Maßgebend hierfür waren die Marktgegebenheiten.

Das Vorhaben „Erfolgskontrolle klimarelevanter Maßnahmen der Abfallwirtschaft in Abfallverbänden des Freistaates Sachsen“ hat das Ziel, für die beteiligten örE die Ergebnisse der Vorgängerstudie mit aktuell ermittelten Ergebnissen zu vergleichen und darauf basierend entsprechend Empfehlungen und Maßnahmen abzuleiten.

An dieser Stelle sei den drei öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern AWVC, Vogtlandkreis und ZAW sowie den Betreibern von nachgeordneten Aufbereitungs-, Verwertungs- und Beseitigungsanlagen für die Mitwirkung an dieser Studie gedankt.

2 Untersuchungsrahmen und Vorgehensweise

Der Untersuchungsrahmen wurde mit der Aufgabenstellung in Kapitel 1 bereits kurz skizziert. Die Untersuchungen umfassen:

- ausgewählte sächsische öRE
 - Bei den drei beteiligten öRE handelt es sich um zwei Abfallverbände, die die Entsorgung der überlassenen Abfälle für ihre Mitglieder (Stadt- und/oder Landkreise) umsetzen, und einen Landkreis, der keinem Verband angehört und die Entsorgung der überlassenen Abfälle in eigener Regie realisiert:
 - AWVC: Stadt Chemnitz und Teilgebiete von Erzgebirgskreis und LK Mittelsachsen, ca. 606.000 Einwohner
 - Vogtlandkreis: ca. 250.000 Einwohner,
 - ZAW: Stadt Leipzig und Landkreis Leipzig, ca. 792.000 Einwohner
- die den öRE überlassenen Abfälle
 - In die Untersuchungen wurden nur den öRE überlassene Abfälle einbezogen. Zu den überlassenen Abfällen zählen die Abfälle aus Haushalten und anderen Herkunftsbereichen, die den öRE zur Entsorgung übergeben wurden (Abfälle zur Beseitigung). Dazu gehören Restabfälle, Sperrmüll, Abfälle von öffentlichen Flächen und gewerbliche Abfälle zur Beseitigung (z. B. Krankenhausabfälle). Andere Abfälle, die vorzugsweise verwertet werden - wie beispielsweise Wertstoffe (Leichtverpackungen, PPK, Glas usw.), Bio- und Grünabfälle und gewerbliche Abfälle zur Verwertung, waren nicht Gegenstand der Betrachtungen.
- die Erstbehandlungsanlagen und nachgeordnete Aufbereitungs-, Verwertungs- und Beseitigungsanlagen (Systeme/Konzepte der öRE)
 - Die ausgewählten öRE betreiben selbst bzw. über Dritte Anlagen zur Behandlung der überlassenen Abfälle. Diesen Anlagen sind weitere Anlagen nachgeschaltet; im Folgenden werden die Anlagen deshalb Erstbehandlungsanlagen genannt. In den nachgeordneten Anlagen erfolgt die weitergehende Aufbereitung oder die endgültige Behandlung (Verwertung/Beseitigung) der Outputströme der Erstbehandlungsanlagen (siehe schematische Darstellung in Abbildung 1).

Das FuE-Vorhaben untergliedert sich in die verschiedenen Bearbeitungsphasen

- Datenerhebung und -auswertung,
- Berechnungen zur Klimarelevanz,
- Berechnung der Energieeffizienz,
- Diskussion und Bewertung der Ergebnisse sowie
- Ableitung von Handlungsempfehlungen und Maßnahmen,

die in den folgenden Kapiteln dargestellt werden, wobei jeweils die Vorgehensweise/Methodik im Detail und die Ergebnisse beschrieben sind.

Die Bilanzgrenzen für die Klimarelevanzberechnungen gehen aus Abbildung 1 hervor. Die Klimarelevanzberechnungen umfassen die Behandlungssysteme der öRE, bestehend aus Erstbehandlungsanlagen und nachgeordneten Anlagen, mit den Stoff- und Energiezugängen und -abgängen für alle Anlagen und Transporte zwischen den Anlagen. Die Sammlung der Abfälle, die Erstellung der Anlagen und die Erstellung von Fahrzeugen und sonstiger Technik bleiben außen vor.

Bei den Energieeffizienzberechnungen wurden Nachbehandlungen von Outputströmen aus thermischen Anlagen (z. B. Schlacken), Verwertungswege für ausgeschleuste Wertstoffe und Transporte nicht modelliert.

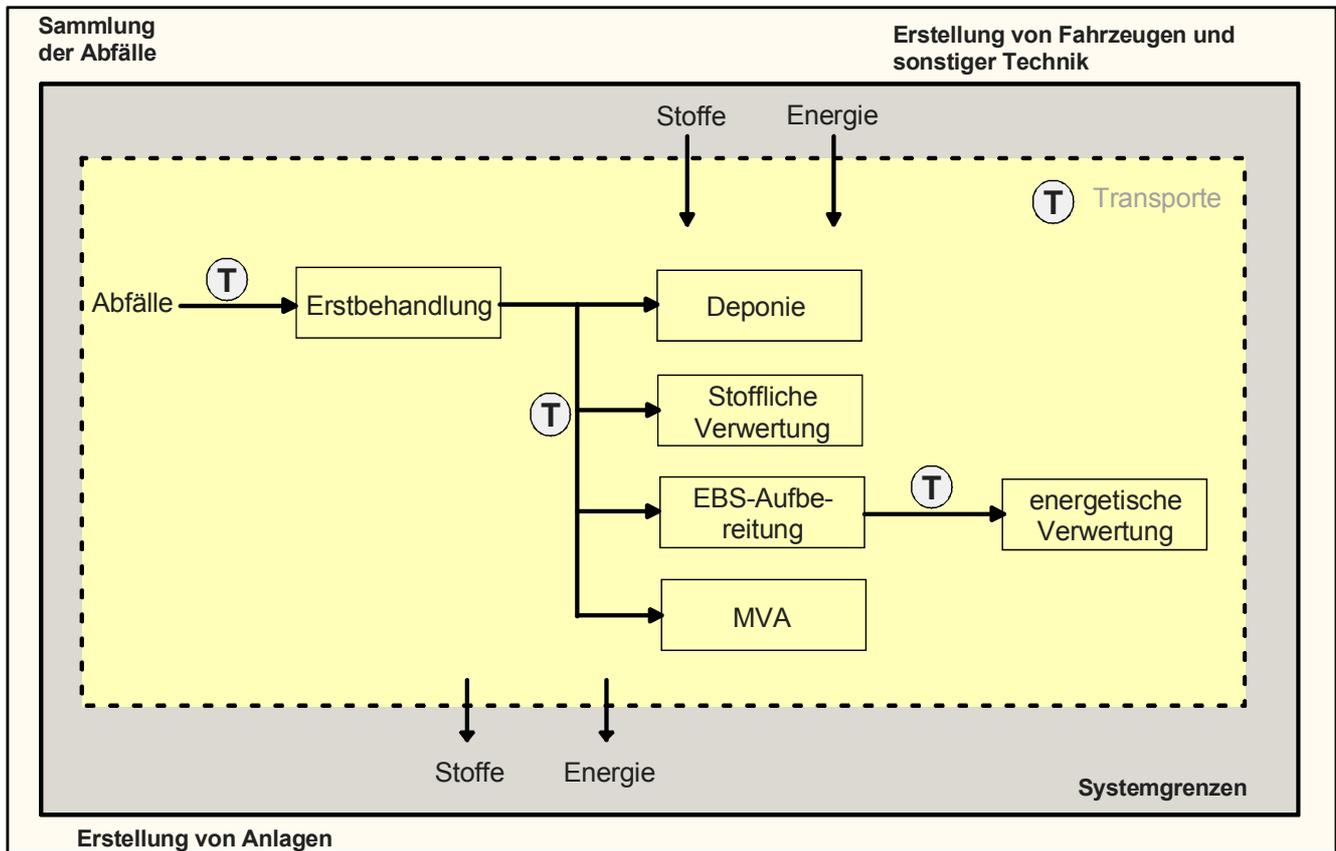


Abbildung 1: Bilanzgrenzen für die Berechnungen zur Klimarelevanz (schematische Darstellung)

Für die Berechnungen muss eine Vielzahl von Informationen und Daten zur Verfügung stehen. Dabei geht es um

- Systeme/Konzepte der öRE,
- Anlagendaten,
- Abfalllieferungsmengen der öRE,
- Last-/Gutschriften für sächsischen und deutschen Strom-/Wärmemix,
- Abfalleigenschaften (Heizwert, C_{biogen} , C_{fossil}),
- Gutschriften für erzeugte Stoffe (Metalle, Inertien als Baustoffe, REA-Gips usw.),
- Lastschriften (Erdgas, Heizöl, Diesel, Betriebsmittel, Anlagenemissionen, Emissionen Deponierung, Transporte).

Die Daten für die Berechnungen beziehen sich überwiegend auf das Jahr 2011. In einigen Fällen musste aus Gründen der Verfügbarkeit auf Daten aus früheren Jahren zurückgegriffen werden. Für den Vogtlandkreis und den ZAW wurden die Anlagendaten für 2011 abgefragt. Für den AWVC wurden die Daten zur Erstbehandlungsanlage für den Zeitraum Januar bis Mai 2012 erhoben und auf ein Jahr hochgerechnet. Die Daten für die nachgeordneten Anlagen wurden allerdings ebenfalls für das Jahr 2011 erfasst. Diese etwas andere Vorgehensweise der Erhebung der Anlagendaten ist erforderlich, weil in der entsprechenden Erstbehandlungsanlage die Effekte von klima- und energieeffizienzverbessernden Maßnahmen erst 2012 wirksam wurden.

3 Datenerhebung und -auswertung

3.1 Abfallmengenströme und Behandlungssysteme der örE

Abbildung 1 zeigt, dass die Systeme der örE zur Behandlung der überlassenen Abfälle im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen. Deshalb wurden die beteiligten örE nach ihren Abfallbehandlungssystemen befragt. Gegenstand der Befragungen waren Angaben zu den örE überlassenen Abfällen, zu den Input- und Outputstoffen der Erstbehandlungsanlagen (Art und Menge) und zu den Entsorgungswegen der Outputstoffe. Diese Informationen bilden wesentliche Grundlagen für die zielgerichteten Datenrecherchen, auf die in den nachfolgenden Teilkapiteln näher eingegangen wird.

Die Befragung der örE führte zu folgenden Ergebnissen:

- Der AWVC führt die überlassenen Abfälle einer Mechanisch-Physikalischen Stabilisierung (MPS), der RABA (Restabfallbehandlungsanlage) Chemnitz zu. Der Vogtlandkreis behandelt die Abfälle in einer Mechanisch-Biologischen Stabilisierungsanlage (MBS) in Oelsnitz/Vogtland. Dem ZAW dient eine Mechanisch-Biologische Abfallbehandlungsanlage (MBA) in Cröbern als Erstbehandlungsanlage. Während die ersten beiden Anlagen darauf ausgerichtet sind, über eine physikalische Trocknung (MPS) bzw. über eine biologische Trocknung (MBS) und entsprechende mechanische Aufbereitungen möglichst umfangreich Ersatzbrennstoffe zur energetischen Verwertung herzustellen, geht es bei der MBA neben der Herstellung von Ersatzbrennstoffen vorrangig um die Erzeugung von ablagerungsfähigen Materialien (Deponiegut).
- Den Erstbehandlungsanlagen fließen neben den den örE überlassenen Abfällen noch Abfälle aus anderen Bereichen und von anderen Abfallerzeugern zu. Dadurch erweitert sich die Palette der zu betrachtenden Inputs (siehe Kapitel 3.2).
- In der MPS werden 2012 nach Hochrechnung der Mengendaten vom Januar bis Mai insgesamt ca. 69.100 Mg überlassene Abfälle behandelt werden, davon ca. 66.900 Mg Restabfälle und ca. 2.200 Mg Krankenhausabfälle. Hinzu kommen 23.900 Mg von anderen Abfallerzeugern. Über die MBS wurden 2011 insgesamt 49.477 Mg Abfälle behandelt, davon 40.835 Mg überlassene Abfälle (35.946 Mg Restabfälle, 4.885 Mg Sperrmüll, 4 Mg Marktabfälle). Der MBA wurden 2011 insgesamt 184.603 Mg zugeführt, davon 121.498 Mg überlassene Abfälle (109.768 Mg Restabfälle, 11.600 Mg Sperrmüll, 130 Mg Abfälle von öffentlichen Flächen).
- Die Erstbehandlungsanlagen splitten die Materialströme hinsichtlich Art und Menge in unterschiedliche Outputs auf. Die Outputs werden z. T. vielen verschiedenen Entsorgungsanlagen zugeführt. Teilweise werden die Outputs an Aufbereitungsanlagen übergeben, die ihrerseits ihre Outputstoffe an nachgeordnete Anlagen zur endgültigen Behandlung übergeben. Es lässt sich zum einen feststellen, dass sich die Konzepte/Systeme der örE wesentlich voneinander unterscheiden. Zum anderen ist auffällig, dass sich insbesondere durch die zwischengeschalteten Aufbereitungen und die Vielzahl der nachgeordneten Entsorgungswege sehr komplizierte und komplexe Systeme etabliert haben, was die Untersuchungen zur Klimarelevanz und zur Energieeffizienz im Vergleich zur Vorgängerstudie komplizierter und die Erhebung der Anlagendaten aufwendiger macht.
- Durch die Abfrage der Outputs der Erstbehandlungsanlagen nach Art und Menge konnten die Hauptmengenströme identifiziert werden. Die Erhebung der Anlagendaten wurde auf diese Hauptmengenströme ausgerichtet. In die Befragung wurden Anlagen einbezogen, denen 1.000 Mg/a oder mehr an Output der Erstbehandlungsanlagen zugeführt wurden.

Die Abbildungen 2 bis 4 zeigen die Abfallbehandlungssysteme der drei örE. In die Abbildungen sind Ergebnisse aus der Erhebung von Anlagendaten (Kapitel 3.3) mit eingeflossen.

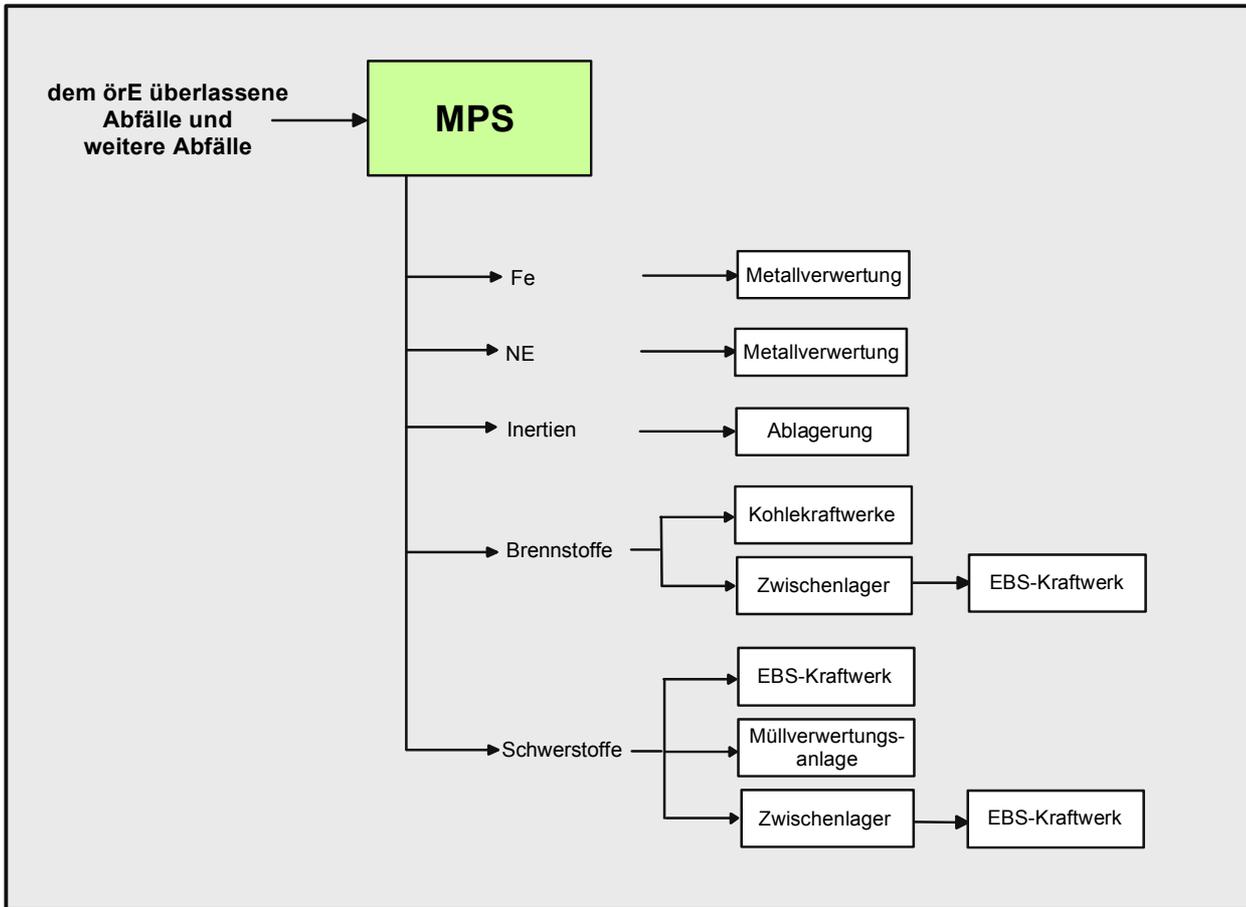


Abbildung 2: Abfallbehandlungssystem des AWVC (2011/12)

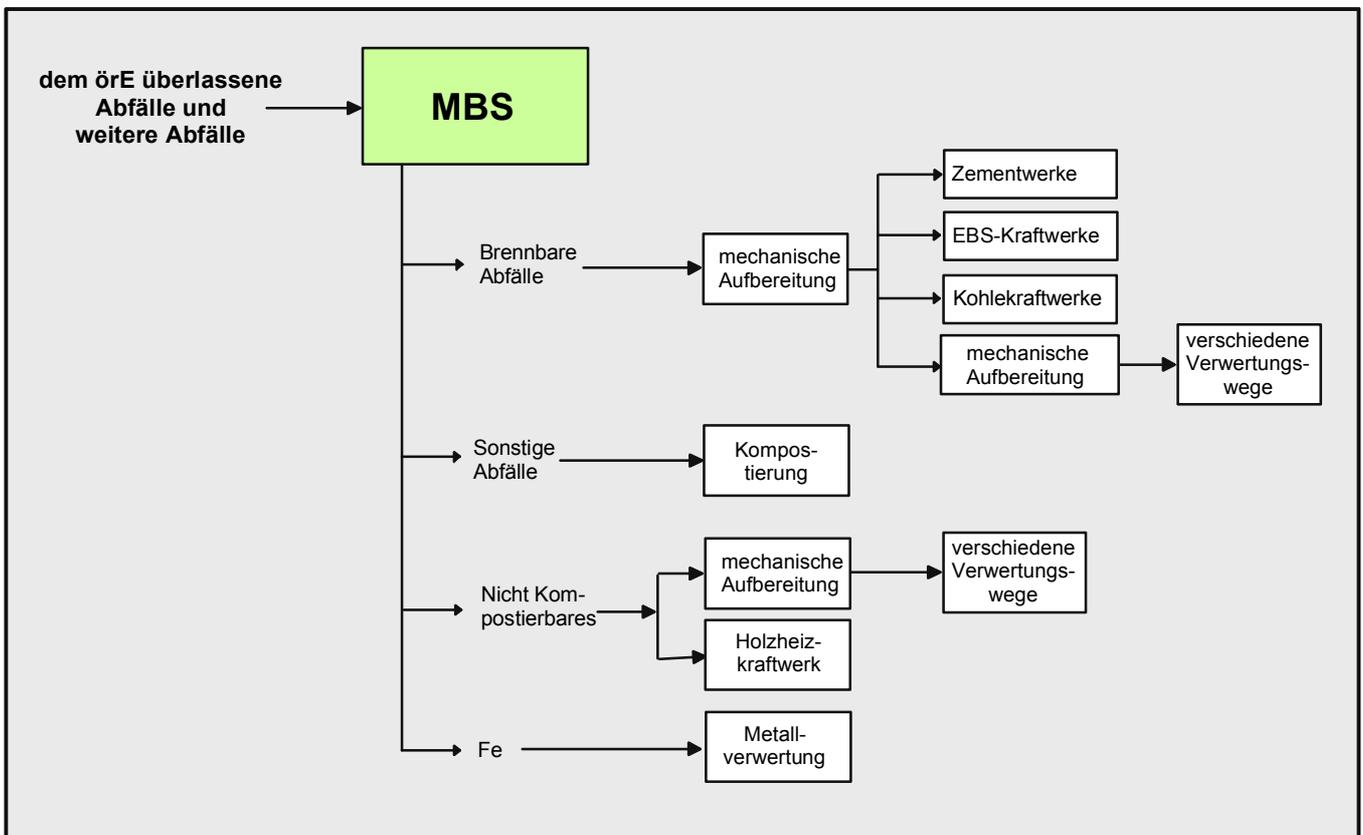


Abbildung 3: Abfallbehandlungssystem des Vogtlandkreises (2011)

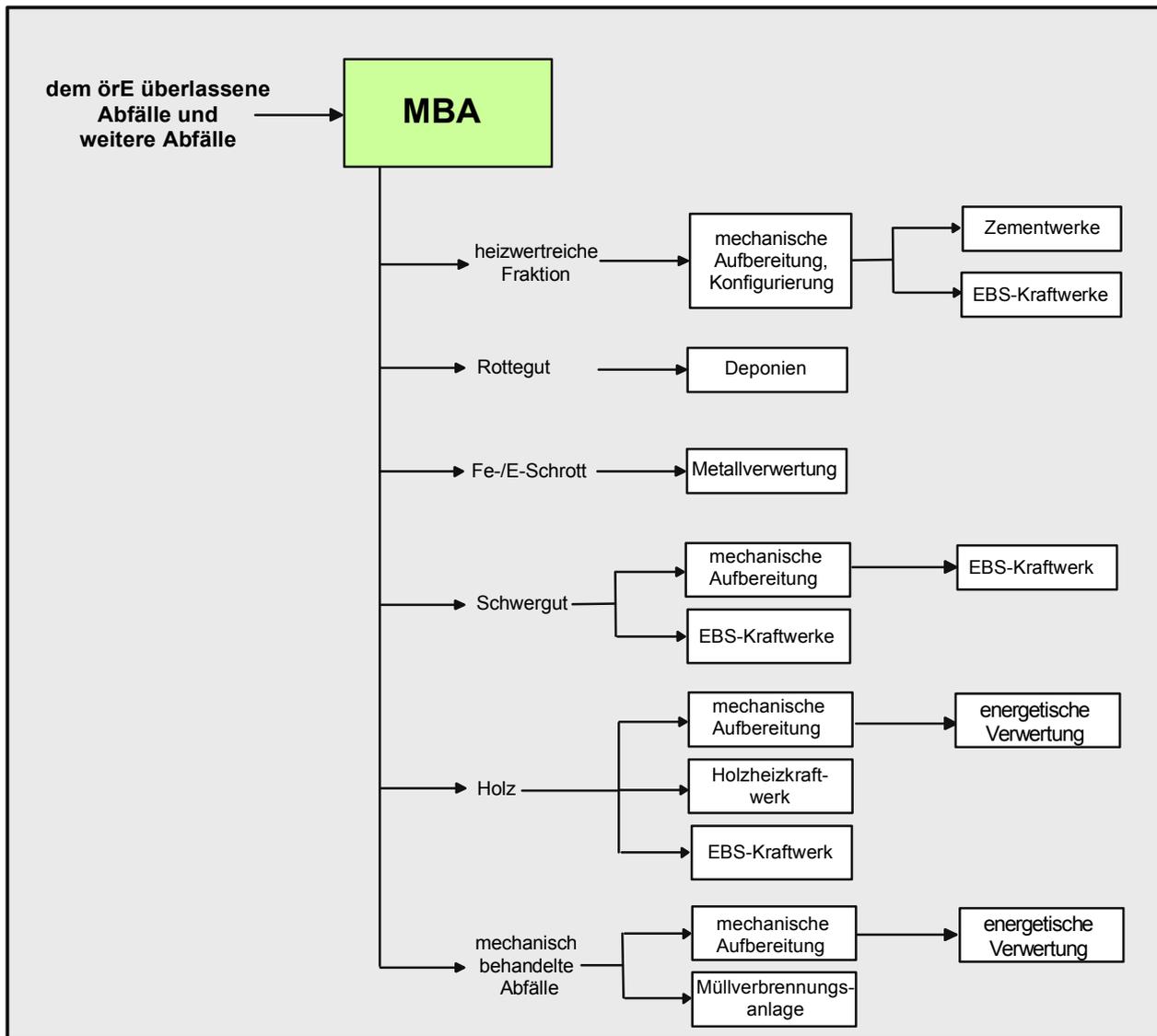


Abbildung 4: Abfallbehandlungssystem des ZAW (2011)

3.2 Daten zu Eigenschaften überlassener Abfälle

Relevante Mengenströme im Input der Erstbehandlungsanlagen

Für die mengenmäßig relevanten Abfallarten im Input der Erstbehandlungsanlagen sind die ergebnisrelevanten Größen - $H_{u,roh}$, C-Gehalt, Gehalt C_{bio} und Gehalt C_{fossil} - zu modellieren, sofern von den Anlagenbetreibern keine eigenen Daten zur Verfügung gestellt werden. Nach Tabelle 1 dominiert in allen drei Anlagen nach wie vor der Restabfall.

- Bei der MPS (AWVC) hat sich die prozentuale Zusammensetzung kaum geändert, hier wird eine veränderte Zusammensetzung des Restabfalls direkt auf den Heizwert des Inputgemisches durchschlagen.
- In der MBS (Vogtlandkreis) hat der Anteil Restabfall am Anlageninput gegenüber 2006 um knapp 20 % zugenommen, während der Gewerbeabfallanteil, der vorher fast die Hälfte des Anlageninputs ausmachte, nunmehr bei knapp 9 % liegt. Zwar kommen hier als Heizwertträger nun Sperrmüll und Sortierreste neu hinzu, doch dürfte der Heizwert des Inputgemisches insgesamt doch leicht gesunken sein.
- In der MBA (ZAW) sind die Veränderungen am gravierendsten. Die heizwertreichen Gewerbeabfälle und Sortierreste spielen praktisch keine Rolle mehr, der Sperrmüllanteil ist leicht und der Restabfallanteil deutlich zurückgegangen. Knapp ein Viertel des Anlageninputs besteht nun aus „Sonstigen Abfällen“, vor allem Schredderleichtfraktion fein und Absiebungen.

Tabelle 1: Mengenrelevante Abfallarten im Input der untersuchten Anlagen 2007 [BIWA, BZL 2009] und 2011 bzw. 2012

Abfallart		MPS (AWVC)		MBS (Vogtlandkreis)		MBA (ZAW)	
		2007	2012	2007	2011	2007	2011
Restabfälle	[%]	97,2	97,5	52,7	72,7	77,5	67,6
Krankenhausabfälle AVV 180104	[%]	-	2,5	-	-	-	-
Sperrmüll	[%]	-	-	-	10,1	10,4	9,7
Gewerbeabfälle, hausmüllähnlich	[%]	2,4	-	47,1	8,9	7,0	0,1
Sortierreste	[%]	-	-	-	6,8	3,4	0,0
Abfälle von öffentlichen Flächen	[%]	0,3	-	0,2	0,2	1,0	0,4
Bauabfälle	[%]	0,1	-	-	-	0,8	-
Sonstiges	[%]	-	-	-	1,4	-	22,3
Hu roh Anlageninput (Gemisch)	[MJ/Mg]	8.550	7.830*	9.905		9.595	

* IBA, Dezember 2011, zit. in [AWVC 2012]

Aktuelle Daten bzgl. der Eigenschaften von Restabfall

Die Zusammensetzung des Restabfalls dürfte sich aufgrund verschiedener Einflussfaktoren seit 2006 teils deutlich geändert haben. So könnten beispielsweise folgende Faktoren eine Veränderung der Restabfallzusammensetzung bewirkt haben:

- Reduzierung des Biomasseanteils im Restabfall in Folge der Einführung der getrennten Bioabfallerfassung in weiteren Kommunen
- veränderte Zusammensetzung und Anteil an LVP im Restabfall in Folge der letzten Novellen VerpackV (Pflichtpfand auf Einwegverpackungen, Ersatz Getränkedosen durch Kunststoffbehälter, ...)
- Greifen weiterer Maßnahmen zur separaten Erfassung schadstoffreicher, heizwertreicher Altprodukte (ElektroG, ...)
- Anstieg des Anteils an Inkontinenzabfällen (Windeln) aufgrund des demografischen Wandels (Zunahme des Anteils alter und pflegebedürftiger Menschen)

Für die vorliegende Untersuchung wurde anhand der Ergebnisse folgender Sortieranalysen geprüft, ob die Daten hinsichtlich Zusammensetzung, Heizwert und C-Gehalt von Restabfall gegenüber den Daten der Vorgängerstudie zu aktualisieren sind:

- Restabfallanalyse 2010 Stadt Leipzig [SHC 2010]
- Restabfallanalyse 2011 Landkreis Leipzig [SHC 2011, SHC 2012]
- Restabfallanalyse 2009/2010 Stadt Dresden [BIWA 2010]
- Restabfallanalyse im Verbandsgebiet des ZAOE [INTECUS 2011]

Stadt Leipzig

Die Stadt Leipzig und der Landkreis Leipzig (ehemalige Landkreise Leipziger Land und Muldentalkreis) bilden zusammen den Zweckverband Abfallwirtschaft Westsachsen (ZAW) und entsorgen die ihnen überlassene Siedlungsabfälle in der MBA Cröbern. Beide haben jedoch eigene Abfallwirtschaftskonzepte erstellt, in deren Rahmen auch Restabfallanalysen durchgeführt wurden. In der Stadt Leipzig waren dies Analysen für die Jahre 2003/2004 [SHC 2006] und 2010 [SHC 2010].

Die Stadt Leipzig stellt insofern eine Besonderheit dar, als sie seit September 2004 die Systembetreiber beauftragt hat, im gesamten Stadtgebiet neben Leichtverpackungen auch stoffgleiche Nichtverpackungen (StNVP) und Elektrokleingeräte über die „Gelbe Tonne plus“ (GT+) mit zu erfassen, zu sortieren und mit Ausnahme der Elektrokleingeräte zu verwerten. Der Pilotver-

sich von September 2004 bis Januar 2006 ergab einen Zuwachs der separat erfassten Materialien von 7,7 kg pro Einwohner und Jahr (25,8 → 33,5 kg/(E*a)). Dabei entfielen auf LVP-Verpackungen 0,8 kg, auf stoffgleiche Nichtverpackungen (StNVP) 2,2 kg, auf nichtstoffgleiche Nichtverpackungen (NStNVP) 2,1 kg und auf Sonstiges 2,5 kg [BÜNEMANN 2011]. Die größten Zuwächse waren bei PPK (entspricht nicht dem Zuweisungskatalog) und Elektrokleingeräten zu verzeichnen, siehe Tabelle 2. Bei einer Einwohnerzahl von 521.649 (Stand 31.12.2002) entspricht dies einer absoluten Zunahme der über die GT+ erfassten Wertstoffe von 4.017 Mg (auf insgesamt 17.475 Mg).

Tabelle 2: Vergleich der spezifischen Erfassungsquoten vor und nach Systemumstellung am Beispiel Gelbe Tonne plus in Leipzig (Pilotversuch, Erfassungszeitraum 9/2004 bis 1/2006)¹ [BÜNEMANN 2011]

Stoffgruppen	Untergruppe	GT+ [absolut]	GT+ [Anteil]	Zunahme [absolut]
		[kg/(E*a)]	[%]	[kg/(E*a)]
Weißblech	VP	3,0	9,0	0,2
	StNVP	0,9	2,7	0,8
Aluminium	VP	1,0	2,9	0,4
	StNVP	0,3	0,8	0,2
Folien > A4	VP	1,3	3,7	0,0
	StNVP	1,1	3,3	0,1
Standardverpackungspolymere	VP	5,3	15,7	0,2
	StNVP	0,7	2,0	0,4
Sonstige Kunststoffe	VP	2,2	6,6	0,1
	StNVP	2,7	8,2	0,7
FKN	VP	2,2	6,5	0,0
PPK	NStNVP	3,8	11,5	1,6
Holz	VP	0,0	0,1	0,0
	NStNVP	0,3	0,9	0,3
Textilien	NStNVP	0,7	2,1	0,7
Elektrokleingeräte	NStNVP	1,1	3,2	1,1
Batterien	NStNVP	0,0	0,1	0,0
Rest		6,9	20,7	0,9
Summe		33,5	100,0	7,7

Kursiv gesetzt sind die Stoffgruppen, die nicht dem Zuweisungskatalog entsprechen.

Das Restabfallaufkommen in der Stadt Leipzig ist von 2003/2004 bis 2010 um fast 12 % entsprechend knapp 8.000 Mg bzw. 15,1 kg pro Einwohner und Jahr zurückgegangen. Dies ist vermutlich auf die vermehrte Nutzung der verschiedenen Sammelsysteme wie Biotonne, blaue Papiertonne, Gelbe Tonne plus, Altglascontainer sowie Altkleider- und Schadstoffsammlung zurückzuführen. Allerdings ist das absolute Aufkommen einiger Stoffgruppen wie Feinfraktion (< 10 mm), Glas, Textilien und

¹ Die Daten entstammen Untersuchungen, die im Zeitraum September 2004 bis Januar 2006 durch die Firma HTP Aachen durchgeführt wurden.

NE-Metalle sogar gestiegen, sodass ihr prozentualer Anteil an der geringer gewordenen Restabfallmasse deutlich zugenommen hat. Die größten Rückgänge im absoluten Aufkommen sind bei Organik (-3.055 Mg), PPK (-2.786 Mg), anderweitig nicht genannten Stoffen (-1.741 Mg) und Verbunden (-859 Mg) festzustellen (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls der Stadt Leipzig 2003/2004 und 2010 [SHC 2006, 2010]

Stoffgruppen	2003/2004			2010			Delta	
	[Mg/a]	[kg/(E*a)]	[%]	[Mg/a]	[kg/(E*a)]	[%]	[Mg]	[%]
Fe-Metalle	990	1,9	1,4	890	1,8	1,5	-100	-10,1
NE-Metalle	443	0,8	0,6	580	1,1	1,0	137	30,9
PPK	6.490	12,4	9,4	3.704	7,1	6,0	-2.786	-42,9
Glas	4.290	8,2	6,2	4.677	9	7,6	387	9,0
Kunststoffe	4.807	9,2	6,9	4.743	9	7,7	-64	-1,3
Organik	32.080	61,5	46,2	29.025	55,6	47,3	-3.055	-9,5
Holz	935	1,8	1,4	631	1,2	1,0	-304	-32,5
Textilien	2.008	3,8	2,9	2.367	4,5	3,9	359	17,9
Mineralstoffe	1.840	3,5	2,7	1.523	2,9	2,5	-317	-17,2
Verbunde	2.520	4,8	3,6	1.661	3,3	2,7	-859	-34,1
Schadstoffbelastete Stoffe	229	0,4	0,3	189	0,3	0,3	-40	-17,5
a. n. g. Stoffe*	7.049	13,5	10,2	5.308	10,1	8,6	-1.741	-24,7
Mittelfraktion*** (10-40 mm)	0	0	0,0	0	0	0,0	0	-
Feinfraktion (< 10 mm)**	5.688	10,9	8,2	6.091	11,7	9,9	403	7,1
Summe	69.369	132,7	100,0	61.389	117,6	100,0	-7.980	-11,5

Leder, Gummi, Kork, Hygieneprodukte, sonstiger Rest

** Asche, Straßenkehrschutt, Erde, Katzen- und Kleintierstreu; in Sortieranalyse SHC als Feinmüll deklariert

*** in Sortieranalyse von SHC als Mittelmüll deklariert

Der Rückgang im Aufkommen an Organik ist vermutlich einer intensiveren Nutzung der getrennten Erfassung in der Biotonne geschuldet. Bei PPK ist davon auszugehen, dass diese überwiegend in die blauen Papiertonnen verlagert wurden (von „Fehlwürfen“ in die GT+ ist aber auszugehen). Der Rückgang bei den anderweitig nicht genannten Stoffen dürfte eher nicht auf eine Erfassung mit der GT+ zurückzuführen sein, weil dieser vor allem Hygieneprodukte und sonstigen Rest betraf. Der Rückgang bei den Verbunden betrifft vor allem Sonstige Verbunde (-653 Mg) und Verbund-Möbel (-237 Mg) und nur in geringem Umfang Verbund-Verpackungen (-12 Mg). Der Rückgang bei Fe-Metallen (-100 Mg) ist wahrscheinlich der Erfassung in der GT+ geschuldet. Die Bilanz für die Kunststoffe (-64 Mg) bedarf einer genaueren Analyse: So ging die Masse an Kunststoffverpackungen um 1.123 Mg zurück, hingegen nahm die Masse an Sonstigen Kunststoffen im Restabfall trotz GT+ um 1.059 Mg zu.

Zugenommen im Restabfall haben auch die Fahrzeugteile (+18 Mg, Zunahme um 62,1 %) und der Elektronikschrott (+26 Mg, Zunahme um 7 %). Letzteres entspricht einer Zunahme von 0,1 kg/E*a. Von daher ist die von SHC [2010] getroffene Aussage bezüglich der Erfassungseffizienz mit Vorbehalt zu sehen:

„Auch in Bezug auf den Elektronikschrott lässt sich die Effizienz der Getrennterfassung und -entsorgung konkret mit Zahlen belegen: Im Jahr 2009 wurden fast 243.000 Elektro- und Elektronikaltgeräte in der Stadt Leipzig separat erfasst und an die Beauftragten der stiftung ear elektro-altgeräte register abgegeben. Gleichzeitig führte die Restabfallanalyse 2010 zu einem E-Schrottaufkommen im Restabfall von lediglich marginalen 0,8 kg/(EW x a).

Daneben ist - sofern das bundesweite E-Schrott-Potenzial von ca. 14 kg/(EW x a) annähernd auch auf die Stadt Leipzig zutreffen sollte (was der Größenordnung nach durchaus nicht unplausibel wäre) - davon auszugehen, dass eine ganz erhebliche Menge an E-Altgeräten über die Gelbe Tonne Plus entsorgt wird, so dass die E-Schrott-Getrennterfassungs-/Verwertungsquote im Stadtgebiet bei einem Potenzial in der genannten Größenordnung deutlich über 90 % (!) angesiedelt ist.“

Derzeit sind keine aktuellen Daten über das Volumen der mit der GT+ im Jahr 2010 erfassten Wertstoffmengen verfügbar. Laut Abfallbilanz Sachsen 2010 (letzte verfügbare Zahlen) betrug das Aufkommen an Wertstoffen in der Stadt Leipzig 21.203 Mg Leichtverpackungen und 8.888 Mg sonstige Wertstoffe [LfULG 2011]. Diese Mengen dürften überwiegend über die GT+ erfasst worden sein.

