



KIT SCIENTIFIC REPORTS 7746

Beitrag der Abfallverbrennung zur Energieversorgung in Deutschland

Ulf Richers

Ulf Richers

**Beitrag der Abfallverbrennung zur
Energieversorgung in Deutschland**

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7746

Beitrag der Abfallverbrennung zur Energieversorgung in Deutschland

von
Ulf Richers

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2018 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-9669

ISBN 978-3-7315-0751-2

DOI 10.5445/KSP/1000078583

Kurzfassung

Beitrag der Abfallverbrennung zur Energieversorgung in Deutschland

Die Energieversorgung in Deutschland durchläuft seit einigen Jahren einen großen Wandel, der als Energiewende bezeichnet wird. Diese Veränderungen umfassen neben dem Ausstieg aus der Kernenergie und der verstärkten Nutzung regenerativer Energien ergänzend den Aufbau der entsprechenden Infrastruktur.

Allgemein betreffen Diskussionen zu Energiethemen auch die Abfallwirtschaft. Einen Schwerpunkt bildet hier der Bereich der thermischen Abfallbehandlung, denn Abfallverbrennungsanlagen stellen Wärmeenergie und/oder elektrische Energie bereit.

Insbesondere aktualisierte europäische Vorschriften waren Anlass zu erneuten Betrachtungen über die Energieeffizienz und die Wirkungsgrade von Abfallverbrennungsanlagen. Allerdings bleiben die Beiträge der Abfallverbrennungsanlagen zum gesamten Strom- und Wärmebedarf in der Regel unbeachtet. Dies gilt auch für die Auswirkungen, die sich durch höhere elektrische Wirkungsgrade der Abfallverbrennungsanlagen ergeben. Diese unbeachteten Aspekte sind Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Für ein besseres Verständnis werden zunächst die Grundlagen der Abfallverbrennung und die Wege für eine Steigerung der Energieeffizienz beschrieben. Ein weiterer Abschnitt enthält die wichtigsten Inhalte von bedeutenden Rechtsvorschriften.

Anschließend werden im Rahmen der durchgeführten Berechnungen die Anteile der Abfallverbrennungsanlagen am Primärenergiebedarf und die Beiträge zur Stromversorgung und Wärmebereitstellung bestimmt. Exakte Berechnungen mit Daten der existierenden Abfallverbrennungsanlagen waren nicht möglich, denn u.a. stellen alle Anlagen Unikate dar und unterliegen technischen Änderungen. Aus diesen Gründen werden einfache Szenarien aus Literaturdaten abgeleitet und die möglichen Potenziale bestimmt.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Beiträge von Abfallverbrennungsanlagen sowohl zum Primärenergiebedarf als auch die Potenziale zur Stromversorgung und Wärmeerzeugung sehr gering sind. Auf dieses Ergebnis haben deutliche Verbesserungen bei dem elektrischen Wirkungsgrad nur geringen Einfluss.

Abstract

Contribution of waste incineration to energy supply in Germany

Energy supply in Germany is undergoing a major change, which is referred to as the energy transition. In addition to the nuclear phase-out and the increased use of renewable energies, these changes include the installation of a suitable infrastructure.

In general, discussions on energy issues also concern the field of waste management. In this context, the area of thermal waste treatment plays an important role, as municipal solid waste incinerators (MSWI) provide heat energy or electrical energy.

Especially amendments of European directives again caused attention to focus on energy efficiency and efficiencies of MSWI. So far, contributions of these plants to total electricity and heat supply have been neglected. This also applies to the effects of higher electrical efficiencies of MSWI. These neglected aspects are subject of this publication.

For a better understanding, the basics of waste incineration and possibilities of increasing the energy efficiency are described first. Another section deals with the requirements of important laws and directives.

Subsequent calculations determine the shares of MSWI in the primary energy demand and contributions to the supply of electrical power and heat. Exact calculations based on data from existing MSWI were not possible, as all plants are unique and subject to technical modifications. For these reasons, simple scenarios are derived from literature data and possible potentials are calculated.

As a result, it can be noted that the contributions of MSWI to both primary energy demand and the potential for electricity and heat generation are very low. Significant improvements in electrical efficiency have little influence on this result.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Problem- und Aufgabenstellung.....	7
3	Grundlagen der thermischen Abfallbehandlung.....	9
3.1	Stand der thermischen Abfallbehandlung in Deutschland.....	9
3.2	Abfallverbrennung im Ausland	11
3.3	Aufbau und Funktion einer Abfallverbrennungsanlage.....	13
3.4	Grundlagen zu Energieerzeugung und Wirkungsgradsteigerungen	16
3.4.1	Feuerung.....	19
3.4.2	Kessel	23
3.4.3	Rauchgasreinigung.....	30
3.5	Maßnahmen an großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen	36
3.5.1	Amsterdam	36
3.5.2	Burgau	37
3.5.3	Kassel	38
3.5.4	Mannheim	39
3.5.5	Offenbach.....	41
3.5.6	Stuttgart.....	43
3.5.7	Weitere Standorte im In-und Ausland.....	44
3.6	Zusammenfassung und Erkenntnisse.....	47
4	Rechtliche Grundlagen	49
4.1	Europäische Emissionsrichtlinie.....	49
4.2	BVT-Merkblatt "Waste Incineration"	52
4.3	Europäische Abfallrichtlinie	53
4.4	Bundes-Immissionsschutzrecht	56
4.5	Kreislaufwirtschaftsgesetz.....	59
4.6	Zusammenfassung	62
5	Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung	63
5.1	Energieformen der Energiewirtschaft.....	63
5.2	Basisdaten für die Berechnungen	65
5.2.1	Verbrennungskapazitäten deutscher Abfallverbrennungsanlagen	65
5.2.2	Abfallheizwerte in Deutschland	68
5.3	Beschreibung der Szenarien	73
5.4	Anteil der Abfallverbrennung am Primärenergiebedarf von Deutschland	76
5.5	Potenzial der Abfallverbrennung für den Wärmebedarf.....	79
5.6	Potenzial der Abfallverbrennung für die Stromerzeugung	81
5.7	CO ₂ -Emissionen	85

6 Zusammenfassung	87
Anhang.....	95
Literatur	97

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Aufbau einer Abfallverbrennungsanlage am Beispiel des MHKW Mainz [Martin 2007] (angepasst).....	14
Abbildung 3.2:	Energiewandlungen bei einem Dampfprozess zur Stromerzeugung (ohne Kraftwärmekopplung).....	16
Abbildung 3.3:	Feuerleistungsdiagramm für die Abfallverbrennungsanlage am Standort Eschbach [Höling 2005].	17
Abbildung 3.4:	Ansatzpunkte für eine Effizienzsteigerung bei Abfallverbrennungsanlagen.	18
Abbildung 3.5:	Schematisches Konzept für die Verbrennung auf dem Rost [Scholz 1990].	19
Abbildung 3.6:	Abhängigkeit des Wirkungsgrads vom Luftüberschuss [Gohlke 2008a].....	20
Abbildung 3.7:	Vereinfachtes Schema zur Feuerungsregelung [Keller 2007].....	22
Abbildung 3.8:	Korrosionsprozesse in Abfallverbrennungsanlagen als Funktion der Wandtemperatur der Überhitzerrohre ([Görner 2003], nach [Seier 1998]).	25
Abbildung 3.9:	Prinzip und Montage des Wandüberhitzers [Martin 2013] [Nachreiner 2015].	27
Abbildung 3.10:	Strahlungsüberhitzer im Kesselbereich [Martin 2013].....	28
Abbildung 3.11:	Schematischer Aufbau der Abfallverbrennungsanlage Borsigstraße [MVB 2005].	31
Abbildung 3.12:	Einfluss der Entstickungsanlage auf den elektrischen Wirkungsgrad (VLN: Very-low NO _x Technologie der Fa. Martin, München) [Gohlke 2008b].	32
Abbildung 3.13:	Schematisch Übersicht über das bei Twence installierte Rauchgasreinigungsverfahren (Soda: Na ₂ CO ₃ ; SBC: NaHCO ₃) [Huttenhuis 2016].....	35
Abbildung 3.14:	Wasser-Dampf-Kreislauf am Standort Amsterdam mit Zwischenüberhitzung [Wandschneider 2010].....	37
Abbildung 3.15:	Rauchgasreinigung am Standort Kassel vor (oben) und nach dem Umbau ([Karpf 2011] korrigiert).	39
Abbildung 3.16:	Längsschnitt durch das Müllheizkraftwerk Offenbach [Thomé-K. 1985].....	41
Abbildung 3.17:	Aktuelles Schema des Müllheizkraftwerks Offenbach [EVO 2013].	42
Abbildung 3.18:	Dampfmassenstrom am Austritt eines Müllkessels am Standort Stuttgart vor und nach der Sanierung [Gotschlich 2008].	44
Abbildung 3.19:	Veränderung der Erdgasmengen für die SCR-Anlage an der MVA Bielefeld [Kriete 2004].....	45

Abbildung 3.20:	Vergleich der Maßnahmen zur Steigerung der Stromproduktion [Benz 2009] (Zitiert nach [Keunecke 2016]).	48
Abbildung 4.1:	Flussdiagramm zur Abfallhierarchie nach KrWG [Engler 2015].	61
Abbildung 5.1:	Umwandlung von Energiearten.	64
Abbildung 5.2:	Abfallaufkommen einschließlich gefährlicher Abfälle [UBA DzU 2015].	68
Abbildung 5.3:	Heizwerte für Abfallfraktionen (linke Achse, breite Säulen) und Anteil am Gesamtheizwert (8,4 MJ/kg) des Restmülls (rechte Achse, schmale Säulen) [Marb 2003].	69
Abbildung 5.4:	Auswirkungen der Wertstoffentnahme auf den Heizwert [Förstner 1993].	70
Abbildung 5.5:	Historische Entwicklung der Heizwerte am Standort Mannheim [Albert 1994] (1 MWh/t entspricht 3,6 MJ/kg).	72
Abbildung 5.6:	Zeitliche Veränderung der Heizwerte an der MVA Kassel [Tanner 2008] und an der MVA Frankfurt [Keune 2012].	72
Abbildung 5.7:	Zeitlicher Verlauf der Siedlungsabfallmengen in Deutschland. Eigene Darstellung mit Daten aus [StaBa 2017].	75
Abbildung 5.8:	Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland 1995 - 2016 [AGEB 2017a].	77
Abbildung 5.9:	Prozentuale Anteile der Primärenergieträger am Gesamtverbrauch für 2016, Vorjahr in Klammern. [AGEB 2017a] (Daten im Anhang).	78
Abbildung 5.10:	Verteilung der Wärmeanwendung auf verschiedene Sektoren, eigene Darstellung mit Daten aus [AGEB 2016].	80
Abbildung 5.11:	CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung aus Abfall (fossiler Anteil, eigene Darstellung mit Daten aus [Icha 2016], 2015 geschätzt).	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Dampfparameter deutscher Abfallverbrennungsanlagen.	26
Tabelle 3.2:	Mögliche Steigerung der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen [Benz 2009] (Zitiert nach [Keunecke 2016]).	29
Tabelle 3.3:	Entwicklung der Abgasreinigung bei der EEW Energy from Waste GmbH ([Büchner 2010], Tabelle um Spalten gekürzt).	33
Tabelle 3.4:	Chronologische Zusammenstellung der Veränderungen an der Abfallverbrennungsanlage Kassel (Auswahl).	38
Tabelle 3.5:	Veränderungen am Müllheizkraftwerk Offenbach [EVO-HP 2016] [Füle 2016].	42
Tabelle 3.6:	Beispiele für Wirkungsgrade [Fleck 2005].	46
Tabelle 4.1:	Kriterien für die Ermittlung der besten verfügbaren Techniken (Anhang III [R 2010 75]).	51
Tabelle 4.2:	Ausgewählte Emissionswerte für Abfallverbrennungsanlagen aus dem BVT-Merkblatt "Waste Incineration" [BVT-WI].	53
Tabelle 4.3:	Hierarchiestufen beim Umgang mit Abfällen (Artikel 4 in [R 2008 98]).	54
Tabelle 4.4:	Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen (Auswahl, Tagesmittelwerte [17. BImSchV]).	59
Tabelle 5.1:	Verbrennungskapazität und Anzahl der Standorte für thermische Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland.	66
Tabelle 5.2:	Heizwerte für Siedlungsabfälle.	71
Tabelle 5.3:	Entstehungsorte und Mengen von Kunststoffabfällen Deutschland [Consultic 2016].	74
Tabelle 5.4:	Basisdaten für die Berechnungen.	76
Tabelle 5.5:	In deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken pro Jahr eingesetzte Primärenergiemengen (Siehe Text).	77
Tabelle 5.6:	Anteil der in Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken Primärenergiemengen am Gesamtbedarf (Siehe Text).....	78
Tabelle 5.7:	Brutto-Potenzial der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit vom Kesselwirkungsgrad.	80
Tabelle 5.8:	Zusammenstellung elektrischer Wirkungsgrade von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken.	82
Tabelle 5.9:	Nettopotenzial der Strombereitstellung für die Energiewende durch Abfallverbrennungsanlagen.....	83
Tabelle 5.10:	Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern für das Jahr 2016 [AGEB 2017c].	84

1 Einleitung

Seit einigen Jahren sind die vielfältigen Themenbereiche Energie, Klimaschutz und Ressourcen, die nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können, in der Tagespresse und anderen Medien immer stärker präsent.