Der Vergleich der Restabfallanalysen 2003/2004 und 2010 zeigt, dass die Ausweitung der getrennten Erfassungssysteme Auswirkungen auf Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls hat. So beträgt der Rückgang an Heizwertträgern mit rein (PPK, Holz) oder überwiegend nicht-fossilem Kohlenstoff (a. n. g. Stoffe, hier vor allem Hygieneprodukte) in Summe rund 3.090 Mg. Dem steht ein Rückgang von „nur“ 923 Mg aus Fraktionen gegenüber, die ganz oder überwiegend auf fossilem Kohlenstoff basieren (Verbunde und Kunststoffe). Dazu BÜNEMANN [2011, S.154]: „Entsprechend der Massenverhältnisse resultieren aus den Wertstofftonnenszenarien restmüllseitige Heizwertreduzierungen in einer Größenordnung von 350 kJ/kg (...) - 400 kJ/kg (...)“.

Zum anderen ist in Leipzig auch das Aufkommen der Organikfraktion um über 3.000 Mg zurückgegangen, was zu einer entsprechenden Anhebung des Heizwertes führen dürfte. Entsprechende Berechnungen zur Veränderung des Heizwertes und des C_{biogen}-Gehaltes des Restabfalls bei Vorwegnahme verschiedener Wertstofffraktionen hat die TU Dresden [KÜGLER 2009] durchgeführt (vgl. Abbildung 5). Dementsprechend dürfte sich im Leipziger Restabfall möglicherweise der Heizwert weniger stark verändert haben, weil sich die Entnahmen gegenläufig auswirken. Gleiches gilt für den Anteil an biogenem Kohlenstoff. Auch hier führt die Entnahme der verschiedenen Wertstofffraktionen zu einer Abnahme (PPK, Organik) auf der einen und zu einer Zunahme (Kunststoffe) auf der anderen Seite.

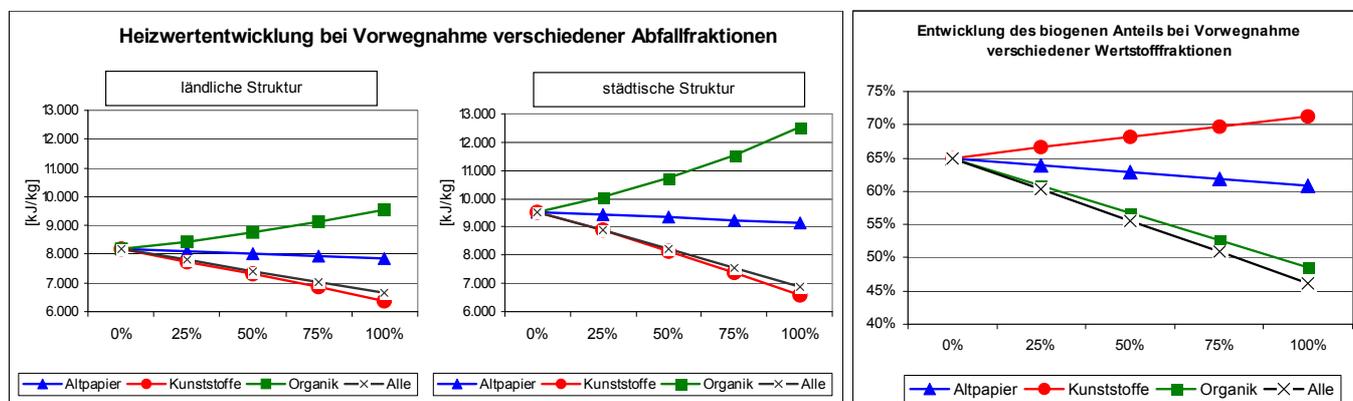


Abbildung 5: Entwicklung des Heizwertes und des biogenen Anteils im Restabfall bei Vorwegnahme verschiedener Wertstofffraktionen [KÜGLER 2009]

Landkreis Leipzig

Infolge der Verwaltungs- und Funktionalreform (Kreisgebietsreform) im Freistaat Sachsen 2008 wurden die Landkreise Leipziger Land und Muldentalkreis zum Landkreis Leipzig zusammengeschlossen. Die vormaligen Landkreise verfügten zum Zeitpunkt des Zusammenschlusses nicht über aktuelle Abfallwirtschaftskonzepte [KEK Leipzig 2011]. Daher wurde in den Jahren 2009 bis 2011 ein einheitliches Konzept erarbeitet und dafür auch eine Analyse der Zusammensetzung der im Landkreis erfassten Restabfälle durchgeführt. Das darauf basierende Abfallwirtschaftskonzept des Landkreises Leipzig für den Zeitraum 2012 bis 2018 [SHC 2012] wurde am 16.05.2012 mit Beschluss des Landkreises für verbindlich erklärt.

Tabelle 4 zeigt Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls des Landkreises Leipzig 2011 sowie der Stadt Leipzig zum Vergleich. Auffällig ist der deutlich höhere Organik-Anteil im Landkreis gegenüber der Stadt Leipzig (überwiegend Küchenabfälle). Dem hingegen ist der prozentuale Anteil an PPK, Glas und Kunststoffen deutlich geringer.

Tabelle 4: Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls des Landkreises Leipzig 2011 im Vergleich zum Restabfall der Stadt Leipzig 2010 [SHC 2012, SHC 2010, INTECUS 2011]

Stoffgruppen	Landkreis Leipzig - 2011			Stadt Leipzig - 2010		
	[Mg/a]	[kg/(E*a)]	[%]	[Mg/a]	[kg/(E*a)]	[%]
Fe-Metalle	319	1,2	1,2	890	1,8	1,5
NE-Metalle	173	0,6	0,7	580	1,1	1,0
PPK	604	2,3	2,3	3.704	7,1	6,0
Glas	896	3,5	3,4	4.677	9	7,6
Kunststoffe	1.214	4,5	4,6	4.743	9	7,7
Organik	15.174	56,7	57,2	29.025	55,6	47,3
Holz	151	0,6	0,6	631	1,2	1,0
Textilien	923	3,4	3,5	2.367	4,5	3,9
Mineralstoffe	579	2,2	2,2	1.523	2,9	2,5
Verbunde	412	1,5	1,6	1.661	3,3	2,7
Schadstoffbelastet Stoffe	46	0,1	0,2	189	0,3	0,3
a. n. g. Stoffe*	1.869	7,0	7,0	5.308	10,1	8,6
Mittelfraktion*** (10 - 40 mm)	1.404	5,3	5,3	0	0	0,0
Feinfraktion (< 10 mm)**	2.767	10,3	10,4	6.091	11,7	9,9
Summe	26.531	99,2	100	61.389	117,6	100

* Leder, Gummi, Kork, Hygieneprodukte, sonstiger Rest

** Asche, Straßenkehrschutt, Erde, Katzen- und Kleintierstreu; in Sortieranalyse von SHC als Feinmüll deklariert

*** In Sortieranalyse von SHC als Mittelmüll deklariert.

Im Landkreis Leipzig wurde die Mittelfraktion zwar weiter aufdifferenziert, allerdings nicht in die Endbilanz integriert, sodass die prozentuale Verteilung nicht direkt vergleichbar ist. Die Analyse der fünf Strukturgebiete ergab einen Organikanteil in der Mittelfraktion von im Mittel 76 % (vier Gebiete) und im fünften Gebiet von 66 %. Danach kamen die a. n. g.-Stoffe mit einem Anteil von 6,3 bis 10,4 % und die Kunststoffe mit 2,8 bis 4,5 %. Der hohe Organikanteil der Mittelfraktion deckt sich mit den Untersuchungen aus der Stadt Dresden [BIWA 2010], Leipzig [SHC 2010] und ländlichen Gebietskörperschaften in Bayern [BLfU 2008]. Unter Berücksichtigung der in der Mittelfraktion enthaltenen Stoffgruppen würde insbesondere der Organikanteil des Restabfalls auf über 60 % steigen.

Hintergrund für diesen sehr hohen Organikanteil dürfte sein, dass der Landkreis Leipzig kein separates Sammelsystem für die Entsorgung von Bioabfällen betreibt. In Teilen des Landkreises wurde die Biotonne allerdings von Unternehmen auf privatrechtlicher Basis angeboten. Laut Empfehlung der Gutachter SHC soll der Landkreis auch künftig keine separate Bioabfallersorgung durchführen, weil der im Landkreis eingesammelte Hausmüll in einer MBA behandelt wird und diese Technik sehr sensibel im Hinblick auf Veränderungen des Anlagen-Inputs reagiert [SHC 2012]. „Zusätzlich sind weite Teile des Landkreises sehr ländlich strukturiert, sodass nach allen Erfahrungen von einem vergleichsweise hohen Stand der Eigenkompostierung ausgegangen

werden kann.“ Bei Einführung einer Biotonne bestehe „die sehr reale Gefahr einer nicht unerheblichen Beeinträchtigung der Eigenkompostierung, indem Bioabfälle vom Komposthaufen unerwünschterweise in die Biotonne umgelenkt werden.“ [SHC 2012].

Stadt Dresden

Die Landeshauptstadt Dresden war bis zum 31.12.2005 Mitglied im Zweckverband Oberes Elbtal (ZAOE) und übernimmt seither die Abfallentsorgung in Eigenverantwortung. Der ZAOE ist aber auf Grund der abgeschlossenen Zweckvereinbarung weiterhin für die Beseitigung der Abfälle aus der Landeshauptstadt Dresden zuständig, für die die Stadt keine eigenen Entsorgungsmöglichkeiten besitzt.

In der Stadt Dresden hat die BIWA Consult die Zusammensetzung von Restabfällen aus Haushalten der Stadt für die Jahre 2001, 2003, 2005, 2007 und zuletzt 2009/2010 [BIWA 2010] analysiert. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der letzten vier Sortierkampagnen.

Tabelle 5: Vergleich der Zusammensetzung des Restabfalls aus Haushalten der Stadt Dresden

Stoffgruppe	2003	2005	2007	2009/10
	[% (Masse FS)]	[% (Masse FS)]	[% (Masse FS)]	[% (Masse FS)]
Fe-Metalle	1,9	1,7	1,4	1,8
NE-Metalle	0,6	0,6	0,7	0,8
Papier	13,1	12,6	13,0	10,4
Glas	6,6	5,8	6,4	5,6
Kunststoffe	5,2	5,1	6,1	5,3
Zusatz 1: Schaumstoffverpackungen	0,2	0,1	0,1	0,2
Organik	32,7	34,6	36,9	38,4
Holz	1,3	0,9	0,8	1,8
Sonstiges	0,3	0,3	0,3	0,3
Textilien	2,6	2,6	3,2	2,9
Mineralstoffe	4,9	2,8	1,9	1,8
Verbunde	7,7	8,7	5,6	7,6
Zusatz 2: Windeln, Hygieneprodukte	5,6	8,1	8,1	5,6
Schadstoffe	1,4	1,5	1,5	1,2
Mittelfraktion Fe	4,6	4,6	4,9	4,7
Feinfraktion Asche	11,5	10,1	8,9	11,8
Summe (inkl. Rundungsdifferenzen)	100,2	100,1	99,8	100,2

Die Analyse der Restabfallzusammensetzung in Dresden ergab [BIWA 2010]:

- „Die Anteile Organik sind von 2001 bis 2007 angestiegen. Dieser Trend wurde durch die Ergebnisse der neuen Sortieranalyse bestätigt. Der Organik-Anteil 2009/10 liegt über dem von 2007. Die Abschöpfung von biogenen Anteilen aus den Restabfällen hat sich durch die flächendeckende Getrennterfassung von Bioabfällen in Dresden nicht verbessert.“

- Für Fe, Asche und Holz nahmen die Gehalte von 2001 bis 2007 stetig ab. Die Analysenergebnisse 2009/10 weisen für diese Materialien wieder höhere Werte aus.
- Für PPK wurden bis 2007 fast konstante Gehalte von etwa 13 % ermittelt. 2009/2010 ging der PPK-Gehalt im Dresdner Restabfall auf ca. 10 % zurück.
- Für andere Stoffgruppen wurden mehr oder weniger stark schwankende Gehalte bestimmt (z. B. Kunststoffe/Verbunde).“

Es zeigt sich, dass die größeren Veränderungen (Abnahme PPK, Zunahme Organik und Holz) im Bereich der Heizwertträger mit nicht-fossilem Kohlenstoff erfolgt sind.

Zweckverband Abfallwirtschaft Oberes Elbtal (ZAOE)

Der Zweckverband Abfallwirtschaft Oberes Elbtal (ZAOE) wurde 1992 gegründet. Träger sind seit der Kreisgebietsreform 2008 der Landkreis Meißen (ehemals Landkreise Meißen und Riesa-Großenhain) und der Landkreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge (ehemals Landkreise Sächsische Schweiz und Weißeritzkreis). Die Landeshauptstadt Dresden ist bereits zum 01.01.2006 aus dem Verband ausgetreten. Der Verband ist für die Entsorgung der überlassenen Abfälle von rund 503.000 Menschen zuständig und hat im Jahr 2010 rund 72.204 Mg Restabfälle entsorgt [INTECUS 2011].

Im Verbandsgebiet des ZAOE wurden bereits 1999/2000 Restabfallanalysen durchgeführt. Tabelle 6 zeigt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse:

Tabelle 6: Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls des ZAOE 2010/2011 im Vergleich zu 1999/2000 [INTECUS 2011]

Stoffgruppen	2010/2011			1999/2000
	[Mg/a]	[kg/(E*a)]	[%]	[%]
Fe-Metalle	1.011	2,2	1,4	2,9
NE-Metalle	433	0,9	0,6	0,8
PPK	1.950	4,0	2,7	6,2
Glas	2.599	5,6	3,6	6,3
Kunststoffe	4.260	9,0	5,9	5,3
Organik	27.726	58,5	38,4	36,9
Holz	1.083	2,3	1,5	1,4
Textilien	4.693	9,9	6,5	3,4
Mineralstoffe	4.765	10,1	6,6	6,1
Verbunde	1.588	3,4	2,2	2,4
Schadstoffbelastete Stoffe	866	1,9	1,2	0,9
a. n. g. Stoffe*	7.798	16,5	10,8	4,7
Mittelfraktion (10 - 40 mm)	0	0,0	0,0	0
Feinfraktion (< 10 mm)**	13.358	28,1	18,5	22,7
Summe	72.204	152,2	100	100

* Leder, Gummi, Kork, Hygieneprodukte, sonstiger Rest

** Asche, Straßenkehrschutt, Erde, Katzen- und Kleintierstreu

Im Herbst 2010 und Frühjahr 2011 wurden Aufkommen und Zusammensetzung des Restabfalls im Verbandsgebiet untersucht [INTECUS 2011]: „Basierend auf der einwohnerspezifischen Restabfallmasse und der vorgenommenen Zuordnung der Einwohner des Verbandsgebietes des ZAOE in die gewählten Schichtungen, ergibt sich eine durchschnittliche einwohnerspezifische

sche Restabfallmasse für das Verbandsgebiet von 137,5 kg/(E*a) in Kampagne 1 und 166,8 kg/(E*a) in Kampagne 2. (...). Die einwohnerspezifische Restabfallmasse der untersuchten Bebauungsstrukturen mit getrennter Bioabfallfasserfassung ist im Durchschnitt höher als in denen ohne getrennte Bioabfallfasserfassung. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass durch die getrennte Erfassung von Bioabfall die einwohnerspezifische Restabfallmasse geringer wird. Was die Ursache für die entgegengesetzte Tendenz in den Untersuchungsgebieten des Verbandsgebietes des ZAOE ist, ist nicht eindeutig zu klären. Dies können ortsspezifische Besonderheiten sein (...).“

Die einwohnerspezifische Restabfallmasse (gewichteter Jahresdurchschnitt) ist praktisch gleich groß geblieben: 1999/2000 betrug sie 151,0 kg/(E x a) und 152,2 kg/(E x a) in 2010/2011. Auch in der Zusammensetzung sind keine signifikanten Unterschiede feststellbar: „Während im Untersuchungszeitraum 1999/2000 der Feinanteil < 10 mm ca. 4 % größer war, lag 2010/2011 der Anteil an a. n. g. Stoffen um ca. 6 % höher. Weiterhin ist ein Rückgang des Papieranteils um 3,5 % festzustellen. Der Textilanteil stieg um ca. 3%. In Summe war ein Rückgang der Wertstofffraktionen (Metalle, PPK, Glas, Kunststoffe) von 21,5 % auf 14,2 % zu verzeichnen. Der Anteil der Organik war 2010/2011 1,5 % höher als bei der Analyse 1999/2000.“ [INTECUS 2011].

Zwischenfazit

Die Auswertung vorhandener Restabfallanalysen aus Sachsen ergibt ein differenziertes Bild. So haben sich in den Städten Dresden und mehr noch Leipzig teilweise deutliche Veränderungen hinsichtlich der Anteile von kohlenstoffreichen Fraktionen gezeigt. Hingegen zeigen die Restabfallanalysen aus dem Verbandsgebiet des ZAOE keine signifikante Änderung in der Zusammensetzung des Restabfalls über die letzten elf Jahre.

Modellierung Restabfall 2011/12

Das Restabfallaufkommen in Sachsen belief sich im Jahr 2010 (aktuellere Daten liegen nicht vor) auf 530.075 Mg. Davon entfielen 14,5 % auf die Stadt Leipzig, 13,8 % auf die Stadt Dresden, 13,6 % auf die beiden zum ZAOE gehörenden Kreise (Meißen 7,0 %, Sächsische Schweiz-Osterzgebirge 6,6 %) und 5,6 % auf den Landkreis Leipzig [LfULG 2011]. In Summe sind mit den oben ausgewerteten Abfallanalysen in den letzten drei Jahren knapp 48 % des Restabfallaufkommens in Sachsen untersucht worden. Mit Ausnahme der Stadt Leipzig hat sich die Abfallzusammensetzung in den untersuchten Gebietskörperschaften nicht dramatisch geändert. Die größten Veränderungen ergaben sich bei der Stadt Leipzig. Erste Daten zur durch die GT+ bewirkten Veränderungen zeigen gegenläufige Entwicklungen hinsichtlich Heizwert und Anteil an biogenem Kohlenstoff. Diese Effekte dürften sich nur anteilig auf den Restabfallmix-Sachsen auswirken - der Anteil der Stadt Leipzig am Restabfallaufkommen in Sachsen beträgt rund ein Siebtel. Eine Heizwertreduzierung etwa um 350 MJ/Mg, wie von BÜNEMANN [2011] angesprochen, würde sich im Sachsen-Mix daher nur mit 50 MJ/Mg bemerkbar machen - bei einem modellierten Heizwert für den Sachsen-Mix von 8.500 MJ/Mg eine zu vernachlässigende Größe. Für die im Weiteren durchzuführenden Berechnungen wird daher weiterhin mit den Daten des bereits in der Vorgängerstudie modellierten Restabfall-Mix für Sachsen gerechnet.

Modellierung Heizwertangereicherte Fraktionen und Ersatzbrennstoff 2011/12

Heizwerte und Kohlenstoffgehalte der heizwertangereicherten Fraktionen und Ersatzbrennstoffe wurden, sofern keine Angaben vom Betreiber, Aufbereiter oder Verwerter vorlagen, anhand der Heizwertbilanz der jeweiligen Erstbehandlungsanlage modelliert.

Modellierung weiterer Abfallarten 2011/12

Tabelle 7 fasst die in der Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] verwendeten Datensätze für die verschiedenen den öRE überlassenen Abfallarten wie hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Sperrmüll und Abfälle von öffentlichen Flächen zusammen. Die Daten basierten auf Sortieranalysen sächsischer öRE, Angaben von Betreibern von Aufbereitungs- und (Mit-) Verbrennungsanlagen, Literaturquellen sowie darauf aufbauend eigenen Abschätzungen und Berechnungen. Aufgrund fehlender aktueller Daten wird auch hier mit den Daten der Vorgängerstudie gerechnet. Zu den Abfällen von öffentlichen Flächen führt das LfULG [2011] aus, dass sich deren Zusammensetzung in der letzten Erhebung kaum geändert hat: „Abfälle von öffentlichen Flächen bestanden auch im Jahr 2010 überwiegend aus Straßenkehricht (14 587 t) sowie Garten- und Parkabfällen (5 265 t).“ Weitere angelieferte und verarbeitete Abfallarten werden im Folgenden kurz beschrieben.

Tabelle 7: Verwendete Datensätze für Abfälle (bezogen auf Frischsubstanz)

Abfallart/-fraktion	Hu _{roh}	C-Gehalt	Gehalt C _{biogen}	Gehalt C _{fossil}
	[MJ/Mg]	[kg C/Mg]	[kg C/Mg]	[kg C/Mg]
Restabfall	8.500	245	177	68
Gewerbeabfall, hausmüllähnlich	11.500	271	139	132
Sperrmüll	13.700	337	223	114
Abfälle von öffentlichen Flächen ^{a)}	4.000	200	150	50

a) Hu wie Organik, Annahme: 40 % TS, davon 50 % C, davon wiederum 75 % biogen und 25 % fossil

Schredderleichtfraktion fein

Für die Schredderleichtfraktion (SLF) wird ein Heizwert von 14 bis 17 MJ/kg angegeben, wobei angereicherte organische Teilfraktionen teilweise deutlich höhere Heizwerte aufweisen können (20 bis 23 MJ/kg, z. T. bis 32 MJ/kg) [FZKA 2004]. Der Feinkornanteil < 10 mm kann bis zu 50 % der Masse der Schredderrückstände betragen [FZKA 2004]. Laut Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV) ist nur der heizwertreiche Grobanteil der SLF für die Verbrennung geeignet [BDSV 2010]. Nach Untersuchungen von [HOFFMANN 2011] weist die SLF-Feinfraktion < 8 mm einen Heizwert zwischen 5 und 13 MJ/kg und einen Kohlenstoffgehalt von 12 bis 35 Gew.- % TS (bei 1 bis 6 % Wasser) auf, je nach Herkunft (Altautos, Weiße Ware, Misch- und Sammelschrott). Der Betreiber hat auf Nachfrage einen Heizwert von 7.000 bis 8.500 MJ/Mg FS für SLF fein mitgeteilt. Der Großteil der organischen Bestandteile dürfte fossilen Ursprungs sein (Kunststoffe, Elastomere), aber es sind auch regenerative Kohlenstoffträger (Holz) enthalten. Der Anteil an regenerativem Kohlenstoff am Gesamt-C wird mit 10 % abgeschätzt.

Vorabsiebung aus Sortieranlagen für Siedlungsabfälle

Das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern (MWAT) gibt für diese Abfallart einen Heizwert von 8 MJ/kg an. In Bezug auf die Masse entfällt je ein Drittel auf die Bestandteile Mineralstoffe (Glas, Steine, Baustoffe), Organik (circa 50 % Kunststoffe, 50 % Holz, PPK und Biomasse) und Feinkorn [MWAT 2009a]. Der Betreiber hat einen Heizwertbereich von 2.500 bis 5.000 MJ/Mg FS für Absiebungen angegeben. Der Anteil an regenerativem Kohlenstoff am Gesamt-C wird mit 10 % abgeschätzt.

Krankenhausabfälle

Der Heizwert für Krankenhausabfälle wird in der Literatur unterschiedlich angegeben. Daten zum C-Gehalt liegen nicht vor. Nach Untersuchungen am Input einer Sonderabfallverbrennungsanlage [REINHARDT 2007] wies der Abfall mit dem AVV-Schlüssel 18 01 04 einen TS-Gehalt von 70 % auf; der Anteil nativer Organik an der TS betrug 60 %, davon waren knapp die Hälfte - hier 45 % - Kohlenstoff regenerativen Ursprungs. Bei einem derart hohen Kohlenstoffgehalt (42 % FS) ist allerdings von einem wesentlich höheren Heizwert als für Restabfall auszugehen. Laut Informationsportal Abfallbewertung IPA enthalten Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (z. B. Wund- und Gipsverbände, Wäsche, Einwegkleidung, Windeln) [AS 180104/AS 180203], insbesondere „Anteile von Metallen, Kunststoffen, Textilien, Glas, Keramik, Wasser.(...) Ausgenommen davon sind getrennt erfasste, nicht kontaminierte Fraktionen Papier, Glas, Kunststoffe.“ [IPA 2012]. Danach ist ein eher niedriger Heizwert zu erwarten. Hierzu passt auch die Angabe einer Studie im Auftrag des MWAT [2009b] über Energie aus Abfall, die für Krankenhausabfälle einen Heizwert von 8.000 MJ/Mg berichtet. Dieser Wert wird im Folgenden verwendet. Für Krankenhausabfall wird in Anlehnung an REINHARDT [2007] der biogene Anteil am Kohlenstoffgehalt auf 45 % festgesetzt.

Alt- und Restholz

[MWAT 2009b] gibt für Altholz 14 MJ/kg und für Restholz 13 MJ/kg an. Der Anteil an regenerativen Kohlenstoff am Gesamt-C-Gehalt dürfte - analog zum Holz im Siedlungsabfall - bei 90 % liegen [IFEU 2007, Tab. 1-8].

LVP-Sortierreste

[IFEU 2007, Tab. 5-5] gibt für LVP-Sortierreste folgende Daten an (bezogen auf 1 Mg Originalsubstanz): Heizwert Hu = 18,4 MJ, 191 kg Wasser, 395 kg C, davon 284 kg C_{fossil} und 111 kg C_{bio}.

3.3 Daten zu den relevanten Entsorgungsanlagen

Ausgehend von den Informationen zu den Behandlungssystemen der öRE (siehe Kapitel 3.1) wurden die zu befragenden Anlagen ausgewählt. Neben den Erstbehandlungsanlagen fanden die nachgeordneten Anlagen Berücksichtigung, denen die Hauptmengenströme der Outputmaterialien der Erstbehandlungsanlagen zugeflossen sind (Mengenströme > 1.000 Mg/a). Anlagen zur Verwertung von Fe- und NE-Metallen wurden in die Anlagenbefragung nicht einbezogen. Hierzu liegen in einschlägigen Datenbanken fundierte Werte für Gutschriften vor, auf die die Klimarelevanzberechnungen zurückgreifen (siehe Kapitel 3.4).

Im Rahmen von zwei Fragebogenaktionen wurden insgesamt 29 Fragebögen versendet. Die Fragebögen wurden auf die jeweiligen Anlagen spezifisch zugeschnitten, wobei die in Abbildung 6 dargestellten Themenkomplexe für die Erarbeitung der Fragebögen zu Grunde gelegt wurden.

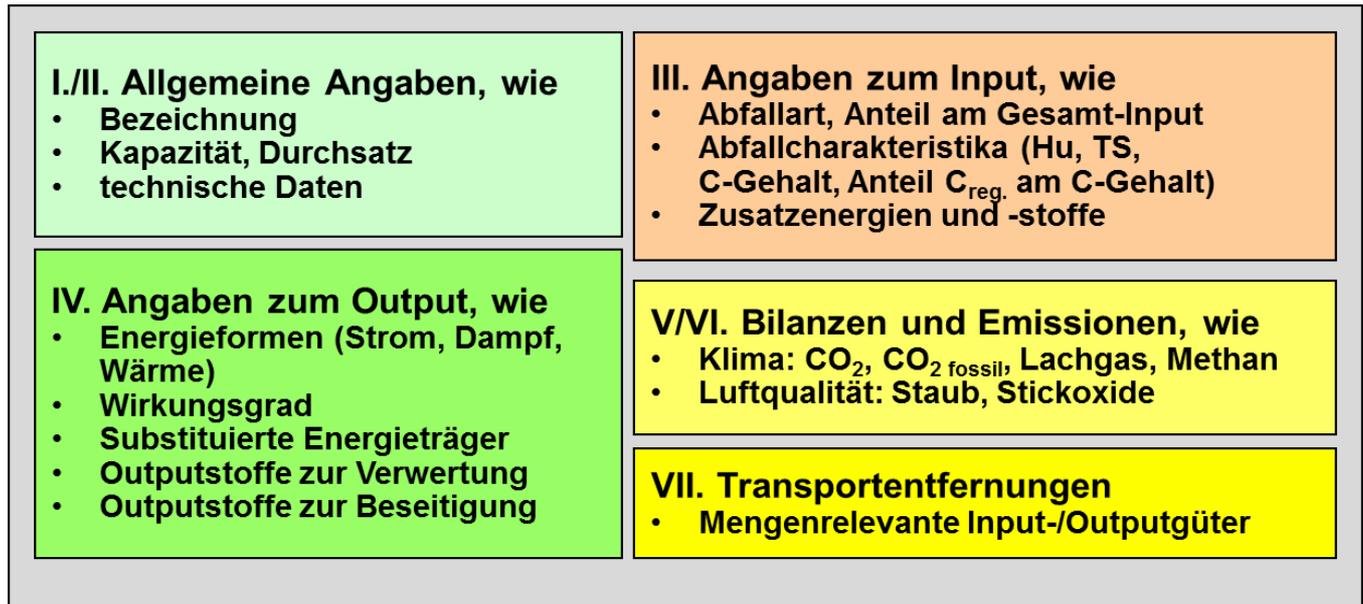


Abbildung 6: Themenbereiche für die Erhebung von Anlagendaten

Die Fragebogenaktionen wurden durch eine umfangreiche Telefonakquise und Mailaktionen sowie Vor-Ort-Besuche bei ausgewählten Anlagen begleitet. Diese Begleitmaßnahmen waren zwingend erforderlich, um einen möglichst umfassenden und fundierten Datenrücklauf von den Anlagen zu erreichen. Im Ergebnis der Anlagendatenerhebung lagen 19 Fragebögen mit auswertbaren Daten vor. Die formalen Ergebnisse der Fragebogenaktionen sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Auf der Grundlage der übermittelten Daten wurden anlagenspezifische Steckbriefe erstellt, die eine wesentliche Basis für die Klimarelevanz- und die Energieeffizienzberechnungen darstellen. Datenlücken, die sich

- durch fehlende Fragebogen-Rückläufe,
 - durch Fehlstellen in den zurückgesendeten Fragebögen bzw.
 - für die geringeren Mengenströme und Metalle, die nicht in die Anlagenbefragung einbezogen wurden,
- ergaben, wurden über entsprechende Modellierungen geschlossen.

Tabelle 8: Rücklauf der Fragebögen im Rahmen der Datenerhebung bei Anlagenbetreibern

Anlagentypen	Fragebogen			
	versendet	Rücksendung	mit verwertbaren Daten	keine Rücksendung
Erstbehandlungsanlagen	3	3	3	0
Zwischenlager	3	3	3	0
Aufbereitungsanlagen	6	4	3	2
EBS-Kraftwerke	6	4	4	2
Kohlekraftwerke	2	2	2	0
Zementwerke	4	0	0	4
Kompostierungsanlage	1	0	0	1
Müllverbrennungsanlagen	2	2	2	0
Deponien	2	2	2	0
Summe	29	20	19	9

3.4 Last- und Gutschriften

Der für diese, wie für die Vorgängerstudie, gewählte Ansatz erfordert die Berücksichtigung der Vorketten. Darunter versteht man den Aufwand bzw. die Emissionen, die von den vorgelagerten Prozessketten² ausgehen. Die entsprechenden Daten können einschlägigen Datenbanken entnommen werden. In dieser Untersuchung wird auf die Datenbank ProBas des Umweltbundesamtes zurückgegriffen (www.probas.umweltbundesamt.de). Diese ist aktuell und im Internet frei verfügbar: „13.07.2012 - Strukturanpassung und Aktualisierung der Datenbank: Der neue ProBas Release umfasst umfangreiche Überarbeitungen und Aktualisierungen. (...) Zahlreiche neue bzw. aktualisierte Datensätze wurden ergänzt. Hierzu gehören Rohstoffdaten aus UBA F+E-Vorhaben, Daten aus TREMOD 2010, Daten aus dem Zentralen System Emissionen des Umweltbundesamtes (ZSE) für 2010 sowie die aktuellen Daten aus GEMIS 4.7.1.“

Wo erforderlich, zum Beispiel um die in ProBas hinterlegten Daten weiter zu untersetzen, wird etwa die Datenbank GEMIS 4.7.1 [2012] selbst herangezogen. Dort werden inzwischen für die Berechnung der Treibhauspotenziale die GWP-Faktoren nach IPCC 2007 verwendet. Die vorherigen Werte in GEMIS 4.4 wurden aktualisiert.

3.4.1 Elektrischer Strom

Bei der Mono- oder Mitverbrennung von Abfällen bzw. daraus abgetrennten heizwertreichen Fraktionen in Müllverbrennungsanlagen (MVA), Ersatzbrennstoffkraftwerken und Kohlekraftwerken wird Energie in Form von Strom, Prozessdampf und/oder Wärme ausgekoppelt. Dafür sind dem Prozess entsprechende Gutschriften zu erteilen. In der Vorgängerstudie wurde auf Wunsch des Auftraggebers, auch vor dem Hintergrund, dass Sachsen seit einigen Jahren Strom exportiert, ein sächsischer Strommix modelliert, der stark von Braunkohle dominiert ist. Sofern die verwertenden Anlagen in anderen Bundesländern stehen, wird dort aber nur eine Gutschrift für den bundesdeutschen Strommix erteilt. Dies ist insofern ergebnisrelevant, als der deutsche Strommix einen deutlich niedrigeren spezifischen CO₂-Emissionsfaktor aufweist als der sächsische Mix. So hat diese Festlegung in der Vorgängerstudie dazu geführt, dass die Anlagen in Sachsen, die einen hohen Aufbereitungsaufwand aufweisen, deren heizwertangereicherte Fraktionen aber außerhalb Sachsens verwertet werden, in der Klimabilanz schlechter ab-

² Die Systemgrenzen können je nach Datenquelle unterschiedlich gewählt sein (z. B. Berücksichtigung von Herstellung und Entsorgung, Last- und Gutschriften).

schnitten als die Anlagen, bei denen die Verwertung innerhalb Sachsens erfolgte. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird auch dieses Mal wieder mit unterschiedlichen Strommischen gearbeitet.

Deutscher Strommix 2011

Die Brutto-Stromerzeugung 2011 betrug 612,1 TWh (612,1 Mrd. kWh). Die Aufteilung auf die einzelnen Energieträger der letzten drei Jahre zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern, Stand: 1.8.2012 [AGEB 2012]

Energieträger	2009	2010	2011*
	[%]	[%]	[%]
Braunkohle	24,6	23,2	24,5
Kernenergie	22,8	22,4	17,6
Steinkohle	18,2	18,6	18,3
Erdgas	13,3	13,8	13,9
Mineralölprodukte	1,6	1,3	1,1
Erneuerbare, darunter	15,9	16,4	20,1
■ Wasserkraft**	3,2	3,3	3,0
■ Windkraft	6,5	6,0	8,0
■ Biomasse	4,3	4,4	5,2
■ Photovoltaik	1,1	1,9	3,2
■ Geothermie	0,0	0,0	0,0
■ Hausmüll***	0,7	0,8	0,8
Übrige Energieträger	3,6	4,3	4,5
Bruttoerzeugung insgesamt	99,9	100,0	100,1
Bruttoerzeugung in [TWh]	592,4	628,1	612,1

* Vorläufige Angaben, z. T. geschätzt

** Erzeugung in Lauf- und Speicherwasserkraftwerken sowie Erzeugung aus natürlichem Zufluss in Pumpspeicherkraftwerken

*** nur Erzeugung aus biogenem Anteil des Hausmülls (ca. 50 %).

Nach Berechnungen bzw. ersten Schätzungen (2011) des Umweltbundesamtes [UBA 2012a] ist der CO₂-Emissionsfaktor des deutschen Strommixes im Jahr 2010 gegenüber dem Vorjahr deutlich gesunken, in 2011 aber wieder angestiegen (vgl. Tabelle 10). Der Stromhandel hat ebenfalls Einfluss auf den Emissionsfaktor, daher wird er ohne und mit Stromhandel angegeben.

Der in 2010 verringerte spezifische CO₂-Faktor ist auf den steigenden Einsatz erneuerbarer Energien (+0,5 %) und den Brennstoffwechsel weg von emissionsintensiver Braunkohle (-1,4 %) zu den emissionsärmeren Energieträgern Erdgas (+0,5 %) und Steinkohle (+0,4 %) zurückzuführen, wodurch sogar der leichte Rückgang bei der Kernenergie (-0,4 %) kompensiert werden konnte. Der Stromhandel hat 2009 und 2010 zu einer Erhöhung des jeweils spezifischen CO₂-Faktors von jeweils rund 3 % beigetragen.

In 2011 war der Stromhandel stark verringert. In Folge dessen ist sein Einfluss auf den spezifischen Emissionsfaktor auch auf 1,3 % zurückgegangen. Hingegen machte sich 2011 die Abschaltung mehrerer AKW in Folge der Reaktorkatastrophe von Fukushima deutlich bemerkbar. Der Anteil der Kernenergie an der Bruttostromerzeugung nahm um mehr als ein Fünftel von 22,4

auf 17,6 % ab. Steinkohle, Erdgas und Mineralölprodukte verzeichneten ebenfalls leichte Rückgänge. Die Erneuerbaren legten kräftig zu, aber ebenso auch die Braunkohle. In Summe führte dies - bei einem Absinken der Bruttostromerzeugung insgesamt um 2,5 % - zu einem deutlichen Anstieg des spezifischen CO₂-Emissionsfaktors 2011 um 15 g/kWh entsprechend 2,8 % (ohne Stromhandel). Damit liegt der für 2011 geschätzte spezifische CO₂-Faktor (559 g) mit dem Wert von 2009 (561 g) praktisch wieder gleichauf.

Tabelle 10: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommixes, Stand 04/2012

		2009	2010*	2011**
CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	[Mio. Mg]	294	302	304
Stromverbrauch***	[TWh]	524	555	544
CO ₂ -Emissionensfaktor Strommix	[g/kWh]	561	544	559
CO ₂ -Emissionensfaktor Strommix inkl. Stromhandelsaldo [Veränderung]	[g/kWh]	577 [+2,9 %]	562 [+3,3 %]	566 [+1,3 %]

* vorläufige Angaben

** erste Schätzungen

*** Bruttostromerzeugung – (Kraftwerkseigenverbrauch + Pumpstrom + Leitungsverluste)

Gesicherte Daten für 2011 sind derzeit nicht verfügbar. So umfasst der im Juni 2012 erschienene Nationale Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar [UBA 2012b] ebenfalls nur den Zeitraum 1990 bis 2010.

„Die Bilanzierung der energiebedingten CO₂-Emissionen der Länder erfolgt nach einer im Länderarbeitskreis Energiebilanzen zwischen den beteiligten Ländern abgestimmten Methodik. Den Berechnungen liegen zum einen die Energiebilanzen als umfassende und vollständige Darstellung des Energieverbrauchs zu Grunde. Daneben werden spezifische, auf den Heizwert eines Energieträgers bezogene CO₂-Faktoren benötigt, die - differenziert nach Energieträgern und Einsatzbereichen- vom Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt werden.“ [LAK-E 2010]

Die spezifischen CO₂-Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes sind in kg CO₂/GJ und nicht in CO₂-Äq. angegeben [UBA 2010]. Die Emissionen anderer Treibhausgase (z. B. Methan aus Gasmotoren) sind daher vermutlich nicht enthalten. Hierfür spricht auch die Aussage im Nationalen Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2010: *„Wir haben im Zuge eines größeren Forschungsvorhabens, das Ende 2008 gestartet ist und im Jahre 2011 abgeschlossen werden konnte (FICHTNER et al. 2011), mit der Aktualisierung der beschriebenen Datengrundlage für Emissionsfaktoren (außer CO₂) begonnen.“* [UBA 2012b]. Die Methodik der Ermittlung der sektorspezifischen Treibhausgasemissionen für den Inventarbericht sieht die Berücksichtigung so genannter Vorketten nicht vor. Die Vorketten erhöhen in der Regel die spezifischen Emissionen und damit die zu erteilenden Last- oder Gutschriften. Zudem sind für die Berechnung der nationalen Treibhausgasinventare die alten GWP-Werte des IPCC von 1996 zu verwenden [GEMIS 4.7.1, 2012].

In ProBas ist der Kraftwerksmix zur Stromerzeugung in Deutschland 2010 anhand der Daten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aus 2011 (Energiedaten - Stromerzeugung in Deutschland) modelliert (EI-KW-Park-DE-2010). Inklusive Vorketten beläuft sich die Treibhausgasemission auf 157.115 kg CO₂-Äq. pro Terajoule entsprechend 0,565 kg CO₂-Äq./kWh_{el}. Zum Vergleich: der CO₂-Emissionensfaktor Strommix ohne Vorketten wird für das Jahr 2010 auf 0,544 bzw. 0,562 kg CO₂-Äq./kWh_{el} (ohne bzw. mit Stromhandel) geschätzt (vgl. Tabelle 10). Für das Jahr 2011 liegt keine entsprechende Modellierung in ProBas vor.

Sächsischer Strommix

Laut Energie- und Klimaprogramm Sachsen vom Oktober 2011 [SMWA/SMUL 2011] nutzen die in Sachsen vorhandenen Großkraftwerke zur Stromerzeugung einheimische Braunkohle als Primärenergieträger. Der durchschnittliche Wirkungsgrad des gesamten Kraftwerksparks beträgt 40 %. Im Vergleich zum Bund (13 % Anteil am Bruttostromverbrauch) verfügt Sachsen über eine große Kapazität an gekoppelter Strom- und Wärmeerzeugung (KWK) (19 %). Sachsen ist nach wie vor ein Stromexportland. So belief sich laut Statistik in Sachsen [StaLa, o. J.] die Bruttostromerzeugung im Jahr 2010 auf rund 37.431 GWh (2009: 36.548 GWh), während der Stromaustauschsaldo -13.735 GWh (2009: -13.741 GWh) betrug.

Daten zur spezifischen CO₂-Emission des sächsischen Strommixes 2010 oder 2011 sind nicht publiziert, auch nicht auf der Internetseite des zuständigen Sächsischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr [SMWA 2012]. Der Länderarbeitskreis Energiebilanzen stellt auf seiner Internetseite die Energie- und CO₂-Bilanzen der einzelnen Bundesländer zur Verfügung. Danach betrug die CO₂-Emission der Stromerzeugung in Sachsen im Jahr 2009 rund 228,9 g CO₂/GJ entsprechend 824,1 g CO₂/kWh_{el} (vgl. Tabelle 11) [LAK-E 2012]. Hierin sind allerdings die Vorketten nicht mit enthalten.

Tabelle 11: CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung in Deutschland und Sachsen [UBA 2012a, SMWA 2012]

CO ₂ -Emissionenfaktor	2007	2008	2009	2010	2011
Strommix Sachsen	816,8	812,8	824,1	k.A.	k.A.
Strommix Deutschland (ohne Stromhandel)	608	568	561	544	559

Eine Modellierung der CO₂-Emissionen des sächsischen Strommixes 2010 oder 2011 ist derzeit nicht möglich, weil die entsprechenden Energiebilanzen noch nicht publiziert sind. In Sachsen ist die Bruttostromerzeugung von 2009 auf 2010 um rund 2,3 % (+847 GWh) gewachsen. Der Anteil der Erneuerbaren nahm hingegen nur um 0,4 % (+223 GWh) zu (vgl. Tabelle 12). Weil in Sachsen keine Atomkraftwerke betrieben werden, müssen die restlichen 624 GWh auf fossiler Basis erzeugt worden sein - vermutlich aus Braunkohle. Daher ist mit einem Anstieg der spezifischen CO₂-Emissionen des sächsischen Strommixes in 2010 zu rechnen. Ein Blick auf die Entwicklung beim deutschen Strommix zeigt, dass dessen spezifische CO₂-Emissionen um 15 g/kWh entsprechend 2,8 % (ohne Stromhandel) angestiegen sind, womit beinahe wieder der Wert von 2009 erreicht wurde. Dies dürfte vor allem auf den Anstieg des Einsatzes von Braunkohle zur Kompensation des Herunterfahrens mehrerer Atomkraftwerke zurückzuführen sein.

Tabelle 12: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien [StaLa, o. J., ergänzt]

Jahr	2007	2008	2009	2010	Zunahme 2010
	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[GWh]	[%]
Bruttostromerzeugung	37.037	35.420	36.584	37.431	2,3
daraus aus EE insgesamt	2.851	2.904	3.009	3.232	
■ Wasserkraft	324	261	275	325	18,2
■ Windkraft	1.548	1.457	1.363	1.336	-2,0
■ Photovoltaik	59	111	197	337	71,1
■ Biomasse/Biogas*	921	1.074	1.175	1.235	5,1
Anteil EE	7,7%	8,2%	8,2%	8,6%	0,4 %

* inklusive Deponiegas, Klärgas, Klärschlamm und biogene Abfälle

Weitere Stromquellen

Der Betreiber einer Aufbereitungsanlage deckt den Strom- und Wärmebedarf seiner Anlage anteilig aus dem benachbarten Blockheizkraftwerk, welches ausschließlich mit Deponiegas betrieben wird. In ProBas wird für ein mit Deponiegas betriebenes BHKW (Deponiegas-BHKW-GM 1 MW-2010/brutto) eine direkte Emission in Höhe von 816 kg CO₂-Äq./TJ entsprechend 0,3 10⁻¹³ kg CO₂-Äq./kWh angegeben.

Für die Berechnung verwendete Daten (Last- und Gutschriften) für Strom

Weil es aufgrund der derzeitig verfügbaren Datenlage nicht möglich ist, für Sachsen einen Strommix für das Jahr 2010 oder 2011 (einschließlich Vorketten) zu modellieren, wird für die weitere Berechnung auf die Daten zurückgegriffen, die nach gleicher Methodik ermittelt wurden und die für einen identischen Bilanzzeitraum gelten: das sind die Daten für das Jahr 2009 für den Bundesmix und den Strommix Sachsen, jeweils ohne Stromhandel (vgl. Tabelle 11). Dies erscheint vertretbar vor dem Hintergrund, dass die Energiefrage das Ergebnis der Berechnungen dominiert. Eine Modellierung des Strommixes Sachsen für 2010 mit einer Zunahme der Erzeugung aus Braunkohle in Sachsen bei gleichzeitigem Rückgang der Emissionen des bundesdeutschen Mixes würde die Schere zwischen CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung in Deutschland und in Sachsen weiter aufgehen lassen, wodurch sich der eingangs beschriebene Effekt (hohe Lastschriften, niedrige Gutschriften) noch gravierender auf das Ergebnis auswirken würde. Mit der nun getroffenen Festlegung ist das Verhältnis der CO₂-Emissionen von bundesdeutschem zu sächsischem Mix beinahe unverändert (Vorgängerstudie: 1 : 1,51; aktuell: 1 : 1,47). Wollte man diesen Effekt gänzlich eliminieren, müssten alle Berechnungen mit einem einheitlichen Strommix (dem bundesdeutschen Mix) durchgeführt werden. Dies ist Gegenstand der anschließenden Sensitivitätsbetrachtung.

■ Verwendete Gutschrift für Strommix Deutschland (ohne Stromhandel) [UBA 2012a]:	-0,561 kg CO ₂ /kWh _{el}
■ Verwendete Gutschrift für Strommix Sachsen [SMWA 2012]:	-0,824 kg CO ₂ /kWh _{el}
■ Verwendete Lastschrift für Strommix Deutschland (ohne Stromhandel) [UBA 2012a]:	+0,561 kg CO ₂ /kWh _{el}
■ Verwendete Lastschrift für Strommix Sachsen [SMWA 2012]:	+0,824 kg CO ₂ /kWh _{el}
■ Verwendete Lastschrift für Deponiegas-betriebenes BHKW:	+0,3·10 ⁻¹³ kg CO ₂ -Äq./kWh _{el}

3.4.2 Weitere verwendete Energieträger

Je nach Verfahren werden weitere Energieträger Erdgas, Heizöl EL, Dieseltreibstoff und Braun- sowie Steinkohle benötigt. Die Lastschriften für deren Verbrauch werden anhand der Daten aus ProBas und ergänzend aus GEMIS 4.7.1 bestimmt (vgl. Tabelle 13 auf Seite 30). Sofern von befragten Anlagenbetreibern detaillierte Angaben etwa zur Herkunft oder zum Energiegehalt gemacht wurden, wird die spezifische THG-Emission entsprechend angepasst.

■ Verwendete Lastschrift für Erdgas [ProBas 2012]:+	+ 8.299 kg CO ₂ -Äq. /TJ
■ Verwendete Lastschrift für Heizöl EL [ProBas 2012]:	+ 10.950 kg CO ₂ -Äq. /TJ
■ Verwendete Lastschrift für Dieseltreibstoff [ProBas 2012]:	+ 12.538 kg CO ₂ -Äq. /TJ
■ Verwendete Lastschrift für Steinkohle [GEMIS 4.7.1 2012]:	+ 93.666 kg CO ₂ -Äq./TJ
■ Verwendete Lastschrift für Braunkohle [GEMIS 4.7.1 2012]:	+114.390 kg CO ₂ -Äq./TJ

3.4.3 Wärmeenergie (Fernwärme)

Die Gutschrift für die abgegebene Wärmeenergie hängt zum einen von der Absatzmöglichkeit der Wärme am Markt ab, konkret von der Frage, ob die erzeugte Wärme ganzjährig oder nur in Spitzenzeiten, z. B. in den Wintermonaten, absetzbar ist. Dies soll im Folgenden bei der Berechnung über den Anteil der Jahresbetriebsstunden, in denen eingespeist werden kann, berücksichtigt werden. Zum anderen hängt die Gutschrift für die abgegebene Wärmeenergie davon ab, welche Wärmeenergie sie verdrängt. Hier geht es vornehmlich um die Bereitstellung von Energien für die Gebäudeheizung. In der Vorgängerstudie wurde, sofern keine detaillierten Angaben über die Art der substituierten Raumwärme vorlagen, 273,2 g CO₂-Äq./kWh_{end} entsprechend 75,9 kg CO₂-Äq./GJ für die Substitution des damaligen Kleinf Feuerungsanlagenmixes Sachsen (31 % Öl- + 69 % Erdgasfeuerung) gutgeschrieben.

Tabelle 13: Last- und Gutschriften für den Verbrauch von Erdgas, Heizöl EL, Dieseltreibstoff und Steinkohle nach ProBas [2012] sowie Braunkohle nach [GEMIS 4.7.1]

	Gasmix-DE-2010	Umschlag-DEÖl-leicht (Lkw)-2010	Dieselmix-DE-2010 (inkl. Biokraftstoffe)	Kohlemix-DE-gesamt-2010	Braunkohle-DE-generisch
Herkunft / Zusammensetzung	16 % Aufbereitung-Gas-DE-2010 16 % PipelineGas-NL-2010 30 % PipelineGas-NO-2010 38 % PipelineGas-RU-2010	RaffinerieÖl-leicht-DE-2010 Transport von Gütertransport-Dienstleistung mit Lkw-Diesel-DE-2010	95,6 % Öl-leicht-DE-HH/KV-2000 4,4 % Summe div. Erneuerbare	Steinkohle-DE-Vollwert-subv-2010	Deutsche Rohbraunkohle, Lausitz
Treibhausrelevante Stoffe [kg CO ₂ -Äq. pro TJ, inkl. Vorkette]	8.299 kg/TJ	10.950 kg/TJ	12.538 kg/TJ	93.666 kg/ TJ (direkte Emission)	114.390 kg/TJ (direkte Emission)
Modellierung in GEMIS 4.7.1 [2012]	Gas-mix-DE-2010 bzw. Gas-DE-2010, Gas-NL-2010, Gas-NO-2010, Gas-RU-2010	Öl-leicht-DE-KW/IN-2010	Diesel-DE-2010 (inkl. Bio)	k.A.	k.A.
Dichte [GEMIS 2012]	0,784 kg/Nm ³ *	0,840 kg/l	0,832 kg/l	k.A.	k.A.
Spezifisches Gewicht [GEMIS 2012]	21.944,0 kg/TJ *	23.457,7 kg/TJ	83,526682 kg/MWh	34.130 kg/TJ	115.607 kg/TJ
Energiegehalt (Hu) [GEMIS 2012]	35,73 MJ/Nm ³ *	42,6 MJ/kg	43,1 MJ/kg	29,3 MJ/kg	8,65 MJ/kg

* errechnet aus den Anteilen der einzelnen Erdgassorten

Für eine Aktualisierung des Kleinf Feuerungsanlagenmixes 2011 standen keine Daten für Sachsen zur Verfügung. Daher wurde auf die Daten in ProBas [2012] zurückgegriffen. Dort beträgt die Gutschrift für ausgekoppelte und genutzte Abwärme bei Heizkraftwerken, die Öl-Heizungen ersetzt, 102,977 kg CO₂-Äq. für 1 GJ Raumwärme (Endenergie). Für den Ersatz von Gasheizungen werden entsprechend 80,992 kg CO₂-Äq./GJ Raumwärme angesetzt. Bei Beibehaltung des damaligen Ansatzes für den Kleinf Feuerungsanlagen-Mix Sachsen [31 % Öl- + 69 % Erdgasfeuerung] würde die Gutschrift sich nunmehr auf 87,8 kg CO₂-Äq./GJ belaufen. Zum Vergleich: IFEU [2007] hat den bundesdeutschen Wärmemix 2007 mit 92 kg CO₂-Äq./GJ modelliert.

Sofern nicht im Einzelfall eine Modellierung für das Entsorgungsgebiet möglich ist, wird bei Fernwärmeauskopplung eine Gutschrift für den bundesdeutschen Wärmemix 2007 in Höhe von 92 kg CO₂-Äq./GJ (Endenergie) erteilt. Für die Umrechnung auf Endenergie (Gebäudegrenze) wird ein Primärenergiefaktor von 0,7 nach DIN 4701-10/A1 /DIN 07/ [FFE 2009] verwendet.

■ **Verwendete Gutschrift für Wärmemix Deutschland [IFEU 2007]:** -92 kg CO₂-Äq./GJ_{end}

3.4.4 Dampf

Wird Prozessdampf an einen industriellen Abnehmer abgegeben, werden dort die ansonsten eingesetzten Brennstoffe zur Dampferzeugung substituiert. IFEU [2007] setzt hierfür generell einen Brennstoffmix von jeweils 50 % Erdgas und Heizöl an. Dafür werden dem Prozess 290 g CO₂-Äq./kWh als Emissionseinsparung gutgeschrieben. Weil dieser Ansatz plausibel erscheint, wird er - sofern keine konkreten Daten im Einzelfall vorliegen - für die weiteren Berechnungen in dieser Studie übernommen.

■ **Verwendete Gutschrift für Prozessdampf [IFEU 2007]:** -0,29 kg CO₂-Äq./kWh

3.4.5 Klinkererzeugung

Laut VDZ [VDZ 2011, S. 12] wurden zur Herstellung einer Tonne Zement in 2011 durchschnittlich 2.759 MJ Brennstoffenergie und 109,4 kWh elektrische Energie eingesetzt. „Brennstoffenergie wird im Wesentlichen für das Brennen des Klinkers benötigt; elektrische Energie wird vor allem für die Rohmaterialaufbereitung (ca. 35 %), für das Brennen und Kühlen des Klinkers

(ca. 22 %) und für das Mahlen der Zemente (ca. 38 %) verwendet. (...)Seit vielen Jahren liegt der klinkerspezifische Brennstoffenergiebedarf zwischen 3.500 und 3.900 kJ/kg Klinker.“ Der angegebene Energiebedarf liegt deutlich über dem BAT-Wert. Im BRef-Dokument 2007 wurden bereits 3.150 MJ/Mg Klinker, erzeugt nach dem Trockenverfahren, angegeben [IPPC 2007]). Im aktuellsten BRef-Dokument von 2010 wird der BAT-Wert für Trockenverfahren mit mehrstufiger Vorwärmung und Vorkalziniierung mit einer Spannbreite von 2.900 bis 3.300 MJ/Mg Klinker angegeben [IPPC 2010, 2012]. Für die Modellierung der Zementerzeugung wird daher mit einem Brennstoffbedarf von 3.200 MJ/Mg Klinker gerechnet. Der Bedarf an elektrischer Energie von 109,4 kWh entfällt zu knapp 40 % auf den Bereich hinter der Klinkererzeugung; 60 % des Bedarfs sind daher dem Klinker zuzurechnen (66 kWh/Mg Klinker).

Der erzeugte Klinker wird dem Verfahren Zementerzeugung gutgeschrieben. Dies erfolgte in früheren Ökobilanzen [IBA 1998, BZL 1998, BIWA/BZL 2009] immer für den Klinker „an sich“, also unabhängig von der Frage, mit welchem Energieaufwand der Klinker erzeugt worden war. So hätte ein nach dem Nassverfahren erzeugter Klinker mit einem Energiebedarf von 5.000 MJ/Mg Klinker die gleiche Gutschrift erhalten wie ein Klinker, der nach einem modernen Verfahren mit einem spezifischen Energiebedarf von lediglich 3.200 MJ/Mg Klinker erzeugt wurde. In der Vorgängerstudie wurde für erzeugten Klinker der spezifische Energieverbrauch oberhalb des BAT-Wertes von 3.200 MJ/Mg Klinker anteilig als Lastschrift berechnet. Weil jedoch zum Energieverbrauch der verwertenden Zementwerke keine detaillierten Informationen verfügbar sind und die Zementindustrie selbst angibt, dass ihr klinkerspezifischer Brennstoffenergiebedarf zwischen 9 und 22 % über dem BAT-Wert liegt, wird der fossile Anteil im Ersatzbrennstoff dem Prozess vollständig als Lastschrift angerechnet. Im Gegenzug wird die vermiedene Emission aus Regelbrennstoff dem Prozess gutgeschrieben. Hierbei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass das Energieaustauschverhältnis Regelbrennstoff zu Ersatzbrennstoff 1 ist, das heißt 1 MJ heizwertangereicherte Fraktion ersetzt 1 MJ Steinkohle. In der Sensitivitätsbetrachtung wird die Ergebnisrelevanz des Energieaustauschverhältnisses weiter untersucht.

■ Verwendete Lastschrift für Energiebedarf: fossiler Anteil im Ersatzbrennstoff in kg CO₂-Äq./Mg Klinker

■ Verwendete Gutschrift: vermiedene Emission aus dem Regelbrennstoff (bei Energieaustauschverhältnis von 1) in kg CO₂-Äq./Mg Klinker

3.4.6 Eisenmetallschrott

Bei den hier modellierten Entsorgungslösungen wird in den Erstbehandlungsanlagen mindestens eine heizwertangereicherte Fraktion abgetrennt. Je nach Anforderungen der Abnehmer muss diese frei von Störstoffen wie Metallen sein. Daher erfolgt die Metallabtrennung in der Aufbereitungsanlage und/oder in der verwertenden Anlage vor, ggf. auch erst nach der Verbrennung (z. B. in MVA aus der Schlacke).

Der abgetrennte Eisenmetallschrott kann direkt oder nach weiterer Aufbereitung in der Stahlindustrie eingesetzt werden. Dort substituiert er Roheisen, wodurch der Abbau von Eisenerz und die Verhüttung von Roheisen vermieden werden. Damit ist die Einsparung von klimarelevanten Emissionen verbunden, die mit einer Gutschrift in die Bilanz eingeht. Im Rahmen dieser Untersuchung kann der Weg des Eisenschrotts nach Übergang an einen (Zwischen-)Händler bzw. bis zum Eintritt in das verwertende Stahlwerk nicht erfasst werden. Hier wären weitere Aufwendungen (Energie für Aufbereitung und Transport) zu berücksichtigen. Weil diese aber von der Höhe her nicht ergebnisrelevant sein dürften, werden sie in der weiteren Betrachtung nicht mehr berücksichtigt.

Die Höhe der Gutschriften für die vermiedenen klimarelevanten Emissionen aufgrund der Substitution von Primärmaterialien wird von mehreren Entwicklungen beeinflusst: Steigerung der Ressourceneffizienz in der erzeugenden Industrie mit Verringerung des spezifischen Energie- und Stoffbedarfs, Erhöhung des Anteils an erneuerbaren Energieträgern im verwendeten Strommix, ggf. auch eine Zunahme der Erfassung von Wertstoffen und ihre Rückführung in die Produktion, dadurch sinkender Anteil an Primärmaterial. Folglich ist zu erwarten, dass die Gutschriften für rezyklierbare Stoffe wie etwa Metallschrotte im Jahr 2010 niedriger ausfallen als im Jahr 2000.

IFEU [2007] hat für die Produktionskette vom Erz bis zum Roheisen eine klimarelevante Emission von 2.400 kg CO₂-Äq. pro Mg angesetzt. Die Datenbasis dafür waren Veröffentlichungen aus den Jahren 1999 bis 2000 und GEMIS 4.0. In der Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] wurde unter Verwendung von GEMIS 4.4.2 für die Berechnung der Gutschrift zur Verwertung von Eisenmetallschrott ein Wert für die spezifische Treibhausgasemission von 1.927 kg CO₂-Äq. pro Mg angesetzt. In ProBas werden für

MetallFe-roh-DE-2010 1,82 kg CO₂-Äq. pro kg Roheisen angegeben. GEMIS 4.7.1 [2012] enthält auch Schätzungen für die Folgejahre. Danach sinken die Gutschriften in 2020 auf 1,806 kg [2020] und in 2030 sogar auf 1,744 kg CO₂-Äq. pro kg.

Für die weitere Berechnung wird für die spezifische Treibhausgasemission der ProBas-Wert für 2010 von 1,82 kg CO₂-Äq. pro kg Roheisen verwendet. Dabei wird davon ausgegangen, dass Eisenmetallschrott Roheisen im Verhältnis 1 : 1 ersetzt. Angaben hierzu sind ProBas oder GEMIS 4.7.1 nicht zu entnehmen.

■ Verwendete Gutschrift für Eisenmetallschrott [ProBas 2012]: -1,82 kg CO₂-Äq. pro kg

3.4.7 Nichteisenmetalle

Wie beim Eisenmetallschrott findet auch bei den Nichteisenmetallen eine anteilige Abtrennung während der mechanischen Aufbereitung in den Erstbehandlungsanlagen statt. In MVA werden Nichteisenmetalle auch teilweise aus der Schlacke abgetrennt und einer Verwertung zugeführt. In der Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] wurde die Gutschrift für abgetrennte NE-Metalle in voller Höhe für Aluminium erteilt. Das IFEU hat hingegen in seiner Studie aus dem Jahr 2007 die Gutschrift für Aluminium reduziert: „Die Fraktion der NE-Metalle im Hausmüll wird üblicherweise von Aluminium dominiert. Das nächst wichtigste Metall ist Kupfer (z. T. als Messing), für welches sich aus dieser Quelle bislang jedoch noch keine Recyclingstruktur herausgebildet hat. Die Bilanz berücksichtigt daher lediglich eine Gutschrift für Aluminium, welches zu 60 % als Al in der NE-Schrott-Fraktion angesetzt wird.“ [IFEU 2007]

Was 2007 noch zutreffend gewesen sein mag, ist 2010 (und erst recht 2012) vermutlich nicht mehr aktuell. So ist etwa zu erwarten, dass durch die WEEE- und RoHS-Richtlinie ein Großteil der kupferhaltigen Produkte nicht mehr im Hausmüll, sondern in der separaten Elektro- und Elektronikaltgeräte-Erfassung aufkommt. Daher erscheint die Reduzierung der Gutschrift für Aluminium aus Restabfall auf 60 % derzeit nicht mehr begründbar.

IFEU [2007] hat für Rohaluminium, basierend auf einem Bericht von Boustead für die Europäische Aluminiumindustrie 2000, eine klimarelevante Emission von 10.600 kg CO₂-Äq. pro Mg angesetzt - wobei aus der Publikation nicht hervorgeht, ob dieser Wert bereits die vom IFEU vorgenommene 60%-ige Reduzierung beinhaltet. (Wenn ja, läge der 100 %-Wert bei relativ hohen 17.667 kg/Mg. Auf der anderen Seite stammen die Boustead-Daten aus der Zeit vor 2000, wo ein Betrieb ineffizienter Anlagen nicht auszuschließen ist). In der Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] wurde unter Verwendung von GEMIS 4.4.2 eine Gutschrift für die Verwertung von NE-Schrott (Aluminium) von 12.868 kg CO₂-Äq./Mg abgetrennter NE-Metall-Fraktion erteilt.

Für das Jahr 2010 sind in ProBas [2012] und GEMIS 4.7.1 [2012] zwei Werte enthalten:

- MetallAluminium-DE-2010 (nur Inlandsproduktion): 14,6 kg CO₂-Äq./kg Aluminium
- MetallAluminium-mix-DE-2010 (inklusive Importanteil von rund 2/3): 14,9 kg CO₂-Äq./kg Aluminium

Für die weitere Berechnung wird der Wert für MetallAluminium-mix-DE-2010 (inklusive Importe) verwendet, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass der Aluschrott ausschließlich in die Inlandsproduktion geht. Von diesem Wert sind die Aufwendungen für das Schmelzen von Aluminium aus Aluschrotten zu Sekundäraluminium abzuziehen. Leider bieten ProBas und GEMIS 4.7.1 nur einen Wert für das Jahr 2005 (MetallAluminium-DE-sekundär-2005). Danach beträgt der energetische Aufwand 1,8 kg CO₂-Äq./kg Aluminium. Folglich reduziert sich die Gutschrift für die Verwertung von Altaluminium auf 13,1 kg CO₂-Äq./kg. Das Substitutionsverhältnis von Alt- zu Neualuminium beträgt 1,1 : 1, d.h. für 1 kg Aluminium werden 1,1 kg Aluminiumschrott eingesetzt. Daher verringert sich die Gutschrift auf 11,9 kg CO₂-Äq./kg Altaluminium.

■ Verwendete Gutschrift für Altaluminium [ProBas 2012]: -11,9 kg CO₂-Äq. pro kg

3.4.8 Gutschriften für weitere Stoffe

Während der Erstbehandlung und/oder im weiteren Verfahrensverlauf werden weitere stofflich nutzbare Stoffströme abgetrennt oder neue Stoffe erzeugt, für die jeweils entsprechende Gutschriften zu erteilen sind.

Holz als Strukturmaterial in der Kompostierung

Eine der Aufbereitungsanlagen trennt eine Holzfraktion ab, die anschließend als Strukturmaterial in der Kompostierung eingesetzt wird, um den Rottekörper mit ausreichendem Luftporenvolumen zu versorgen. Als Strukturmaterial werden üblicherweise neben Siebüberläufen aus der Konfektionierung der Fertigprodukte auch zerkleinerter Baum- und Strauchschnitt, Rinde oder Holzabfälle aus anderen Quellen eingesetzt. Durch den Einsatz der Holzfraktion wird kein hochwertiges oder treibhausgasrele-

vantes Material substituiert bzw. die substituierten Materialien sind ebenfalls regenerativen Ursprungs, sodass die Substitution keine Gutschrift ergeben kann. Auf der anderen Seite ist ggf. eine Zerkleinerung der Holzfraktion zu modellieren (Energiebedarf). Zudem steht der Energiegehalt des Materials nicht für die Gewinnung von Strom, Prozessdampf oder Wärme zur Verfügung. Andererseits wird für die Erzeugung von Kompost unter Berücksichtigung der Senkenfunktion für regenerativen Kohlenstoff eine Gutschrift für die Kompostierung von 16 kg CO₂-Äq./Mg Bioabfall modelliert [IFEU/AHU 2012, Abb. 5-11]. Weil empfohlen wird, dass der Anteil an strukturbildenden Materialien (Schreddergut, Siebüberlauf etc.) zwecks Erhaltung des erforderlichen luftführenden Porenvolumens circa 40 bis 60 Vol.-% betragen sollte [BMLFUW 2005, Kap. 4.5.1], erscheint es gerechtfertigt, für Altholz 50 % der Gutschrift für Kompost zu erteilen.

■ Verwendete Gutschrift für Altholz: -8 kg CO₂-Äq. pro Mg

Schottermaterial

Schlacken und Schmelzgranulate werden u. a. im Straßenbau verwertet. Sie verdrängen hier teilweise Primärrohstoffe. Weil GEMIS 4.7.1 für Schotter keinen Eintrag aufweist, wird ersatzweise der von IFEU für Schottermaterial verwendete Wert in Höhe von 0,0039 kg CO₂-Äq./kg herangezogen. Dieser Wert ist plausibel und liegt in der gleichen Größenordnung, wie sie GEMIS 4.7.1 (Stoffe: Mineralien, Baustoffe) etwa für Basaltbrechsand (0,0023 kg CO₂-Äq./kg) oder Bruchkies (0,00272 kg CO₂-Äq./kg) angibt.

■ Verwendete Gutschrift für Schottermaterial [IFEU 2007]: -0,0039 kg CO₂-Äq. pro kg

REA-Gips

Bei der Rauchgasentschwefelung fällt REA-Gips an. Dieser spielt heute in der Gips-Industrie eine bedeutende Rolle und substituiert dort Gips aus Primärrohstoffen. GEMIS 4.7.1 gibt für die Herstellung von Gips (Steine-Erden\Gips-DE-2010) eine Emission in Höhe von 0,0403 kg CO₂-Äq./kg an.

■ Verwendete Gutschrift für REA-Gips [GEMIS 4.7.1]: -0,0403 kg CO₂-Äq. pro kg

Ammoniumsulfat aus der RTO

Bei der Abgasreinigung mittels RTO fällt Ammoniumsulfat (Ammonsulfat, schwefelsaures Ammoniak, (NH₄)₂SO₄) an, welches in der Landwirtschaft als Düngemittel eingesetzt werden kann. Mangels verfügbarer Daten in GEMIS/Probas wird auf einen Ansatz von IFEU zurückgegriffen [IFEU 2007], bei dem das gewonnene Ammoniumsulfat über die Primärherstellung von Ammoniumdünger modelliert wird. Für die vorliegende Studie wird die Modellierung auf den Stickstoffeintrag bezogen.

■ Verwendete Gutschrift für Ammoniumsulfat aus der RTO: -5,66 kg CO₂-Äq. pro kg

3.4.9 Ammoniumhydroxid und weitere Chemikalien (Betriebs- und Hilfsstoffe)

Je nach Verfahren werden weitere Betriebsmittel zum Beispiel für die Abgasreinigung eingesetzt. Hierfür werden die in Tabelle 14 wiedergegebenen Lastschriften nach ProBas bzw., sofern dort nicht enthalten, nach GEMIS 4.7.1 angesetzt. Einen Sonderfall stellt die Lastschrift für NaHCO₃ (Natriumbicarbonat, Natriumhydrogencarbonat) dar. Für diesen Stoff, der in der Rauchgasreinigung eingesetzt wird, sind in den einschlägigen Datenbanken keine Daten zur Umweltbelastung (direkte Emission + Vorketten) verfügbar. Die Technische Universität München und das ATZ Entwicklungszentrum Sulzbach-Rosenberg [TUM/ATZ 2009] haben anhand von GEMIS 2007 eine Berechnung der klimarelevanten Emissionen aus der Herstellung von Natriumbicarbonat durchgeführt. Danach werden bei der Produktion von 1 Mg NaHCO₃ rund 0,575 Mg CO₂ emittiert. Dieser Wert soll im Folgenden - auch wenn er auf einer veralteten Datenbasis beruht, worauf die Autoren selbst hinweisen - verwendet werden. So errechnen die Autoren im gleichen Gutachten für die Herstellung von 1 Mg Ca(OH)₂ eine Umweltbelastung von 0,894 Mg CO₂/Mg Kalkhydrat, während GEMIS 4.7.1 hierfür 0,573 Mg CO₂/Mg angibt [Steine-Erden\Kalk-gelöscht-DE-2000]. Die Eingabedaten sind ggf. entsprechend der in der Praxis verwendeten Konzentration der Betriebsmittel umzurechnen.

Tabelle 14: Last- und Gutschriften für den Betriebsmittelverbrauch der Rauchgasreinigung

Betriebsmittel	CO ₂ -Äq. [kg/kg]	Quelle	Pfad-Bezugsjahr
Ammoniak 100 %	2,060	ProBas	Chem-AnorgAmmoniak-DE-2010
Aktivkohle 100 %	0,477	ProBas	FabrikAktivkohle-DE-2000
CaCO ₃ 100 %	0,045	GEMIS 4.7.1	Steine-Erden\CaCO3-Mehl-DE-2000
CaO fein 100 %	1,07	ProBas	Steine-ErdenCaO-mix-DE-2010
Ca(OH) ₂ 100 % (gelöschter Kalk)	0,573	GEMIS 4.7.1	Steine-Erden\Kalk-gelöscht-DE-2000
Harnstoff 100 %	0,813	ProBas	Chem-OrgHarnstoff-DE-2010
NaHCO ₃ 100 %	0,575	GEMIS 2007	Berechnet anhand von GEMIS 2007 [TUM/ATZ 2009]
NaOH 50 %	0,464	ProBas	Chem-anorgNaOH-mix-DE-2000
H ₂ SO ₄ ^{a)} 100 %	-0,406	ProBas	Chem-AnorgSchwefelsäure-2000
Salzsäure (HCl) 50 %	0,464	-	Modelliert wie NaOH

3.4.10 Ablagerung von MBA-Rotterest

Für die Ablagerung von MBA-Rotterest wurden in der Vergangenheit Lastschriften für den energetischen Aufwand des Einbaus (Diesel) und die Freisetzung von Restgasemissionen erteilt. Letztere wurden anhand der zulässigerweise enthaltenen Restorganik, dem Methanbildungspotenzial und dem teilweisen Abbau mittels Methanoxidation abgeschätzt, wobei noch die aus der Methanoxidation gebildete CO₂-Menge mit berücksichtigt wurde. Die Methanemissionen werden nach dem Einphasen-Modell des IPCC berechnet, wonach sich ein Emissionspotenzial von rund 7,7 kg Methan pro Mg Abfall ergibt. Weil MBA-Rotterest aufgrund der geringen Restgasemissionen ohne aktive Gasfassung eingebaut wird, ist die Emissionsminderung durch Methanoxidation die einzige Reduktionsmaßnahme. Bei einem Oxidationsfaktor von 0,1 (d. h. 10 % Reduktion durch Methanoxidation) würden somit über rund 100 Jahre rund 6,9 kg Methan freigesetzt. Bei einem Treibhauspotenzial von 25 für Methan entspricht dies einer Lastschrift von rund 172,5 kg CO₂-Äq./Mg Rotterest. Weil ausschließlich regenerative C-Quellen erfasst werden (Papier, Textilien, Garten-, Park- und andere verrottbare Abfälle, Lebensmittelabfälle sowie Holz und Stroh), ist das bei der Methanoxidation gebildete CO₂ nicht klimarelevant.

CO₂-Emissionen aus regenerativem Kohlenstoff gelten als klimaneutral; ein Überführen in eine dauerhafte Kohlenstoffsene ist klimaentlastend und müsste daher mit einer Gutschrift versehen werden. So wird in einigen Ökobilanzen für die dauerhafte Fixierung von regenerativem organischen Kohlenstoff im Deponiekörper oder im Boden (Humusbildung) eine Gutschrift erteilt [IFEU 2007, IFEU/AHU 2012]. Hier wird folglich auch für den regenerativen Kohlenstoffanteil im MBA-Rotterest, der nicht abgebaut und remobilisiert wird, eine Gutschrift von 21,1 kg CO₂/Mg Rotterest erteilt.

In der Bilanz überwiegt die Lastschrift für die restlichen Methangasemissionen deutlich die Gutschrift für die Verbringung regenerativen Kohlenstoffs in Senken. Es verbleibt eine Lastschrift für die Ablagerung von MBA-Rotterest von +151,4 kg CO₂/Mg Rotterest.

■ Verwendete Lastschrift für Deponierung Rotterest: +152 kg CO₂-Äq./Mg Rotterest (bei 18 % C in der TS)

3.4.11 Transportbedingte Emissionen

Die Lastschriften für transportbedingte Emissionen mittels Lkw werden anhand GEMIS 4.7.1 für den Prozess Lkw-Diesel-EU-2010 modelliert. Die Lastschrift (inkl. Vorketten) wird mit 0,0968 kg CO₂-Äq. pro Tonnenkilometer angegeben. Die Lastschriften für transportbedingte Emissionen mittels Schienenfahrzeugen werden anhand ProBas für den Prozess Zug-el-Güter-DE-2010 modelliert. Die Lastschrift (inkl. Vorketten) wird mit 0,0342 kg CO₂-Äq. pro Tonnenkilometer angegeben.

■ Verwendete Lastschrift für transportbedingte Emissionen (Lkw): +0,0968 kg CO₂-Äq./[Mg * km]

■ Verwendete Lastschrift für transportbedingte Emissionen (Schiene): +0,0342 kg CO₂-Äq./[Mg * km]

4 Berechnung der Klimarelevanz

4.1 Methodik

In den Vorgängerstudien [BIWA, BZL 2003, BIWA, BZL 2009] wurde zum einen die Methodik der überarbeiteten IPCC-Richtlinie aus dem Jahr 1996 zur Erstellung nationaler Treibhausgas-Inventare (Input/Output-Berechnung für fossiles C resp. CO₂) verwendet. Diese ist seit der letzten Aktualisierung im Jahr 2006 unverändert geblieben. Zum anderen wurde ein ökobilanzieller Ansatz angewendet. Die Studien erhoben allerdings nicht den Anspruch einer umfassenden Ökobilanz.

Für die Modellierung der Input- und Outputströme wird auf das Prinzip der Stoffflussanalyse Bezug genommen. Das Entsorgungssystem wird als Black Box betrachtet, in die Stoffe und Energie eingebracht werden. Input, Output und ggf. Lager innerhalb des Systems für Energie und Stoffe müssen in Summe „aufgehen“.