Auf internationaler Ebene hat die International Energy Agency (IEA) für die Umgestaltung der Energieversorgung verschiedene Studien [IEA 2011] [IEA 2012] [IEA 2015] veröffentlicht. Die verschiedenen Aktivitäten zur Veränderung der Energieversorgung in Deutschland werden derzeit unter dem Schlagwort "Energiewende" zusammengefasst. Im Mittelpunkt der deutschen Energiewende stehen der Ausstieg aus der Kernenergienutzung aufgrund des Unglücks im japanischen Atomkraftwerk Fukushima und der intensiviertere Einsatz erneuerbarer Energien für einen verbesserten Klimaschutz. Für das Erreichen dieser Ziele wurden von der Bundesregierung, dem Umweltbundesamt und anderen Institutionen zahlreiche Arbeiten [BMWi 2006] [BMWi 2008] [BMWi 2014] [FhG-ISI 2010] [IER RWI ZEW 2009] [Markewitz 2011] [Schüth 2007] publiziert.

Der Beginn der deutschen Energiewende beruht eigentlich nicht auf dem Unglück in Fukushima im März 2011. Den ersten Meilenstein stellt das 1990 verabschiedete Stromeinspeisungsgesetz [StromEinspG] dar, mit dem erstmals Unternehmen aus dem Bereich der Elektrizitätsversorgung zur Abnahme und Vergütung von elektrischer Energie aus regenerativen Quellen verpflichtet wurden. Dieses Gesetz wurde im Jahr 2000 durch die erste Fassung des Gesetzes für den Ausbau erneuerbarer Energien [EEG 2000] abgelöst. Mit diesen Gesetzen begann eine Subventionierung der nicht marktfähigen Wind- und Solarenergie sowie weiteren regenerativen Energietechnologien.

Allerdings darf die Energiewende nicht auf einen Ersatz der konventionellen Kraftwerke, betrieben mit fossilen (Kern-)Brennstoffen, gegen regenerative Stromerzeugungstechniken wie Windkraftwerke oder Photovoltaik-Anlagen beschränkt werden. Zukünftig wird eine durch dezentrale und regenerative Erzeugungsstruktur geprägte Stromversorgung im Vergleich zu zentralen Großkraftwerken an Bedeutung gewinnen. Außerdem ist zu beachten, dass die Integration von elektrischer Energie aus Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen in existierende Stromnetze aufgrund von zeitlichen Schwankungen mit Problemen verbunden ist [Jarras 1980]. Durch ein intelligentes Energiemanagement muss ein Ausgleich zwischen dem Stromverbrauch und der momentanen Eigenerzeugung des dezentralen Versorgungsgebiets in Verbindung mit einem Netzverbund erreicht werden [Schweagerl 2002].

Folglich stellt die Energiewende einen sehr aufwändigen Prozess dar, der neben den verschiedenen Erzeugungstechnologien zusätzlich die gesamte Infrastruktur erfasst. Dazu zählen u.a. die Stromnetze, die Datenerfassung und eine kommunikative Vernetzung der beteiligten Strukturen.

Neben der Umgestaltung der Energieversorgung kommt einem schonenden Umgang mit Ressourcen eine steigende Bedeutung zu. Die Endlichkeit von Rohstoffen, die u.a. durch steigende

Preise bei den seltenen Erden-Metallen deutlich wurde, ist in Arbeiten von internationalen Organisationen [EC 2014] [Moss 2011] [OECD 2010] dargelegt.

Die Entwicklungen in den Bereichen Energie, Klimaschutz und Ressourcenschonung betreffen auch die vielfältigen Diskussionen, die sich auf die unterschiedlichen Zweige der Abfallwirtschaft beziehen [Rummler 2007]. Der Zusammenhang zwischen Ressourcenschonung und der Abfallwirtschaft ergibt sich bereits aus den Abfallmengen. In Deutschland fielen im Jahr 2013 insgesamt etwa 401 Mio. t Abfall an; den größten Anteil mit 209,5 Mio. t bilden Bau- und Abbruchabfälle. Aus privaten Haushalten und kleinen Gewerbebetrieben mussten 2013 insgesamt 51,1 Mio. t Siedlungsabfälle entsorgt werden; zusätzlich entstanden 59,5 Mio. t Produktions- und Gewerbeabfälle. [StaBa 2016]

Darüber hinaus sind die Themenbereiche Energie und Klimaschutz im Bereich der Abfallwirtschaft insbesondere bei der Auswahl von Recyclingverfahren und Entscheidungen hinsichtlich endgültiger Entsorgungswege von Bedeutung.

Allgemein anerkannt ist in diesem Zusammenhang der Klimaschutzbeitrag der Abfallwirtschaft durch ein weitreichendes Deponieverbot [Bogner 2008] [Dehoust 2005] [Dehoust 2010a] [ifeu 2005] [Kost 1999] [Sieck 2006] [UBA 2011] [Wünsch 2010]. Die Limitierungen bei der Ablagerung von Abfällen auf Deponien, die insbesondere zu einer Minderung der sehr klimaschädlichen Methanemissionen aus den Deponien führten, wurden in Deutschland mit Verabschiedung der TA Siedlungsabfall [TA Si] im Jahr 1993 eingeleitet und mit der Abfallablagerungsverordnung [AbfAbIV] zum 1. Juni 2005 endgültig durchgesetzt wurde (Siehe dazu: [Radde 2005]). Die Anforderungen der TA Siedlungsabfall verursachten in Deutschland einen Investitionsboom bei Abfallverbrennungsanlagen [Döing 2013].

Die Abkehr von der Deponierung besitzt nicht nur in den OECD-Ländern ein großes Treibhausminderungspotential, sondern auch in den Schwellen- und Entwicklungsländern Indien und Ägypten [Vogt 2015a] [Vogt 2015b] sowie in Mexiko, Tunesien und der Türkei [UBA 2011].

Als eine Alternative zur Deponierung hat sich in Deutschland und vielen anderen Ländern die Abfallverbrennung als Behandlungsverfahren etabliert. Im Gegensatz zu den 70er und 80er Jahren spielen heute die entsprechenden Anlagen in Folge strenger Vorschriften bei den Emissionen von Dioxinen, Staub, Schwermetallen und anderen Schadstoffen keine Rolle mehr [UBA 2008a], die Emissionsgrenzwerte werden im regulären Betrieb deutlich unterschritten und auch Schadstoffspitzen werden zuverlässig abgefangen [Thomé-K. 2007]. Ferner bewirkt die Abfallverbrennung keine negativen Einflüsse auf die Abfallvermeidung [UBA 2008b] [Martin 2010]. Eine Verbrennung nicht sinnvoll verwertbarer Abfällen ist auch in der Zukunft notwendig [Fleck 2005].

Allerdings ist die thermische Abfallbehandlung als Entsorgungsverfahren bis in die Gegenwart immer wieder Gegenstand von Diskussionen und Untersuchungen, insbesondere im Zusammenhang mit dem Klimaschutz sowie der europäischen Abfall- und Energiepolitik [Ragoßnig 2008]. Dies gilt insbesondere, wenn europäische oder nationale Rechtsvorschriften geändert oder neu erlassen wurden.

Einen großen Schwerpunkt bildeten in der Mitte der 90er Jahre die Vergleiche und die systematische Berechnung von Wirkungsgraden für verschiedene thermische Abfallbehandlungsverfahren, die neben der etablierten Rostfeuerung u.a. zur Einhaltung der Anforderungen aus der TA Siedlungsabfall entwickelt wurden [Barin 1996] [Hellweg 1999] [Mayer 1993] [Nottrodt 1995] [Scholz 1994] [Scholz 1995].

Ebenfalls in den 90er Jahren führte das damals neue Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [KrW-/AbfG] zu einer Untersuchung von thermischen Abfallbehandlungsverfahren hinsichtlich der Abgrenzung zwischen thermischer Verwertung und thermischer Beseitigung [Joschek 1993a] [Joschek 1993b].

Weitere Betrachtungen um eine Abgrenzung zwischen Beseitigung und Verwertung gingen von den Urteilen des Europäischen Gerichtshofs [EUG 228] [EUG 458] aus, die im Jahr 2003 gefällt wurden. Entsprechend diesen Urteilen waren die Einwände luxemburgischer Behörden gegen eine Abfallverbringung in ein anders Mitgliedsland zur Hauptnutzung als Brennstoff (Verwertung) in einer Abfallverbrennungsanlage berechtigt. Außerdem dürfen für die Abgrenzung zwischen Beseitigung und Verwertung andere Kriterien wie z.B. der Heizwert nicht herangezogen werden. Genauere Interpretationen der oben genannten Urteile können der Literatur [Bothe 2003] [Bucht 2003] [Kaminski 2003] [Kriete 2004] [Paschlau 2003] [Pauly 2003] [Scholz 2004] entnommen werden.

Andere Arbeiten beziehen sich auf die umweltbezogene Bewertung der Abfallverbrennung unter verschiedenen Aspekten [Fehrenbach 2007a] [Liamsanguan 2007] oder auf die Modellierung von Abfallverbrennungsanlagen in Ökobilanzen [Ciroth 2002a] [Ciroth 2002b] [Hellweg 2001] [Kremer 1998]. Zusätzlich werden Abfallverbrennungsanlagen in ökologischen Vergleichen [Kägi 2015] [Nürrenbach 2010] [RE 2015 36] [Wollny 2000a] [Wollny 2000a] von Entsorgungswegen für ausgewählte Abfälle berücksichtigt.

In einem auf Nordrhein-Westfalen bezogenen Vergleich von Abfallverbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen erwiesen sich die Parameter Energieeffizienz und Quecksilberemissionen als entscheidend [Both 2005] [Fehrenbach 2007a]. Nach einer Darstellung des Umweltbundesamtes [UBA 2008a] [UBA 2008b] stellen Abfallverbrennungsanlagen beachtliche Mengen an Energie als Strom und Wärme bereit und leisten somit relevante Beiträge zur Energieversorgung. Im Rahmen eines Workshops [Sieck 2006] wurde festgestellt, dass für einen verbesserten Klimaschutz nach Einschränkung der Abfalldeponierung wesentliche Potenziale im Bereich der Abfallverbrennung liegen, indem die thermischen bzw. elektrischen Wirkungsgrade von Abfallverbrennungsanlagen erhöht und entsprechend Kraft-Wärme-Kopplungstechnologien forciert eingesetzt werden. Auf ein großes Verbesserungspotential im Bereich der Energienutzung von Abfallverbrennungsanlagen wird auch in [UBA 2008a] hingewiesen.

Eine Untersuchung zur hochwertigen Verwertung in Abfallverbrennungsanlagen unter Berücksichtigung der Klimarelevanz zeigte ebenfalls eine herausragende Bedeutung der Energienutzung [Fehrenbach 2007b]. Nach Ausführungen in [Scharf 2006] bieten Effizienzsteigerungen bei bestehenden und neuen Abfallverbrennungsanlagen zusätzliche Möglichkeiten für eine nachhaltige Energiewirtschaft. Eine Betrachtung der kommunalen Abfallwirtschaft in Hamburg

hinsichtlich der Möglichkeiten für einen verbesserten Klimaschutz ergab u.a., dass sich eine höhere Energieausbeute in den örtlichen Abfallverbrennungsanlagen stark bemerkbar macht [Dehoust 2010b].

Eine weitere Ursache für die andauernde Diskussion um die Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen bildet die Neufassung der europäischen Abfallrahmenrichtlinie, denn auf Basis eines Referentenentwurfs aus dem Jahr 2005 wurde eine Berechnungsformel für die Energieeffizienz vorgeschlagen [Kühn 2007]. Diese Berechnungsformel, teilweise als "R1-Kriterium" oder "R1-Faktor" bezeichnet, fand Eingang in die Endfassung der im November 2008 verabschiedeten Neufassung der Abfallrahmenrichtlinie [R 2008 98]. Durch diese Formel wird an Hand von in der Richtlinie festgelegten Werten die Abgrenzung zwischen einer thermischen Verwertung und thermischen Beseitigung bestimmt.

Neben der in der Abfallrahmenrichtlinie aufgeführten europäischen Berechnungsformel existieren in einigen europäischen Staaten andere Kennzahlen, die Anreize für die Steigerung der Energieeffizienz bieten sollen [Gohlke 2011]. Genauere Betrachtungen zur Berechnung der energetischen Effizienz von Abfallverbrennungsanlagen können u.a. [Baars 2007] [CUTEC 2016] [Beckmann 2007a] [Beckmann 2007b] [Gohlke 2011] [KRdL 2006] [Löschau 2010] [Reimann 2003] [VDI 3460.2] entnommen werden.

Die Auswirkungen der neuen Abfallrahmenrichtlinie werden auch bei der Standortauswahl neuer Abfallverbrennungsanlagen deutlich. In der Vergangenheit wurden Abfallverbrennungsanlagen überwiegend mit Blick auf die Abfallentsorgung und politische Durchsetzbarkeit errichtet; die Möglichkeiten zur Energienutzung spielten eine untergeordnete Rolle (Siehe u.a. [Fehrenbach 2007b] [UBA 2008b]). Diese gilt insbesondere für Anlagen, die aus Angst vor Protesten von der Bevölkerung auf der grünen Wiese errichtet wurden, wo sich die Energienutzung auf die Stromerzeugung reduziert. Erst seit einigen Jahren kommt beim Anlagenneubau der Energieeffizienz und damit auch dem Energiegeschäft eine deutlich größere Bedeutung zu. [Döing 2014]

Relativ aktuelle Arbeiten [Dehoust 2015a] [Dehoust 2015b] betrachten u.a. die zukünftigen Veränderungen durch die Energiewende hinsichtlich der Abfallverbrennung als Teil der Kreislaufwirtschaft. Entsprechend der Strategie der Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA) wird zukünftig eine Grundlaststromerzeugung durch Kraftwerke und Abfallverbrennungsanlagen immer weniger benötigt werden [ASA 2016] [Grundmann 2016].

Zukünftig ist davon auszugehen, dass bei der Auftragsvergabe von öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern für die Entsorgung kommunale Abfallmengen die Energieeffizienz des Entsorgungsverfahrens eine große Bedeutung haben wird [Knapp 2012]. Verschiedene Betreiber von Abfallverbrennungsanlagen weisen bereits darauf hin, dass ein hoher Energieeffizienzfaktor entsprechend der Abfallrahmenrichtlinie [R 2008 98] erreicht worden ist [RE 2013 28] [RE 2015 19] [RE 2015 26]. Entsprechende Zertifikate werden von den Betreibern im Internet zur Verfügung gestellt.

Die zunehmenden Diskussionen um den Klimaschutz werden im Zusammenhang mit der Abfallverbrennung an weiteren Stellen deutlich. In Nordrhein-Westfalen verabschiedete der Landtag einen Klimaschutzplan, in dem u.a. eine verbesserte Abwärmenutzung bei Abfallverbrennungsanlagen besser untersucht werden soll [RE 2015 52].

2 Problem- und Aufgabenstellung

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass die Abfallwirtschaft im Zusammenhang mit der Ressourcenproblematik, Klimaschutz und Energie seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand verschiedener und zugleich umfangreicher Diskurse ist.

Im Fall der Abfallverbrennung, die als ein Entsorgungsverfahren Teil der Abfallwirtschaft ist, haben derzeit die Themenbereiche Energie und Klimaschutz aus zwei Gründen einen hohen Anteil an den Diskussionen. Einerseits geht es um die Erfüllung der Anforderungen aus der europäischen Abfallrahmenrichtlinie hinsichtlich der Energieeffizienz und damit Einstufung als Verwertungsverfahren. Den zweiten Grund bilden mögliche Beiträge der Abfallverbrennung zur Energiewende und Klimaschutz. Hier ist zu beachten, dass der Neubau von Abfallverbrennungsanlagen aufgrund der Einschränkung bei der Deponierung eine Zunahme der CO₂-Emissionen verursacht.

Der Umfang der diesbezüglichen Diskussionen führt zu dem Eindruck, dass Abfallverbrennungsanlagen durch Bereitstellung von elektrischer Energie und Wärme maßgebliche Beiträge zur Energieversorgung und zum Klimaschutz liefern können. Hier hat insbesondere die Verbesserung der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen durch die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrads einen großen Anteil.

Dem entgegen sind aus wissenschaftlichen Publikationen und Studien keine exakten Angaben über mögliche Beiträge von Abfallverbrennungsanlagen zur Energieversorgung zu entnehmen; es fehlen insbesondere detaillierte Aussagen zu den Auswirkungen der viel diskutierten Effizienzsteigerung von Abfallverbrennungsanlagen auf die Energieversorgung.

Die möglichen Beiträge sollen in der vorliegenden Arbeit genauer untersucht werden. Diese Aufgabenstellung lässt sich vor dem Hintergrund der Ausführungen in Kapitel 1 in zwei Bereiche aufteilen.

Der erste Bereich umfasst den Beitrag der Abfallverbrennung zum Primärenergieverbrauch sowie zum Strom- und Wärmebedarf. Dagegen liegt der Schwerpunkt des zweiten Bereichs auf den technischen Details, in dem die Auswirkungen einer verbesserten Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen in Beziehung zum gesamten Energie- bzw. Stromverbrauch gesetzt werden.

Die durchgeführten Arbeiten beschränken sich auf die möglichen Beiträge zur Energieversorgung in Deutschland. Nicht behandelt werden die Auswirkungen der Energiewende auf Abfallverbrennungsanlagen, wie beispielsweise die wirtschaftlichen Auswirkungen durch Veränderung der Strompreise aufgrund der immer weiter zunehmenden Einspeisung von Wind- und Solarstrom. Weitere Informationen zu möglichen Vorteilen einer Flexibilisierung der Stromerzeugung findet man in [Huneke 2017] und [Treder 2016b]. Außerdem werden zusätzliche abfallwirtschaftliche Maßnahmen wie Aufbereitungs- oder Recyclingprozesse nicht erfasst, denn es würde eine erweiterte Systemdefinition mit einem erheblich größeren Bilanzraum

entstehen. Eine Einführung in diese Thematik mit verschiedenen Beispielen findet man z.B. in [Scholz 2006].

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die theoretischen Grundlagen erläutert, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit als Basis erforderlich sind. In Kapitel 3 wird die Technik der Abfallverbrennung einschließlich Energienutzung und Rauchgasreinigung beschrieben. Der Inhalt von Kapitel 4 umfasst die Vorstellung von europäischen und nationalen Rechtsvorschriften, die für die Abfallwirtschaft und den Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen wichtig sind.

Kapitel 5 enthält die berechneten Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung einschließlich der genutzten Basisdaten für die Berechnungen. Die Berechnungen erfolgen anhand einfacher Szenarien, denn alle deutschen Abfallverbrennungsanlagen sind unterschiedlich aufgebaut und unterscheiden sich in der Energienutzung. In einzelnen Abschnitten werden die Anteile am Primärenergiebedarf, an der Wärmebereitstellung und an der Stromerzeugung betrachtet. Die erarbeiteten Erkenntnisse werden abschließend in Kapitel 6 zusammengefasst.

3 Grundlagen der thermischen Abfallbehandlung

In diesem Kapitel wird in einem ersten Abschnitt der aktuelle Stand der thermischen Abfallbehandlung in Deutschland beschrieben; anschließend erfolgt eine kurze Darstellung der weltweiten Entwicklungen.

Im dritten Abschnitt wird der technische Aufbau von Abfallverbrennungsanlagen mit Rostfeuerung am Beispiel einer deutschen Anlage beschrieben. Die Technologie der Rostfeuerung wird nicht nur in Deutschland, sondern weltweit eingesetzt; der Marktanteil bei der Vergabe von Neubauten zur thermischen Behandlung von Abfällen in Europa lag im Zeitraum von 2010 bis 2013 bei über 95 % [Martin 2013].

Alle deutschen Abfallverbrennungsanlagen¹ sowie die Mehrzahl der Ersatzbrennstoff-Kraftwerke sind mit einer Rostfeuerung ausgerüstet, so dass sich ein sehr ähnlicher Aufbau ergibt. Eine separate Beschreibung von Ersatzbrennstoff-Kraftwerken ist somit nicht erforderlich; auf Ersatzbrennstoff-Kraftwerke mit einer Wirbelschichtfeuerung wird nicht eingegangen.

Der vierte Abschnitt umfasst die Grundlagen der Energieerzeugung und mögliche Maßnahmen zu Wirkungsgradsteigerungen im Zusammenhang mit der Abfallverbrennung. Abschließend werden entsprechende Maßnahmen für ausgewählte Standorte von Abfallverbrennungsanlagen im In- und Ausland vorgestellt.

3.1 Stand der thermischen Abfallbehandlung in Deutschland

Ursprünglich wurden Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland für die Verbrennung von Hausmüll und ähnlichen Abfällen errichtet, die im Rahmen der öffentlichen Müllabfuhr gesammelt werden.

Diese Situation hat sich aufgrund von verschiedenen abfallwirtschaftlichen Maßnahmen in der Vergangenheit verändert. Zu diesen Maßnahmen gehören beispielsweise die separate Sammlung von Verpackungen oder die Einschränkung der Abfalldeponierung in Verbindung mit der Einführung der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA-Anlagen). Außerdem wurden Rechtsvorschriften für spezielle Abfälle erlassen wie die Gewerbeabfallverordnung [GewAbfV] oder die Altholzverordnung [AltholzV]. Demgemäß werden in deutschen Abfallverbrennungsanlagen heute neben (unsortiertem) Hausmüll ("gemischte Siedlungsabfälle") zusätzlich unterschiedliche Fraktionen entsorgt, die u.a. aus Hausmüll abgetrennt wurden. Der

¹ Die Pyrolyseanlage am Standort Burgau wird nicht mehr betrieben [Meier 2015].

Anteil des gemischten Siedlungsabfalls an den in deutschen Abfallverbrennungsanlagen² verbrannten Abfällen lag in der Vergangenheit zwischen 57,2 % (2012) und 53,8 % (2014) [RE 2015 24].

Andererseits nahm aufgrund der Liberalisierung der Stromversorgung und steigender Energiepreise das Interesse an einer energetischen Nutzung der unterschiedlichen Fraktionen aus Hausmüll und ähnlichen Abfällen in der Vergangenheit zu. Diese Fraktionen, zusammenfassend als Sekundärbrennstoffe oder Ersatzbrennstoffe bezeichnet, werden heute in unterschiedlichen thermischen Prozessen eingesetzt. Dazu zählen insbesondere Kohlekraftwerke zur Stromerzeugung oder Wärmebereitstellung, Anlagen zur Zementherstellung und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke, die speziell für den Einsatz von aufbereiteten Abfallfraktionen errichtet wurden. Somit können Abfallverbrennungsanlagen heute nicht mehr eindeutig von anderen Feuerungsanlagen abgegrenzt werden.

Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke weisen neben dem erwähnten ähnlichen Aufbau eine weitere Gemeinsamkeit bei den Anforderungen an die Emissionen in die Atmosphäre auf, denn beide Anlagentypen unterliegen der 17. BImSchV (Siehe Abschnitt 4.4).

Infolgedessen bezeichnet die "Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland" (ITAD) Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke zusammenfassend als "Thermische Abfallbehandlung" [Treder 2015a] [Treder 2015b]. Ergänzend zeigt die Erweiterung des Abfallannahmekatalogs für das Industriekraftwerk Rüdersdorf hinsichtlich nicht vorbehandelter Siedlungsabfälle [RE 2016 22], dass die Unterschiede zwischen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken zunehmend geringer werden.

In der vorliegenden Arbeit werden als Abfallverbrennungsanlagen diejenigen Standorte verstanden, die entsprechend der Liste vom Umweltbundesamt [UBA MVA 2008] größtenteils Siedlungsabfälle verbrennen. Als Ersatzbrennstoff-Kraftwerke werden Anlagen bezeichnet, die überwiegend Ersatzbrennstoffe einsetzen.

Alternative Technologien zur thermischen Abfallbehandlung, bei denen eine Pyrolyse oder eine Vergasung den zentralen Behandlungsschritt darstellen, konnten sich in Deutschland am Markt nicht etablieren. Dazu gehören Thermoselect (Siehe z.B. [Schweitzer 1994]), das Schwelbrenn-Verfahren von der Firma Siemens (Siehe z.B. [Berwein 1990] [Baumgärtel 1993] [Richers 1996]), das Konversionsverfahren der Firma Noell (Siehe z.B. [Lorson 1994] [Scholz 2001]) und das RCP-Verfahren (Siehe z.B. [Brunner 1996] [Scholz 2001]), das von der Firma Von Roll Umwelttechnik entwickelt wurde. In [Barin 1996] und [Kaimer 1999] werden hinsichtlich von Entscheidungsprozessen für neue thermische Abfallbehandlungsanlagen neben der etablierten Rostfeuerung die alternativen Technologien berücksichtigt. Übersichten zu Pyrolyse- und Vergasungsverfahren findet man in [Blume 1988] [Gleis 2011a] [Gleis 2011b].