Beim ökobilanziellen Ansatz wurden gemäß dem Prinzip der Nutzengleichheit für die verbrauchten bzw. erzeugten Stoffe und Energien Systeme modelliert, die denselben Nutzen auf anderem Weg (andere Rohstoffe, andere Verfahren) erzeugen (Äquivalenzsystem). Die Erzeugung des äquivalenten Nutzens wird dann dem jeweiligen Verfahren gutgeschrieben (z. B. Verdrängung von Strom aus fossilen Energieträgern oder von Wärme aus Öl und Gas). Hierfür wird auf verfügbare Datensätze in ProBas und weitere Literaturquellen zurückgegriffen.

Aktualisierung der Datenbasis

Die in den Vorgängerstudien verwendeten Datensätze sind nicht mehr aktuell. So werden die ergebnisrelevanten Daten - Abfallzusammensetzung und Daten für Last- und Gutschriften, hier insbesondere der Strommix - neu modelliert (siehe Kapitel 3). Zugleich war auch zu prüfen, ob die verwendeten Faktoren für das relative Treibhauspotenzial (Global warming potential, GWP) noch aktuell sind. Der GWP-Wert beschreibt die mittlere Erderwärmungswirkung in Relation zu CO₂. Üblicherweise wird der GWP-Wert für einen Zeitraum von 100 Jahren verwendet. Die Werte für die Treibhauspotenziale wurden vom IPCC zuletzt 2007 [IPCC 2007a] aktualisiert. Allerdings sind für die Berechnung der nationalen Treibhausgasinventare weiterhin die alten GWP-Werte des IPCC 1996 zu verwenden [GEMIS 4.7.1, 2012].

Modellierung der Heizwertbilanz

Die Heizwertbilanz ist der wichtigste Aspekt der Modellierung, denn sie beschreibt, wie sich die in das System eingebrachte Energie in Form von Heizwertträgern auf die verschiedenen Outputströme verteilt. Die Heizwertbilanz der Erstbehandlungsanlagen wird anhand der bekannten oder modellierten Heizwerte der Inputströme und Heizwerte der ausgeschleusten Fraktionen ermittelt. Hierbei müssen sowohl Mengenangaben als auch Angaben zum Heizwert von Erstbehandlungs-, Zwischenbehandlungs-, Verwertungs- und Entsorgungsanlagen zu einer stimmigen Bilanz aggregiert werden. Weil die überwiegende Anzahl der Zwischenbehandlungs-, Verwertungs- und Entsorgungsanlagen mehr als nur den Output der betrachteten Erstbehandlungsanlage verarbeiten, muss die Bilanz zumeist über eine Betrachtung von Teilströmen geschlossen werden. Nicht bilanzierbare Pfade wie etwa Wasser- und Rotteverlust werden zur Schließung des Bilanzkreises verwendet, wobei die angesetzten Werte durch Plausibilitätsbetrachtungen abgesichert werden.

Modellierung der Energiebilanz

In die Energiebilanz der Erstbehandlungsanlage gehen neben dem Energiegehalt der Abfälle bzw. der ausgeschleusten Fraktionen auch die zugeführten Fremdenergien (Strom, Erdgas, Diesel) mit in die Betrachtung ein (vgl. Kapitel 5).

Modellierung der Kohlenstoffbilanz

Neben der Heizwertbilanz ist die Kohlenstoffbilanz zentrale Stellgröße für das Ergebnis der Klimarelevanz der Entsorgungslösungen, denn die Modellierung des Anteils an fossilem Kohlenstoff schlägt sich unmittelbar in der Berechnung der direkten Emissionen aus der Behandlung des Abfallinputs sowie der Verwertung der einzelnen Outputfraktionen nieder. Für die Modellierung der Gehalte an Kohlenstoff und des Anteils an fossilem bzw. regenerativem (oder biogenem) Kohlenstoff wurde auf verschiedene Literaturquellen (u. a. zitiert in Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] und [IFEU 2007]) sowie eigene Abschätzungen zurückgegriffen.

Modellierung der energetischen Verwertung

Bei der Modellierung der energetischen Verwertung gehen neben dem Energiegehalt der Abfälle bzw. der ausgeschleusten Fraktionen zum einen die zugeführten Fremdenergien (Strom, Erdgas, Diesel, in der Erst-, den Zwischenbehandlungs- und Verwertungsanlagen) und zum anderen die ausgekoppelte Energie in Form von Strom und Wärme mit in die Betrachtung ein. Die erzielbare Ausbeute hängt vom energetischen Netto-Wirkungsgrad der verwertenden Anlage ab (vgl. Kapitel 5).

Bei der MVA werden für die Modellierung der Stromauskopplung generell 8.760 Jahresstunden angesetzt, auch wenn die Anlagen ggf. zwei bis vier Wochen wegen Revisionsarbeiten stillstehen. In der modellierten MVA wurden für den Output an Prozessdampf 8.200 Betriebsstunden angegeben. Daher müsste die Gutschrift eigentlich entsprechend reduziert werden. Es ist allerdings zu vermuten, dass während des Anlagenbetriebs durchgehend Prozessdampf ausgekoppelt wurde und die fehlenden 560 Stunden auch die Stromauskopplung betreffen (Anlagenrevision, s. o.). Weil die anderen thermischen Anlagen auch keine Ausfallzeiten angeben (die aber sicher stattgefunden haben werden), wird die Auskopplung von Prozessdampf nicht stundenproportional reduziert.

Modellierung der direkten Emissionen thermischer Anlagen

Durch den Einsatz von heizwertreicher Fraktion als Ersatzbrennstoff wird Regelbrennstoff (in der Regel fossilen Ursprungs) ersetzt. Hierfür wird eine Gutschrift über die ausgekoppelte Energie (Strom, Wärme, Prozessdampf) erteilt. Auf der anderen Seite führt der fossile C-Anteil im Ersatzbrennstoff zur Bildung und direkten Freisetzung von klimarelevantem CO₂. Die Höhe der CO₂-Freisetzung hängt vom C-Gehalt, dem Anteil an C_{fossil} und dem Ausbrand ab: Die beiden ersten Größen werden anhand der verschiedenen Abfallarten des Inputs modelliert (s. o.: Kohlenstoffbilanz). Weil in der Regel Angaben zum C-Gehalt in den Reststoffen fehlen und so eine Massenbilanz nicht berechnet werden konnte, wird der Ausbrand einheitlich auf 99,5 % (bei Zementwerken auf 100 %) geschätzt. D. h. 99,5 % des C_{fossil} aus EBS gehen bei Feuerungsanlagen ins Abgas und führen dort zu einer klimarelevanten CO₂-Emission.

Für Braunkohlekraftwerke sind zudem auch Emissionen an Lachgas zu beachten. Diese bewegen sich für Staubfeuerung im Bereich von 0,5 bis 3 kg N₂O/TJ Brennstoffeinsatz [UBA WIEN 2010]. Die beiden verwertenden Kohlekraftwerke machen auch im Deutschen Schadstofffreisetzung- und -verbringungsregister [Pollutant Release and Transfer Register, www.prtr.bund.de] entsprechende Angaben, die sich bei Rückrechnung über den Durchsatz im Bereich unter 1 kg N₂O/TJ bewegen. Vereinfachend wird daher mit einem mittleren Emissionswert von 1,0 kg N₂O/TJ gerechnet. Für MVA sind Lachgas-Emissionen laut IFEU [2008, S. 52] nicht relevant: „... die Beiträge von Methan und Lachgas sind bezüglich dieser Systeme von weit untergeordneter Bedeutung.“

Reststoffaufkommen der thermischen Anlagen

Das Reststoffaufkommen wird für alle thermischen Anlagen mengen- und nicht heizwertproportional umgelegt, ohne Berücksichtigung der differierenden Aschegehalte der Brennstoffe.

Grundlage für Sensitivitätsanalyse

In die Berechnungen fließen verschiedene ergebnisrelevante Größen ein. Mit der Sensitivitätsanalyse soll der Einfluss solcher Größen auf die Ergebnisse der Klimarelevanzberechnungen untersucht werden. In die Untersuchungen werden folgende Parameter/Stellschrauben einbezogen (siehe Kapitel 4.4):

- Eigenschaften/Zusammensetzung des Abfalls (Heizwert, Anteil des fossilen Kohlenstoffs)
- Zuordnung des Outputs zu verwertenden Anlagen
- Energieaustauschverhältnis Primär- zu Ersatzbrennstoff
- Last- und Gutschriften für Strom
- Emissionen aus dem Anlagenbetrieb

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Abfallbehandlungssystem des AWVC

Für die MPS (AWVC) wurde der Heizwert und der C-Gehalt des Inputs (Tabelle 15) sowie des Outputs (Tabelle 16) modelliert. Der Input wird nach mechanischer Aufbereitung und thermischer Trocknung weiter aufbereitet und aufgetrennt in drei Ersatzbrennstofffraktionen, drei Schwerstofffraktionen und eine Inertfraktion. Zudem werden Eisenmetallschrott und Nichteisenmetalle abgetrennt und es findet ein Austrag von Wasser und leichtflüchtigen organischen Verbindungen über den Abgaspfad statt.

Tabelle 15: Modellierung des Inputs der MPS (AWVC) für 2012 (fünf Monate, hochgerechnet auf ein Jahr)

Input	2012	Hu _{roh} einzeln	Anteil am Input	Hu _{roh} Gemisch	C-Gehalt (FS)	C-Gehalt Gemisch (FS)	davon C _{bio}
	[Mg]	[MJ/Mg]	[%]	[MJ/Mg]	[kg]	[kg]	[%]
Restabfall	90.641	8.500	97,5	8.288	245	239	72,2
Krankenhausabfälle	2.323	8.000	2,5	200	210	5	45,0
Summe	92.964			8.488		244	71,1

Tabelle 16: Modellierung des Outputs der MPS (AWVC) 2012

Output	2012	Hu _{roh} einzeln	Beitrag Hu im Output,	C _{gesamt} gewichtet	C _{bio} gewichtet
	[kg/Mg]	[MJ/Mg]	[MJ/Mg]	[kg/Mg FS]	[kg/Mg FS]
SBS1	552,7	9.989	5.521	135	88
SBS2	35,5	11.722	416	9	6
SBS3	50,3	11.830	595	14	7
Schwerfraktion 1	2,5	8.120	20	0,6	1
Schwerfraktion 2	89,0	12.800	1.139	26	21
Schwerfraktion 3	24,5	12.800	314	7	6
Inertien	21,5	1.000	22	0,1	0,01
Fe-Metallschrott	22,6	0	0	0	0
NE-Metalle	1,1	0	0	0	0
NE-Metalle	0,5	0	0	0	0
Abgasverlust	0,0		212	57,7	51,9
Wasserverlust	199,7		0	0	0
Output gesamt	1.000,0		8.239	250	180

Die Modellierung der MPS RABA Chemnitz mit den Input- und Outputdaten der ersten fünf Monate des Jahres 2012 sowie den Daten der Verwertungsanlagen für 2011 führt zu dem Ergebnis, dass das Entsorgungssystem insgesamt zu einer Klimaentlastung beiträgt (Tabelle 17).

Tabelle 17: Ergebnis der Klimarelevanzberechnung für das Abfallbehandlungssystem des AWVC

Modul	Last-/Gutschrift	
	[kg CO ₂ -Äq. pro Mg Anlageninput]	[kg CO ₂ -Äq. pro Mg MPS-Input]
MPS		113,0
SBS1	-218,8	-120,9
SBS2	-291,7	-10,4
SBS3 (Aufbereitung)	0,5	0,023
SBS3 (Verwertung)	-15,1	-0,8
Schwerfraktion 1 (Aufbereitung)	0,5	0,001
Schwerfraktion 1 (Verwertung)	-215,8	-0,5
Schwerfraktion 2	-286,6	-25,5
Schwerfraktion 3	-364,0	-8,9
Fe-Metalle		-41,2
NE-Metalle		-19,0
Schotterersatz		-0,1
Ergebnis		-114,3
<i>Davon Summe ohne MPS</i>		-227,3

Der Klimabelastung aus dem Betrieb der MPS selbst (ohne Gutschriften für verwertbare Outputströme) und den Transporten zu den Verwertungsanlagen in Höhe von 113,0 kg CO₂-Äq./Mg Abfall stehen Einsparungen an klimarelevanten Emissionen durch die Auskopplung von Strom, Prozessdampf und Fernwärme sowie von Eisen- und Nichteisenmetallen und Inertmaterial (Schotterersatz) in Höhe von -227,3 kg CO₂-Äq./Mg Abfall gegenüber, die diese Emission überkompensieren, sodass in Summe eine Klimaentlastung in Höhe von -114,3 kg CO₂-Äq./Mg Abfall erreicht wird. Besonders positiv schlägt zu Buche, dass ein Großteil des heizwertreichen Outputmaterials (SBS1) in einem effizienten Braunkohle-Kraftwerk (Kohle-KW 2) energetisch verwertet wird.

Die MPS RABA Chemnitz wird im Jahr 2012 hochgerechnet (auf Basis der ersten fünf Monate) 92.964 Mg Abfälle behandeln und einer Verwertung zuführen. Entsprechend der hier vorgenommenen Modellierung wird dies zu einer **Einsparung an klimarelevanten Emissionen in Höhe von -10.627 Mg CO₂-Äq.** führen. Davon entfallen -7.900 Mg CO₂-Äq. auf 69.113 Mg überlassene Abfälle.

4.2.2 Abfallbehandlungssystem des Vogtlandkreises

Tabelle 18 zeigt die Modellierung des Inputs der MBS in Oelsnitz/Vogtland für 2011. Die Anlage schleust rund 36.254 Mg an stofflichen Fraktionen aus (Tabelle 19). Die Massendifferenz zum Input in Höhe von 13.223 Mg entsprechend 26,7 % wird als Rotte- und Wasserverlust in der Bilanz ausgewiesen. Der Input der MBS besteht zu rund 73 % aus Restabfall und zu knapp 26 % aus Fraktionen, die einen höheren Heizwert als Restabfall aufweisen. Infolgedessen ist der Input in die Anlage mit rund 9,9 MJ/kg auch vergleichsweise hoch.

Tabelle 18: Modellierung des Inputs der MBS (Vogtlandkreis) für 2011

Input	2011	Hu roh einzeln*	Anteil am Input	Hu roh Gemisch	C-Gehalt (FS)	C-Gehalt Gemisch (FS)	davon C _{bio}
	[Mg]	[MJ/Mg]	[%]	[MJ/Mg]	[kg]	[kg]	[%]
Restabfall	35.946	8.500	72,7	6.175	245	178	65,5
Sperrmüll	5.006	13.700	10,1	1.386	337	34	66,2
hmä GA	4.382	11.500	8,9	1.019	271	24	51,3
Sortierreste	3.376	18.400	6,8	1.256	395	27	28,1
AöF	81	4.000	0,2	7	200	0,3	75,0
Sonstiges (wie AöF)	686	4.000	1,4	55	200	3	75,0
Summe	49.477		100,0	9.898		266	60,6

* angenommen

Tabelle 19: Modellierung des Outputs der MBS (Vogtlandkreis) für 2011

Output	2011	Anteil	Hu	Hu roh einzeln	Hu
	[Mg]	[%]	[MJ/Mg]	[MJ/Mg]	[kWh/Mg]
Brennstoff aus Abfällen BAA1	8.957	18,1	17.958	3.251	903,2
Brennstoff aus Abfällen BAA2	7.248	14,6	14.332	2.100	583,4
Brennstoff aus Abfällen BAA3	3.209	6,5	14.332	930	258,3
Brennstoff aus Abfällen BAA4	2.605	5,3	14.332	755	209,6
Brennstoff aus Abfällen BAA5	1.320	2,7	13.750	367	101,9
Brennstoff aus Abfällen BAA6	875	1,8	17.300	306	85,0
Brennstoff aus Abfällen BAA7	5.995	12,1	6.920	839	233,0
Brennstoff aus Abfällen BAA8	1.502	3,0	6.920	210	58,4
Sonstige Abfälle aus mechanischer Behandlung SAMB (= AVV 191212)	2.164	4,4	6.920	303	84,1
Nicht kompostierte Fraktion NKO1	642	1,3	6.920	90	24,9
Nicht kompostierte Fraktion NKO2	563	1,1	6.920	79	21,9
Fe-Metalle Fe1 bis Fe5	1.174	2,4	0	0	0,0
Rotte-/Wasserverlust (ad 100%)	13.223	26,7		495	137,5
Summe	49.477	100,0		9.722	2.701

Die Modellierung der MBS (Vogtlandkreis) und der Daten der Verwertungsanlagen für 2011 führen zu dem Ergebnis, dass das Entsorgungssystem insgesamt zu einer geringen Klimaentlastung in Höhe von -20,3 kg CO₂-Äq./Mg Abfall beiträgt (Tabelle 20).

Tabelle 20: Ergebnis der Klimarelevanzberechnung für das Abfallbehandlungssystem des Vogtlandkreises

Modul	Verwertung	Last-/Gutschrift	
		(ohne direkte CO ₂ -Emissionen)	
		[kg CO ₂ -Äq. pro Mg Anlageninput]	[kg CO ₂ -Äq. pro Mg MBS/Input]
MBS ohne Gutschriften			71,2
Lastschrift für Emissionen CO ₂ fossil aus energetischer Verwertung			379,6
BAA1	AUF1	13,5	2,4
BAA1	AUF2	27,0	4,9
BAA1	ZEM_BAA1	-1.341,7	-194,3
BAA1	EBS_KW4	-611,5	-9,3
BAA1	EBS_KW5	-851,6	-17,9
BAA2	EBS_KW7	-210,1	-30,8
BAA3	EBS_KW6	-908,4	-58,9
BAA4	EBS_KW1	-571,2	-30,1
BAA5	EBS_KW1	-546,4	-14,6
BAA6	AUF2	27,0	0,5
BAA6	ZEM_BAA6	-1.292,5	-22,9
BAA7	AUF3	13,5	1,6
BAA7	EBS_KW1	-254,7	-30,9
BAA8	EBS_KW1	-254,7	-7,7
SAMB	AUF4	13,5	0,6
SAMB	EBS_KW1	-254,7	-11,1
NKO	ZEM	-517,0	-6,7
NKO	HOLZ_KW	-241,9	-2,8
Fe-Metalle			-43,2
Ergebnis			-20,3

Der Klimabelastung aus dem Betrieb der MBS selbst (ohne Gutschriften für ausgeschleuste Brenn- und Wertstoffe) und den Transporten zu den Verwertungsanlagen beträgt 71,2 kg CO₂-Äq./Mg Abfall. Hinzu kommen die Emissionen von fossilem Kohlenstoff (als CO_{2, fossil}) aus der Verwertung der Heizwertträger. Sie machen 379,6 kg CO_{2, fossil}/Mg Abfallinput aus. Die Emissionen aus MBS (direkt) und Verwertungsanlagen belaufen sich in Summe auf 450,8 CO₂-Äq./Mg Abfall. Aufgrund der realisierten Verwertungswege gelingt es, diese Emissionen überzukompensieren (Summe aller Outputströme außer Rotterest = -471,1 kg CO₂-Äq./Mg Abfall). Ursächlich für das leicht positive Ergebnis ist die Verbringung eines größeren Anteils der brennbaren Abfälle in die Zementindustrie, weil hier aufgrund der verwendeten Methodik die größten Gutschriften zu erzielen sind (Wirkungsgrad = 100 %). Nachteilig wirkt sich hingegen aus, dass rund 15 % des Anlagenoutputs in ein sehr ineffizientes Kraftwerk (EBS_KW7 [13,6 % Wirkungsgrad]) verbracht werden, während in das effizienteste Kraftwerk dieser Modellierung (EBS_KW6 [78,2 % WG]) gerade nur 6,5 % des Outputs gelangen.

Die MBS Vogtland hat im Jahr 2011 rund 49.477 Mg Abfälle behandelt und einer Verwertung zugeführt. Entsprechend der hier vorgenommenen Modellierung hat dies zu einer **Einsparung an klimarelevanten Emissionen in Höhe von -1.003 Mg CO₂-Äq.** geführt. Davon entfallen rund -828 Mg CO₂-Äq. auf die 40.835 Mg überlassenen Abfälle (vereinfachte Berechnung über Anteil der überlassenen Abfälle am Gesamtinput, ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Zusammensetzung der überlassenen und der angelieferten Abfälle).

4.2.3 Abfallbehandlungssystem des ZAW

Die Modellierung der MBA Cröbern und der nachgeschalteten Anlagen bezieht sich auf das Bilanzjahr 2011. Tabelle 21 zeigt die Modellierung des Inputs der MBA Cröbern zur mechanisch-biologischen Behandlung 2011 einschließlich der nur biologisch behandelten Abfallarten SLF fein und Absiebungen. Die Restmenge Sonstiges von 3.447 Mg bestehend aus Kunststoffabfällen, Holz, gemischten Bau- und Abbruchabfällen, Sandfangrückständen, sonstigen Abfällen einschließlich Materialmischungen durchläuft die gesamte MBA und trägt damit anteilig zum heizwertreichen Output sowie zum Rotterest bei.

Tabelle 21: Modellierung des Inputs der MBA (ZAW) für 2011

Input	2011	Hu _{roh} einzeln*	Anteil am Input	Hu _{roh} Gemisch	C-Gehalt (FS)	C-Gehalt Gemisch (FS)	davon C _{bio}
	[Mg]	[MJ/Mg]	[%]	[MJ/Mg]	[kg]	[kg]	[%]
Restabfall	124.732	8.500	67,6	5.743	245	166	72,2
Sperrmüll	17.866	13.700	9,7	1.326	337	33	66,2
hmä GA	149	11.500	0,1	9	271	0,2	51,3
AöF	773	4.000	0,4	17	200	0,8	75,0
SLF fein**	17.318	7.500	9,4	704	230	21,6	20,0
Absiebungen**	20.317	3.500	11,0	385	150	16,5	20,0
Sonstiges	3.447	8.000	1,9	149	240	4,5	50,0
Summe	184.602		100,0	8.333		242	62,8

* angenommen

** nur biologisch behandelt, keine Abtrennung von Heizwertträgern

Aus dem Input der MBA (ausgenommen SLF und Absiebungen) werden alle energetisch oder stofflich zu verwertenden Teilströme (einschließlich Ammoniumsulfatlösung aus der RTO) ausgeschleust. Der verbleibende heizwerterniedrigte Rest wird gemeinsam mit den SLF fein und den Absiebungen biologisch behandelt. Der Rotterest wird anschließend auf der Deponie abgelagert. Der zweitgrößte Teilstrom mit 24,8 % ist die heizwertangereicherte Fraktion (haFr). Sie wird an einen Aufbereiter

geliefert, der aus diesem und anderen Inputmaterialien mehrere Ersatzbrennstoffe für Zement- und Ersatzbrennstoffkraftwerke herstellt. Im Bilanzjahr wurden hier zudem Altmengen aus Vorjahren aus der MBA verarbeitet.

Tabelle 22: Modellierung des Outputs der MBA (ZAW) für 2011

Output	2011	Hu _{roh} einzeln	Beitrag Hu im Output	C _{gesamt} gewichtet	C _{bio} gewichtet
	[kg/Mg]	[MJ/Mg]	[MJ/Mg]	[kg/Mg FS]	[kg/Mg FS]
Rotterest aus mech.-biol. Beh.	280	2.884	808	56	30
Rotterest aus biol. Behandlung	143	3.738	534	37	12
haFr	248	12.150	3.014	74	52
Schwerfraktion1	34	14.200	475	12	4,7
Schwerfraktion2	36	14.200	511	13	5,0
Schwerfraktion3	4,5	14.200	64	2	0,6
Mechanisch behandelte Abfall 1	16	14.000	221	5	2,1
Mechanisch behandelte Abfall 2	1,7	14.000	23	1	0,2
Holz1	0,7	13.000	9	0,3	0,3
Holz2	7,4	13.000	96	2,9	2,8
Holz3	0,7	13.000	9	0,3	0,3
Holz4	0,4	13.000	5	0,2	0,2
WEEE	0,01	19.500	0,1	0,002	0,0
Abwasser	0,2	0	0	0	0
Fe-Metalle Fe1	0,7	0	0	0	0
Fe-Metalle Fe2	7,4	0	0	0	0
Fe-Metalle Fe3	0,1	0	0	0	0
Ammoniumsulfatlösung 1	4,1	0	0	0	0
Ammoniumsulfatlösung 2	0,1	0	0	0	0
Rotte-/Wasserverlust	215,8		917 1.667	26,1	23
Output gesamt	1.000		8.269	229	134

Die Modellierung der MBA Cröbern sowie der Daten der Verwertungsanlagen für 2011 führt zu dem Ergebnis, dass das Entsorgungssystem insgesamt zu einer Klimaentlastung in Höhe von -45,5 kg CO₂-Äq./Mg Abfall beiträgt (vgl. Tabelle 23).

Tabelle 23: Ergebnis der Klimarelevanzberechnungen für das Abfallbehandlungssystem des ZAW

Modul	Verwertung	Last-/Gutschrift	
		[kg CO ₂ -Äq. pro Mg Anlageninput]	[kg CO ₂ -Äq. pro Mg MBA-Input]
MBA ohne Gutschriften			34,0
MBA-Rotterest	Ablagerung	120,9	51,1
haFr1	Aufbereitung	26,2	6,5
haFr1	ZemW	-577,8	-87,0
haFr1	EBS_KW4	-83,2	-4,7
haFr1	EBS_KW5	-245,5	-10,0
Schwerfraktion 1			
Schwerfraktion 1a, weiter aufbereitet	EBS_KW2	219,9	1,0
Schwerfraktion 1b, direkt verwertet	EBS_KW2	207,2	6,0
Schwerfraktion 2	EBS_KW6	-516,7	-18,6
Schwerfraktion 3	EBS_KW7	558,0	2,5
MECH1	Aufbereitung	12,7	0,2
	EBS_KW3	193,7	3,1
MECH2	MVA	160,2	0,3
HOLZ1+3+4	HOLZ_KW	-488,4	-0,3
HOLZ2	Kompostierung	-8,0	-0,1
Fe-Metalle			-14,9
Ammoniumsulfat			-0,01
Ergebnis			-31,0
<i>nur Output</i>			-64,9
<i>Output ohne Rottegut</i>			-116,1

Der Klimabelastung aus dem Betrieb der MBA selbst (ohne Ablagerung des Rotterestes) und den Transporten zu den Verwertungsanlagen beträgt 34,0 kg CO₂-Äq./Mg Abfall. Dieser vergleichsweise niedrige Wert ist darauf zurückzuführen, dass die Anlage knapp 90 % ihres benötigten Stromes und die Wärme nahezu emissionsfrei aus einem mit Deponiegas betriebenen BHKW bezieht.

Die Outputströme tragen unterschiedlich zum Gesamtergebnis der Entsorgungslösung bei. Schlägt man die Emissionen aus der Ablagerung des Rotterestes in Höhe von 51,1 kg CO₂-Äq./Mg Abfall ebenfalls dem Anlagenbetrieb zu, belaufen sich die Emissionen auf (31,0+51,1=) 82,1 kg CO₂-Äq./Mg Abfall. Durch den Einsatz der Ersatzbrennstoffe in der Zementindustrie sowie die Auskopplung von Strom, Prozessdampf, Wärme, Eisenmetalle und Ammoniumsulfat werden klimarelevante Einsparungen in Höhe von -115,7 kg CO₂-Äq./Mg Abfall erreicht, die diese Emission überkompensieren. Insgesamt führt die modellierte Entsorgungslösung zu einer Klimaentlastung in Höhe von -31,0 kg CO₂-Äq./Mg Abfall (Abweichungen hinter dem Komma aufgrund von Rundungsdifferenzen). Besonders positiv schlägt zu Buche (neben der Stromversorgung aus dem BHKW), dass knapp zwei Drittel des heizwertreichen Outputmaterials (haFr1, SCHW2) in der Zementindustrie bzw. in effizienten Ersatzbrennstoffkraftwerken verwertet werden.

Die MBA Cröbern hat im Jahr 2011 rund 184.603 Mg Abfälle behandelt und einer Verwertung zugeführt. Entsprechend der hier vorgenommenen Modellierung hat dies zu einer **Einsparung an klimarelevanten Emissionen in Höhe von -5.717 Mg CO₂-Äq.** geführt. Davon entfallen rund -3.762 Mg CO₂-Äq. auf die 121.498 Mg überlassenen Abfälle (vereinfachte Berechnung über Anteil der überlassenen Abfälle am Gesamtinput, ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Zusammensetzung der überlassenen und der angelieferten Abfälle).

4.3 Vergleich der Ergebnisse mit denen der Vorgängerstudie

In der Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] waren für die drei modellierten Behandlungssysteme folgende spezifische Treibhausgasemissionen bzw. -emissionseinsparungen in Abhängigkeit vom Anlagenstandard und von den modellierten Verwertungswegen ermittelt worden:

- MPS RABA Chemnitz: +40,8 kg CO₂-Äq./Mg Input
- MBS Vogtlandkreis: -1,6 kg CO₂-Äq./Mg Input
- MBA Cröbern: -17,4 kg CO₂-Äq./Mg Input

Die Berechnungen der aktuellen Studie haben folgende Ergebnisse erbracht:

- MPS RABA Chemnitz: -114,3 kg CO₂-Äq./Mg Input
- MBS Vogtlandkreis: -20,3 kg CO₂-Äq./Mg Input
- MBA Cröbern: -31,0 kg CO₂-Äq./Mg Input

Die Ergebnisse der aktuellen Untersuchung sind mit den Ergebnissen der Vorgängerstudie nur bedingt vergleichbar. Zwar wurde mit der gleichen Methodik wie in BIWA, BZL [2009] gearbeitet, doch haben sich im Detail erhebliche Abweichungen ergeben, die ergebnisrelevant sind bzw. sein können. So weisen zwei der drei Anlagen einen gegenüber 2007 erheblich veränderten Input auf. Eine der Anlagen wurde anhand einer vergleichbaren Anlage modelliert. Auch wurde u. a. mit aktualisierten Werten für Last- oder Gutschriften für Strom (keine Vorketten) und stoffliche Verwertung gerechnet. Zudem sind die Bandbreiten der Berechnungsergebnisse hinsichtlich ergebnisrelevanten „Stellschrauben“ zu beachten (vgl. Kapitel 0 Sensitivitätsanalyse).

Abfallbehandlungssystem MPS (AWVC)

Die MPS RABA Chemnitz schnitt in der Vorgängerstudie vor allem wegen ihres hohen Bedarfs an Erdgas für die physikalische Trocknung des zu behandelnden Materials schlecht ab [BIWA, BZL 2009]: „Trotz der hohen Wirkungsgrade der verwertenden Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen bzw. der hohen Gutschrift für die stoffliche Verwertung fällt die Bilanz negativ aus, weil der Aufwand in der MPS – hier insbesondere die Abfalltrocknung mittels Erdgas – zu einer starken Klimabelastung führt.“

Die Anlage wurde inzwischen grundlegend verändert und optimiert [GOLLUB 2012]: „Die Ziele der von Waste Tec vorgeschlagenen und letztlich in die Anlagenoptimierung eingeflossenen Veränderungen in der Verfahrenstechnik lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- *Verringerung des Erdgasverbrauchs durch Stilllegung eines thermischen Trockners in Verbindung mit der Ausschleusung und Alternativvermarktung von (nicht getrockneten) Abfallteilfraktionen*
- *Energieeinsparung durch Austausch ineffizienter Anlagenteile im Bereich der Nachzerkleinerung*
- *Erhöhung der Anlagenflexibilität im Hinblick auf eine bedarfsgerechtere Produktion von Ersatzbrennstoffen (optional Umfahrung von Anlagenteilen)*
- *Verbesserung der Emissionssituation durch Wegfall der offenen Verladung und Bau einer geschlossenen Verladehalle.*

Nach vorläufigen Berechnungen führen die vorgenannten Maßnahmen in Summe zu einer geschätzten jährlichen CO₂-Einsparung in Höhe von 9.100 Mg; darüber hinaus wird der Energieverbrauch der Anlage um circa 20 bis 50 % gesenkt (je nach Anlagenfahrweise).“

Diese Veränderung lässt sich auch in der Modellierung der Anlage in der Vorgängerstudie und in der aktuellen Studie nachvollziehen. So wurde die Lastschrift für den Anlagenbetrieb seinerzeit mit 143,7 kg CO₂-Äq./Mg Input [BIWA, BZL 2009, Abb. 3.4] berechnet, während es aktuell „nur“ noch 113,0 kg CO₂-Äq./Mg Input sind. Zugleich haben sich die Ausbeute an Ersatzbrennstoffen in der Anlage selbst und die Energieausbeute aus diesen Ersatzbrennstoffen in den nachfolgenden Anlagen deutlich erhöht. Wesentlichen Einfluss hat dabei die Verbringung des größeren Teils der Ersatzbrennstoffe (SBS 1) in ein sehr effizientes Braunkohlekraftwerk mit Auskopplung von Strom und Nah-/Fernwärme (EBS_KW2). Insgesamt ist die damit erreichte Klimaentlastung gegenüber dem Status quo 2007 als plausibel anzusehen.

Abfallbehandlungssystem MBS (Vogtlandkreis)

Die Ergebnisse der Vorgänger- und der aktuellen Studie liegen auf den ersten Blick relativ dicht beieinander. Allerdings sind die Werte trotzdem nicht direkt vergleichbar. Die Betriebsaufwendungen und Emissionen wurden 2007 für eine vergleichbare Anlage modelliert und auf diese Anlage übertragen. Das Ergebnis 2007 wurde unter der Annahme erreicht, dass vom damaligen Anlagenoutput (590 kg/Mg MBS-Input) nur 20 % in die MVA2 und 80 % in das modellierte EBS-KW1 gelangten. Wäre der gesamte Output in die MVA2 verbracht worden (nur Strom, bundesdeutscher Strommix), hätte die Entsorgungslösung in Summe zu einer Klimabelastung geführt. Dass in der aktuellen Studie nun ein leicht höheres positives Ergebnis erreicht wurde, ist zum einen der Ausschleusung eines größeren Anteils vom Anlageninput zur energetischen Nutzung und hier insbesondere der Verbringung eines größeren Anteils der brennbaren Fraktionen in die Zementindustrie geschuldet. Dass insgesamt aber keine deutlich höhere Klimaentlastung erreicht wird, liegt daran, dass rund 15 % des Anlagenoutputs in ein sehr ineffizientes Kraftwerk (EBS_KW7 [13,6 % WG]) verbracht werden, während in das effizienteste Kraftwerk dieser Modellierung (EBS_KW6 [78,2% WG]) gerade nur 6,5 % des Outputs gelangen.

Abfallbehandlungssystem MBA (ZAW)

Beim Vergleich der berechneten Klimaeffekte mit den Ergebnissen der Vorgängerstudie ist für das Abfallbehandlungssystem des ZAW eine Verbesserung der Werte feststellbar. Dieser aktuell höhere Klimaentlastungseffekt ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass die Anlage knapp 90 % ihres benötigten Stromes und die Wärme nahezu emissionsfrei aus einem mit Deponiegas betriebenen BHKW bezieht. Weil in der Vorgängerstudie für den gesamten Strombedarf des Abfallbehandlungssystems der sächsische Strommix angesetzt wurde, ist ein direkter Vergleich der beiden Ergebnisse anhand der absoluten Werte zur Klimarelevanz der Abfallbehandlungssysteme nicht möglich.

4.4 Sensitivitätsanalyse

Die hier vorgenommene Modellierung der Entsorgungslösungen dreier sächsischer Entsorgungsträger basiert auf Angaben der Betreiber der Erstbehandlungsanlagen und Informationen wesentlicher nachgeschalteter Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen. Dennoch waren viele Datenlücken durch Plausibilitätsbetrachtungen und durch Literaturquellen gestützte Annahmen zu schließen. Daher soll an dieser Stelle eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um die Belastbarkeit der Ergebnisse zu prüfen.

Eigenschaften/Zusammensetzung des Abfalls

Heizwert

Für keine der drei Erstbehandlungsanlagen lagen Messungen zum Heizwert des gesamten Anlageninputs vor. Diese Werte mussten daher individuell für jede Anlage modelliert werden. Die verwendeten Datensätze stammen überwiegend aus der Literatur bzw. aus der Vorgängerstudie (dort ebenfalls überwiegend auf Literatur gestützt). Für die stoffliche Zusammensetzung von Restabfall wurden in dieser Studie zudem neuere Analysen verschiedener sächsischer öRE ausgewertet (vgl. Kapitel 3.2). Aufgrund der teils gegenläufigen Trends hinsichtlich der Zu- oder Abnahme von Heizwertträgern im Input wurde mit dem Auftraggeber vereinbart, dass weiterhin mit dem in der Vorgängerstudie modellierten sächsischen Restabfall gerechnet werden soll. Für die anderen Abfallarten des Inputs wurden typische Werte aus der Literatur herangezogen. Eine mittelbare Kontrolle des Heizwertes des Abfallinputs erfolgte zudem über die Bilanzierung der Heizwerte im Anlagenoutput, wobei eine größere Unsicherheit für die über den Wasser-/Rotteverlust modellierten Heizwertverlust besteht. Hier konnte mit Literaturdaten die Plausibilität der Modellierung gestützt werden. Bei der MBA Cröbern besteht die Besonderheit, dass nicht zwischen Rotteverlust und Restmaterial in der Anlage differenziert werden konnte. Die vorgenommene Modellierung ergab jedoch auch hier eine plausible Bilanz. Die modellierten Heizwertbilanzen sind daher mit relativ geringen Unsicherheiten behaftet.

Anteil des fossilen Kohlenstoffs

Bis auf wenige Ausnahmen waren Angaben zum Gehalt an Kohlenstoff sowie dessen Verteilung auf C_{fossil} und C_{bio} nicht verfügbar. Hier musste mit Literaturdaten und Plausibilitätsüberlegungen gearbeitet werden. Von erheblicher Ergebnisrelevanz ist dabei die Modellierung des Anteils an fossilem Kohlenstoff, denn dieser geht als Lastschrift für die Emission von $\text{CO}_2, \text{fossil}$ in die Modellierung der Anlagenbilanz ein. Die Ergebnisrelevanz wird am Beispiel der MBS Vogtland verdeutlicht. Dort wurde modelliert, dass die 104 kg C_{fossil} pro Mg Abfallinput in der energetischen Verwertung zur Freisetzung von rund 380 kg $\text{CO}_2, \text{fossil}$ pro Mg Abfallinput führen, die der MBS-Anlage per Saldo als Lastschrift angerechnet werden, unabhängig davon, in welcher Verwertungsanlage und wie effizient der Output verwertet wird. Setzt man bei gleichem Heizwert und C_{gesamt} -Gehalt den Gehalt an C_{fossil} mit plus bzw. minus 10 % an, ergeben sich - bei gleichbleibenden Gutschriften für die Verwertungsanlagen - die folgenden Lastschriften und Bilanzergebnisse für das Entsorgungssystem:

- Gehalt an C_{fossil} im Abfall 10 % höher als modelliert:
 - Lastschrift für Emission = 418 kg $\text{CO}_2, \text{fossil}$ pro Mg Abfallinput
 - Bilanzergebnis Entsorgungssystem: +17,7 kg $\text{CO}_2, \text{fossil}$ pro Mg Abfallinput

- Gehalt an C_{fossil} im Abfall 10 % niedriger:
 - Lastschrift für Emission = 342 kg $\text{CO}_2, \text{fossil}$ pro Mg Abfallinput
 - Bilanzergebnis Entsorgungssystem: -58,2 kg $\text{CO}_2, \text{fossil}$ pro Mg Abfallinput

Im ersten Fall (höherer Anteil C_{fossil}) würde das Entsorgungssystem insgesamt zu einer Klimabelastung, im zweiten Fall dagegen zu einer deutlich höheren Klimaentlastung führen als modelliert (-20,3 kg $\text{CO}_2, \text{fossil}$ pro Mg Abfallinput).