Außerdem ergab eine aktuelle Analyse von alternativen thermischen Verfahren, dass für gemischte Siedlungsabfälle eine Abfallverbrennungsanlage mit effizienter Energienutzung unter

² Vermutlich beziehen sich diese Angaben auf die Standorte, die von der Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD) vertreten werden.

wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten die derzeit überzeugendste Lösung darstellt [Quicker 2015] [Quicker 2017].

Nicht erfasst werden im Rahmen dieser Arbeit die Sonderabfallverbrennungsanlagen, die in Deutschland an 10 Standorten betrieben werden [Neuss 2017]. An Stelle einer Rostfeuerung sind diese Anlagen mit einer Drehrohrfeuerung, kombiniert mit Nachbrennkammer und Kessel ausgerüstet. Die Verbrennungskapazität dieser Anlagen, die teilweise zu Standorten der chemischen Industrie gehören, beträgt etwa 1,5 Mio. Tonnen pro Jahr [Neuss 2017]. Nähere Informationen zu diesen Anlagen und der Feuerungstechnik findet man in der Literatur [Richers 1995] [Thomé-K. 2009a] [Suchomel 2016].

3.2 Abfallverbrennung im Ausland

Die thermische Behandlung von Abfällen ist nicht nur für die deutsche Abfallwirtschaft von Bedeutung, sondern wird global zunehmend eingesetzt. Im Jahr 2015 waren weltweit über 2200 Abfallverbrennungsanlagen mit einer jährlichen Behandlungskapazität von etwa 280 Mio. t in Betrieb [RE 2015 36a] [Döing 2015]. Davon wurden im Zeitraum zwischen 2007 und 2013 knapp 300 Anlagen neu errichtet [Döing 2014]. In den Jahren 2015 und 2016 gingen 128 neue Abfallverbrennungsanlagen in Betrieb; Asien war die wichtigste Wachstumsregion [RE 2016 48]. Mit der weltweiten Vergabe von Aufträgen für Abfallverbrennungsanlagen mit einer Gesamtverbrennungskapazität von 88.300 Tonnen pro Tag wurde 2016 ein neuer Höchststand erreicht [RE 2017 18].

Die wichtigste Ursache für diese Entwicklung, insbesondere in sehr großen Städten, ist die Verknappung von Deponiekapazitäten, so dass eventuell vorhandene Flächen im Umland für neue Deponien nur mit langen Transportwegen erreichbar sind [Döing 2014].

In China, wo ein Großteil der Siedlungsabfälle derzeit noch ohne Vorbehandlung deponiert wird, steigt der Anteil der Abfallverbrennung an der Abfallentsorgung. Die Abfallverbrennung wird als bevorzugte Technologie angesehen, so dass neuen Projekten eine starke politische und administrative Unterstützung zukommt [Nebocat 2012]. Außerdem wird Abfall verstärkt als Energiequelle erkannt [Nelles 2015]. In der Zeit von 2001 bis 2008 stieg die Anzahl der Verbrennungsanlagen von 36 auf 74 [Buekens 2011], und im Zeitraum von 2008 bis 2011 wurde über 50 % der weltweit vergebenen Aufträge für neue Abfallverbrennungsanlagen in China abgeschlossen [Martin 2013]. Im Jahr 2012 wurden 19 Anlagen in Betrieb genommen [Döing 2014], so dass insgesamt 134 Anlagen in Betrieb waren [Nelles 2015]. Der Anlagenbauer Martin in München berichtet im Juni 2016 über den Eingang von sechs Aufträgen für den Neubau von Abfallverbrennungsanlagen in China, die in Kooperation mit chinesischen Unternehmen errichtet werden [RE 2016 25].

Abweichend zu europäischen Siedlungsabfällen weisen Abfälle in China aufgrund eines hohen Organik- bzw. Wasseranteils mit 4 bis 6 MJ/kg oft nur einen sehr niedrigen Heizwert auf, so dass eine Stützfeuerung mit heizwertreichen Brennstoffen erforderlich werden kann [Gablinger 2005] [Nebocat 2012] [Nelles 2015] [Sohlenthaler 2003].

Seit über 100 Jahren werden in Japan Abfälle thermisch behandelt, denn in Folge der geographischen Verhältnisse mit vielen Bergen in Verbindung mit einer hohen Bevölkerungsdichte ist die Verfügbarkeit von nutzbaren Flächen auch für die Deponierung von Abfällen stark eingeschränkt [Krämer 2010] [Vehlow 2004]. Folglich entstehen bei der Deponierung hohe Kosten [Eyssen 2011].

Die thermische Behandlung erfolgte in Japan zunächst in sehr kleinen Anlagen, die nicht kontinuierlich und oft ohne Kessel zur Energienutzung betrieben wurden [Krämer 2010] [Vehlow 2004]. Eine Energienutzung fand in Japan früher nur an Großanlagen statt, die an kleinen, diskontinuierlich betriebenen Verbrennungsanlagen ökonomisch nicht umsetzbar ist [Vehlow 2015]. Eine effiziente Nutzung der Energie bei der thermischen Abfallbehandlung wird in Japan mit dem Abfallgesetz aus dem Jahr 2000 gefordert, so dass Neuanlagen eine Energienutzung aufweisen müssen [Vehlow 2015]. Die Anzahl der Anlagenstandorte ging in Japan von 1998 bis 2010 um mehr als 30 % zurück [Döing 2014].

Der entstandene Markt für Abfallverbrennungsanlagen in Asien führte zur Übernahme von europäischen Anlagenbauern durch asiatische Konzerne. Die Firma Von Roll aus der Schweiz gehört zu Hitachi Zosen, das belgische Unternehmen Seghers ist ein Teil der Firma Keppel aus Singapur und der deutsche Anlagenbauer Lentjes wurde von Doosan aus Südkorea übernommen. Außerdem erfolgte eine Übernahme von europäischen Anlagenbetreibern durch chinesische Unternehmen. [Döing 2013]

Die Bedeutung der thermischen Abfallbehandlung nimmt auch in Kanada zu, wo die Städte und Gemeinden aufgrund von Forderungen der Provinzverwaltungen weniger Hausmüll auf Deponien entsorgen sollen [Alex 2015].

In Europa war Situation bezüglich der thermischen Abfallbehandlung in den einzelnen Mitgliedsstaaten sehr unterschiedlich. Beispielsweise wurden in Belgien, Österreich, Luxemburg, Dänemark und Deutschland bereits vor den europäischen Initiativen Rechtsvorschriften erlassen, die eine umwelt- und ressourcenschonende Abfallwirtschaft einschließlich einer Einschränkung der Deponierung gewährleisten sollten. Dagegen wiesen andere Länder wie Großbritannien, Frankreich, Spanien, Italien und Griechenland bei der Siedlungsabfallentsorgung hohe Deponierungsraten auf. Im Rahmen einer Hochrechnung für die Erfüllung der abfallpolitischen Ziele der Europäischen Union wurde ein Bedarf von 180 zusätzlichen Abfallverbrennungsanlagen mit einer Verbrennungskapazität von 50 Mio. Tonnen ermittelt [RE 2016 16].

In Polen war im Jahr 2009 nur eine Abfallverbrennungsanlage am Standort Warschau in Betrieb, so dass 90 % der Siedlungsabfälle deponiert werden mussten [Zunft 2009]. Es wurden ca. 20 Abfallverbrennungsanlagen geplant, von denen bis zum Jahresende 2015 drei Anlagen an den Standorten Bialystok, Konin und Bydgoszcz durch Übergabe an den Auftraggeber den Regelbetrieb aufgenommen haben [RE 2016 3].

In der Schweiz sind aufgrund der zunehmenden Bevölkerungsentwicklung zukünftig vier bis fünf neue Abfallverbrennungsanlagen notwendig [RE 2015 36b]. In Italien besteht vor dem Hintergrund verschiedener Klagen vor dem Europäischen Gerichtshof bei der Verbrennungs-

kapazität für Abfälle ein zusätzlicher Bedarf im Bereich von 1,8 Mio. Jahrestonnen [RE 2016 46].

In Großbritannien wurden in der Vergangenheit veraltete Abfallverbrennungsanlagen aus den 1960er und 1970er Jahren stillgelegt, denn aktuelle Anforderungen aus europäischer Richtlinien konnten nicht erfüllt werden [Lohe 2004]. In der Folge wurden 2001/2002 etwa 80 % des Hausmülls auf Deponien abgelagert [Lohe 2004]. Aufgrund der Anforderungen aus der europäischen Deponierichtlinie und einer Strafsteuer für die Deponierung von Siedlungsabfällen entstand in Großbritannien ein hoher Bedarf an thermischen Abfallbehandlungskapazitäten [Zunft 2009]. Eine entsprechende Infrastruktur wird derzeit aufgebaut [Döing 2014].

Abweichend zu der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Situation in Deutschland spielen heute neue Verfahren, die auf Pyrolyse- oder Vergasungstechniken aufbauen, insbesondere in England, erneut eine zunehmende Rolle [Vaccani 2015]. Einen wesentlichen Grund für diese Entwicklungen stellt die höhere Energieeffizienz dar, wenn mit dem im Verfahren entstehenden Synthesegas mit Turbinen oder Gasmotoren Strom erzeugt wird [Vaccani 2015]. Es bleibt abzuwarten, inwiefern sich diese neuen Behandlungstechnologien am Markt etablieren können.

3.3 Aufbau und Funktion einer Abfallverbrennungsanlage

Die Abfallverbrennung begann in Deutschland mit der Anlage in Hamburg am Bullerdeich, deren vollständige Inbetriebnahme zum 1. Januar 1896 abgeschlossen war [Franck 1997]. In den 20er Jahren des vergangenen Jahrhunderts begann auf der Basis von Erfahrungen mit ballastreichen Brennstoffen wie Kohle die Entwicklung von kontinuierlich arbeitenden Rostsystemen für die Abfallverbrennung [Reimann 1992a]. Eine Übersicht über den Stand der Technik in den 60er Jahren findet man in [Heigl 1968], weitere Zusammenstellungen und detaillierte Informationen sind in [Hämmerli 1991] [Kranert 2010] [Reimann 1992a] [Reimann 1992b] [Thomé-K. 1994] enthalten. Die technische Planung einer Abfallverbrennungsanlage ist grundlegend in [Wandschneider 2012] beschrieben.

Abfallverbrennungsanlagen werden heute kontinuierlich im Schichtbetrieb über 24 Stunden an sieben Tagen in der Woche betrieben. In Abbildung 3.1 (S.14) ist der Aufbau einer modernen Abfallverbrennungsanlage schematisch am Beispiel des Müllheizkraftwerks Mainz dargestellt.

Die in der Anlieferungszone (1) eintreffenden Sammelfahrzeuge entladen die gesammelten Abfälle in den Müllbunker (2) zur Brennstoffbereitstellung. Am Müllbunker sind in Abhängigkeit vom Standort mechanische Vorrichtungen zur Abfallzerkleinerung installiert (In Abbildung 3.1 nicht bezeichnet). Mit einer Krananlage (3) werden die angelieferten Abfälle gemischt und über den Aufgabetrichter (4) der Verbrennung zugeführt, die im Feuerraum (5) bei Temperaturen im Bereich um 1000 °C auf einem Rost stattfindet. Die Zuführung der Verbrennungsluft erfolgt sowohl von unten durch kleine Öffnungen im Rost (Primärluft) als auch von den Seiten des Feuerraums oberhalb des Rostes (Sekundärluft).

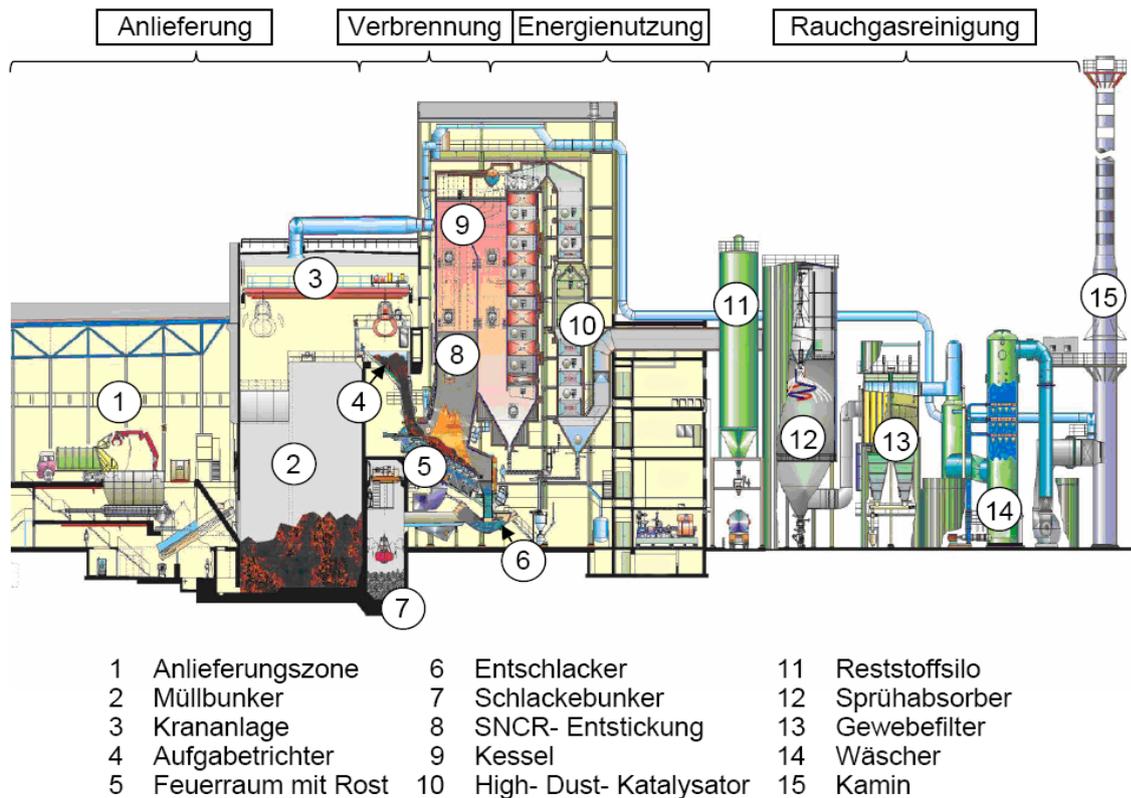


Abbildung 3.1: Aufbau einer Abfallverbrennungsanlage am Beispiel des MHKW Mainz [Martin 2007] (angepasst).

Mit Hilfe von beweglichen Rostsegmenten wird Abfall während der Verbrennung durchmischt und gleichzeitig zum Ende des Rostes transportiert. Am Rostende fällt der Verbrennungsrückstand, als Schlacke oder Rostasche bezeichnet, in den Entschlacker (6) und wird mit mechanischen Fördereinrichtungen dem Schlackebunker (7) zugeführt. Eine Zusammenstellung der Anforderungen an Rostsysteme sowie eine Beschreibung der Vorgänge in Rostfeuerungen findet man in [Urban 1990].

Die bei der Verbrennung gebildeten Rauchgase werden nach oben aus dem Feuerraum abgeführt und durchströmen den Kessel³ (9) zur Abgabe der erzeugten Wärmeenergie an den Wasser-Dampf-Kreislauf. Der im Kessel erzeugte Dampf, für den als Dampfparameter 40 bar und 400 °C angegeben werden [Syring 2000], wird am Standort Mainz auf einem speziellen Weg genutzt: Der überwiegende Anteil wird an das 400-MW-Gas- und Dampfturbinenkraftwerk in der Nachbarschaft zur Stromerzeugung abgegeben; außerdem ist eine kleine Turbine zur Eigenstromerzeugung installiert (In Abbildung 3.1 nicht dargestellt) [Martin 2007]. Das Gas- und Dampfturbinenkraftwerk wird in [Jopp 2005] erläutert.

Am MHKW Mainz sind für die Abscheidung von den unterschiedlichen Schadstoffen aus dem Rauchgas nach [Syring 2000] [Fischer 2005] verschiedene Reinigungsstufen installiert. Zu-

³ In der Literatur existiert keine eindeutige Abgrenzung für den Begriff Kessel. Als Kessel wird auch die Kombination aus Dampferzeuger und Feuerung aufgefasst.

nächst werden die Stickoxide bereits im Kesselbereich mit einer Kombination aus der selektiven nichtkatalytischen Reduktion (Abbildung 3.1 (8) SNCR-Entstickung) und der selektiven katalytischen Reduktion (Abbildung 3.1 (10) High-Dust-Katalysator) aus dem Rauchgas entfernt.

Anschließend werden in einer Kombination aus Sprühabsorber (12) und Gewebefilter (13) mit einer Kalkmilch-Suspension die sauren Schadstoffe (SO_2 , HCl , HF) aus dem Rauchgas abgetrennt. Eine Zugabe von Aktivkoks in den Rauchgasstrom vor dem Gewebefilter ermöglicht zusätzlich die Abscheidung von Dioxinen⁴ und Quecksilber. Die letzte Rauchgasreinigungsstufe vor dem Kamin bildet ein Wäscher (14) zur weiteren Abscheidung von noch im Rauchgas verbliebenen Schadstoffen.

Insgesamt stellen großtechnische Abfallverbrennungsanlagen wie viele andere industrielle Prozessanlagen komplexe verfahrenstechnische Anlagen dar, für deren Betrieb heute elektronische Leitsysteme eingesetzt werden. Diese Leitsysteme stellen komplexe Systeme aus Hard- und Software dar, mit denen der Anlagenbetrieb überwacht und gesteuert wird. Den Mittelpunkt des Leitsystems bildet die Leitwarte⁵ (In Abbildung 3.1 nicht dargestellt), wo die verfahrenstechnischen Informationen und Messwerte zusammengeführt und visualisiert werden.

Die beschriebene Abfallverbrennungsanlage am Standort Mainz stellt allerdings nur ein Beispiel dar. Eine genauere Betrachtung der deutschen Abfallverbrennungsanlagen zeigt, dass es sich bei allen Anlagen um Unikate handelt. Die Unterschiede betreffen die Gestaltung des Feuerraums, die Rostkonstruktion und den Kessel. Zahlreiche Varianten existieren für die Energienutzung, die insbesondere vom Anlagenstandort abhängt (Siehe [Fehrenbach 2007b]).

Neben der am Standort Mainz installierten Dampfabgabe erfolgt an vielen Anlagen eine kombinierte Strom- und Wärmebereitstellung (Kraft-Wärme-Kopplung). Fehlen Fernwärmenetze oder andere Möglichkeiten zur Wärmenutzung, beschränkt sich die Energienutzung auf die Stromerzeugung. Wie bereits oben im Text erwähnt, wurden für Abfallverbrennungsanlagen hinsichtlich der Energienutzung nicht immer vorteilhafte Standorte ausgewählt. Beispielsweise war der optimale Standort für die Müllverbrennungsanlage Rugenberger Damm in Hamburg politisch nicht durchsetzbar [Zwahr 2001].

Außerdem gibt es große Abweichungen beim Aufbau der Rauchgasreinigungsanlagen, denn es gibt keinen einheitlich festgelegten Stand der Rauchgasreinigungstechnik [Schulteß 2007]. Nach [Fuchs 2013] geben Projektrelevante Kriterien den Ausschlag für die Auswahl der Rauchgasreinigungstechnik. Oft unterscheiden sich auch die einzelnen Verbrennungslinien an einem Standort.

Eine umfangreiche Beschreibung von Rauchgasreinigungstechnologien findet man in [Löschau 2014] [VDI 3460.1]. In [Mosch 1985] findet man Auslegungsdaten und eine Beschreibung der Verfahren für die Abscheidung saurer Schadstoffe. Ein ökobilanzieller Ver-

⁴ Diese umgangssprachliche Bezeichnung umfasst insgesamt 75 polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und 135 polychlorierte Dibenzofurane.

⁵ Die Leitwarte wird auch als Warte oder Leitstand bezeichnet.

gleich von historischen mit modernen Rauchgasreinigungsanlagen wurde von Damgaard [Damgaard 2010] publiziert.

Die Ursachen für die genannten Unterschiede sind vielfältig. Einerseits werden Abfallverbrennungsanlagen am Markt von unterschiedlichen Firmen angeboten, die - teilweise durch Patente bedingt - jeweils eigene Konstruktionskonzepte einsetzen. Dies gilt insbesondere für die Gestaltung der Feuerräume, Kessel sowie die Rostkonstruktionen.

Andererseits werden bestehende Abfallverbrennungsanlagen an den technischen Fortschritt angepasst oder durch Nachrüstungen ertüchtigt, um verschärfte Emissionsgrenzwerte einhalten zu können. Außerdem sind insbesondere bei älteren Anlagen umfangreiche Instandhaltungsmaßnahmen erforderlich [TR 2013]. Folglich kommt es an Abfallverbrennungsanlagen während der Betriebszeit, die mehrere Jahrzehnte umfasst, zu ständigen Veränderungen der eingesetzten Technik.

In den nachfolgenden Abschnitten werden mit Blick auf die Energieeffizienz der Abfallverbrennungsanlagen die technischen Varianten der einzelnen Anlagenteile vorgestellt und anschließend mit Hilfe von ausgewählten technischen Beispielen genauer erläutert.

3.4 Grundlagen zu Energieerzeugung und Wirkungsgradsteigerungen

Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke sind wie konventionelle Kohlekraftwerke den Dampfkesselanlagen zuzuordnen, in denen die Energienutzung auf dem Dampfprozess beruht. In Abbildung 3.2 ist der Dampfprozess mit den einzelnen Energieumwandlungen für die Stromerzeugung vereinfacht dargestellt.

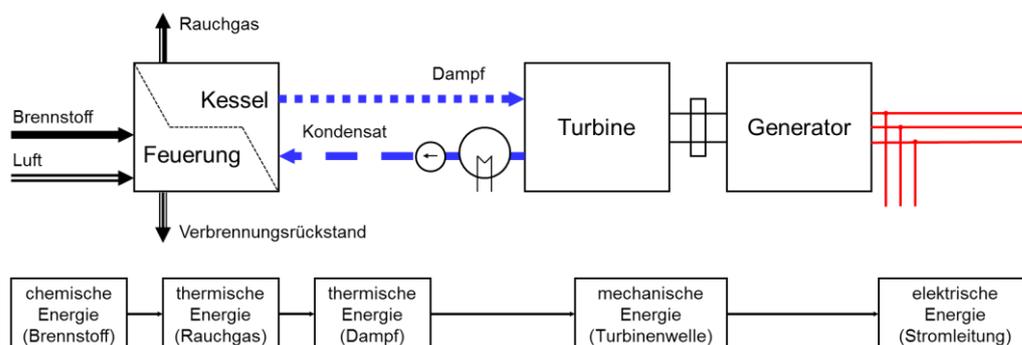


Abbildung 3.2: Energieumwandlungen bei einem Dampfprozess zur Stromerzeugung (ohne Kraftwärmekopplung).

Entsprechend Abbildung 3.2 wird bei einem Dampfprozess der Brennstoff in einer Feuerung verbrannt. Allgemein verfügt eine Feuerung über Einrichtungen zur Brennstoffzuführung, Verbrennungsluftzuführung, einen Raum für die eigentliche Verbrennung sowie eine Rauchgasabführung. Ferner ist in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff zumeist eine Austragsvorrichtung für Verbrennungsrückstände notwendig.

Durch die Verbrennung in der Feuerung wird die im Brennstoff gespeicherte chemische Energie in thermische Energie überführt, die anschließend in den heißen Rauchgasen enthalten ist. Als Maß für die im Brennstoff gespeicherte chemische Energie dient der Heizwert H , der die maximal nutzbare Wärmemenge ohne Wasserdampfkondensation beschreibt.

Die thermische Energie der Rauchgase wird im Kessel über mehrere Wärmetauscher an den Wasser-Dampf-Kreislauf zur Dampferzeugung abgegeben. Anschließend wird die thermische Energie des Dampfes in der Turbine in mechanische Energie (Rotation der Turbinenwelle) transformiert, die dann zum Antrieb des Generators genutzt wird. Im Generator wird die mechanische Energie abschließend in elektrische Energie umgeformt.

Der aus der Turbine austretende Dampf wird kondensiert und als Speisewasser dem Kessel erneut zugeführt. Allgemein gilt, dass bei alleiniger Stromerzeugung mit einer Turbine, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, die Verdampfungsenergie des dem Kessel zugeführten Speisewassers nicht oder nur in sehr geringen Anteilen genutzt werden kann und als Systemverlust zu betrachten ist.