Auf der anderen Seite geht ein höherer Anteil an fossilem Kohlenstoff im Abfall bzw. Ersatzbrennstoff in der Regel auch mit einem höheren Heizwert einher. Dies schlägt sich – bei gleichem Wirkungsgrad der verwertenden Anlagen – in einer höheren Ausbeute an Strom, Wärme und Dampf oder einer geringeren Einsatzmenge an Ersatzbrennstoff zur Substitution von Regelbrennstoff im Zementwerk nieder, sodass die Gutschriften aus der Verwertung auch entsprechend höher ausfallen werden. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Modellierung des fossilen Kohlenstoffanteils im Abfall bzw. Ersatzbrennstoff von sehr hoher Ergebnisrelevanz ist. Weil die Modellierung bis auf wenige Ausnahmen nur anhand von Literaturdaten und Plausibilitätsüberlegungen erfolgte, sind die berechneten Emissionswerte mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Zuordnung des Outputs zu verwertenden Anlagen

Die Energieeffizienz der verwertenden Anlagen hat wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der zu erreichenden Einsparungen an Treibhausgasemissionen (weitere Ausführungen zu den energetischen Verwertungsanlagen sind in Kapitel 5 dargestellt). Neben der Modellierung der Energieeffizienz der verwertenden Anlagen kommt der Aufteilung der Massenströme auf diese Anlagen eine sehr große Ergebnisrelevanz zu. Am Beispiel der MBA Cröbern wird untersucht, wie sich das Ergebnis für die Entsorgungslösung verändert, wenn bestimmte Output-Ströme in andere Verwertungsanlagen gelenkt werden.

Szenario Optimierte energetische Verwertung von MECH1

Für die Fraktion MECH1 wollte der Aufbereiter keine weitere Angabe zum nachgeschalteten Verwerter machen. Es wurde daher modelliert, dass diese Fraktion in einer MVA entsorgt wird. Würde diese Fraktion hingegen in das effiziente EBS_KW6 verbracht werden, würde die Klimaentlastung der Entsorgungslösung von -31,0 kg auf -36,3 kg CO₂-Äq./Mg Abfall ansteigen, in Summe also um -5,3 kg CO₂-Äq./Mg Abfall höher ausfallen (ohne Berücksichtigung veränderter Transportaufwendungen; Rundungsdifferenz zu Summe Einzelbeiträgen 0,1 kg/Mg).

Szenario Optimierte energetische Verwertung der Schwerfraktion

In der MBA Cröbern gelangt nur eine der drei Schwerfraktionen in das besonders effiziente EBS_KW6. Die beiden anderen Fraktionen gelangen in zwei weniger effiziente EBS-Kraftwerke. Würden alle drei Fraktionen in das effizienteste EBS-Kraftwerk verbracht, würde die Klimaentlastung um 29,1 kg CO₂-Äq./Mg Abfall höher ausfallen (ohne Berücksichtigung veränderter Transportaufwendungen; Rundungsdifferenz zu Summe Einzelbeiträgen 0,1 kg/Mg).

■ Basisszenario:

- 3,6 % des Anlagenoutputs gelangen in das effiziente EBS_KW6 und 3,8 % in ineffiziente EBS_KWs
- Ergebnis Entsorgungslösung: -31,0 kg CO₂-Äq./Mg Abfall

■ Szenario Optimierte energetische Verwertung der Schwerfraktion:

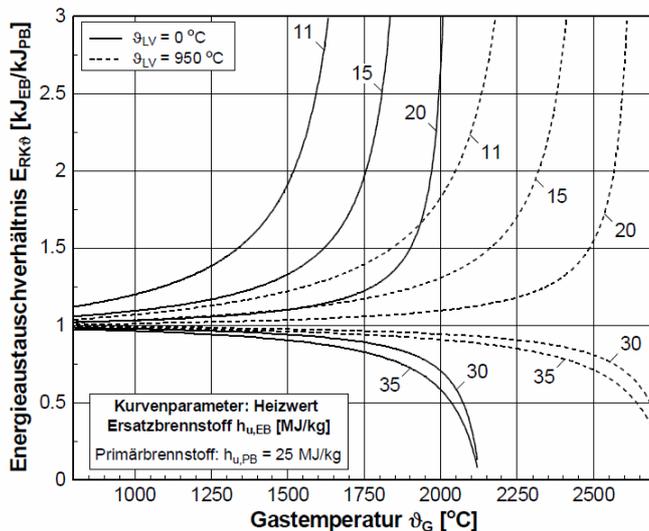
- 7,4 % des Anlagenoutputs gelangt in das effiziente EBS_KW6
- Ergebnis Entsorgungslösung: -60,0 kg CO₂-Äq./Mg Abfall

Bei allen drei Entsorgungslösungen musste für einen Teil des Anlagenoutputs eine Zuordnung zu verwertenden Anlagen (zum Teil nach weiterer externer Aufbereitung) durch die Bearbeiter vorgenommen werden. Die beiden Beispielrechnungen zeigen, dass die Ergebnisrelevanz der Energieeffizienz der verwertenden Anlagen und der Zuordnung der Outputströme zu diesen Verwertungsanlagen ausgesprochen hoch ist. So führt in oben angeführten Beispielen die Verschiebung eines relativ geringen Anteils des Anlagenoutputs (knapp 1,6 % bzw. knapp 4 %) in eine wesentlich effizientere Verwertungsanlage dazu, dass sich die Klimaentlastung der Entsorgungslösung nahezu verdoppelt.

Energieaustauschverhältnis Primär- zu Ersatzbrennstoff

„Das Energieaustauschverhältnis drückt aus, wie viel Energie des Primärbrennstoffes durch die Energie des Ersatzbrennstoffes bei sonst gleicher Prozessführung (z. B. Produktionsleistung bei der Klinkerherstellung) ersetzt werden kann.“ [BECKMANN et al. 2002]. Das Energieaustauschverhältnis v wird in einschlägigen Ökobilanzen [z. B. IFEU 2007, BIWA, BZL 2009] üblicherweise vereinfachend mit 1 angenommen oder nicht modelliert. So das IFEU [2007, S. 13]: „Für einen Abfall, der in einem Kohlekraftwerk oder Zementwerk eingesetzt wird, wird die entsprechende Wärmemenge weniger an Kohle³ eingesetzt.“ In Fußnote 3 heißt es dann: „Ggf. sind Faktoren für brennstofftechnisch bedingt ungünstigere Energieaustauschverhältnisse bei starken Discrepanzen zwischen den Heizwerten von Sekundär- und Regelbrennstoff anzusetzen.“

In dieser Studie wurde bei der Modellierung der Verwertung heizwertreicher Outputströme in Braunkohlekraftwerken und Zementwerken wie in der Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] das Energieaustauschverhältnis von Primärbrennstoff zu Ersatzbrennstoff vereinfachend gleich 1 gesetzt, d. h. 1 MJ EBS ersetzt 1 MJ Primärbrennstoff. In der Praxis ist dies jedoch nicht zutreffend, denn das Energieaustauschverhältnis hängt u. a. nicht nur von den kalorischen Eigenschaften eines Brennstoffes ab, sondern wird auch von der Prozessführung in den Teilprozessen des Gesamtverfahrens wie z. B. Luftüberschussverhältnis, Luft- und Brennstoffvorwärmung oder Abgas- und Wärmeverluste beeinflusst. Nach BECKMANN et al. [2002] ist das Energieaustauschverhältnis E umso größer, *„je höher die zu erreichende Bilanztemperatur und je niedriger der Heizwert des Ersatzbrennstoffes im Vergleich zum Primärbrennstoff sind. ... Insbesondere bei einem Vergleich der Energieaustauschverhältnisse in Abb. 2 für einen bestimmten Ersatzbrennstoff mit und ohne Luftvorwärmung wird die Bedeutung der Wärmerückgewinnung (z. B. Wärmerückgewinnung aus dem Gut, Rostkühler Klinkerbrennprozess) deutlich. Im Fall eines Ersatzbrennstoffes mit $h_{u,EB}=11$ MJ/kg werden Gastemperaturen $\vartheta_G > 1700$ °C nur durch eine entsprechende Luftvorwärmung (Abb. 2) erreicht.“*



Erläuterung:
 Durchgezogene Linie: ohne Luftvorwärmung
 Gestrichelte Linie: Luftvorwärmung auf 950 °C

Abbildung 7: Energieaustauschverhältnis bei statischer Betrachtung [BECKMANN et al. 2002, dort Abb. 2]

Im Folgenden wird daher untersucht, wie sich das Bilanzergebnis für eine Entsorgungslösung mit hohem Anteil an Verwertung ihrer Outputfraktionen in Zementwerken ändert, wenn für die eingebrachten Ersatzbrennstoffe das Energieaustauschverhältnis nicht gleich 1 gesetzt wird. Aus der MBS Vogtland gelangen insgesamt drei Outputströme in Zementwerke. In Anlehnung an Abbildung 7 wird für diese Fraktionen ein Energieaustauschfaktor $E > 1$ angesetzt. Dabei fällt der Faktor umso höher aus, je niedriger der Heizwert des Ersatzbrennstoffes im Vergleich zum Primärbrennstoff Steinkohle ($H_u = 28.557 \text{ MJ/Mg}$) ist.

Je höher E ist, desto mehr Ersatzbrennstoff muss eingesetzt werden, um den Heizwert der Steinkohle zu substituieren. Für die Niederkalorische Fraktion 1 mit einem H_u von 6.920 MJ/Mg bedeutet $E = 2$, dass 2 MJ aus NKO1 1 MJ aus Steinkohle ersetzen, mithin die doppelte Menge an NKO1 eingebracht werden muss. Durch die Einführung von $E > 1$ verändern sich die Gutschriften für die Verbringung ins Zementwerk und das Gesamtergebnis der Entsorgungslösung. Die Details sind in Tabelle 24 wiedergegeben.

Die Gegenüberstellung in Tabelle 24 zeigt, dass bei Berücksichtigung eines Energieaustauschverhältnisses von größer 1 für die modellierte Entsorgungslösung das Ergebnis sich um $24,8 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./Mg}$ Anlageninput verschlechtert, wodurch der Klimaeffekt „kippt“ und das Ergebnis zu einer Klimabelastung von $4,5 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. pro Mg}$ Abfallinput der MBS führt.

Führt man diese Rechnung entsprechend für die MBA Cröbern durch und setzt für die heizwertangereicherte Fraktion 1 mit einem H_u von 12.150 MJ/Mg im Zementwerk ein Energieaustauschverhältnis zu Steinkohle von 1,5 an, führt dies in Summe zu einer Reduzierung der Einsparung an Treibhausgasemissionen um $45,6 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./Mg}$ und ebenfalls zu einem Kippen des Klimaeffektes. Statt einer Klimaentlastung von $-45,5 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./Mg}$ resultiert nun eine Klimabelastung der Gesamtentsorgungslösung von in Summe $0,1 \text{ kg CO}_2\text{-Äq. pro Mg}$ Abfallinput der MBA.

Wenn in der Berechnung ein von $E = 1$ abweichendes Energieaustauschverhältnis modelliert wird, müsste dieses gleichermaßen auch für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Kohlekraftwerken modelliert werden. Für Braunkohlekraftwerke würde sich dann ggf. sogar ein Energieaustauschverhältnis kleiner 1 ergeben, weil Rohbraunkohle einen H_u von 8.000 bis 8.500 MJ/Mg aufweist, während Ersatzbrennstoffe darüber liegen. Hier könnten sich ggf. rein rechnerisch höhere als die modellierten Einsparungen an Treibhausgasemissionen ergeben.

Tabelle 24: Veränderung des Bilanzergebnisses der MBS Vogtland bei Berücksichtigung eines Energieaustauschverhältnisses E für Ersatzbrennstoffe > 1 (Hu Steinkohle = 28.557 MJ/Mg)

Modul	Basisszenario		Hu	E	Szenario Energieaustausch		Δ
	[kg CO ₂ -Äq. pro Mg]				[kg CO ₂ -Äq. pro Mg]	[kg CO ₂ -Äq. pro Mg]	
	Anlageninput	MBS-Input	Fraktion		Anlageninput	MBS-Input	MBS-Input
MBS ohne Gutschriften		71,2				71,2	
Lastschrift für Emissionen CO ₂ , fossil aus energetischer Verwertung		379,6				379,6	
Summe Gutschriften Verwertung		-471,1				-446,2	
davon BAA1	-1.341,7	-194,3	17.958	1,1	-1.219,7	-176,6	17,7
davon BAA6	-1.292,5	-22,9	17.300	1,2	-1.077,1	-19,1	3,8
davon NKO1	-517,0	-6,7	6.920	2,0	-258,5	-3,4	3,4
Ergebnis Entsorgungssystem		-20,3				4,5	24,8

Last- und Gutschrift für Strom

Eine ergebnisrelevante Stellgröße ist - siehe Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] - die Modellierung der Lastschrift für den verbrauchten bzw. der Gutschrift für den ausgekoppelten Strom.

Strom aus mit Deponiegas betriebemem BHKW

Am Beispiel der MBA Cröbern konnte bereits gezeigt werden, dass der klimaentlastende Effekt dieses Entsorgungskonzeptes in Höhe von -31,0 kg CO₂-Äq./Mg Abfall maßgeblich darauf zurückzuführen ist, dass die Anlage knapp 90 % ihres benötigten Stromes (und einen Großteil der benötigten Wärme) nahezu emissionsfrei aus einem mit Deponiegas betriebenen BHKW bezieht. Würde der gesamte Strombedarf mit Strom aus dem sächsischem Strommix gedeckt, würde das Ergebnis der Entsorgungslösung zu einer Klimabelastung von 11,4 kg CO₂-Äq./Mg Abfall führen.

Szenario „Nur deutscher Strommix“

Für die MPS RABA Chemnitz wird ein Szenario „Nur deutscher Strommix“ modelliert. Alle Stromverbräuche und Stromauskoppelungen werden dafür einheitlich mit der Last-/Gutschrift für den bundesdeutschen Strommix belegt. Dadurch reduzieren sich die Lastschriften für den Stromverbrauch in der modellierten MPS-Anlage, während die Gutschriften für den in der sächsischen MVA ausgekoppelten Strom sinken:

- Weil nur ein sehr geringer Anteil aus der MPS-Anlage in die sächsische MVA gelangt und dort verstromt wird, verringert sich die Gutschrift für erzeugten Strom um 4,4 kg CO₂-Äq./Mg.
- Die niedrigere Lastschrift beim Stromverbrauch des Anlagenbetrieb der MPS schlägt sich merklich in deren Bilanz nieder: Es fallen 20,4 kg CO₂-Äq./Mg weniger an Emissionen aus dem MPS-Betrieb an.
- Insgesamt führt die Verwendung der Gutschrift für den deutschen Strommix für die modellierte Entsorgungslösung zu einer Erhöhung der Einsparung an klimarelevanten Emissionen von 16,0 kg CO₂-Äq./Mg Abfall (-16 kg CO₂-Äq./Mg Abfall).

Emissionen aus dem Anlagenbetrieb

Bei der Modellierung der Emissionen der MPS-Anlage wurde unterstellt, dass das eingesetzte Erdgas zu 100 % verbrannt wird und keine Verluste auftreten. Aus der Literatur ist allerdings bekannt, dass etwa bei BHKW der Methanschluß 1 % des eingesetzten Methans und mehr betragen kann. Auch bei hoher Abgasreinigungstechnik (Oxidationskatalysator) ist noch ein geringer Methanschluß (0,004 %) zu erwarten [IFEU & Partner 2008, S. 69].

Für die MPS RABA Chemnitz wird daher ein Szenario „Methanschluß“ modelliert und untersucht, wie sich das Ergebnis in Abhängigkeit vom Methanschluß der Anlage ändert. Hierfür wird ein Methanschluß von 0,004 % bzw. 1 % des eingesetzten Erdgases modelliert.

Der Einsatz von Erdgas in der MPS RABA Chemnitz beträgt 17,57 m³/Mg. Bei einer Dichte von 0,784 kg/Nm³ entspricht dies 13,8 kg/Mg Input. Bei einem Anteil an Methan am Erdgas von rund 90 % sind dies 12,4 kg Methan/Mg Input. Ein Methanschluß von 0,004 % entspricht damit 0,0005 kg CH₄/Mg entsprechend 0,012 kg CO₂-Äq./Mg. Dieser Methanschluß würde sich in der Bilanz nicht bemerkbar machen. Anders sieht es aus, wenn der Methanschluß mit 1 % modelliert wird. Dann würde sich das Ergebnis für die MPS-Anlage (und auch das Gesamtergebnis) um rund 3,1 kg CO₂-Äq./Mg Abfall verschlechtern.

Fazit Sensitivitätsanalyse

Die in der Sensitivitätsanalyse untersuchten „Stellschrauben“ weisen jeweils für sich eine zumeist erhebliche Ergebnisrelevanz auf. Insgesamt zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass die berechneten Klimaeffekte der modellierten Entsorgungslösungen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten im Detail sind dennoch belastbare Einschätzungen der Größenordnung der klimarelevanten Effekte der modellierten Entsorgungslösungen möglich.

5 Berechnung der Energieeffizienz

5.1 Methodik

Energieeffizienz von Abfallbehandlungsanlagen

Als „Abfallbehandlungsanlagen“ werden im Folgenden bezeichnet:

- Abfall-(Müll-)verbrennungsanlagen (MVA) für gemischte Siedlungsabfälle
- Energetische Verwertungsanlagen für heizwertangereicherte, abfallstämmige Brennstoffe (Ersatz-, Substitutbrennstoffe [EBS, SBS u. a.]) oder Kohlekraftwerke, die diese mitverbrennen
- Biomasse-(heiz-)kraftwerke, in denen Altholz oder EBS verbrannt werden
- Zementwerke, in denen Abfälle energetisch genutzt werden
- Aufbereitungsanlagen für vorbehandelte Abfälle und Zwischenlager

Basis für die Bewertung der Energieeffizienz von Anlagen ist die Berechnung des energetischen Wirkungsgrades auf der Basis der von den Anlagen in einer Befragung vorgelegten Daten. Die Ermittlung von Wirkungsgraden kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. So werden z. B. im BVT-Merkblatt über beste verfügbare Techniken der Abfallverbrennung [BVT 2005] und im Kreislaufwirtschaftsgesetz, Anlage 2 [KrWG 2012] Berechnungsverfahren angegeben, die in der „politischen“ Anerkennung der Anlagen als Verwertungsanlagen Eingang gefunden haben.

Der Wirkungsgrad wird nach folgender Gleichung ermittelt:

$$\eta_{\text{netto}} = \frac{\text{erzeugte Nettoenergiemenge}}{\text{Abfallenergie} + \text{Fremdenergie}}$$

Als Nettoenergiemenge wird die auf eine „Brennstoff“-Masse bezogene Brutto-Energieausbeute eines Verfahrens berechnet, von der der Eigenverbrauch der Anlage aus diesem Energiestrom (Strom oder Wärme) subtrahiert wird (vgl. Abbildung 8). Die Berechnung nach dieser Formel entspricht den Vorgaben der VDI-Richtlinie 3460 [VDI 2007] und ist identisch mit der Auswertung, die in der Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] für die Bilanzen von 2007 durchgeführt wurde. Der Energieinhalt der den Anlagen zugeführten „Brennstoffe“ wird bei thermischen Verfahren „durch die Prozessleitsysteme aus den Anlagendaten berechnet.

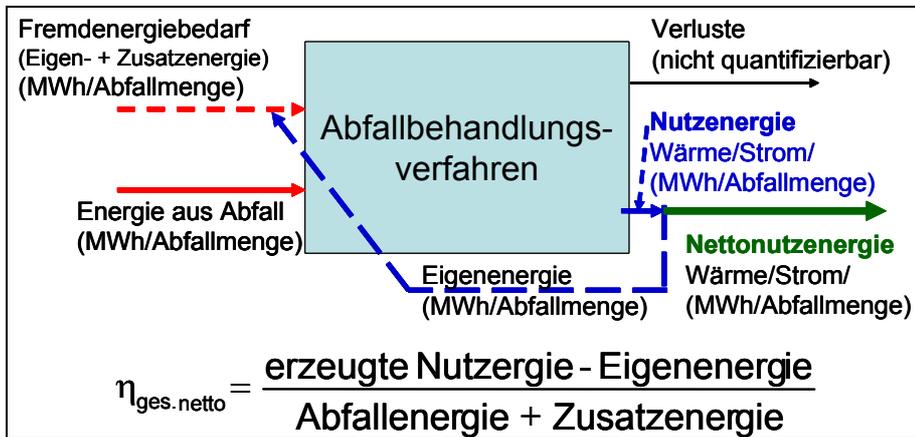


Abbildung 8: Berechnung des energetischen Netto-Wirkungsgrades von Abfallbehandlungsanlagen nach der VDI-Richtlinie 3460 [VDI 2007]

Für die Berechnung des energetischen Netto-Wirkungsgrades werden in der VDI-Richtlinie 3460 zwei Bilanzkreise festgelegt, die in Abbildung 9 dargestellt sind:

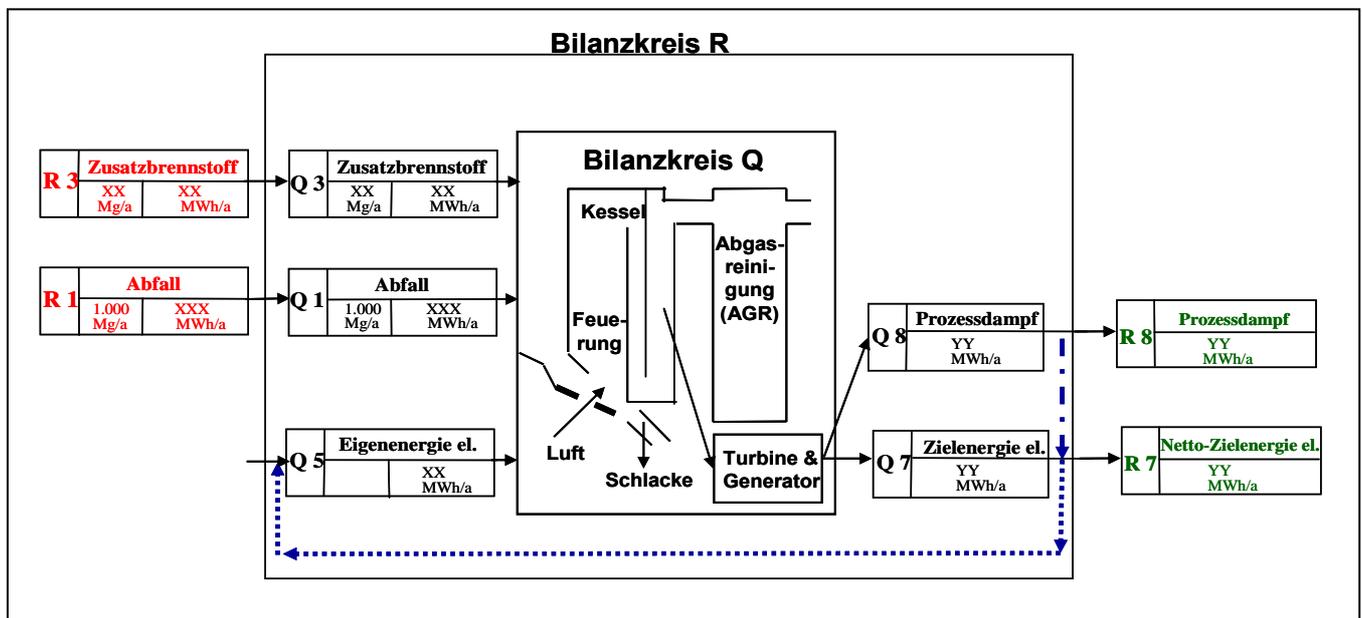


Abbildung 9: Bilanzkreise zur Ermittlung des Netto-Wirkungsgrades thermischer Anlagen nach der VDI-Richtlinie 3460

Um die Bilanzen verschiedener Anlagen vergleichbar zu machen, wird auf eine einheitliche Menge an „Brennstoffinput“ (1.000 Mg) normiert. Von den im Bilanzkreis Q berechneten Zielenergieströmen (Strom und Wärme) wird der Bedarf an Zusatzenergie (Strom und Wärme) subtrahiert, sodass im Bilanzkreis R nur die Nettoenergieströme erscheinen.

Als energetischer Netto-Wirkungsgrad ergibt sich dann:

$$\eta_{\text{netto, Anlage}} = \frac{R7 + R8}{R1 + R3} * 100 \text{ in \%}$$

Voraussetzung für die energetische Bilanzierung sind schlüssige Stoff- und Energiebilanzen der Anlagen. Dabei ist wegen der ungenauen Bestimmung der Energieinhalte der beteiligten Abfallströme ein Bilanzfehler von ca. 10 % zu akzeptieren. Wegen der zahlreichen Anlagenkombinationen und der z. T. unvollständigen Ausfüllung der Befragungsbogen müssen teilweise Daten aus den Unterlagen von 2007 übernommen oder modelliert/geschätzt werden.

Energieeffizienz von Abfallbehandlungssystemen

Als „Abfallbehandlungssysteme“ werden Anlagenkombinationen bezeichnet, in denen Abfallströme vorbehandelt und zur Weiter- oder Endbehandlung an andere Anlagen abgegeben werden. Die in den folgenden Untersuchungen betrachteten Erstbehandlungsanlagen sind

- Mechanisch-physikalische Restabfall-(vorbehandlungs-)anlagen (MPS),
- Mechanisch-biologische Vorbehandlungsanlagen für Siedlungsabfälle mit Endrotte (MBA) oder biologischer Stabilisierung (MBS).

Weitere Anlagen im System sind Zwischenlager, Aufbereitungsanlagen und energetische Verwertungsanlagen zur Endbehandlung der Abfälle.

Um die Energieeffizienz von Anlagensystemen zu ermitteln, werden die energetischen Daten aller an der Behandlung und Beseitigung/Verwertung beteiligten Anlagen benötigt (vgl. Abbildung 10). Hierfür werden Masse- und Energiebilanzen ermittelt. Ziel ist es, den energetischen Wirkungsgrad vergleichend zu berechnen. Weiterhin wird geprüft, ob die Vorbehandlung/Aufbereitung der Abfallströme, die eine höhere Effizienz der energetischen Verwertung der speziell erzeugten „Ersatzbrennstoffe“ ermöglicht, insgesamt zu einer besseren Energieeffizienz führt, als die unmittelbare Verwertung des gesamten Abfallstroms in einer MVA. Dabei werden nicht nur Daten von MVA aus dem Betrachtungsgebiet verwendet, weil sowohl die Stromerzeugung als auch die Wärme-Kraft-Kopplung berücksichtigt werden müssen. Optimale Varianten der Verwertung können aus dem Einsatz von Anlagen mit maximalem energetischem Wirkungsgrad erwartet werden.

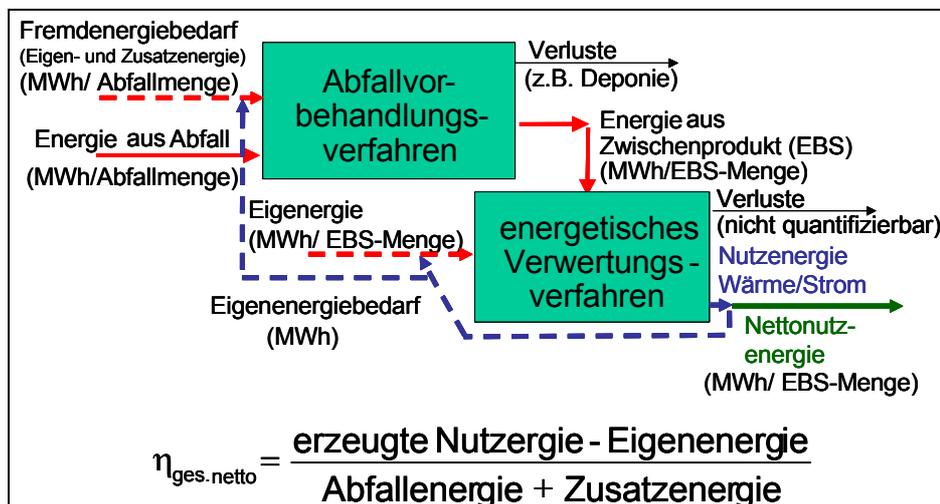


Abbildung 10: Berechnung des energetischen Netto-Wirkungsgrades von Abfallbehandlungssystemen

Für Abfallbehandlungssysteme werden analog zur Methodik für thermische Behandlungsanlagen die entsprechenden Bilanzkreise berechnet (vgl. Abbildung 11).

Wie bereits oben ausgeführt, sind Bilanzfehler unter 10 % nur durch plausible Anpassung von Heizwerten einzelner Fraktionen zu erreichen.

Für den Netto-Wirkungsgrad ergibt sich dann ebenfalls:

$$\eta_{\text{netto, System}} = \frac{R_7 + R_8}{R_1 + R_3} * 100 \text{ in \%}$$

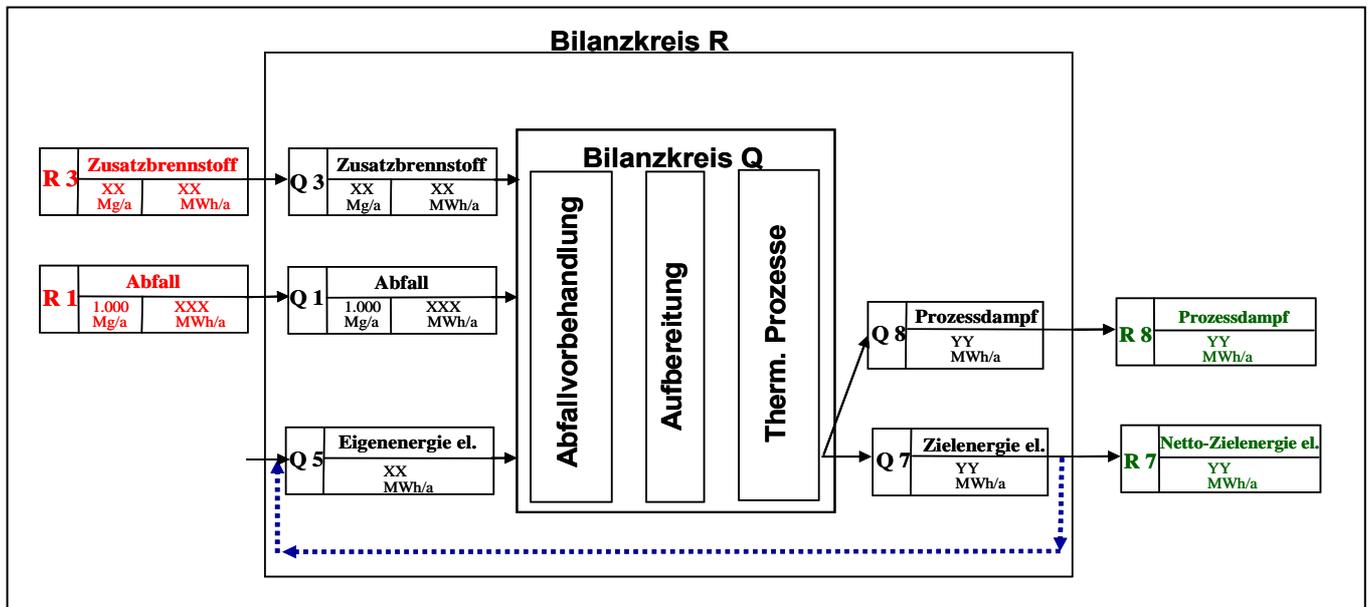


Abbildung 11: Bilanzkreise zur Ermittlung des Netto-Wirkungsgrades von Abfallbehandlungssystemen

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Energieeffizienz der Abfallbehandlungsanlagen

Abfallverbrennungsanlagen

Aus den Ergebnissen der Umfragen standen nur Daten einer **MVA 1 mit Stromerzeugung** und geringer Prozessdampfabgabe zur Verfügung (vgl. Abbildung 12):

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 20,5 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 19,1 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 1,4 %

Diese Werte sind für stromerzeugende MVA mit üblichen Dampfparametern (40 bar/400 °C) typisch.

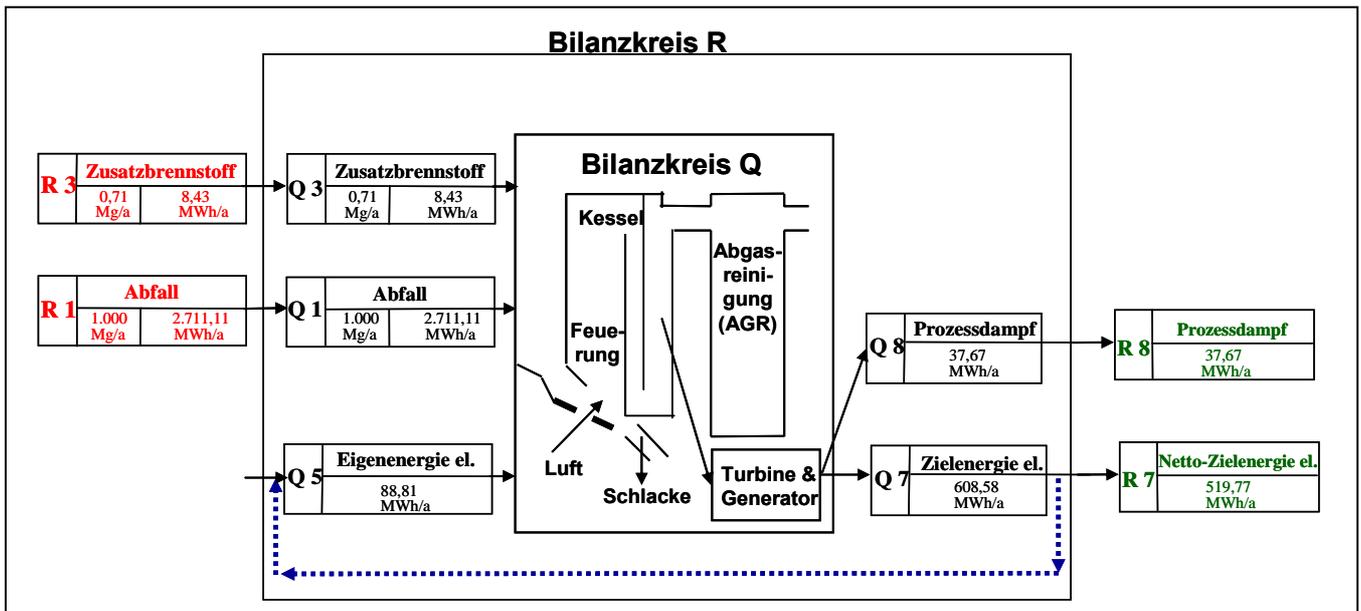


Abbildung 12: Bilanzierung einer Abfallverbrennungsanlage mit Stromerzeugung

Für die **MVA 2 mit Stromerzeugung und Fernwärmeabgabe** werden die Daten für den Bilanzzeitraum 2007 angesetzt:

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 37,3 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 19,3 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 18,0 %

Ersatzbrennstoffkraftwerke

Bei der Befragung wurde fünf Anlagen unterschiedlicher Größe, mit reiner Stromerzeugung und verschieden hoher Dampfabgabe berücksichtigt. Für das EBS-Kraftwerk 1 mit Stromerzeugung ergab sich folgender Wert (vgl. Abbildung 13):

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 27,4 %

In der Vorgängerstudie wurde der energetische Wirkungsgrad für ein weiteres **EBS-Kraftwerk 2 mit Stromerzeugung** berechnet:

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 27,0 %

Der Wert für dieses Kraftwerk wird auch für die aktuelle Auswertung angesetzt. Zudem wird er für ein **EBS-Kraftwerk 3 mit Stromerzeugung** benötigt, für das keine Daten geliefert wurden.

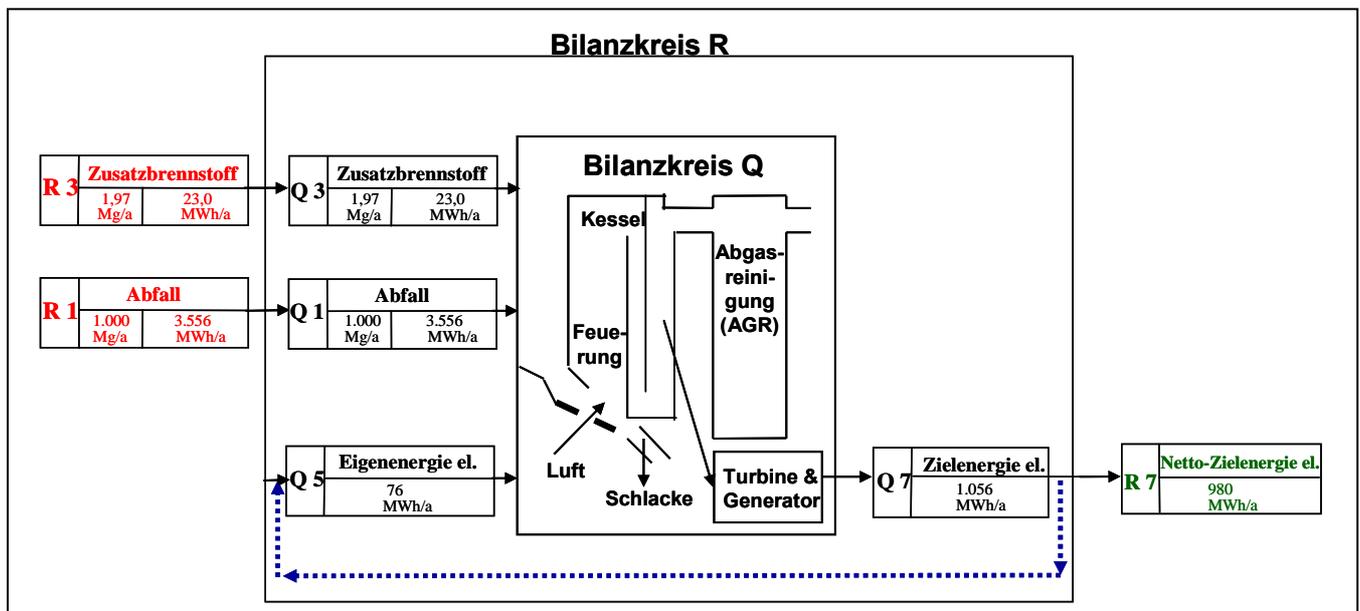


Abbildung 13: Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit Stromerzeugung

Für ein **EBS-Kraftwerk 4 mit Fernwärme- und Prozessdampfaukopplung** wurden die Daten komplett übergeben (vgl. Abbildung 14):

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 30,9 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 13,2 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 17,7 %

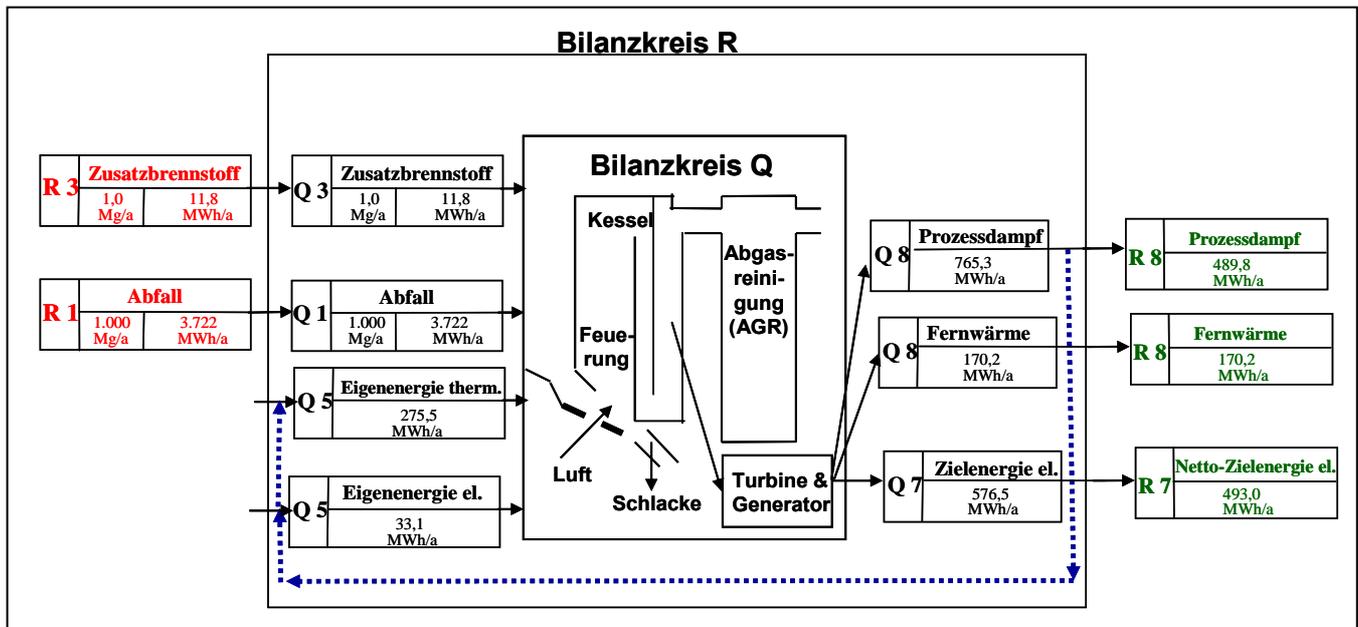


Abbildung 14: Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit überwiegend Dampfproduktion

Für ein EBS-Kraftwerk 5 mit hoher Prozessdampfauskopplung wurden folgende Daten berechnet (vgl. Abbildung 15):

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 50,1 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 9,9 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 40,2 %

Von der Anlage sind die Stromerzeugung und die Menge an Dampf, die an Kunden abgegeben wurde, sowie die davon zu subtrahierende Menge an Dampffremdbezug ermittelt worden. Weil die Anlage Heißdampf (90 bar, 420 °C) produziert, ergibt sich eine Dampfenthalpie von 3.174 kJ/kg (0,882 MWh/Mg EBS). Daraus lässt sich der Dampfenergiestrom zu 1.575,3 MWh/1.000 Mg EBS ermitteln.

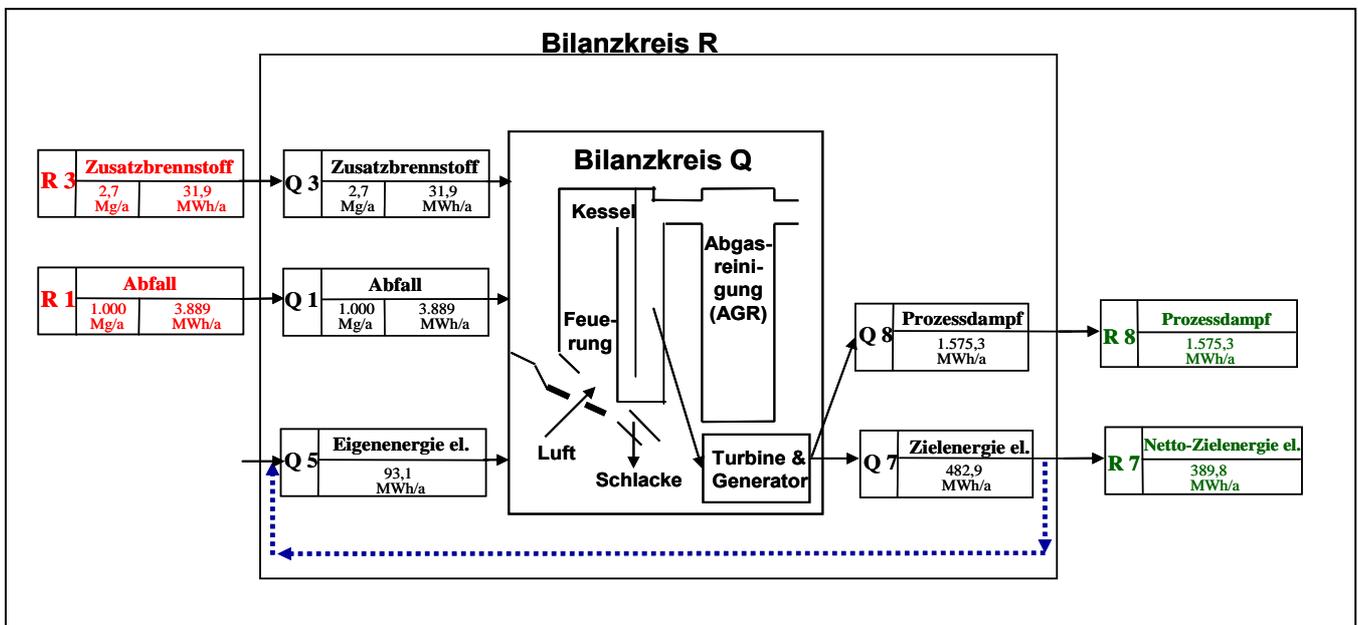


Abbildung 15: Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit überwiegend Dampfproduktion

Für das **EBS-Kraftwerk 6 mit sehr hoher Prozessdampfauskopplung** ist der Durchsatz an Ersatzbrennstoffen sowie deren Heizwert aus den Befragungsergebnissen bekannt. Aus Angaben der Interessengemeinschaft Thermische Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland [ITAD-2012] ist zu entnehmen, dass die drei Dampferzeuger bei einem Abfallinput von 440.000 Mg/a eine Dampfmenge von 1,8 Mio. Mg/a (41 bar, 410 °C) erzeugen. Im Abgleich mit den Befragungsergebnissen ist für 2011 mit einer Dampfproduktion von 1.750.910 Mg/a zu rechnen. Setzt man für den Heißdampf eine Enthalpie von 3.235 kJ/kg (0,899 MWh/Mg) an, so ergibt sich eine Wärmeleistung von 3.677 MWh/1.000 Mg als Rechengröße für die Bilanzierung. Mit diesem Wert erreicht der Kesselwirkungsgrad der Anlage 93 %. Dieser Wert ist sehr optimistisch, soll aber für die Bewertung verwendet werden. Die Anlage gibt den Dampf als Prozessdampf an einen Abnehmer, der daraus auch seinen Strombedarf deckt. Es wird angenommen, dass 80 % der Energie als Prozessdampf verwertet werden und 20 % mit einem energetischen Netto-Wirkungsgrad von 20 % verstromt werden. Somit ergeben sich die folgenden Kenndaten (vgl. Abbildung 16):

■ Energetischer Netto-Wirkungsgrad:	78,2 %
■ Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades:	3,9 %
■ Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades:	74,3 %

Als Fremdenergiebedarf ist die Heizölmenge für die Stützfeuerung aus der Befragung bekannt. Der Eigenstrombedarf des EBS-Kraftwerkes wird mit 80 MWh/1.000 Mg Abfall in der Bilanz berücksichtigt. Für die Abbildung 16 wurde der Bedarf mit 76 MWh/1.000 Mg Abfall bestimmt. In BVT [2005] wird ein Wert von 80 MWh/1.000 Mg Abfall angegeben. Der Eigenstrombedarf für das EBS-Kraftwerk wird von der Elektroenergieerzeugung im Abnehmerwerk für den Prozessdampf abgezogen. Der Eigenstrombedarf und die Zusatzenergie der Umwandlung von Prozessdampf in Strom beim Abnehmer sind im energetischen Wirkungsgrad bei der Stromerzeugung berücksichtigt.

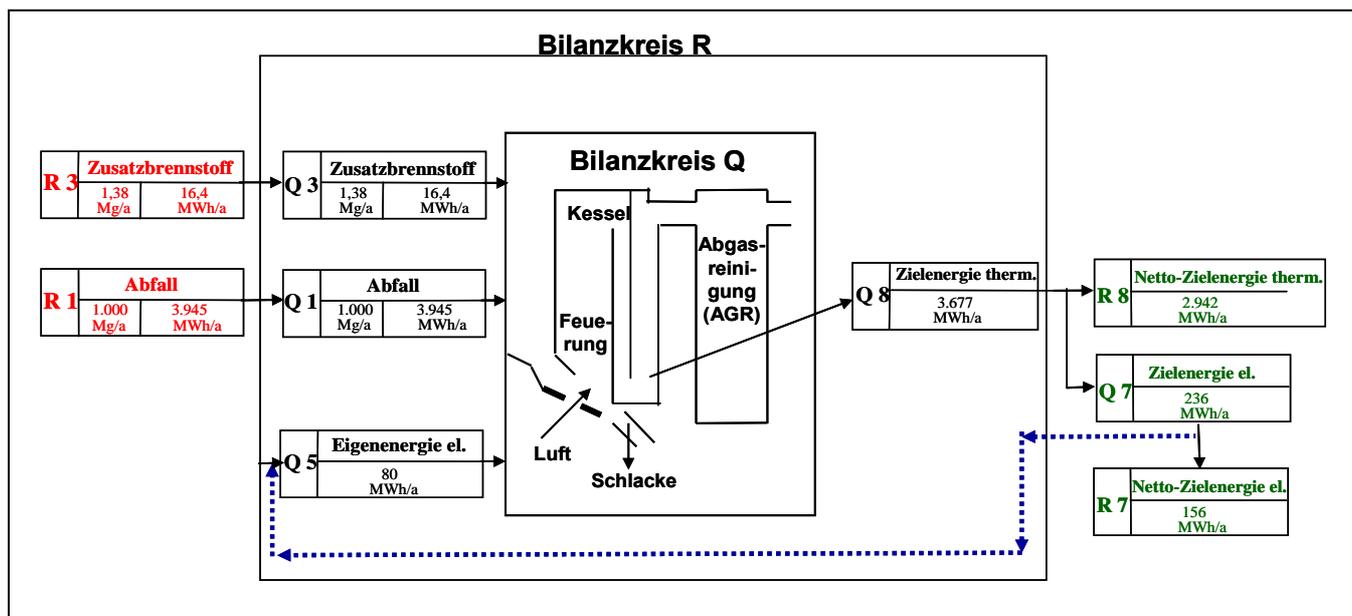


Abbildung 16: Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit Prozesswärmeerzeugung

Im **EBS-Kraftwerk 7 mit Strom- und Fernwärmeauskopplung bei geringer Durchsatzleistung** sind vier Kessel mit einem Jahresdurchsatz von je ca. 11.000 Mg installiert. Es handelt sich um eine sehr kleine Anlage, die EBS und Altholz energetisch verwertet. Aus den Daten der Befragung konnten lediglich die Stromerzeugung sowie der Bedarf an Fremd- und Eigenenergie berechnet werden. Die Produktion von Fernwärme in der wärmegeführten Anlage wurde nicht angegeben. Aus Abbildung 17 kann entnommen werden, dass die Anlage ca. 2.200 Haushalte mit Fernwärme versorgt. Rechnet man mit einem mittleren Wärmebedarf pro Haushalt von ca. 4 MWh/a, erhält man eine relativ geringe Auskopplung an Fernwärme.

■ Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad:	13,6 %
■ Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades:	6,8 %
■ Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades:	6,8 %

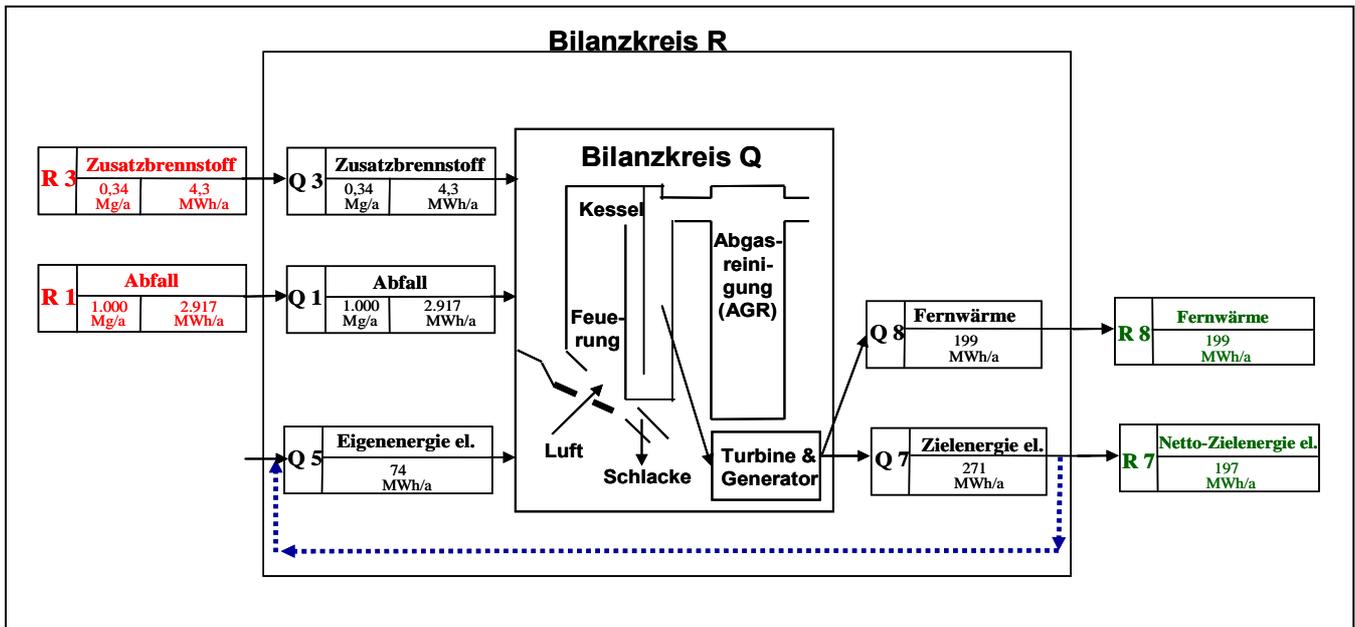


Abbildung 17: Bilanzierung eines Ersatzbrennstoffkraftwerkes mit Fernwärmeerzeugung

Biomassekraftwerk

Von dem **Biomassekraftwerk**, das einen kleinen Teilstrom der zu betrachtenden Ersatzbrennstoffe energetisch verwertet, wurden keine Daten geliefert. Es wird reine Stromerzeugung angesetzt. Weil es sich um ein modernes Kraftwerk mit Wirbelschichttechnologie handelt, wird folgender Wert angesetzt:

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 26,0 %

Zementwerke

Bei der energetischen Verwertung von vorbehandelten Abfällen in Zementanlagen kann eine Nutzenergie nicht berechnet werden, da der Energieinhalt für die chemischen Reaktionen im Produkt verwendet wird, wie bereits in der Vorgängerstudie [BIWA, BZL 2009] dargestellt wurde. In diesem Fall kann lediglich eine Ressourcenschonung an Regelbrennstoffen berücksichtigt werden. Dabei wird ermittelt, welche Netto-Strom- oder Netto-Wärmemengen in einem Kraftwerk gewinnbar wären, wenn die im Zementwerk eingesparte Brennstoffmenge dort eingesetzt würde. Für die Substitution soll ein stromgeführtes Braunkohlekraftwerk betrachtet werden, in dem der Einsatz von Braunkohlebrennstaub ($H_u = 21 \text{ MJ/kg}$) substituiert wird. Unter Nutzung der für das **Kohlekraftwerk 1** berechneten Daten wird folgender Wert angesetzt:

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 35,5 %

Kohlekraftwerke

Ersatzbrennstoffe werden in einigen Kohlekraftwerken mitverbrannt. Der Anteil am gesamten Brennstoffinput ist aus Gründen der möglichen Dampferzeugerkorrosion sehr gering. Die energetischen Wirkungsgrade der Kohlekraftwerke sind wegen der hohen Dampfparameter erheblich höher als die der abfallstämmige „Brennstoffe“ verwertenden Kraftwerke. Die Abbildung 18 zeigt die Bilanz beim Einsatz von ca. 1,75 Ma.-% an EBS im gesamten Brennstoff.

Für das **Kohlekraftwerk 1 mit Strom- und geringer Fernwärmeauskopplung** ergibt sich:

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 35,5 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 34,8 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 0,7 %

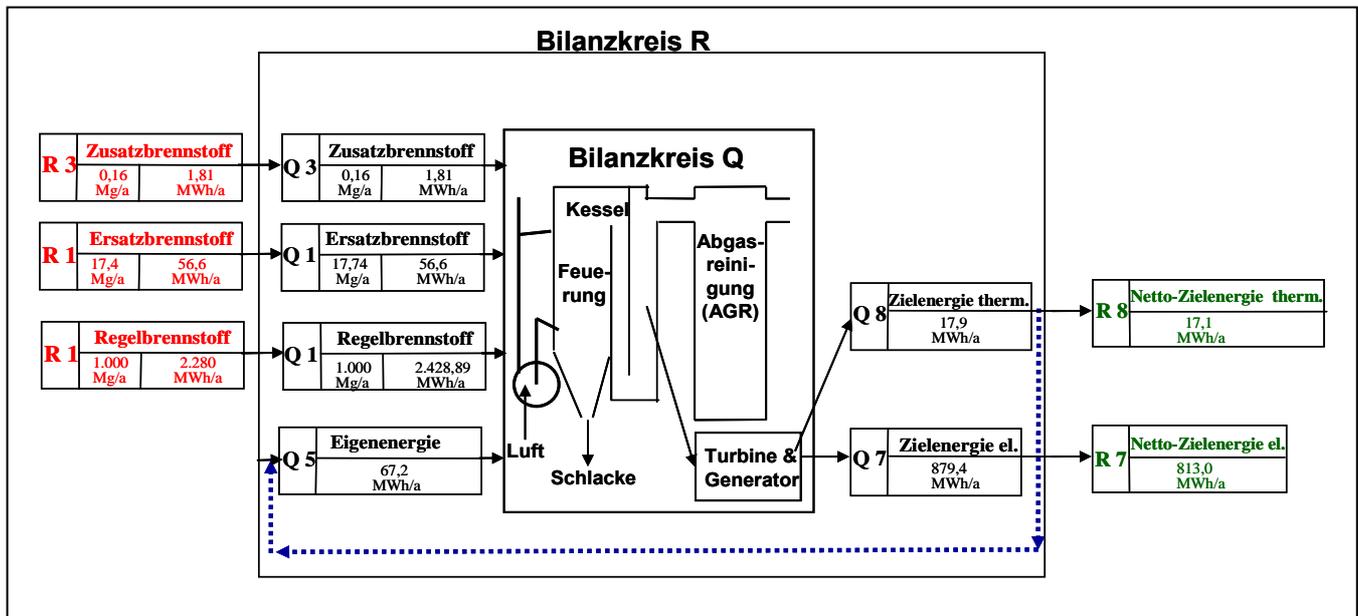


Abbildung 18: Bilanzierung eines Kohlekraftwerkes mit geringer Wärmeauskopplung

Wenn in größerem Umfang Wärme ausgekoppelt wird, steigt der energetische Wirkungsgrad erheblich, wie die Kennwerte für das Kohlekraftwerk 2 mit Strom- und Wärmeauskopplung zeigen (vgl. Abbildung 19):

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 45,3 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 37,9 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 7,4 %

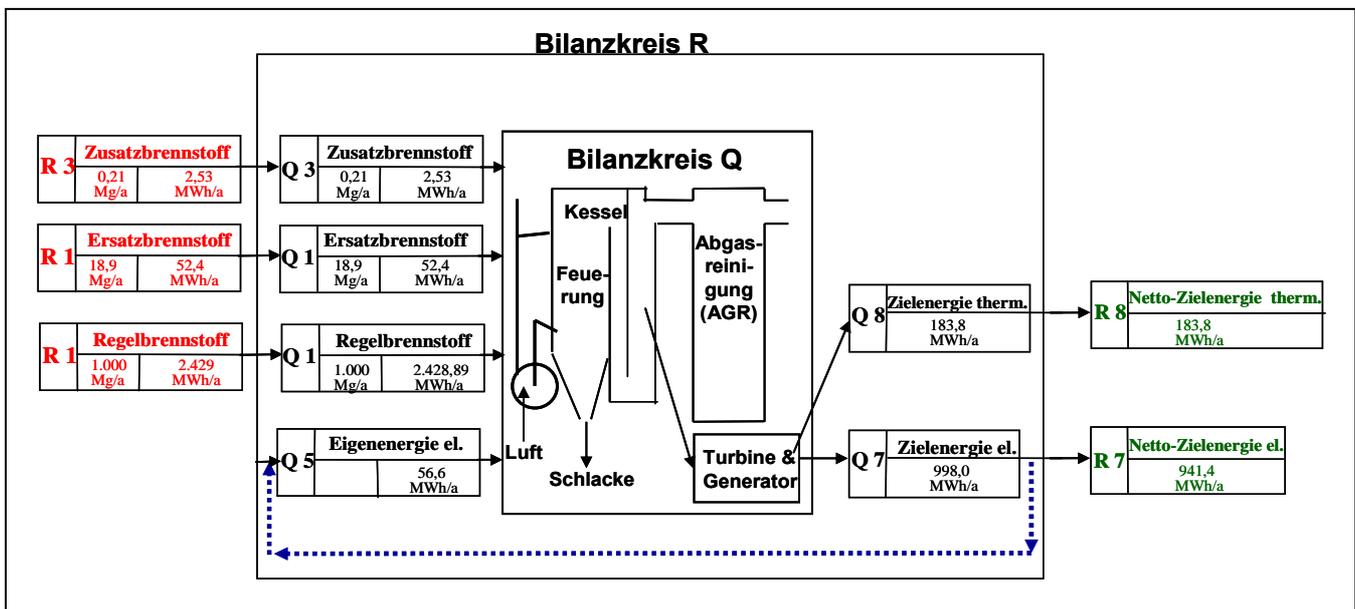


Abbildung 19: Bilanzierung eines Kohlekraftwerkes mit höherer Wärmeauskopplung

Zwischenlager und Aufbereitungsanlagen

Zwischenlager und Aufbereitungsanlagen werden von den Erstbehandlungsanlagenbetreibern genutzt, um ihre Outputstoffströme nach dem Bedarf der Endabnehmer konditionieren zu lassen. Damit wird der technische Aufwand zur aktuell bedarfsgerechten Erzeugung von Abfallströmen mit bestimmten Eigenschaften auf andere Systempartner verlagert. Die Erstbehandlungsanlagen können ihre Technologie standardisieren und die Anpassung an den Markt (auch Spotmarkt) den speziell ausgerüsteten Aufbereitungsanlagen überlassen. Diese benötigen naturgemäß für die Bewältigung dieser Aufgaben einen nicht uner-

heblichen Energiebetrag, der sich einzelnen Stoffströmen nicht zuordnen lässt. Einen Beitrag zur vertiefenden Behandlung der Abfallströme liefern sie nicht. Die Anpassung an die aktuellen Marktanforderungen ist mit einem erhöhten Energiebedarf, also mit einer Minderung des energetischen Wirkungsgrades des gesamten Entsorgungsprozesses verbunden.

Aus der Befragung der Anlagen konnten Daten von drei Anlagentypen ausgewertet werden: Zwischenlager (Anlage A) und Aufbereitungsanlage (Anlage B) mit geringer Jahreskapazität und Aufbereitungsanlagen mit einer großen Jahreskapazität (Anlagen C und D). Die aus den Angaben der Betreiber entnommenen Daten sind in Tabelle 25 zusammengefasst:

Tabelle 25: Energiebedarf der Zwischenlager und Aufbereitungsanlagen

Anlage	Durchsatz	Stromverbrauch		Dieselverbrauch	
		[Mg/a] (gerundet)	[kWh/a]	[kWh/Mg]	[kWh/a]
A	20.000	15.000	0,66	44.100	1,95
B	30.000	k.A.	k.A.	520.580	18,2
C	175.000	2.700.000	15,4	k.A.	k.A.
D	175.000	5.636.840	31,8	k.A.	k.A.

k. A.: keine Angaben

Die Verbrauchswerte der Aufbereitungsanlagen sind orientierend, weil sie z. T. nicht allein auf den Prozess bezogen werden können. Insbesondere der Verbrauch an Diesel wird in den Betrieben nicht allein für die Manipulation der Abfälle erfasst. Der große Unterschied in den Angaben lässt keine Verallgemeinerung des Bedarfs an Energie für die Aufbereitung der vorbehandelten Abfälle zu.

5.2.2 Energieeffizienz der Abfallbehandlungssysteme

Abfallbehandlungssystem MPS (AWVC)

Die Auftrennung der Abfall- und Energieströme in den Abfallbehandlungssystemen erfordert eine Aufstellung der Stoffbilanzen vor der Berechnung des energetischen Wirkungsgrades. Aus der Erhebung der Anlagendaten konnten die in Abbildung 20 angegebenen Werte ermittelt werden. Der Heizwert des Abfalls wurde nach Plausibilitätskriterien berechnet.

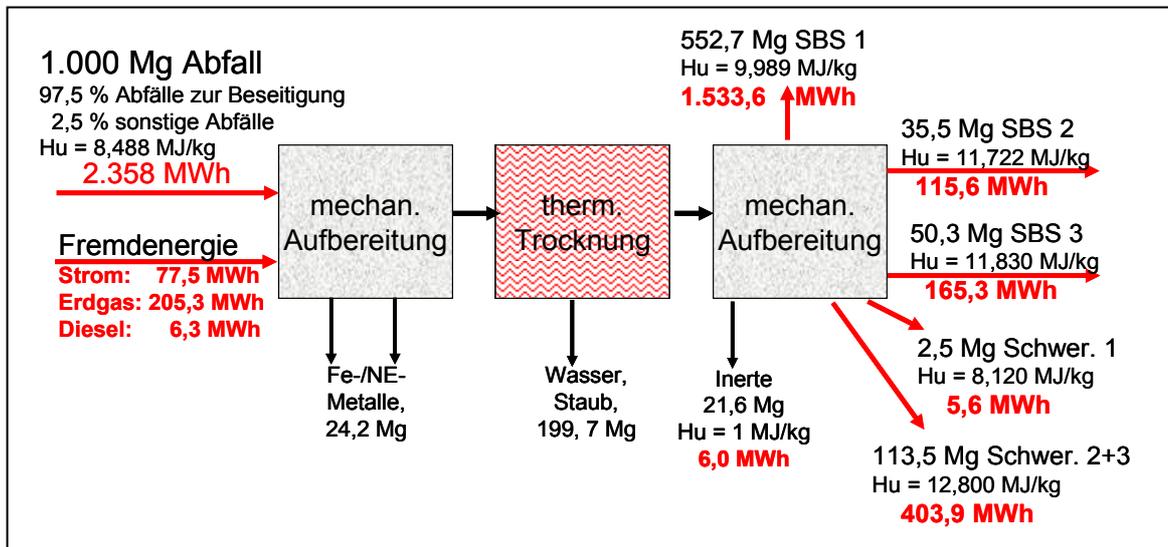


Abbildung 20: Masse- und Energiebilanz der MPS (AWVC)

Die Massebilanz zeigt, dass ca. 98 Ma.-% der angelieferten Abfälle in Stoffströme von Ersatzbrennstoffen mit unterschiedlichem Heizwert (Hu) überführt werden. Die Energiebilanz weist mit einigen Annahmen zu den Heizwerten (u. a. Inerte) aus, dass von der Abfallenergie (2.358 MWh/1.000 Mg Abfall) ca. 95 % (2.230 MWh/1.000 Mg Abfall) in den Produktstoffströmen gefunden werden. Das ist eine ausreichend genaue Datenübereinstimmung für eine Bilanz, bei der einige Daten nicht bekannt sind.

Die Energiebilanz für die energetische Verwertung der vorbehandelten Abfälle ist in Abbildung 21 dargestellt. 52,8 Mg Ersatzbrennstoffe je 1.000 Mg Abfall werden über ein Zwischenlager in ein EBS-Kraftwerk überführt. Die Gesamtenergieausbeute (brutto) beträgt 887 MWh/1.000 Mg Abfall. Unter Berücksichtigung der Eigenenergie werden netto 693,5 MWh Strom und 115,5 Wh Wärme aus 1.000 Mg Abfall erzeugt (vgl. Abbildung 22).

Der größte Anteil des Ersatzbrennstoffs SBS gelangt in das Kohlekraftwerk 2 mit höherem Anteil an Wärmeauskopplung ($\eta = 45,3\%$) (vgl. Abbildung 21). Weil im Zwischenlager lediglich eine Vermischung der Ersatzbrennstoffströme erfolgen kann, wird angesetzt, dass der in die Anlagen eingebrachte Energiestrom unverändert in die Endbehandlung überführt wird.

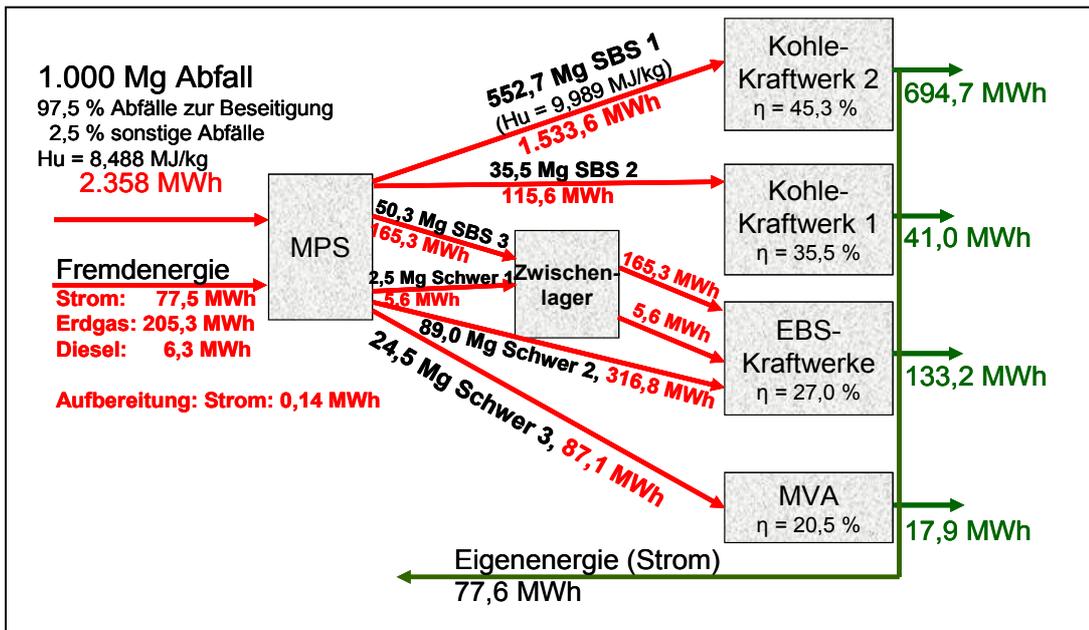


Abbildung 21: Energiebilanz der energetischen Verwertung der Ersatzbrennstoffe aus der MPS (vereinfacht)

Aus den Daten der Bilanz lässt sich der energetische Gesamt-Netto-Wirkungsgrad unter Berücksichtigung der Fremdenergie berechnen. Für die Zwischenlagerung wurden die Energieaufwendungen nach Tabelle 25 für den Typ A als Fremdenergiebedarf berücksichtigt (0,14 MWh/1.000 Mg Abfall). Für das System ergeben sich folgende Wirkungsgrade (vgl. Abbildung 22):

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 31,5 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 27,0 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 4,5 %

Durch die hohen energetischer Wandlungsgrade in den Kraftwerken wird ein Gesamt-Wirkungsgrad von 31,5 % erreicht. Ohne den Erdgasbedarf für die Abfalltrocknung wäre der Zusatzenergieaufwand (Dieselverbrauch) mit nur 6,2 MWh zu berücksichtigen und der energetische Gesamt-Wirkungsgrad würde 34,2 % erreichen.

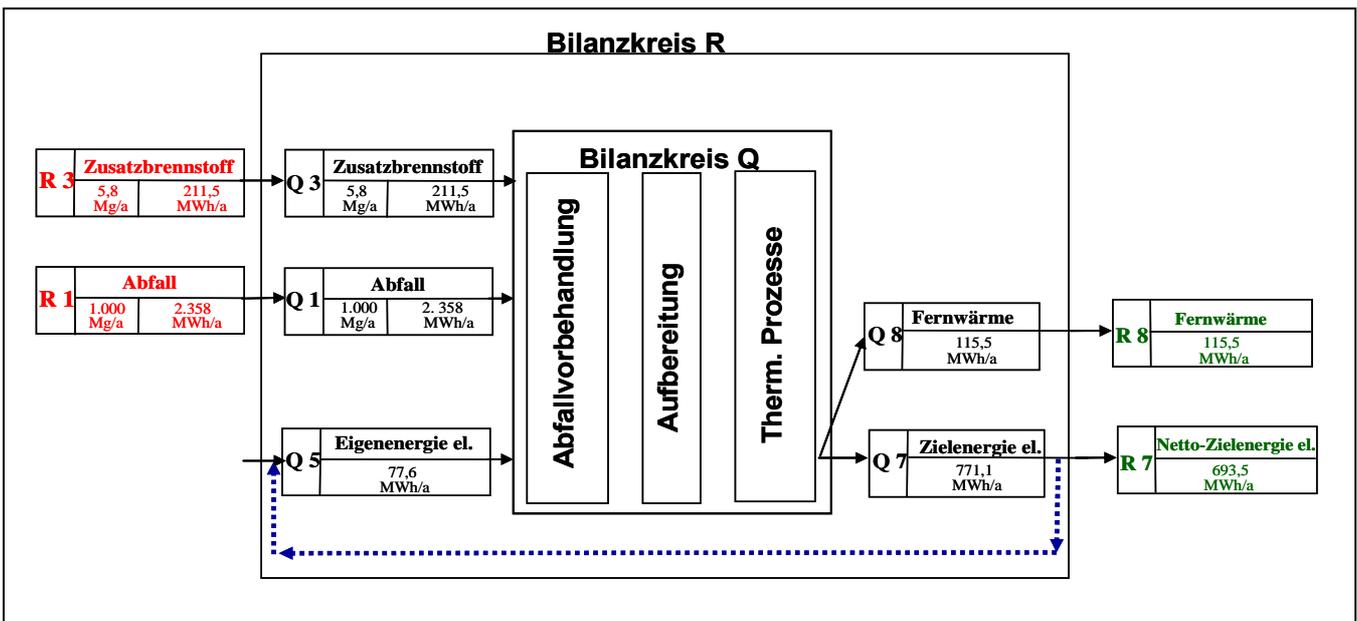


Abbildung 22: Bilanzierung für das Abfallbehandlungssystem MPS (AWVC)

In Abbildung 23 werden die Energieausbeuten mit alternativen Behandlungsanlagen bzw. -systemen verglichen. Bei der Behandlung des gesamten Abfallinputs in Müllverbrennungsanlagen wird berücksichtigt, dass der Einsatz von Zusatzenergie für die MPS (Erdgas und Diesel) in der MVA nicht benötigt wird und daher der Energieausbeute der MVA als Strom- (bei stromgeführter MVA $\eta_{el.} = 50\%$) oder Wärmegewinn (bei MVA mit höherer Wärmeabgabe $\eta_{ges} = 90\%$ mit $\eta_{el.} = 40\%$ und $\eta_{therm.} = 50\%$) zugeschlagen werden kann.

Bei der energetischen Verwertung der erzeugten Ersatzbrennstoffe in EBS-Kraftwerken (2.224 MWh/1.000 Mg Abfall) muss der Strombedarf der MPS und der Zwischenlagerung nach der Stromerzeugung (77 MWh/1.000 Mg Abfall) subtrahiert werden. Eine Verwertung der gesamten EBS-Menge in Kohlekraftwerken wird nicht betrachtet, weil eine Erhöhung der Verfügbarkeit dieser Anlagen wegen deren begrenzter Aufnahmefähigkeit nicht zu erwarten ist.

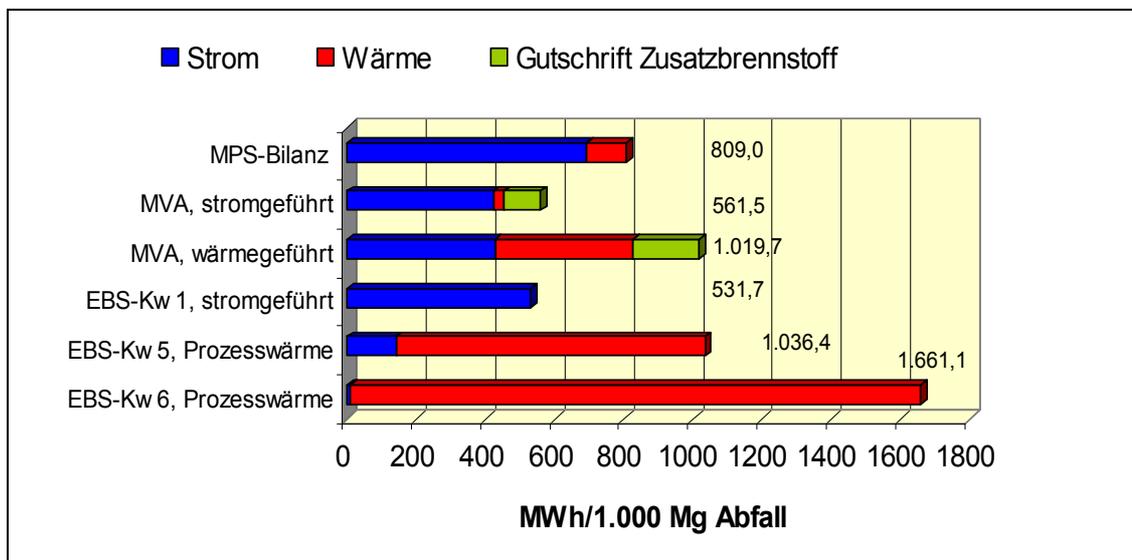


Abbildung 23: Vergleich des Abfallbehandlungssystems MPS (AWVC) mit anderen Systemen

Der Vergleich zeigt, dass das Abfallbehandlungssystem MPS mit nachfolgender energetischer Verwertung in verschiedenen thermischen Anlagen trotz der hohen Kohlekraftwerks-Wirkungsgrade mit hoher Wärmeauskopplung eine Energieausbeute bringt, die niedriger ist als der Einsatz des Abfalls in einer MVA mit erheblicher Fernwärmeanbindung. Wenn die EBS-Mengen in einem stromgeführten EBS-Kraftwerk eingesetzt würden, ist die Energieausbeute ebenfalls geringer als die Verwertung der gesamten Abfallmenge in einer stromgeführten MVA. Die höchste Energieausbeute wird natürlich erreicht, wenn in EBS-Kraftwerken aus den erzeugten Ersatzbrennstoffen in hohem Maße Prozesswärme erzeugt wird. Hier werden im Folgenden nur die EBS-Kraftwerke 5 ($\eta = 50,1\%$) und 6 ($\eta = 78,2\%$) berücksichtigt. Dieser Vergleich ist allerdings spekulativ und rein theoretisch, weil nicht zu erwarten ist, dass diese Kraftwerke, deren Daten in Abbildung 15 und Abbildung 16 ausgewertet wurden, als Abnahmekunden für alle EBS-Stoffströme verfügbar sind. Insgesamt wird die Energieeffizienz des Systems MPS mit nachfolgender energetischer Verwertung der Ersatzbrennstoffe durch den Erdgasverbrauch zur Abfalltrocknung erheblich belastet.