Die Auslegung und Konstruktion von Feuerung, Kessel und Turbine ist aufeinander abgestimmt. Die thermische Leistung einer Abfallverbrennungsanlage ergibt sich aus dem Abfallheizwert und der verbrannten Abfallmenge. Der Zusammenhang zwischen dem Abfalldurchsatz und der thermischen Leistung wird durch das Feuerleistungsdiagramm beschrieben. In Abbildung 3.3 ist das Feuerleistungsdiagramm für die Abfallverbrennungsanlage am Standort Eschbach bei Freiburg dargestellt.

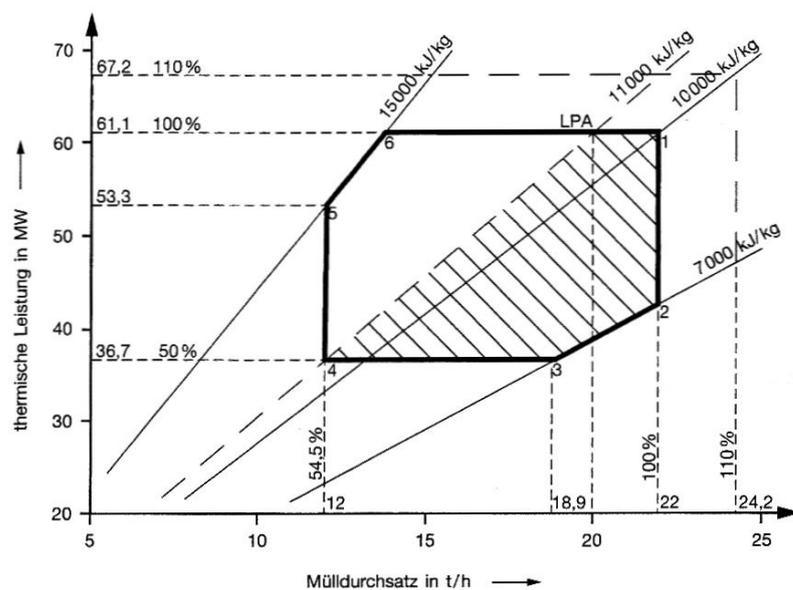


Abbildung 3.3: Feuerleistungsdiagramm für die Abfallverbrennungsanlage am Standort Eschbach [Höling 2005].

Die Anlage am Standort Eschbach ist konstruiert für Betriebspunkte, die durch die Fläche mit den Punkten 1 bis 6 beschrieben wird. Ursprünglich ausgelegt war die Anlage für die Verbrennung

von 20 Tonnen pro Stunde und einen Abfallheizwert 11 MJ/kg. Entsprechend späteren Betriebserfahrungen wies der verbrannte Abfall nur einen Heizwert von 9,5 MJ/kg auf, so dass die maximale thermische Leistung (61,1 MW) mit dem größtmöglichen Abfalldurchsatz (22 t/h) nicht erreicht wurde [Höling 2005].

Für einen umfassenden Überblick über die Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung in einer Abfallverbrennungsanlage reicht eine Betrachtung der Energiewandlungen im Dampfprozess allerdings nicht aus. Es ist der verfahrenstechnische Aufbau der gesamten Anlage in Betracht zu ziehen, der von Abbildung 3.2 nur unvollständig erfasst wird.

In einer Abfallverbrennungsanlage lassen sich die Ansätze zur Effizienzsteigerung drei verschiedenen Anlagenbereichen zuordnen, die in Abbildung 3.4 markiert sind.

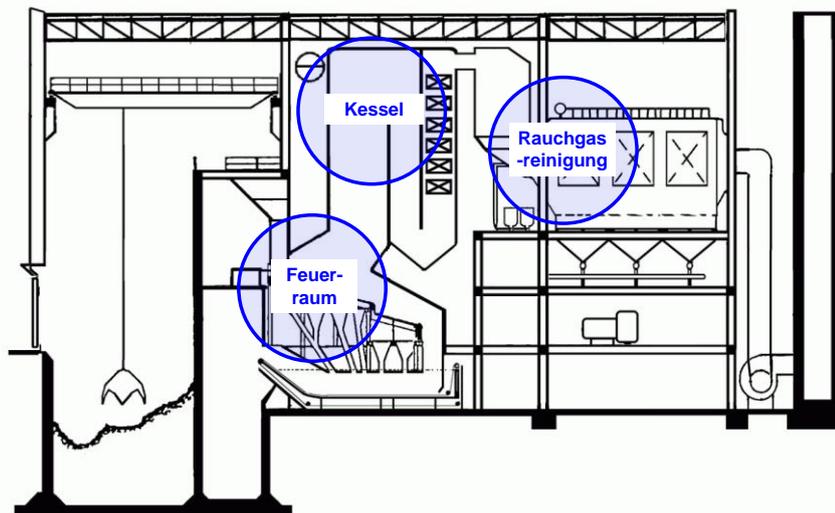


Abbildung 3.4: Ansatzpunkte für eine Effizienzsteigerung bei Abfallverbrennungsanlagen.

Aus Abbildung 3.4 geht hervor, dass der eigentliche Verbrennungsprozess im Feuerraum, wo die chemische Energie des Brennstoffs in thermische Energie umgewandelt wird, eine erste Möglichkeit für eine Effizienzsteigerung bietet.

Weitere Ansätze für Effizienzsteigerungen bietet der Kesselbereich, der die Übertragung der thermischen Energie der Rauchgase auf den Wasser-Dampf-Kreislauf des Kessels und die anschließende Dampfnutzung umfasst. Zu beachten ist, dass der erzeugte Dampf nicht nur für die Stromerzeugung, sondern ebenso für verschiedene Wege der Wärmebereitstellung genutzt werden kann (In Abbildung 3.2 und Abbildung 3.4 nicht dargestellt).

Einen dritten Bereich zur Effizienzsteigerung bietet der verfahrenstechnische Aufbau der Abfallverbrennungsanlage. Hier bietet insbesondere die Rauchgasreinigungsanlage durch einen energieoptimierten Aufbau Möglichkeiten zur Minderung des Energieverbrauchs und somit zur Steigerung des Netto-Wirkungsgrads.

Auf die drei vorgestellten Ansatzpunkte zur Effizienzsteigerung, die nicht vollständig unabhängig voneinander sind, wird in den nächsten Abschnitten näher eingegangen.

3.4.1 Feuerung

In der Feuerung wird, wie oben im Text erwähnt, die chemische Energie des Brennstoffs durch Verbrennung in thermische Energie umgewandelt. Die vielfältigen Eigenschaften der verwendeten Brennstoffe, wie Heizwert, Aschegehalt, Aggregatzustand usw. bestimmen maßgeblich den Aufbau der Feuerung. Folglich unterscheiden sich die Feuerungen für fossile Brennstoffe wie Erdgas, Heizöl oder Kohle (staubförmig) erheblich von der in Abbildung 3.1 (S. 14) dargestellten Rostfeuerung.

Rostfeuerungen haben sich allgemein für die Verbrennung von stückigen Brennstoffen mit inhomogener Zusammensetzung wie Siedlungsabfällen oder Ersatzbrennstoffen bewährt. Das prinzipielle Konzept der Verbrennungsführung auf dem Rost ist in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt und wird im weiteren Text genauer vorgestellt.

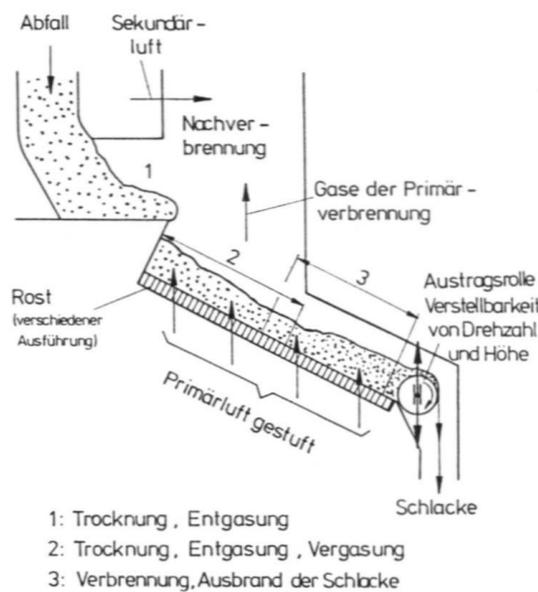


Abbildung 3.5: Schematisches Konzept für die Verbrennung auf dem Rost [Scholz 1990]⁶.

Der Aufbau von Rostfeuerungen ermöglicht eine vielfältige Einflussnahme auf die Verbrennungsvorgänge. Durch die beweglichen Rostsegmente (In Abbildung 3.5 nicht dargestellt) wird der brennende Abfall auf dem Rost durchmischt und transportiert, so dass eine Schürwirkung erreicht wird. Zusätzlich kann die Verweilzeit der zu verbrennenden Abfälle im Feuerraum durch die Bewegungsgeschwindigkeit der Rostsegmente, eventuell ergänzt um eine Austragsrolle am Ende des Rostes, gesteuert werden.

⁶ Diese Abbildung befindet sich leicht verändert auch in [Beckmann 1994] [Jeschar 1992] [Scholz 1991].

Mit der zugeführten Primärluft gelingt kein vollständiger Umsatz des Brennstoffs Abfall, so dass für die vom Rost aufsteigenden Gase eine Nachverbrennung erforderlich ist. Der dafür notwendige Sauerstoff wird mit der Sekundärluft oberhalb des Rostes zugeführt (Siehe Abbildung 3.5). Der Anteil der Primärluft beträgt in der Regel 70 bis 80 % [Scholz 1991]. Eine Rezirkulation von Rauchgasanteilen bietet zusätzlich die Möglichkeit, durch bessere Vermischung und zusätzliches Sauerstoffangebot den Ausbrand zu verbessern. Ausführliche Erläuterungen zu den Luftzuführungen bei Abfallverbrennungsanlagen findet man z.B. in [Auel 2009] [Schu 2006] [Scholz 1990].

Eine optimal kontrollierte (ideale) Verbrennung müsste zwei Anforderungen erfüllen: Einerseits ist ein vollständiger Umsatz des Brennstoffs wünschenswert, um die gesamte im Brennstoff gespeicherte chemische Energie für die Stromerzeugung (bzw. Wärmebereitstellung) nutzen zu können.

Andererseits ist ein möglichst geringes Rauchgasvolumen anzustreben, um die Wärmeverluste mit dem aus dem Kessel austretenden Rauchgas möglichst gering zu halten. Ein niedriger Luftüberschuss führt zu einem höheren elektrischen Wirkungsgrad. Die entsprechenden Zusammenhänge sind in Abbildung 3.6 dargestellt.

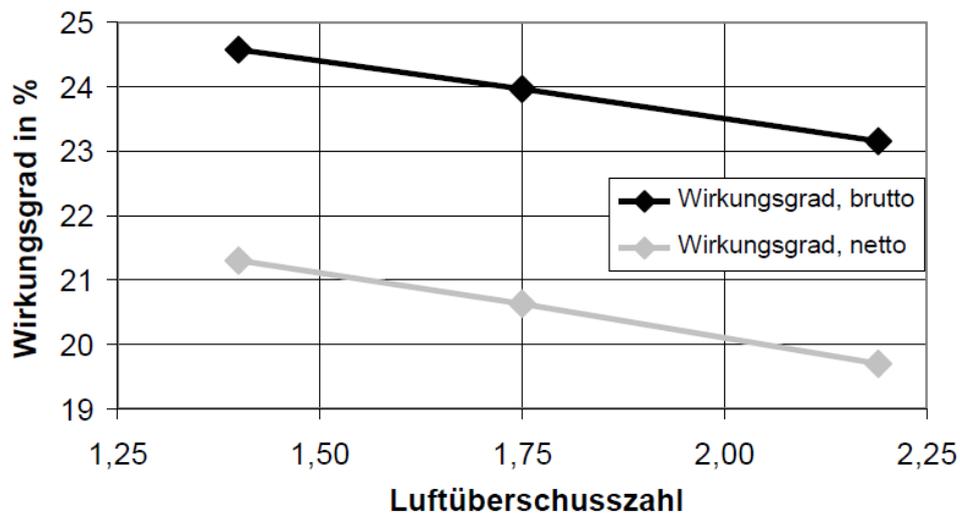


Abbildung 3.6: Abhängigkeit des Wirkungsgrads vom Luftüberschuss [Gohlke 2008a].

Theoretisch wäre eine optimale Verbrennung gewährleistet, wenn die zugeführte Luftmenge (Summe aus Primär- und Sekundärluft) exakt der erforderlichen Luftmenge für eine vollständige Verbrennung entsprechen würde. Dies bedeutet, dass weder ein Luftüberschuss noch ein Luftmangel auftritt. Der entsprechende Zustand wird als stöchiometrische Verbrennung bezeichnet [Mayr 1997].