Abfallbehandlungssystem MBS (Vogtlandkreis)

Die Masse- und Energiebilanzen für das Abfallbehandlungssystem MBS des Vogtlandkreises sind in Abbildung 24 dargestellt. Der Abfallheizwert wurde durch Plausibilitätsrechnungen ermittelt. Die Energieinhalte der Outputfraktionen waren aus den Umfrageergebnissen bekannt. Die Massebilanz wird wieder durch die Menge an Wasser und Rotteverlust abgeglichen.

Die Hauptanteile der Masse und Energie der erzeugten Ersatzbrennstoffe gelangt in die BAA-Fractionen 1 bis 4, von denen die BAA1 den höchsten Heizwert aufweist. Insgesamt werden aus dem Energieinput ca. 2.565 MWh/1.000 Mg Abfall in die Ersatzbrennstoffe überführt, das sind ca. 93 % des Energieinhaltes des Abfalls. Der Fremdenergiebedarf an Strom unterscheidet sich nicht wesentlich von den beiden anderen betrachteten Vorbehandlungsanlagen. Der Bedarf an Erdgas für die Abgasbehandlung ist relativ hoch. Der hohe Verbrauch an Diesel resultiert aus der Einbeziehung nicht unmittelbar mit dem Anlagenbetrieb verbundener Fahrzeuge, deren Bedarf nicht separat berechnet wird.

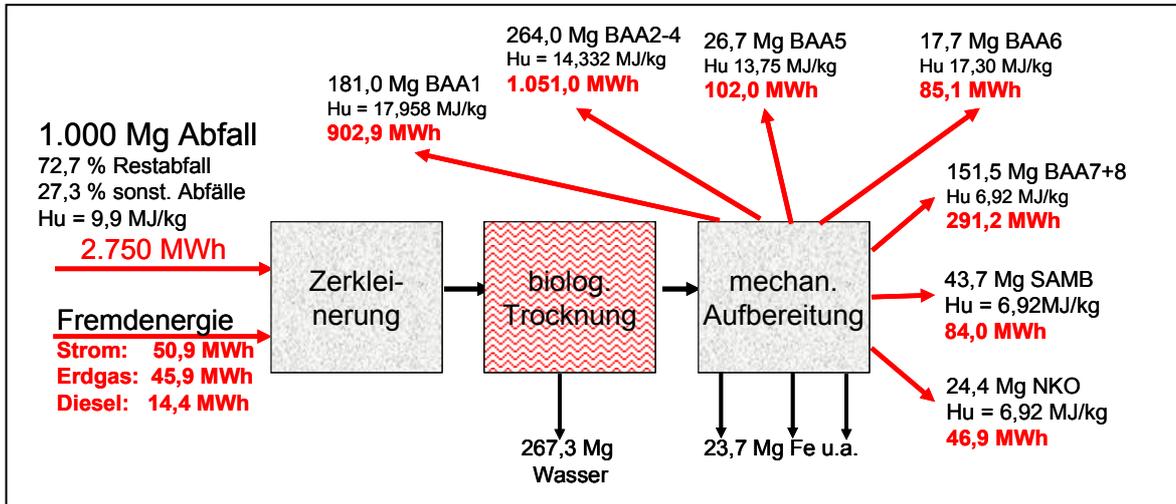


Abbildung 24: Masse- und Energiebilanz der MBS (Vogtlandkreis) (vereinfacht)

Nur ca. 290 Mg EBS/1.000 Mg Abfall werden direkt an EBS-Kraftwerke geliefert, davon ca. 65 Mg/1.000 Mg Abfall in das Kraftwerk 6 mit einem sehr hohen energetischen Wirkungsgrad (vgl. Abbildung 25). Der weitaus überwiegende Teil der Ersatzbrennstoffe durchläuft z. T. mehrere Aufbereitungsanlagen bzw. Zwischenlager, sodass die Massenströme durch Vermischungen nicht verfolgbar sind. Es wird daher wie bei den anderen Aufbereitungsanlagen angenommen, dass die Energieströme unverändert in die Endbehandlung überführt werden. Für die Aufbereitung wird der Bedarf an Eigenenergie aus den Angaben der Tabelle 25 eingeschätzt.

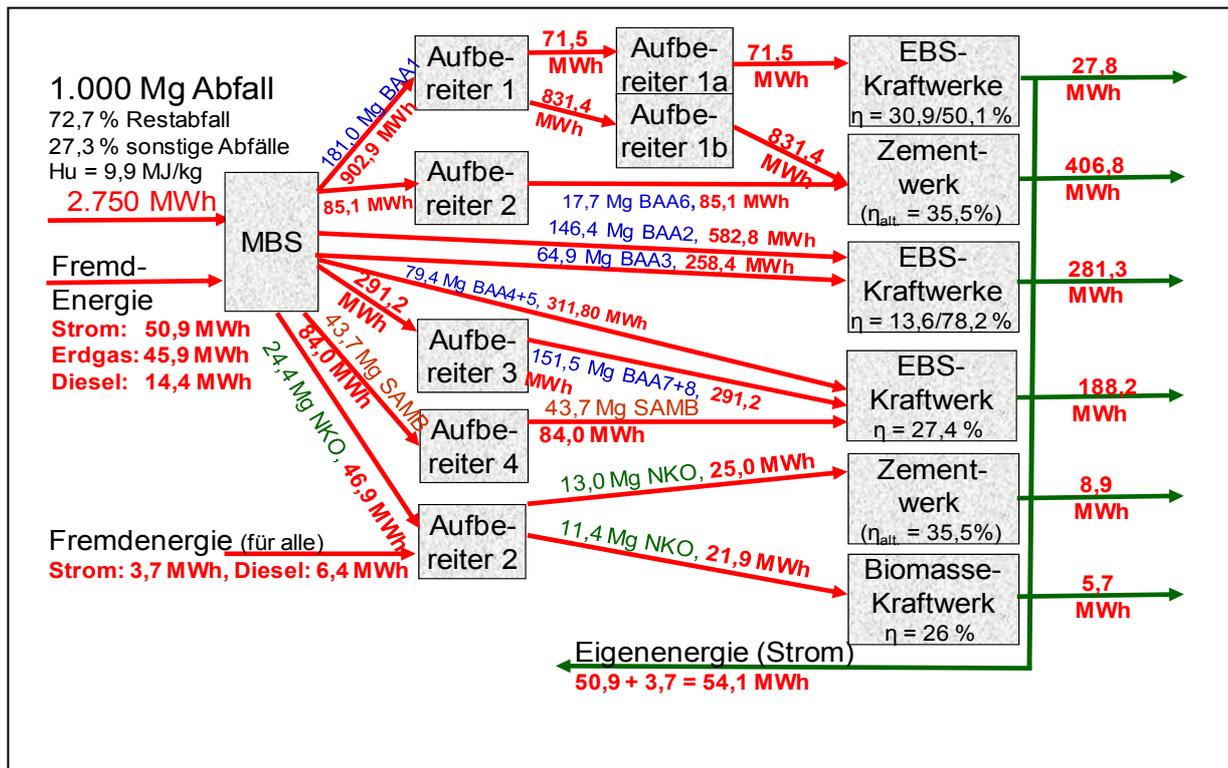


Abbildung 25: Energiebilanz der energetischen Verwertung der Ersatzbrennstoffe aus der MBS (vereinfacht)

Der Gesamtenergiegewinn nach der energetischen Verwendung beträgt ca. 920 MWh/1.000 Mg Abfall. Der Eigenenergiebedarf, der für die Berechnung des energetischen System-Netto-Wirkungsgrades von der Stromerzeugung subtrahiert wird, beträgt ca. 55 MWh/1.000 Mg Abfall.

Aus den Daten der energetischen Verwendung der Ersatzbrennstoffe wurde folgender Wirkungsgrad für das Abfallbehandlungssystem MBS (Vogtlandkreis) berechnet (vgl. Abbildung 26):

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 30,7 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 19,6 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 11,1 %

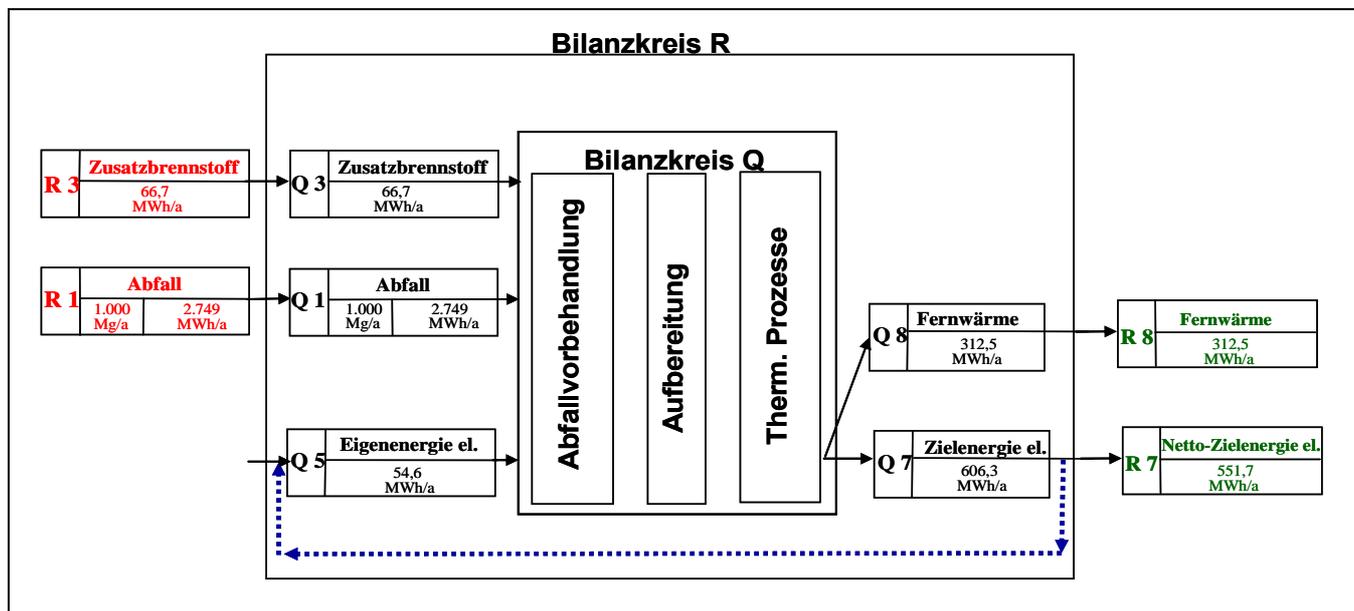


Abbildung 26: Bilanzierung für das Abfallbehandlungssystem MBS (Vogtlandkreis)

Der Systemvergleich mit anderen Abfallbehandlungssystemen ist in Abbildung 27 dargestellt. Eine wärmegeführte MVA erweist sich hier der EBS-Verbrennung im Kraftwerk 5 leicht überlegen. Bei der Verwertung des gesamten Abfallinputs in Müllverbrennungsanlagen wird berücksichtigt, dass der Einsatz von Zusatzenergie für die MBS (Erdgas und Diesel) in der MVA nicht benötigt wird und daher der Energieausbeute der MVA als Strom- (bei stromgeführter MVA $\eta_{el.} = 50\%$) oder Wärmegewinn (bei MVA mit höherer Wärmeabgabe $\eta_{ges} = 90\%$ mit $\eta_{el.} = 40\%$ und $\eta_{therm.} = 50\%$) zugeschlagen werden kann.

Die Überführung der gesamten EBS-Energie in Prozesswärme zeigt ein höheres Potenzial als die MBS. Der Vergleich mit den EBS-Kraftwerken mit hoher Wärmeauskopplung ist allerdings spekulativ und rein theoretisch, weil nicht zu erwarten ist, dass diese Kraftwerke als Abnahmekunden für alle EBS-Stoffströme verfügbar sind.

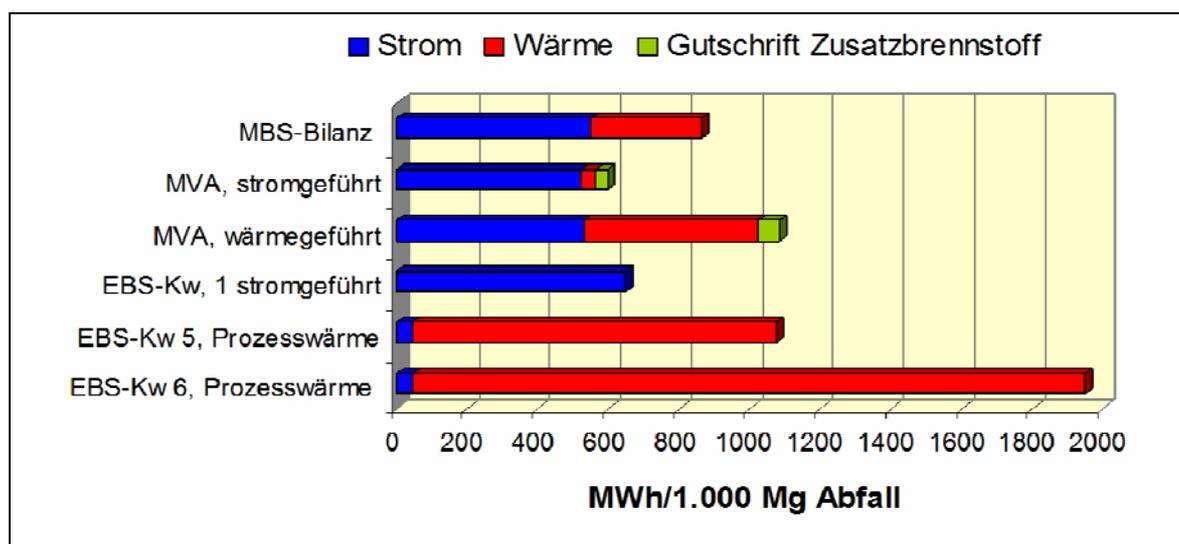


Abbildung 27: Vergleich des Abfallbehandlungssystems MBS (Vogtlandkreis) mit anderen Systemen

Abfallbehandlungssystem MBA (ZAW)

In der MBA Cröbern werden mehrere Stoffströme an Ersatzbrennstoffen hergestellt. In Abbildung 28 sind die Masse- und Energieverteilung in den EBS dargestellt. Für die Fraktion Holz und mechanisch vorbehandelte Abfälle wurde der Heizwert geschätzt. Der Abgleich der Massebilanz erfolgt über die Wassermenge der Rotte und den Rotteverlust. Der Heizwert des Abfallinputs wurde aus Plausibilitätserwägungen zu 8,333 MJ/kg (2.315 MWh/1.000 Mg Abfall) berechnet. Der Energiebetrag in den EBS sowie der Kompost- und Deponiefraktion erreicht 1.598 MWh/1.000 Mg Abfall. Das sind nur ca. 69 % des Abfallenergiestroms. Die 31 % Bilanzdifferenz ergeben sich aus dem Rotteverlust (ca. 11 %) und dem Heizwert des „Differenzmaterials“ (ca. 20 %). 52 % des Abfallheizwertes finden sich in den energetisch verwertbaren Produkten wieder. Ursache für diese hohe Differenz im Vergleich zur Abbildung 20 ist die unsichere Information zu den Heizwerten der Fraktionen. Der Heizwert des Abfalls wurde aber bereits sehr gering angesetzt, um den Fehler nicht noch zu vergrößern. Dieser Bilanzfehler wird die Energieeffizienz des Abfallbehandlungssystems stark belasten.

Der Fremdenergiebedarf an Erdgas ist im Vergleich zu den anderen untersuchten Vorbehandlungsanlagen gering. Der Wert für die Fremdenergie darf als zu niedrig eingeschätzt werden, weil für die Aufbereitung entweder der Diesel- oder nur der Strombedarf angegeben wurde (vgl. Tabelle 25).

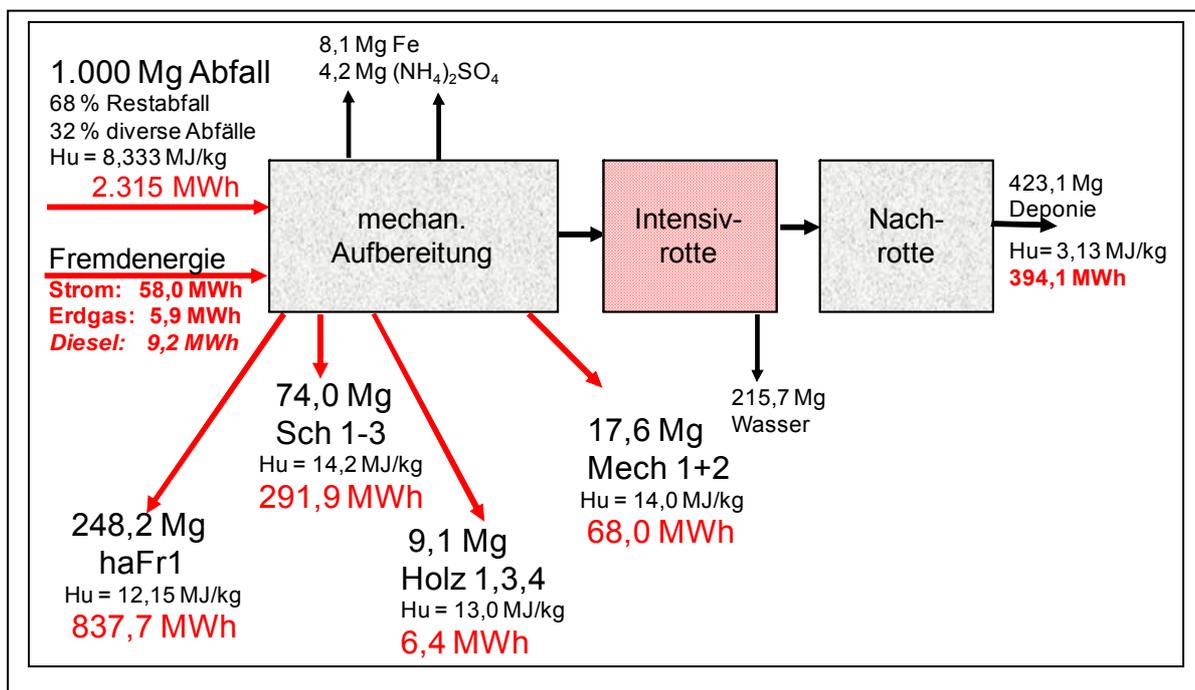


Abbildung 28: Masse- und Energiebilanz der MBA (ZAW) (vereinfacht)

Für die Aufteilung der Energieströme auf die differenzierten Verwertungswege mussten sowohl für die Aufbereitung (Tabelle 25) als auch für einige energetischen Verwertungsanlagen Annahmen getroffen werden, weil keine ausreichenden Informationen für deren Wirkungsgradberechnung vorlagen. Weil die Aufbereitung bzw. Zwischenlagerung zu einer Vermischung mit anderen Abfallströmen führt, wird hier angesetzt, dass die Energieströme der erzeugten Ersatzbrennstoffe unverändert zur energetischen Verwertung gelangen. Die Verwertung der heizwertreichen Fraktion (haFr1) erfolgt in der Zementindustrie und in EBS-Kraftwerken. Wie im Kapitel 5.2.1 angegeben, wird der Einsatz in Zementwerken einheitlich mit einem energetischen Wirkungsgrad von 35,5 % berechnet. Ein Teil der haFr1 wird in zwei EBS-Kraftwerken (4 und 5) mit unterschiedlichem Wirkungsgrad verwertet und anteilmäßig berücksichtigt. Die Überführung der Stoffströme für die Schwerfraktion2 zum EBS-Kraftwerk 6 und die Schwerfraktion3 zum EBS-Kraftwerk 7 wird in den Befragungsunterlagen ausgewiesen. Die mechanisch behandelten Abfälle (Mech2) werden der MVA zugeführt. Für die energetische Verwertung des Stoffstroms Holz in einem Biomassekraftwerk wurde ein Netto-Wirkungsgrad von 26 % angesetzt, der eine reine Stromproduktion in einer energetisch optimierten Anlage berücksichtigt.

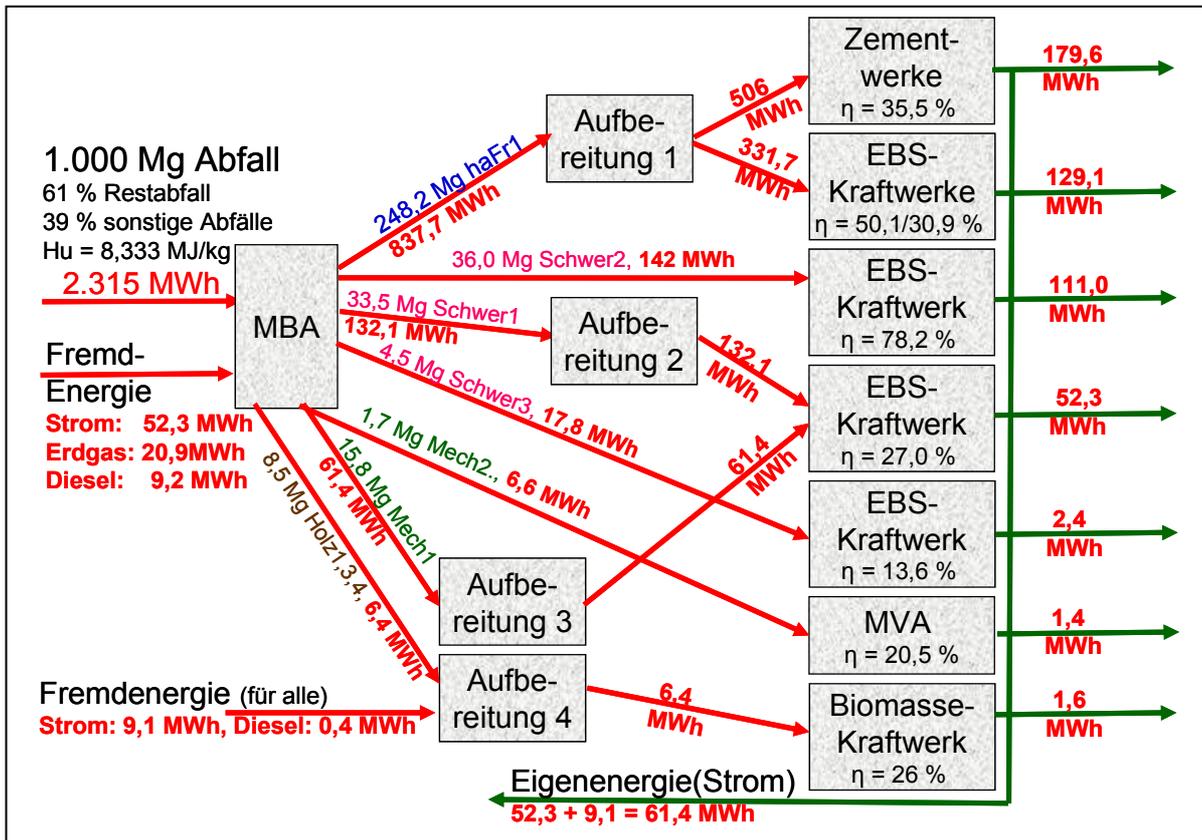


Abbildung 29: Energiebilanz der energetischen Verwertung der Ersatzbrennstoffe aus der MBA (vereinfacht)

Die Bilanzwerte werden in die Berechnung des energetischen Netto-Wirkungsgrades für das Abfallbehandlungssystem MBA (ZAW) überführt (vgl. Abbildung 30):

- Energetischer Gesamt-Netto-Wirkungsgrad: 17,7 %
- Anteil des elektrischen Netto-Wirkungsgrades: 9,3 %
- Anteil des thermischen Netto-Wirkungsgrades: 8,4 %

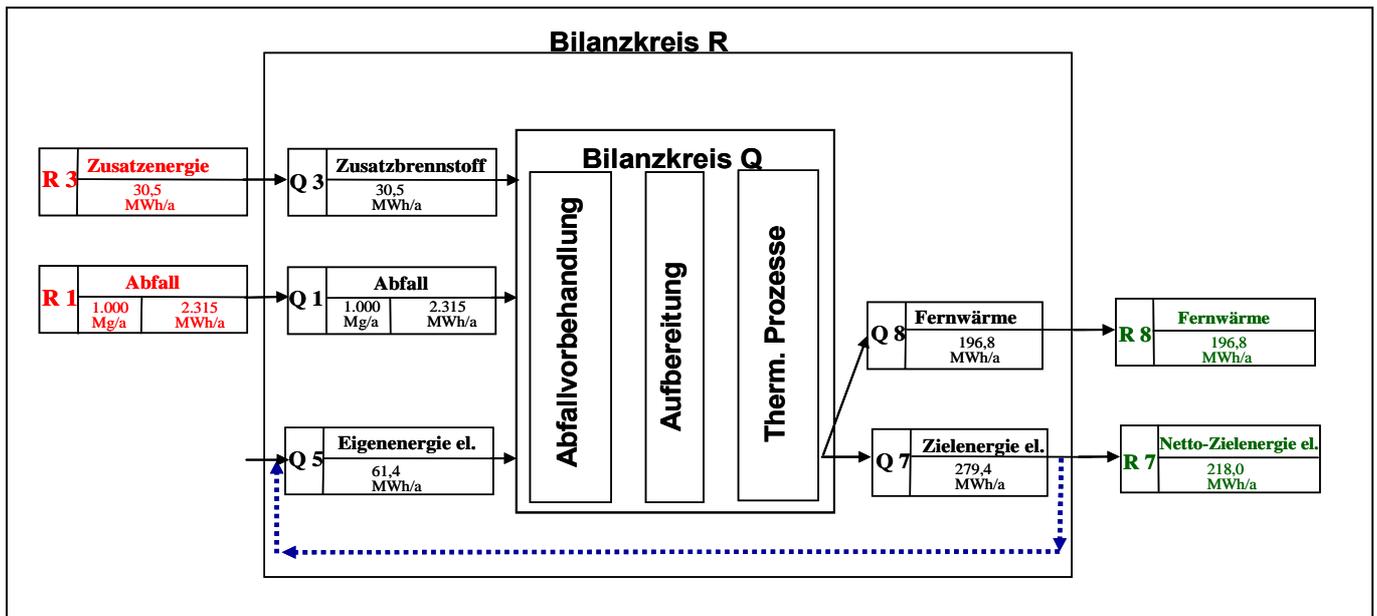


Abbildung 30: Bilanzierung für das Abfallbehandlungssystem MBA (ZAW)

Die Energiebilanz zeigt, wie schon die Berechnung des energetischen Netto-Wirkungsgrades, dass bei einer geringen Menge an Energie in den Ersatzbrennstoffen auch dann keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden, wenn ein großer Teil der EBS-Energie in Fernwärme überführt wird (EBS-Kraftwerk 5). Die Ausbeute von nur ca. 50 % des Energieinhaltes vom zugeführten Abfall in den Ersatzbrennstoffen und der hohe Anteil von über 40 % Kompost- und Deponiegut reduzieren die Energieeffizienz des gesamten Abfallbehandlungssystems. Die wesentlichen Ursachen dafür sind in den Unklarheiten zu den Heizwerten der Abfallströme und der nicht ausgeglichenen Bilanz der Energieströme zu suchen (vgl. Abbildung 28).

Abbildung 31 zeigt den Vergleich der Energieausbeuten mit alternativen Abfallbehandlungs- und -verwertungssystemen. Demnach lässt sich in einer nur Strom erzeugenden MVA mehr Netto-Energie erzeugen, als nach der MBA-Bilanz, in der die EBS-Verteilung in diverse Verwertungswege erfolgt. Bei der Verwertung des gesamten Abfallinputs in Müllverbrennungsanlagen wird jedoch berücksichtigt, dass der Einsatz von Zusatzenergie für die MBA (Erdgas und Diesel) in der MVA nicht benötigt wird und daher der Energieausbeute der MVA als Strom- (bei stromgeführter MVA $\eta_{el.} = 50\%$) oder Wärmegewinn (bei MVA mit höherer Wärmeabgabe $\eta_{ges} = 90\%$ mit $\eta_{el.} = 40\%$ und $\eta_{therm.} = 50\%$) zugeschlagen werden kann.

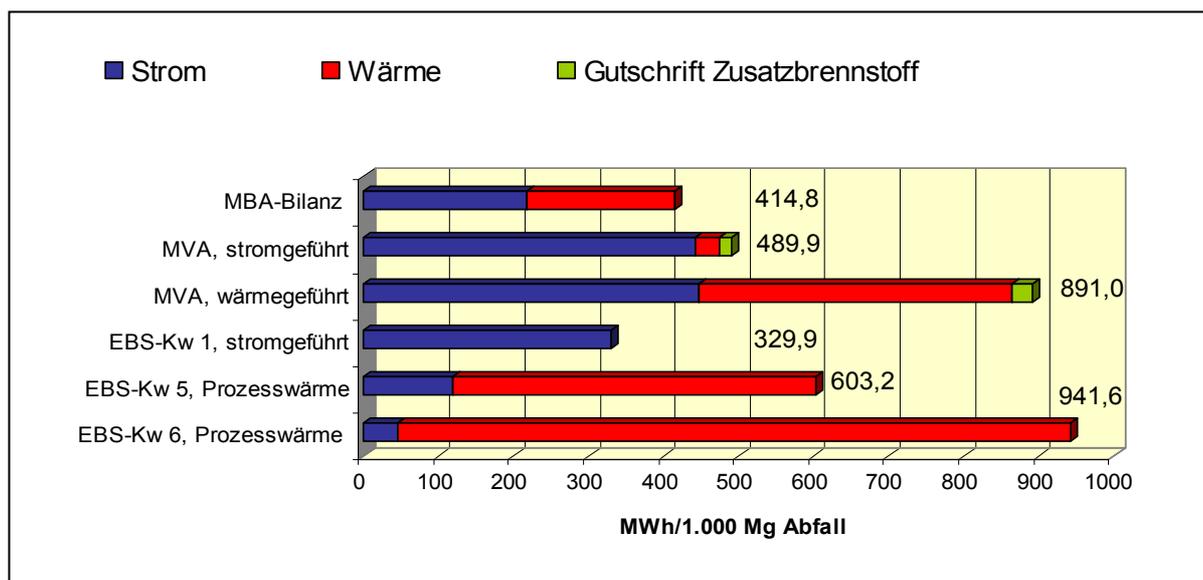


Abbildung 31: Vergleich des Abfallbehandlungssystems MBA (ZAW) mit anderen Systemen

5.3 Vergleich der Ergebnisse mit denen der Vorgängerstudie

Im Vergleich zu den Berechnungen der Vorgängerstudie haben sich bei den Erstbehandlungsanlagen Änderungen vollzogen, die es sehr schwierig machten, repräsentative Daten zu erheben. Zum einen hat sich die Anzahl der verfahrenstechnischen Operationen in den Anlagen erhöht, um unterschiedliche Qualitäten an Ersatzbrennstoffen für den Markt bereitzustellen. Die energetischen Kennwerte dieser Stoffe sind nicht immer verfügbar. Zum anderen werden die bei der Erstbehandlung anfallenden Stoffströme z. T. an weitere Aufbereitungsanlagen abgegeben, deren energetische Daten nicht ausreichend zur Verfügung stehen oder von den Anlagen nicht bereitgestellt wurden. Weil die Stoffströme in diesen Anlagen für den weiteren Absatz vermischt und ihre Energieinhalte geändert werden, ist eine Zuordnung der für die Behandlung erforderlichen Energieaufwendungen nicht möglich. Im Vergleich zur Erhebung von 2007 sind die Ergebnisse daher ungenauer.

Energieeffizienz der Abfallbehandlungsanlagen

Die bereits 2007 betrachteten thermischen Anlagen unterscheiden sich in ihrer Energieeffizienz fast nicht von den in der vorliegenden Studie untersuchten. Zusätzlich wurden in 2011 EBS-Kraftwerke hoher Energieeffizienz (Kraftwerke 5 und 6) sowie ein großes Kohlekraftwerk (2) mit höherem Fernwärmeanteil mit Ersatzbrennstoffen versorgt. Die Einbeziehung der EBS-Kraftwerke mit hoher Wärmeauskopplung in die vergleichende Bewertung der Energieeffizienz ist allerdings spekulativ und rein theoretisch, weil nicht zu erwarten ist, dass diese Kraftwerke, deren Daten in Abbildung 15 und Abbildung 16 ausgewertet wur-

den, als Abnahmekunden für alle EBS-Stoffströme der Vorbehandlungsanlagen verfügbar sind. Das 2007 bewertete Braunkohleheizkraftwerk mit hoher Fernwärmeauskopplung wurde 2011 nicht beliefert.

In die Entsorgungskette wurde 2011 eine Anzahl von Aufbereitungsanlagen und Zwischenlagern einbezogen. Damit sichern sich die Vorbehandlungsanlagen Speicherkapazitäten und Mischeinrichtungen, die auf aktuelle Marktanforderungen schneller reagieren können, weil sie von unterschiedlichen Vorbehandlungsverfahren Stoffströme mit differenzierten Eigenschaften erwerben und diese nach Bedarf mischen können. Diese Möglichkeiten besitzen die Vorbehandlungsanlagen nicht. Der von den Aufbereitungsanlagen und Zwischenlagern angegebene Aufwand an Energie (siehe Tabelle 25) wird nicht eindeutig für den technologischen Bedarf ermittelt. Obwohl er bei der Berechnung der Fremdenergie im Vergleich zur Abfallenergie oder dem Aufwand an Strom und Erdgas bei der Vorbehandlung gering ist, stellt er doch einen zusätzlichen Energieverbrauch dar, der durch die Wirtschaftlichkeitsbemühungen der Vorbehandlungsanlagen entsteht. Bei den energetischen Betrachtungen kann nicht berücksichtigt werden, welcher Verbrauch an Energie (Diesel) durch die Transportwege der Ersatzbrennstoffe entsteht.

Energieeffizienz der Abfallbehandlungssysteme

Der Vergleich der Ergebnisse mit den für das Bilanzjahr 2007 ermittelten Daten ist aus folgenden Gründen nicht eindeutig durchzuführen:

- Für die MPS ergeben sich nachweisbare neue Verhältnisse, weil ein Umbau auf Grund der Ergebnisse der Bewertungen von 2007 zu einer neuen Strategie der Vorbehandlung geführt hat.
- Die Unterlagen der MBS für 2011 wurden nicht für die gleiche Anlage abgefragt wie 2007 und lassen sich daher nicht vergleichen.
- Die Bewertung der MBA ist nicht ohne Probleme durchführbar, weil eine Schätzung wesentlicher energetischer Daten (Heizwerte) für 2011 erforderlich war.

Grundsätzlich ist, wie bereits erwähnt, eine verstärkte Einbeziehung von Zwischenlagern und Aufbereitungsanlagen in die EBS-Verwertung eingeführt worden.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte auf der Basis der für die Energieeffizienzberechnung für das Jahr 2011/12 ermittelten Daten aus der Befragung der öRE und ihrer Partner. Für nicht mitgeteilte Informationen wurden Unterlagen anderer an der Befragung beteiligter Partner verwendet oder Plausibilitätsberechnungen durchgeführt.

Abfallbehandlungssystem MPS (AWVC)

Die Technologie der MPS wurde bis Ende 2011 einer erheblichen Änderung unterzogen. Die Datenauswertung erfolgte daher für die ersten fünf Monate des Jahres 2012. Wesentliche Ergebnisse sind:

- Die Reduzierung des Erdgaseinsatzes von ca. 32 auf ca. 18 m³/Mg Abfallinput.
- Die Verteilung der Outputstoffströme auf mehrere Partner, einschließlich eines Zwischenlagers, nach Wegfall der Verwertungsmöglichkeiten im Sekundär-Rohstoff-Verwertungszentrum Schwarze Pumpe.

Der Energieinput hat sich von 2.556 auf 2.358 MWh/1.000 Mg Abfall reduziert. Eine Angabe des Wertes für 2012 in der Befragung erfolgte nicht, sodass der Wert auf einer Plausibilitätsrechnung basiert.

Die Ausbeute an Ersatzbrennstoffen hat sich erheblich erhöht. 2007 betrug die Menge ca. 495 Mg/1.000 Mg Abfall, für 2012 wurden ca. 755 Mg/1.000 Mg Abfall angegeben. Während 2007 ca. 78 % des Energieinhaltes der Abfälle in die Ersatzbrennstoffe überführt wurden, konnten für 2012 ca. 95 % berechnet werden. Die Energieausbeute in den EBS stieg von 1.990 auf 2.230 MWh/1.000 Mg Abfall (trotz des geringeren Heizwertes). Die Reduzierung des Ausbringens an Wasser und Staub lässt diese Tendenz plausibel erscheinen.

Im Vergleich zu 2007 wird 2012 der größte Teil der erzeugten EBS einem Kohlekraftwerk (2) mit Fernwärme- und Prozessdampferzeugung zugeführt. Die Gesamtnettoenergieausbeute für 1.000 Mg Abfall beträgt ca. 695 MWh Strom (Eigenenergiebedarf abgezogen) und ca. 115 MWh Wärme. Das ist erheblich mehr als für 2007 berechnet wurde (ca. 590 MWh/1.000 Mg Abfall).

Die Energieeffizienz der Abfallbehandlung mit der MPS konnte erheblich gesteigert werden, allerdings sind die Verwertungswege nicht unmittelbar vergleichbar. Die Energieausbeute einer MVA mit Wärme-Kraft-Kopplung erreicht bei Einsatz des gesamten Abfalls eine noch höhere Energieeffizienz.