Allerdings steigt allgemein der erforderliche Luftüberschuss mit der Inhomogenität des Brennstoffs, so dass in großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen eine stöchiometrische Verbrennung aufgrund der Heterogenität und Stückigkeit des Brennstoffs Abfall nicht erreicht werden kann. Insbesondere eine Unterschreitung der stöchiometrischen Verbrennungsluftmenge muss vermieden werden, denn in diesen Fall würde durch die unvollständige Verbrennung neben organischen Schadstoffen auch Kohlenmonoxid gebildet und mit dem Rauchgas den Kessel verlassen. Außerdem steigt die Gefahr von Verpuffungen, insbesondere wenn im Bereich der Rauchgasreinigung ein Elektrofilter installiert ist.

Aus diesem Grund existieren für den Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen Vorschriften, die sich auf den Betrieb der Feuerung beziehen. Entsprechend § 5 und § 6 der 17. BImSchV [17. BImSchV] (Siehe Abschnitt 4.4, S. 56 ff) müssen Abfallverbrennungsanlagen so errichtet und betrieben werden, dass u.a. für die entstehenden Verbrennungsgase nach der letzten Verbrennungsluftzuführung eine Verweilzeit von mindestens zwei Sekunden bei einer Mindesttemperatur von 850 °C eingehalten wird. Der organische Kohlenstoffgehalt der Schlacke ist auf 3 % bzw. der Glühverlust auf 5 % begrenzt. Außerdem sind die Emissionen für Kohlenmonoxid und organische Schadstoffe limitiert. Ältere Versionen der 17. BImSchV enthielten darüber hinaus auch Anforderungen für den Mindestsauerstoffgehalt der entstehenden Rauchgase.

Für eine genaue Kontrolle und Regelung der Feuerung sind Abfallverbrennungsanlagen wie andere großtechnische (Feuerungs-)Anlagen heute mit leistungsfähigen elektronischen Betriebsleitsystemen ausgerüstet. Allerdings stellt die Feuerungsregelung einer Abfallverbrennungsanlage im Vergleich zu Feuerungen, die mit fossilen Brennstoffen wie Kohle, Öl oder Gas betrieben werden, eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Dieser Unterschied ist in den Brennstoffeigenschaften begründet. Fossile Brennstoffe besitzen homogene, nicht schwankende und gleichzeitig bekannte Eigenschaften, so dass durch Hinterlegung eines mathematischen Modells mit dem Verhalten der entsprechenden Anlage im Betriebsleitsystem eine ruhige und reproduzierbare Regelung der Feuerung erreicht wird [Röderer 2007].

Dem entgegen weisen die einer Abfallverbrennungsanlage zugeführten Brennstoffe sehr inhomogene, schwankende und nicht vorhersehbare Eigenschaften auf, die eine Aufrechterhaltung einer konstant guten Verbrennung erschweren [Schumacher 1991]. Folglich reichen einfache mathematische Modelle als alleinige Regelstrukturen für die Feuerung in Abfallverbrennungsanlagen nicht aus. In der Praxis wurde daher die konventionelle Regelungstechnik mit Eingriffen des Betriebspersonals kombiniert [Gierend 1996].

Bereits zu Beginn der 90er Jahre wurde von der Fa. Steinmüller ein Forschungsprogramm vorbereitet, in dem die Möglichkeiten der IR-Thermographie zur Temperaturbestimmung des Abfallbetts auf dem Rost untersucht wurde [Schumacher 1991]. Über einen frühen Einsatz der IR-Thermographie an der Abfallverbrennungsanlage in Coburg wird in [Busch 1993] berichtet. Zusätzlich werden zur Feuerungsregelung Videokameras eingesetzt [Martin 1993]. Abbildung 3.7 zeigt mögliche Kamera-Positionen und ein vereinfachtes Schema zur Feuerungsregelung.

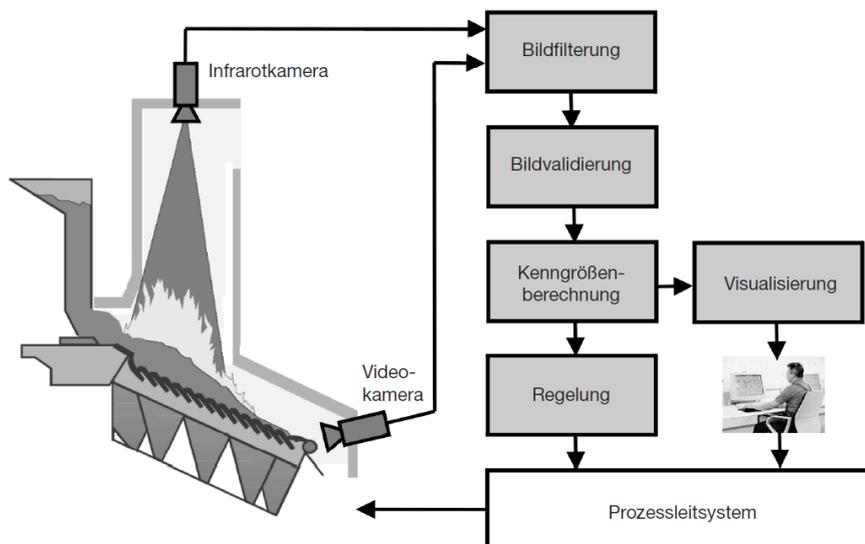


Abbildung 3.7: Vereinfachtes Schema zur Feuerungsregelung [Keller 2007].

Heute stehen für die Feuerungsregelung von großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen zuverlässige Technologien zur Verfügung, die sowohl auf Fortschritten in der EDV- und Computertechnik als auch in der Sensortechnik basieren. Beispielsweise sind nach [Pacher 2007] an bayrischen Abfallverbrennungsanlagen für eine Kontrolle der Verbrennungsvorgänge verschiedene Bilanzierungsmodelle, Online-Heizwertberechnungen oder Kombinationen aus Thermoelementen und Pyrometern mit Plausibilitätskontrolle installiert.

Weitere Verbesserungen ergaben sich durch die Einführung der sogenannten Fuzzy-Regelung in die Feuerleistungsregelung von Abfallverbrennungsanlagen [Gierend 1996] [Maltry 2012], die seit den 90er Jahren eingesetzt wird [Vodegel 2006]. Die Basis für diese Regelungstechnik bilden grundlegende Zusammenhänge, ergänzt durch Betriebserfahrungen, die als Fuzzy-Logik im Betriebsleitsystem hinterlegt werden. Die Kombination aus modellgestützter Regelungstechnik und Fuzzy-Technologie wird von der Firma Siemens Power Generation als hybride Feuerleistungsregelung bezeichnet [Ellersiek 2008]. Außerdem werden Künstliche Neuronale Netze als weitere Technologie für die Überwachung und Regelung von Abfallverbrennungsanlagen betrachtet [Vodegel 2006] [Schmidt 2008].

Darüber hinaus wurden für eine Weiterentwicklung der Abfallverbrennungsanlagen und Optimierung der Verbrennungsprozesse verschiedene Modellvorstellungen zur Simulation der Vorgänge in einer Abfallverbrennungsanlage entwickelt [Appel 2002] [Beckmann 1994] [Beckmann 2005] [Brosch 2014] [Klasen 2006] [Peters 1994] [Schetter 1985] [Scholz 1990] [Simsek 2009] [Vodegel 2006] [Wirtz 2013] [Wolf 2005].

3.4.2 Kessel

Der Kessel stellt entsprechend den vorangegangenen Abschnitten das zentrale Bauteil für die Energienutzung dar, denn hier wird der Dampf für die weitere Verwendung (Wärmenutzung, Dampfabgabe, Strombereitstellung) erzeugt.

Die Konstruktion des Kessels ist auf die verwendete Feuerung und die eingesetzten Brennstoffe abgestimmt. Außerdem wird der Wirkungsgrad bzw. die Effizienz der Gesamtanlage maßgeblich durch die Konstruktion des Kessels bestimmt. Der Kesselwirkungsgrad beschreibt den Energieanteil, der aus den von der Feuerung aufsteigenden heißen Rauchgasen auf den Wasser-Dampf-Kreislauf des Kessels für eine spätere Nutzung übertragen wird.

Steinkohlkraftwerke erreichen einen Kesselwirkungsgrad von über 93 % [Schu 2006], nach Angaben in [Kugler 1990] liegt der Kesselwirkungsgrad bei Kraftwerken zwischen 91 und 94 %. Für das moderne Kraftwerk in Karlsruhe, das seit 2014 offiziell in Betrieb ist, wird ein hoher Kesselwirkungsgrad von 95,6 % mitgeteilt [Stamatelopoulos 2016].

Moderne Abfallverbrennungsanlagen erreichen hier Werte, die deutlich über 80 % liegen [Martin 2013] [Schu 2006]. Entsprechend einem älteren Vergleich (Stand 2001), der im BVT-Merkblatt "Waste Incineration" berücksichtigt wurde, schwankt der Kesselwirkungsgrad zwischen 75,2 und 84,2 %; als Mittelwert ergaben sich 81,2 % [BVT WI]. Diese Angaben findet man auch in [Johnke 2004]. Nach Reimann [Reimann 2004] liegen die Kesselwirkungsgrade im Bereich von 80 bis 85 %.

Eine Steigerung auf über 90 % ist möglich, wenn durch Einsatz der Abgas-Kondensation die latente Wärme der Rauchgase genutzt wird [Martin 2013]. Für die Abfallverbrennungsanlage in Aarhus (Dänemark) wird ein Kesselwirkungsgrad von 92,2 % angegeben [Schäfers 2006]. Von Damgaard [Damgaard 2010] werden im Rahmen eines ökobilanziellen Vergleichs für den Wirkungsgrad 92 % bei maximaler Energienutzung angenommen.

Die energetische Beurteilung der Gesamtanlage erfolgt sinnvollerweise durch andere Wirkungsgrade, in denen die abgegebene Kraftwerksleistung – d.h. die erzeugte Nutzenergie in Form von Strom oder Wärme – in Beziehung zu der zugeführten Primärenergie des Brennstoffs gesetzt wird. Die Primärenergie des Brennstoffs entspricht der im Brennstoff gespeicherten chemischen Energie und wird durch den Heizwert beschrieben.

Als "Wirkungsgrad" wird in der Regel der elektrische Nettowirkungsgrad bezeichnet, wenn der im Kessel erzeugte Dampf nur zur Erzeugung elektrischer Energie genutzt wird. Der elektrische Nettowirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der in das Stromnetz abgegebenen elektrischen Energie zu der mit dem Brennstoff zugeführten Primärenergie. Auf diesem Weg wird der Eigenverbrauch der Anlage berücksichtigt. Der elektrische Bruttowirkungsgrad basiert dagegen auf der im Generator erzeugten elektrischen Energie ohne Einbeziehung des Eigenverbrauchs.

Wird der im Kessel erzeugte Dampf gleichzeitig für die Bereitstellung von elektrischer Energie und Wärme (Fernwärme usw.) genutzt, so werden oft die Begriffe "Nutzungsgrad" oder "Wärmenutzungsgrad" verwendet. In diesen Fällen beschreibt das entsprechende Verhältnis die

Summe der in die Netze abgegebenen Energiemengen (Strom und Wärme) zu der mit dem Brennstoff zugeführten Primärenergie.

Die Dampfnutzung für die Bereitstellung von Wärme ist im Gegensatz zur Erzeugung elektrischer Energie vom Standort der Anlage abhängig. Nicht jeder Standort einer Abfallverbrennungsanlage weist entsprechende Wärmeabnehmer auf, wie z.B. ein Fernwärmenetz oder einen Industriebetrieb mit Wärmebedarf, denn die politische Durchsetzbarkeit war oft ein Hauptkriterium für die Standortwahl [UBA 2008a]. Aufgrund der großen Widerstände gegen Abfallverbrennungsanlagen in der Vergangenheit bildete die Stromerzeugung standortbedingt den Schwerpunkt bei der Energienutzung [Fleck 2005].

Folglich gibt es bei dem Nutzungsanteil der im Feuerraum freigesetzten Energie sehr große Unterschiede. Eine Beschränkung auf Wärmenutzung ermöglicht theoretisch eine Nutzung von ca. 90 % der zugeführten Energie, dagegen können bei alleiniger Stromerzeugung unter optimalen lokalen und technischen Bedingungen maximal gut 30 % der zugeführten Energie genutzt werden [Ragoßnig 2008].