Abfallbehandlungssystem MBS (Vogtlandkreis)

Mit Daten aus 2007 wurde 2008 eine MBS untersucht, bei der Abfälle mit einem Heizwert von 8,5 MJ/kg vorbehandelt wurden. Die Anlage überführte bei einem Energieinput von 2.360 MWh/1.000 Mg Abfall 86 % der Abfallenergie (2.020 MWh/1.000 Mg Abfall) in einen Ersatzbrennstoff. Für die MBS, deren Daten aus 2011 verfügbar waren, wurde der Abfallheizwert nach Plausibilitätsberechnungen mit 9,9 MJ/kg angesetzt. Daraus ergibt sich ein Energieinput für 1.000 Mg Abfall von 2.750 MWh. Die Energieausbeute der energetisch verwertbaren Fraktionen aus dieser Anlage beträgt 93 % der Abfallenergie (ca. 2.565 MWh/1.000 Mg Abfall).

Der Gesamtnettoenergiegewinn wurde für die Anlage in 2008 mit ca. 550 bis 600 MWh/1.000 Mg Abfall (ca. 25 % vom Input) berechnet. Für den höheren Wert gilt die energetische Verwertung in einem EBS-Kraftwerk mit Wärme-Kraft-Kopplung. Mit ca. 865 MWh/1.000 Mg Abfall erreichte die 2012 betrachtete Anlage durch die Kombination von Endbehandlungsanlagen eine Nettoenergieausbeute von ca. 865 MWh/1.000 Mg Abfall (ca. 32 % vom Input).

Aus den Daten wurde berechnet, dass in der 2008 betrachteten Anlage energetische Netto-Wirkungsgrade von ca. 20 bis ca. 30 % erreichbar wären, wenn die EBS in EBS-Kraftwerken energetisch verwertet werden. Für die 2012 betrachtete Anlage ergab sich ein System-Netto-Wirkungsgrad von 30,7 %. Das Ergebnis entspricht dem optimistischen Wert für die 2008 bewertete Anlage und darf daher als energieeffizient betrachtet werden. Zu berücksichtigen bleibt aber, dass die energetische Verwertung des Abfalls in einer MVA mit Wärme-Kraft-Kopplung eine noch erheblich höhere Energieeffizienz ausweist.

Abfallbehandlungssystem MBA (ZAW)

In der Anlage wurden 2007 (ausgewertet 2008) ca. 455 Mg Ersatzbrennstoffe aus 1.000 Mg Abfall erzeugt. 2011 wurden ca. 350 Mg verschiedener EBS/1.000 Mg Abfallinput gewonnen. Ca. 420 Mg/1.000 Mg Abfall werden kompostiert oder deponiert. Der Heizwert des Abfalls wurde aus Daten der angelieferten Abfallarten mit Hilfe einer Plausibilitätsrechnung ermittelt. Er liegt geringfügig niedriger als der für 2007 berechnete Heizwert.

2007 wurden zwei EBS-Sorten mit einem Heizwert von ca. 11 bis 15 MJ/kg bzw. 16 bis 18 MJ/kg hergestellt. Die heizwertreichen Fraktionen wiesen 2011 einen Heizwert von 12,15 bis 14,2 MJ/kg auf. Aus dem Abfallheizwert werden nur 52 % in die EBS überführt, für 2007 wurden 64 % berechnet. Der Anteil der Deponiefraktion war mit 33,5 % 2007 wesentlich geringer.

2007 wurde ein Gesamtnettoenergiegewinn von ca. 570 MWh/1.000 Mg Abfall ermittelt. Für 2011 konnten ca. 415 MWh/1.000 Mg Abfall berechnet werden. Die Energieausbeute hat sich erheblich reduziert. Wie bereits 2007 sind die Energieausbeuten in Vergleichssystemen (vgl. Abbildung 31) für die MVA stets höher als für die EBS-Verwertung.

Die Ergebnisse der Analysen für 2011 weisen im Vergleich mit denen für 2007 für das Abfallbehandlungssystem MBA (ZAW) eine geringere Energieeffizienz aus. Die wichtigsten Gründe sind der geringere Energieeintrag mit dem Abfall und der hohe Energieverlust in der Deponiefraktion. Hierbei sind jedoch die Unsicherheiten aufgrund der zuvor genannten möglichen Bilanzfehler zu beachten, sodass ein direkter Vergleich der Ergebnisse nur bedingt möglich ist.

6 Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen des FuE-Vorhabens lassen sich Handlungsempfehlungen sowohl für den Freistaat Sachsen als auch für die sächsischen öRE bzw. Anlagenbetreiber von Abfallbehandlungsanlagen ableiten, die nachfolgend dargestellt sind.

6.1 Handlungsempfehlungen für den Freistaat Sachsen

Der Freistaat Sachsen beteiligt sich zumindest seit 2001 an den Aktivitäten zur Reduzierung der Emissionen klimarelevanter Gase. Kapitel 1 enthält einen kurzen Abriss dieser Aktivitäten. Programmatische Vorgaben beispielsweise zur Reduzierung von CO₂-Äq-Emissionen bedürfen naturgemäß regelmäßiger Berichterstattungen zur Erreichung der Ziele. Die Abfallwirtschaft leistet mit ihren Maßnahmen zur Behandlung von Abfällen einen Beitrag zur Zielerfüllung und sollte sich demzufolge mit ihren Ergebnissen in die Berichterstattung einbringen. Zur Behandlung von Restabfällen und anderen Abfällen (überlassene Abfälle) wurden bereits drei Studien durchgeführt. Diese Untersuchungen sollten - unter Einbeziehung aller öRE im Freistaat Sachsen - turnusmäßig bzw. nach Bedarf durchgeführt werden **(a)**.

Mit der Behandlung überlassener Abfälle werden die Leistungen der Abfallwirtschaft bzgl. Klimarelevanz und Energieeffizienz in keinsten Weise erschöpfend abgebildet. Für den Zuständigkeitsbereich der öRE sollten in jedem Fall weitere, größere Mengenströme (Bio- und Grünabfälle, Wertstoffe und Sperrmüll - Abfälle zur Verwertung) einbezogen werden. Die Vorgängerstudien und andere Klimarelevanzbetrachtungen zeigen, dass die Verwertung dieser Abfälle einen wesentlichen Beitrag zur Klimaentlastung leisten kann **(b)**. Aber nicht nur die Entsorgung (Beseitigung, Verwertung) der den öRE überlassenen Abfälle spielt eine Rolle, sondern auch die Entsorgung der gewerblichen Abfälle. Diese stellen mengenmäßig sogar das weitaus größere Potenzial dar. Zu erwarten ist, dass mit deren Entsorgung auch größere Effekte bzgl. einer Klimaentlastung verbunden sind. Folgerichtig wäre, die gewerblichen Abfälle in die abfallwirtschaftliche Klimaschutzberichterstattung einzubeziehen **(c)**. Zu beachten ist allerdings, dass auf diesem Gebiet noch Vorarbeit in die Methodenentwicklung und Modellierung entsprechender Entsorgungsverfahren investiert und eine Basis für die statistische Mengenerfassung für gewerbliche Abfälle geschaffen werden muss.

Das Gebiet der Behandlung von Abfällen sollte durch Betrachtungen zu den klimarelevanten Auswirkungen der Deponien abgerundet werden **(d)**. Eine fundierte Datenbasis hierfür bildet das Emissionskataster sächsischer Deponien.

Die Sächsischen Klimarelevanz-Studien und die Mehrzahl anderer Untersuchungen widmen sich der Verwertung und Beseitigung von Abfällen. Betrachtungen zum vorgelagerten Aufwand für Erfassung, Sammlung und Transport bleiben in der Regel außen vor. Diese logistischen Aufwendungen sind natürlich mit klimarelevanten Belastungen verbunden, müssen der Abfallwirtschaft zugerechnet werden und sollten zukünftig bei der Beurteilung abfallwirtschaftlicher Systeme Beachtung finden **(e)**. Die ökologischen Vorteile der separaten Erfassung und Verwertung von Bioabfällen beispielsweise lassen sich erst feststellen, wenn den Klimaentlastungen, die für unterschiedlichen Verfahren zur Verwertung dargestellt werden können, die Klimabelastungen für die logistischen Aufwendungen im Vorfeld gegengerechnet werden und wenn der Gesamtklimaeffekt mit den Effekten mit alternativen Erfassungs- und Verwertungsmöglichkeiten (z. B. Mitentsorgung mit Restabfällen) verglichen wird. Für die Gesamtbetrachtung von Entsorgungssystemen von der Erfassung bis zur endgültigen Behandlung sind vorab ebenfalls noch Methoden zu entwickeln **(f)**.

Übersicht

- a) Regelmäßige Ermittlung der Klimarelevanz und der Energieeffizienz für die sächsische Abfallwirtschaft als Grundlage für die Berichterstattung zum Energie- und Klimaprogramm Sachsen unter Einbeziehung der Entsorgung (Behandlung) überlassener Abfälle für den gesamten Freistaat
- b) Einbeziehung weiterer mengenrelevanter Abfallströme aus Haushalten zur Verwertung (Bio- und Grünabfälle, Wertstoffe, Sperrmüll)
- c) Einbeziehung gewerblicher Abfälle
- d) Einbeziehung der klimarelevanten Emissionen aus Deponien

- e) Erweiterung des Betrachtungsrahmens um den Bereich Erfassung/Sammlung/Transport der Abfälle, dazu Entwicklung einer Untersuchungsmethodik und vereinfachter Kalkulationsalgorithmen
- f) Entwicklung von nutzungsfähigen Instrumentarien zur regelmäßigen Berichterstattung zur Klimarelevanz und zur Energieeffizienz der Abfallwirtschaft

6.2 Handlungsempfehlungen für örE, Anlagenbetreiber

Die örE bzw. Betreiber der Erstbehandlungsanlagen haben die Möglichkeit, darauf Einfluss zu nehmen, wie klimarelevant und energieeffizient die Entsorgung der Abfälle abläuft. Einige der Stellschrauben wurden im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung im Kapitel 0 dargestellt. Diese umfassen sowohl konzeptionelle Umstellungen (**g**) als auch technische Maßnahmen (**h**) im Bereich der Behandlungsanlagen und -systeme. Beispiele zu den Auswirkungen entsprechender Maßnahmen zeigt die vorliegende Studie, wobei solche Maßnahmen auch für die hier betrachteten Erstbehandlungsanlagen weiterhin relevant sind.

Die vorliegenden Studienergebnisse belegen erneut, dass die Klimarelevanz und die Energieeffizienz für ein Entsorgungssystem ganz entscheidend durch die Wahl der nachgeordneten (endgültigen) Entsorgungswege bestimmt werden kann. Bei der Optimierung eines Systems unter Klimarelevanz- und Energieeffizienzaspekten sollten Wege zur stofflichen Verwertung bestimmter Fraktionen (Abtrennung geeigneter Materialien erforderlich) und/oder besonders effiziente energetische Verwertungswege (thermischen Anlagen mit hohen Wirkungsgraden oder Zementwerke) genutzt werden (**i**).

Übersicht

- g) Überprüfung/Optimierung der Behandlungskonzepte in den Erstbehandlungsanlagen
- h) Einsatz energieeffizienter und ressourcenschonender Aggregate und Technik
- i) Nutzung besonders energieeffizienter Verwertungswege

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Aufgabenstellung

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse zum FuE-Vorhaben „**Erfolgskontrolle klimarelevanter Maßnahmen der Abfallwirtschaft in Abfallverbänden des Freistaates Sachsen**“ dargestellt. Ziel des Vorhabens war es, für drei ausgewählte sächsische örE Klimarelevanz- und Energieeffizienzbetrachtungen für die Behandlung überlassener Abfälle anzustellen und mit Ergebnissen einer Vorgängerstudie aus dem Jahr 2009 zu vergleichen. Für die drei örE war darzustellen, welche Auswirkungen die Maßnahmen, die seither umgesetzt wurden, auf Klimarelevanz und Energieeffizienz hatten. Bei den von den örE bzw. den Anlagenbetreibern der Erstbehandlungsanlagen umgesetzten Maßnahmen ging es um

- prinzipielle Änderungen am System zur Entsorgung überlassener Abfälle (z. B. Anpassung der Outputqualitäten an Marktgegebenheiten - teilweise verbunden mit einer Reduzierung des Behandlungsaufwandes, Nutzung unterschiedlicher - z. T. neuer - Entsorgungswege für Outputmaterialien),
- technische Änderungen (Einsatz energieeffizienterer Aggregate, gezielte Teilstromführung in den Erstbehandlungsanlagen usw.) und
- Deckung des Eigenenergiebedarfs aus erneuerbaren Energien (eigene Energieerzeugung).

Auf der Grundlage der Ergebnisse und deren Diskussion sollten Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Vorgehensweise

Grundlage für die Berechnungen zur Klimarelevanz und zur Energieeffizienz bilden die

- Systeme/Konzepte der örE,
- Anlagedaten,
- Abfalllieferungsmengen der örE,
- Last-/Gutschriften für sächsischen und deutschen Strom-/Wärmemix,
- Abfalleigenschaften (Heizwert, C[*bio*], C[*fossil*]),
- Gutschriften für erzeugte Stoffe (Metalle, Inertien als Baustoffe, REA-Gips usw.),
- Lastschriften (Erdgas, Heizöl, Diesel, Betriebsmittel, Anlagenemissionen, Emissionen Deponierung, Transporte).

Zu den Systemen/Konzepten der örE und den Anlagedaten wurden umfangreiche Befragungen über Fragebogenaktionen, Nachfragen per Telefon oder E-Mail sowie Vor-Ort-Besuche durchgeführt. Die überlassenen Abfallmengen wurden von den örE mitgeteilt. Die anderen Daten wurden durch umfangreiche Literaturlauswertungen und Datenbankrecherchen ermittelt.

Grundlage für die Klimarelevanzberechnungen bildete die Methodik der IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change)-Richtlinie aus den Jahren 1996/2006 zur Erstellung nationaler Treibhausgas-Inventare, ergänzt durch die Methodik der Ökobilanzierung. Die Energieeffizienzberechnungen erfolgten auf der Basis der VDI-Richtlinie 3460, 2007 - Emissionsminderung und Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung.

Wesentliche Ergebnisse

Der für das Abfallbehandlungssystem des AWVC (Erstbehandlungsanlage MPS) für das Jahr 2007 festgestellten Klimabelastung von +40,8 kg CO₂-Äq./Mg Input steht im Jahr 2012 eine Klimaentlastung von -114,3 kg CO₂-Äq./Mg Input gegenüber. Die seither umgesetzten Maßnahmen an der MPS zeigen offenbar die vom AWVC gewünschten Effekte. Die aktuell ermittelte Energieeffizienz für das gesamte Entsorgungssystem beträgt 31,5 % und bewegt sich damit an der oberen Grenze des für 2007 berechneten Bereichs.

Die für das Abfallbehandlungssystem des Vogtlandkreises (Erstbehandlungsanlage MBS) berechnete Klimaentlastung für das Jahr 2011 liegt mit -20,3 kg CO₂-Äq./Mg Input über der für 2007 anhand einer vergleichbaren Anlagen modellierten Entsorgungslösung (-1,6 kg CO₂-Äq./Mg Input). Die Energieeffizienz für 2011 liegt mit 30,7 % ebenfalls im oberen Bereich des für das Jahr 2007 berechneten Ergebnisses (16 bis 37 %).

Für das Abfallbehandlungssystem des ZAW (Erstbehandlungsanlage MBA) wurde in der Vorgängerstudie eine Klimaentlastung von -16,4 kg CO₂-Äq./Mg Input berechnet. Das Ergebnis für 2011 liegt mit einer Klimaentlastung in Höhe von -31,0 kg CO₂-Äq./Mg Input darüber und ist vor allem auf die überwiegende Energieversorgung durch ein mit Deponiegas betriebenes BHKW zurückzuführen. Die Energieeffizienz liegt mit 17,7 % für das Gesamtsystem (2011) unter dem für 2007 ausgewiesenen Bereich von 26 bis 32 %.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind mit Unsicherheiten behaftet. Eine wesentliche Ursache liegt in den z. T. unbefriedigenden Daten zu den Eigenschaften der Materialien und zu den Anlagen, was auch auf das sehr breite Spektrum der in die Entsorgungssysteme eingeschlossenen Anlagen zurückzuführen ist. Datenfehlstellen mussten mit modellierten Daten ausgefüllt werden. Durch Plausibilitätsprüfungen über Bilanzierungen für Mengen- und Energieströme sowie Kohlenstoffmengen konnten die Unsicherheiten eingegrenzt werden, sodass sich auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse weitergehende Aussagen ableiten ließen.

Handlungsempfehlungen, Maßnahmen

Dem Freistaat Sachsen wird empfohlen, ausgewählte abfallwirtschaftliche Maßnahmen der örE weiterhin unter Klimarelevanz- und Energieeffizienzaspekten zu bewerten und die Ergebnisse in die Berichterstattung zum „Energie- und Klimaprogramm Sachsen“ einfließen zu lassen. Hierzu wurden sechs Maßnahmen zu Inhalten und zu methodischen Arbeiten für den Aufbau einer entsprechenden Berichterstattung benannt.

Den sächsischen öRE wird empfohlen, zusammen mit den Anlagenbetreibern - auch der nachgeordneten Anlagen - weitere Beiträge zur Klimaentlastung und zur Erhöhung der Energieeffizienz durch die Optimierung der Anlagenkonzepte und -techniken sowie durch Nutzung energieeffizienter Verwertungs- und Entsorgungsanlagen für die Outputstoffe zu leisten.

7.2 Ausblick

Wie bereits in den Vorgängerstudien nachgewiesen werden konnte, leistet die sächsische Abfallwirtschaft einen beachtlichen Beitrag zum Klimaschutz. Dass durch die Ergebnisse der Vorgängerstudie Optimierungsmaßnahmen seitens der öRE initiiert werden konnten, kann als Erfolg der auf den Klimaschutz bezogenen Untersuchungen der Abfallwirtschaft durch den Freistaat Sachsen gewertet werden. Die vorliegende Studie zeigt zudem, dass weitere Potenziale durch technische Optimierungsmaßnahmen im Bereich der Behandlung überlassener Abfälle und einer damit einhergehenden hochwertigen Verwertung der Abfallströme bestehen. Jedoch ist die Umsetzbarkeit von Optimierungsmaßnahmen abhängig von den regionalen Voraussetzungen wie z. B. der bereits vorhandenen Technik der jeweiligen Behandlungskonzepte sowie den wirtschaftlichen Möglichkeiten und Rahmenbedingungen der öRE. Mit Hilfe der hier vorgestellten Methodik zur Untersuchung der Klimarelevanz und Energieeffizienz sind die weiteren Optimierungspotenziale der abfallwirtschaftlichen Behandlungssysteme feststell- und planbar.

Die langfristige Zielstellung einer Abfallvermeidung und weitestgehenden Verwertung der wertstoffhaltigen Abfallströme führt zu einer stetigen Abnahme des Restabfallaufkommens aus Haushalten. Dieser durchaus gewollte Trend kann bei einer nur unter effizienz- und klimarelevanten Kriterien durchgeführten Bewertung der kommunalen Abfallbehandlungssysteme zu einer Verschlechterung der Klimarelevanz und/oder Energieeffizienz insbesondere infolge geringer werdender Auslastung vorhandener Erstbehandlungsanlagen führen. Für die ökologische Bewertung dieser Systeme sind deshalb solche Aspekte wie die Funktion der Restabfallentsorgung als Schadstoffsenke oder die Sicherstellung der Entsorgung mit möglichst geringen Transportentfernungen zwischen dem Erfassungsgebiet und der Erstbehandlungsanlage nicht außer Acht zu lassen. Ziel sollte daher eine ganzheitliche Bewertung der Abfallbehandlungssysteme sein, die neben allen hier genannten ökologischen Kriterien auch die ökonomischen und sozialen Aspekte mitbetrachtet.

Quellenverzeichnis

- AGEB 2012 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2011 nach Energieträgern.
http://www.ag-energiebilanzen.de/componenten/download.php?filedata=1345636913.pdf&filename=20120801_BRD_Stromerzeugung1990_2011.pdf&mimetype=application/pdf
- ASA/IBA 2010 ASA-Projekt: Energieeffizienz von Kombinationsverfahren mit MBA und energetischer Verwertung. Anlage: RABA Chemnitz. Tab. 1: Eingabedaten für das Bilanzmodell; Unterlage übergeben vom Betreiber, 9.10.2012
- AWVC 2012 Joachim Schatz (AWVC): Umsetzung von technischen Anpassungen in der Restabfallbehandlungsanlage Chemnitz in den Bereichen Nachzerkleinerung, Pelletierung und Fördertechnik. Energie und Klimaschutz – RL EuK/2007. Workshop mit der SAENA GmbH und den sächsischen Abfallwirtschaftsverbänden; Chemnitz 24. April 2012
- BDSV 2010 Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V.: Keine Probleme bei der Entsorgung der Schredderleichtfraktion. 14.04.2010
http://www.bdsv.org/downloads/bdsv_standpunkt_0410.pdf
- BECKMANN et al., 2002 Michael Beckmann, Martin Horeni, Roland Scholz, Thorsten Harnaut: Einfluss der Prozessführung auf den spezifischen Energieverbrauch in Verfahren der Grundstoffindustrie beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen. VDI-Berichte 1708, S. 131 – 163, Düsseldorf, 2002
http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/iet/vws/Veroeffentlichungen/Beckmann_90-07/Be-58.pdf
- BIWA, BZL 2003 BIWA Consult GbR Freiberg, BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH Oyten in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Manfred Born, Freiberg: Die Klimarelevanz der Abfallwirtschaft im Freistaat Sachsen, FuE-Vorhaben im Auftrag des LfUG – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden 2003
- BIWA, BZL 2009 BIWA Consult GbR Freiberg, BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH Oyten in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Manfred Born, Freiberg: Untersuchungen zur Klimarelevanz der Abfallwirtschaft in den Abfallverbänden des Freistaates Sachsen, FuE-Vorhaben im Auftrag des LfUG – Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden 2009
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13774>
- BIWA 2010 Analyse der Zusammensetzung von Restabfällen aus Haushalten in der Stadt Dresden 2009/2010 für die Stadtreinigung Dresden GmbH, Juni 2010
- BLfU 2008 Bayerisches Landesamt für Umwelt: Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeit von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern. Endbericht zum Forschungsvorhaben, November 2008
http://uok.bayern.de/portal/internalfile/download/EU45_Schlussbericht_1232096370770.pdf
- BMLFUW 2005 Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft: Stand der Technik der Kompostierung. Richtlinie des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 10.2.2005
http://www.lebensministerium.at/dms/lmat/umwelt/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-biotechnisch/richtlinie_sdt/Richtlinie_20Kompost-1-/Richtlinie_20Kompost%5B1%5D.pdf
- BOERRIGTER 2000 H. Boerrigter: Implementation of thermal processes for feedstock recycling of bromine and antimony, with energy recovery, from plastics waste of electrical and electronic equipment (WEEE). Phase 1: Literature survey/status update, evaluation, and ranking of combustion, gasification, and pyrolysis based technologies. ECN-C--00-114, November 2000
<http://www.ecn.nl/docs/library/report/2000/c00114.pdf>
- BRUSSELAERS 2006 Johan Brusselaers, Frank E. Mark, Lein Tange: Using metal-rich WEEE plastics as feedstock/fuel substitute for an integrated metals smelter. A Technical Report produced by Plastics Europe in cooperation with Umicore and EFRA. November 2006
<http://www.plasticseurope.org/cust/documentrequest.aspx?DocID=654>

- BÜNEMANN 2011 Agnes Bünemann, Gunda Rachut (cyclos GmbH, Osnabrück), Dr. Joachim Christiani, Dr. Michael Langen, Dr. Jörg Wolters (HTP GmbH, Aachen): Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung Teilvorhaben 1: Bestimmung der Idealzusammensetzung der Wertstofftonne. UFOPLAN Förderkennzeichen 3710 93 313 1. UBA-FB 001459, UBA-Texte 08/2011
www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4074.pdf
- BVT 2005 BVT-Merkblatt über beste verfügbare Techniken der Abfallverbrennung. Europäische Kommission, Umweltbundesamt, Juli 2005
- BZL 1998 BZL GmbH, Oyten, Dr.-Ing. A. Nottrodt GmbH, Hamburg, THERMOCHEM GmbH, Aachen: Arbeitshilfe Kreislaufwirtschaft, erstellt im Auftrag des Landesumweltamtes NRW, November 1998
- CUHLS 2005 Cuhls C., Clemens J.: Die Tauglichkeit von Biofilterkonzepten für die Abluftreinigung. In: Kühle-Weidemeier M. (Hrsg.): International Symposium MBT 2005 – Internationale Tagung MBA 2005. Cuvillier 2005, S. 463-477
<http://books.google.de/books?id=bw3SD7RPh8IC&printsec=frontcover&hl=de#v=onepage&q&f=false>
- EEW 2012 E.ON Energy from Waste (EEW): Großräschen. Moderne Technik mit langer Tradition. EEWGRO 05/2012
http://www.eon-energyfromwaste.com/SnetWebControls/Forms/PDF/EEW_Grossraeschen.pdf
- FFE 2009 Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE): Primärenergetische Bewertung von Fernwärme aus KWK. Studie im Auftrag der AGFW e.V.. Endbericht, Juni 2009
http://www.ffe.de/download/langberichte/FfE_PE-Bewertung_FW_aus_KWK.pdf
- FZKA 2004 T. Reinhardt, U. Richers: Entsorgung von Schredderrückständen – ein aktueller Überblick. Forschungszentrum Karlsruhe – Wissenschaftliche Berichte – FZKA 6940
<http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA6940.pdf>
- GEMIS 4.7.1 2012 Öko-Institut: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS)
<http://www.gemis.de/gemis471.zip>
- GOLLUB 2012 Gollub M.: Energie-, Stoffstrom- und Kostenoptimierung an einer Restabfallbehandlungsanlage. Müll-Handbuch Kz. 2956, Lfg. 3/12, 2012
<http://www.muellhandbuchdigital.de/pos/1757/dokument.html>
- HEMPEL 2000 Hempel, C.: Untersuchungen zum Heizwert Hu von Restabfällen zur thermischen Behandlung und mögliche Entwicklungslinien. Diplomarbeit an der Hochschule Mittweida (FH), 2000
- HOFFMANN 2011 Hoffmann G.: Charakterisierung und Verbrennung von Shredderleichtfraktionen in einer stationären Wirbelschicht (Dissertation). TU Dresden, Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten Bd. 72, 2011
- IBA 1998 IBA GmbH, Hannover, BZL GmbH, Oyten, CUTEC GmbH, Clausthal-Zellerfeld: Möglichkeiten der Kombination von mechanisch-biologischer und thermischer Behandlung von Restabfällen. F + E- Vorhaben Nr. 1471 114 im Auftrag des BMBF/UBA, 1998, hier Anhang zu Kap. 12
- IFEU 2007 ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg: Ökobilanz thermischer Entsorgungssysteme für brennbare Abfälle in Nordrhein-Westfalen. Hrsg.: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Düsseldorf, September 2007
http://www.ifeu.de/abfallwirtschaft/pdf/therm_entsorg.pdf
- IFEU 2008 Horst Fehrenbach, Jürgen Giegrich, Sameh Mahmood (ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung): Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz. Forschungsbericht 205 33 311, UBA-FB 001092. UBA-Texte 16/08, 2008
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3445.pdf>
- IFEU/AHU 2012 Knappe F., Vogt R. (IFEU, Heidelberg), Lazar S., Höke S. (ahu, Aachen): Optimierung der Verwertung organischer Abfälle. FKZ 3709 33 340, UBA-FB 001592, UBA-Texte 31/2012
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4310.pdf>
- IFEU & Partner 2008 IFEU & Partner: Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. F&E-Vorhaben, FKZ: 0327544, Heidelberg, Leipzig, Berlin, Darmstadt, Mai 2008
<http://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/BMU-Biogasprojekt%202008-Gesamtband.pdf>
- INTECUS 2011 Abfallanalysen im Verbandsgebiet des Zweckverbandes Abfallwirtschaft Oberes Elbtal – ZAOE, im Auftrag des ZAOE. INTECUS GmbH, Dresden, Juni 2011

IPA 2012	<p>Informationsportal Abfallbewertung IPA: Abfallsteckbriefe 1801 und 1802 Human- und tierärztliche Versorgung, Stand (21.02.2012). Herausgeber: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), erstellt von BIWA, Freiberg</p> <p>http://www.abfallbewertung.org/repgen.php?report=ipa&char_id=1801_Human&lang_id=de&avv=&synon=&kapitel=2&tactive=no</p>
IPPC 2007	<p>Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference Document on Best Available Techniques in the Cement and Lime Manufacturing Industries. Draft, September 2007</p> <p>ftp://ftp.jrc.es/pub/eippcb/doc/clp_d1_0907.pdf</p>
IPCC 2007a	<p>IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report (AR4) 2007, Working Group 1, Chapter 2, Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, Table 2.14, page 212,</p> <p>http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf</p>
IPCC 2007b	<p>IPCC: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 5 Waste</p> <p>http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/5_Waste.pdf</p>
IPPC 2010	<p>Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Reference Document on Best Available Techniques in the Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries. May 2010</p> <p>http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/clm_bref_0510.pdf</p>
IPPC 2012	<p>Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Draft CLM BREF (June 2012)</p> <p>http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CLM_FD_06_2012.pdf</p>
ITAD 2012	<p>www.itad/Mitglieder.de</p>
KEK Leipzig 2011	<p>Kreisentwicklungskonzept für den Landkreis Leipzig vom 02.03.2011, Kap. 7 – Technische Infrastruktur</p> <p>www.landkreisleipzig.de/f-Download-d-file.html?id=2218</p>
KrWG 2012	<p>Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), Anlage 2</p>
LAK-E 2010	<p>Länderarbeitskreis Energiebilanzen: Zur Methodik der CO₂-Bilanzen. 2010</p> <p>http://www.lak-nergiebilanzen.de/sixcms/list.php?page=liste_en&sv[relation_en.gsid]=lbm1.c.229525.de&order=ifdnr,online_date&order=desc</p>
LAK-E 2012	<p>Länderarbeitskreis Energiebilanzen: 2.1 CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung seit 1990. Stand: 30.07.2012.</p> <p>http://www.lak-energiebilanzen.de/sixcms/media.php/4/co2_2_1.xls</p>
LfULG 2011	<p>Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Siedlungsabfallbilanz 2010. Dresden, November 2011. Korrekturfassung Januar 2012. (RO-TIS_Korrektur_Siedlungsabfallbilanz_2010.pdf)</p> <p>https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/12620/documents/14171</p>
MWAT 2009a	<p>Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.): Dezentrale Verwertung von Ersatzbrennstoffen und heizwertreichen Sortierresten in Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin, Dezember 2009</p> <p>http://service.mvnet.de/_php/download.php?datei_id=19287</p>
MWAT 2009b	<p>Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.): Energie aus Abfall in Mecklenburg-Vorpommern. Schwerin, Dezember 2009</p> <p>http://service.mvnet.de/_php/download.php?datei_id=19279</p>
ÖVA 2008	<p>Österreichischer Verein für Altlastenmanagement (ÖVA): Leitfaden Methanoxidationsschichten. Erstellt im Rahmen der ÖVA-Arbeitsgruppe „Leitfaden Methanoxidationsschichten“, Wien, Oktober 2008</p> <p>http://cms.altlastenmanagement.at/documents/ak_tl/Leitfaden_Methanox%20.docx.pdf</p>
ProBas 2012	<p>Umweltbundesamt (V.i.S.d.P.): Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement-Instrumente (ProBas)</p> <p>http://www.probas.umweltbundesamt.de, zuletzt aktualisiert am 13.07.2012</p> <p>http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php</p>
PRTR 2012	<p>Pollutant Release and Transfer Register – Deutsches Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister</p> <p>www.prtr.bund.de</p>

- RAMKE 2006 Ramke H.-G.: Ermittlung geeigneter Parameter zur Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit im Zusammenhang mit abfalltechnischen Untersuchungen. Fachgespräch Feststoffuntersuchung 2006 – Neue Entwicklungen in der Abfall- und Altlastenuntersuchung. Fachtagung in der Bildungsstätte Essen des BEW, Bildungszentrum für Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH, Essen, 20./21. März 2006 http://www.hs-owl.de/fb8/fachgebiete/abfallwirtschaft/pdf/Essen_2006_Beitrag_Internet.pdf
- REINHARDT 2007 T. Reinhardt, U. Richers, H. Suchomel: Kohlendioxidemissionen einer Sonderabfallverbrennungsanlage. Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7277, März 2007 <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7277.pdf>
- SEMBA 2005 Stefan Skutan, P. H. Brunner: Stoffbilanzen mechanisch-biologischer Anlagen zur Behandlung von Restmüll (SEMBA), im Auftrag des Bundesministeriums für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Umweltbundesamt GmbH. Endbericht, Wien, Mai 2005 http://www.bmlfuw.gv.at/lmat/dms/lmat/umwelt/abfall-ressourcen/behandlung-verwertung/behandlung-mechanisch/studie_mba/SEMBA-Endbericht/SEMBA%20Endbericht.pdf
- SHC 2006 Zweite Fortschreibung des Abfallwirtschaftskonzeptes der Stadt Leipzig- Eigenbetrieb Stadtreinigung - 2006 – 2010 – Kurzfassung. 2006 www.stadtreinigung-leipzig.de/srl/pdfs/awk.pdf
- SHC 2010 Restabfallanalyse 2010 Stadt Leipzig. SHC Sabrowski-Hertrich-Consult GmbH, Erlenbach am Main, für Abfallwirtschaft Landkreis Leipzig, 2010
- SHC 2011 Restabfallanalyse 2011 Landkreis Leipzig – Gesamtergebnis (Frühlings- und Sommeranalyse) – EXCEL-Auswertung. SHC Sabrowski-Hertrich-Consult GmbH, Erlenbach am Main, für Abfallwirtschaft Landkreis Leipzig, August 2011 www.landkreisleipzig.de/f-Download-d-pm.html?id=555
- SHC 2012 Abfallwirtschaftskonzept Landkreis Leipzig 2012 bis 2018. SHC Sabrowski-Hertrich-Consult GmbH, Erlenbach am Main, für Abfallwirtschaft Landkreis Leipzig, Februar 2012 www.landkreisleipzig.de/f-Download-d-file.html?id=2981
- SMUL 2001 Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: Klimaschutzprogramm des Freistaates Sachsen, Dresden 2001, Stand: 01.06.2001 http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/klima/klimaschutzprogramm_sachsen.pdf
- SMUL 2005 Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: Klimaschutzbericht 2005 – Bericht zur Umsetzung des Sächsischen Klimaschutzprogramms, Dresden 2005 http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/klima/Klimaschutzbericht_2005_011105.pdf
- SMUL 2008 Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: Aktionsplan Klima und Energie des Freistaates Sachsen, Dresden 2008, Stand 03.06.2008 http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/Aktionsplan_Klima_und_Energie_080603.pdf
- SMUL 2010 Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: Umsetzung Aktionsplan Klima und Energie, Dresden 2010, Stand 18.06.2010 http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/APKE_Tabelle_IMAG_Sachstand_170610.pdf
- SMUL 2011 Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: Energie- und Klimaprogramm Sachsen (Entwurf, Stand: 12. Oktober 2011), Dresden 2011 http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/EuK_Kabinett.pdf
- SMWA 2012 Sächsischen Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr: Energie: Zahlen und Fakten. http://www.smwa.sachsen.de/de/Wirtschaft/Energie/Zahlen_und_Fakten/18287.html und http://www.smwa.sachsen.de/de/Wirtschaft/Energie/Energiebilanzen_des_Freistaates_Sachsen_seit_1994/138275.html, zuletzt eingesehen am 19.9.2012
- SMWA/SMUL 2011 Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (SMWA), Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL): Energie- und Klimaprogramm, Entwurf vom 12.10.2011 http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/EuK_Kabinett.pdf
- StaLa o. J. Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen: Strombilanz im Freistaat Sachsen seit 1991 in Millionen Kilowattstunden. Ohne Jahresangabe. http://www.statistik.sachsen.de/download/050_W-Ind-Bau/E_VI_Tab05_Strombilanz.pdf

TUM/ATZ 2009	Technische Universität München, ATZ Entwicklungszentrum Sulzbach-Rosenberg: Vergleichende ökologische Betrachtung verschiedener Einsatzstoffe bei Trockensorptionsverfahren zur Rauchgasreinigung. Endbericht. Auftraggeber: Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie, Köln, Juli 2009 http://www.kalk.de/uploads/tx_bvkpage/Endbericht_Studie_Rauchgasreinigung_02.pdf
UBA 2006	Umweltbundesamt (Hrsg.): Einsatz von Sekundärbrennstoffen. UBA-Texte 07/06 http://opus.kobv.de/zlb/volltexte/2007/1090/pdf/Einsatz.pdf
UBA 2010	Umweltbundesamt (Hrsg.): CO ₂ -Emissionsfaktoren (application/vnd.ms-excel 20.0 KB) Stand: 27.09.2010 http://www.lak-energiebilanzen.de/sixcms/media.php/4/Emissionsfaktoren.xls
UBA 2012a	Umweltbundesamt: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2010 und erste Schätzungen 2011. April 2012 http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf
UBA 2012b	Umweltbundesamt: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2010. Climate Change Nr. 08/2012, Juni 2012 http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4292.pdf
UBA WIEN 2010	Umweltbundesamt: Leitfaden für die Durchführung der PRTR-Berichtspflicht. UBA-REPORT REP-0164. Wien, 2010 http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0164.pdf
VDI 2007	Emissionsminderung, Energieumwandlung bei der thermischen Abfallbehandlung. VDI-Richtlinie 3460, Blatt 2, 2007
VDZ 2011	VDZ - Verein Deutscher Zementwerke e. V.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011, Düsseldorf, August 2012
WASTE CONSULT 2008	WASTECONSULT INTERNATIONAL, 2008: Methanemissionen aus passiv entgasten Deponien und der Ablagerung von mechanisch-biologisch vorbehandelten Abfällen, FKZ: 360 16 015, Dezember 2008 http://www.wasteconsult.de/Methanemissionen_Schlussbericht.pdf

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: + 49 351 2612-0
Telefax: + 49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Steffen Wagner; Heiko Ibold
BIWA Consult GbR, Freiberg
Am St. Niclas Schacht 13, 09599 Freiberg
Telefon: + 49 3731 781-276
Telefax: + 49 3731 781-277
E-Mail: info@biwa-consult.de
Dr. Barbara Zeschmar-Lahl
BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH
Lindenstraße 33, 28876 Oyten
Telefon: + 49 4207 699-838
E-Mail: bzl@bzl-gmbh.de
Manfred Born
Em. Professor der TU Bergakademie Freiberg
E-Mail: Born-Manfred-FG@t-online.de

Redaktion:

Verena Jacobi, Stefan Zinkler
LfULG, Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Wertstoffwirtschaft
Telefon: + 49 351 8928-4100
Telefax: + 49 351 8928-4199
E-Mail: Stefan.Zinkler@smul.sachsen.de

Fotos:

Steffen Wagner, info@biwa-consult.de; Abfallwirtschaftsverband Chemnitz,
Zweckverband Abfallwirtschaft Westsachsen; H. Degenkolb

Redaktionsschluss:

14.02.2013

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.