Geht man bei der Verwendung des erzeugten Dampfes nur von der Stromerzeugung aus, so beruhen die möglichen Maßnahmen für Wirkungsgradsteigerungen zur Erzeugung elektrischer Energie auf grundlegenden thermodynamischen Zusammenhängen. Je mehr Energie aus dem Rauchgas auf den Dampf durch eine möglichst hohe Überhitzung übertragen werden kann, umso höher ist die Effizienz der Turbine und somit der elektrische Bruttowirkungsgrad der Abfallverbrennungsanlage. Eine möglichst hohe Überhitzung wird durch hohe Dampfparameter, d.h. durch möglichst hohe Dampftemperaturen und einen hohen Druck erreicht.

In Folge dieses Sachverhalts wurden bei großen Kohlekraftwerken durch Verbesserungen bei den Werkstoffen immer höhere Betriebsdrücke bzw. Temperaturen angestrebt und damit der elektrische Wirkungsgrad gesteigert.

Im Vergleich zu Kraftwerken können in Abfallverbrennungsanlagen die Dampfparameter nicht immer weiter erhöht werden, denn aufgrund der Rauchgaszusammensetzung treten sehr starke Korrosionsprozesse auf. Abbildung 3.8 zeigt eine schematische Übersicht zu Korrosionsprozessen in Abfallverbrennungsanlagen in Abhängigkeit von der Temperatur.

Entsprechend Abbildung 3.8 sind drei grundsätzliche Korrosionsprozesse zu unterscheiden. Im Temperaturbereich unterhalb von ca. 170 °C kommt es zu einer Taupunktunterschreitung in den Rauchgasen, so dass ein elektrochemischer Angriff auf das Kesselmaterial durch sich bildende anorganische Säuren möglich wird. Oberhalb von 400 °C treten Korrosionsvorgänge auf, die durch Ablagerungen auf den Heizflächen des Kessels verursacht werden. Ergänzend dazu spielen Prozesse eine Rolle, die auf einem direkten Kontakt der Gasphase mit den Kesselheizflächen beruhen.

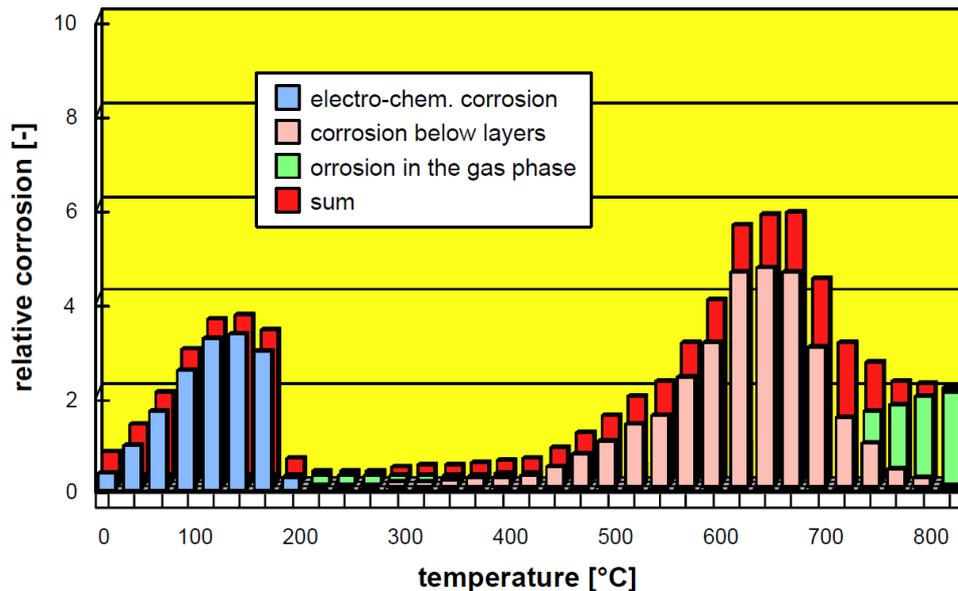


Abbildung 3.8: Korrosionsprozesse in Abfallverbrennungsanlagen als Funktion der Wandtemperatur der Überhitzerrohre ([Görner 2003], nach [Seier 1998]).

Verursacht werden diese Korrosionsprozesse durch die im Restabfall enthaltenen chemischen Elemente Chlor und Schwefel, sowie Alkalimetalle (Natrium, Kalium) und Schwermetalle (u.a. Blei, Zink) [Martin 2013]. Die Standzeit der Kesselrohre hängt direkt von den Dampfparametern und dem Chorgehalt der Rauchgase ab [Seiler 2005].

Die Korrosionsprozesse in Kesseln von Abfallverbrennungsanlagen werden trotz intensiver Forschung bis heute noch nicht vollständig verstanden [Martin 2013]. Es gibt viele Beispiele dafür, dass sich die an einem Standort als vorteilhafte erweisende Modifikationen hinsichtlich der Korrosionsproblematik nicht auf einen anderen Standort übertragen lassen [Spiegel 2005]. Teilweise treten massive Korrosionsschäden bereits bei moderaten Dampfparametern auf, andere Anlagen zeigen dem entgegen bei höheren Dampftemperaturen noch akzeptable Korrosionsraten [Martin 2013].

Für genauere Informationen zu den Korrosionsprozessen wird auf die Literatur (Siehe z.B. [Born 1996] [Grabke 1995] [Lee 2007] [Schroer 2002] [Schumacher 1996] [Schumacher 1997] [Warnecke 2014]) verwiesen.

Allgemein werden heute Dampfparameter von 40 bar und 400 °C als Kompromiss zwischen niedrigen Korrosionsraten und möglichst hohen Wirkungsgraden betrachtet [Pacher 2007] [Seier 1998]. Diese Parameter sind als Grenze für das sichere Erreichen von vertretbaren Standzeiten für Kesselrohre anzusehen [Martin 2013]. Es gibt bis heute keine metallischen Werkstoffe für Dampfkessel von Abfallverbrennungsanlagen, die bei Temperaturen von über 400 °C (Metalltemperatur) tatsächlich korrosionsfest sind [Nachreiner 2015].

Die Auswertung einer Zusammenstellung von Dampfparametern deutscher Abfallverbrennungsanlagen in [Schu 2009] zeigt, dass überwiegend Dampfparameter in Bereichen um 40 bar und 400 °C genutzt werden. Die Anzahl der Standorte kann Tabelle 3.1 entnommen werden.

Tabelle 3.1: Dampfparameter deutscher Abfallverbrennungsanlagen.

	Dampfdruck		
	< 38	38-42 bar	>42 bar
Anzahl Standorte	9	43	10
	Dampftemperatur		
	< 360 °C	360-420 °C	> 420 °C
Anzahl Standorte	7	47	8

Anmerkung: Die Datengrundlage für diese Zusammenstellung findet man in [Schu 2009] und stammt aus dem Jahr 2005. Standorte mit verschiedenen Dampfparametern für einzelne Verbrennungslinien wurden hier in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Weiter unten im Text und in Abschnitt 3.5 werden einige Abfallverbrennungsanlagen vorgestellt, deren Dampfparameter oberhalb von 40 bar und 400 °C liegen. Die Dampfparameter von neuen Kraftwerken, die beispielsweise für das neue Steinkohlekraftwerk in Karlsruhe bei 603 °C und 292 bar (Hochdruckseite) betragen [Brüggemann 2015] [Stamatelopoulos 2016], werden jedoch nicht erreicht.

Zur Minderung der Korrosionsprobleme, die in Abfallverbrennungsanlagen an Kesselheizflächen mit direktem Rauchgaskontakt auftreten, wurden verschiedene Technologien entwickelt.

Eine Möglichkeit bietet das Aufbringen von metallischen Schutzschichten in Kesselbereichen, die besonders von der Korrosion betroffen sind. Das Aufbringen der Schutzschichten kann durch Auftragsschweißung ("Cladding"), galvanische Beschichtung oder durch Thermisches Spritzen erfolgen [Bendix 2005] [Manzke 2016].

Im MHKW Burgkirchen, wo aufgrund der Dampfabgabe an ein benachbartes Chemiewerk die Dampfparameter bei 80 bar und 400 °C liegen, wurden bereits im Folgejahr (1994) nach der Inbetriebnahme der Anlage erste Cladding-Arbeiten durchgeführt. Allerdings weisen die beschichteten Rohre ebenfalls einen Materialabtrag durch Korrosion auf, so dass an diesem Standort im Jahr 2001 mit dem Aufbringen neuer Schutzschichten (Recladding) begonnen wurde. [Englmaier 2004]

Einen anderen Weg zur Verbesserung der Effizienz des Kessels bieten neuartige Heizflächen, die sich durch eine spezielle Anordnung bzw. einen besonderen Schutz auszeichnen.

Als "Wandüberhitzer" werden von der Fa. Martin (München) Heizflächen bezeichnet, die im ersten Strahlungszug des Kessels installiert werden [Egeler 2013] [Martin 2013]

[Nachreiner 2015]. Der Einbau dieser Heizflächen erfolgt zwischen der Membranwand des Kessels und den keramischen Schutzplatten. Aufgrund der Hinterlüftung der keramischen Schutzplatten sind die Überhitzerheizflächen vor dem korrosiven Angriff der Rauchgase geschützt. In der Vergangenheit haben sich hinterlüftete Plattensysteme im ersten Kesselzug gut bewährt, denn es wurden Standzeiten von über 50.000 Stunden ohne nennenswerte Schäden erreicht [Büchner 2010]. Aufbau und Montage des neuartigen Wandüberhitzers sind in Abbildung 3.9 dargestellt.

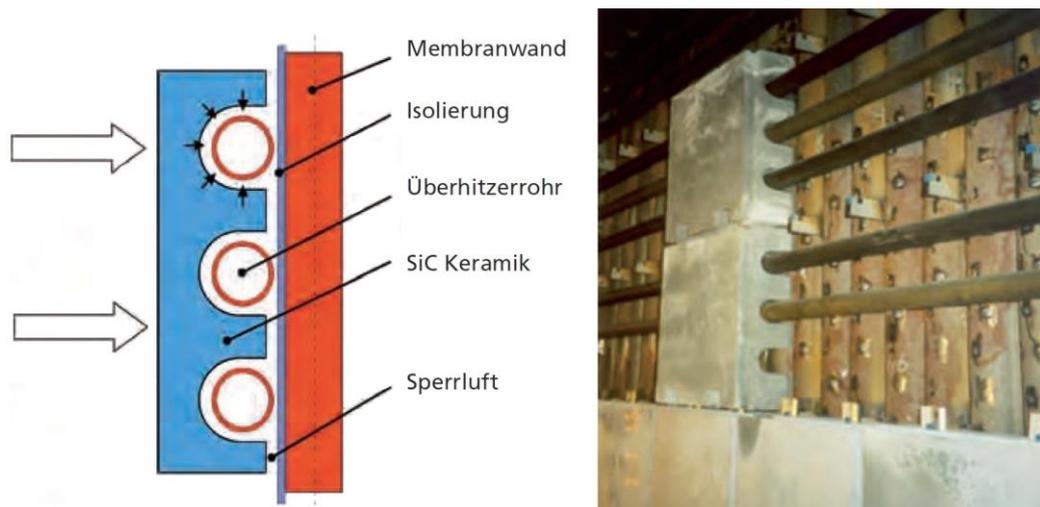


Abbildung 3.9: Prinzip und Montage des Wandüberhitzers [Martin 2013] [Nachreiner 2015].

Im Rahmen von Tests am Müllkraftwerk Schwandorf im Zeitraum von 2000 bis 2003 wurde mit Hilfe des Wandüberhitzers eine Dampftemperatur von 470 °C erreicht [Nachreiner 2015].

Als weiteren Weg für höhere Dampftemperaturen wird in [Martin 2013] und [Nachreiner 2015] ein "Strahlungsüberhitzer" beschrieben. Dabei handelt es sich um Heizflächen, die in den ersten Zug des Kessels eingehängt werden (Siehe Abbildung 3.10, S. 28).

Ein Strahlungsüberhitzer, wie in Abbildung 3.10 (S. 28) gezeigt, wurde für Versuchszwecke im Jahr 2012 am Müllheizkraftwerk Rosenheim installiert. Das entsprechende Überhitzerpanel war nach Angaben in [Nachreiner 2015] 4,1 m lang und 1,4 m breit und das Gewicht betrug 2 t. Es wurden Dampftemperaturen von bis zu 480 °C erreicht, ohne dass nennenswerte Korrosionsschäden auftraten [Nachreiner 2015]. Erste Ergebnisse aus 3600 Betriebsstunden werden von Egeler [Egeler 2013] vorgestellt.

Weitere Potenziale zur Wirkungsgradsteigerung von Abfallverbrennungsanlagen ergeben sich bei der Betrachtung der einzelnen Aggregate des Wasser-Dampf-Kreislaufs. Entsprechende Vorschläge werden in [Wandschneider 2015a] vorgestellt.

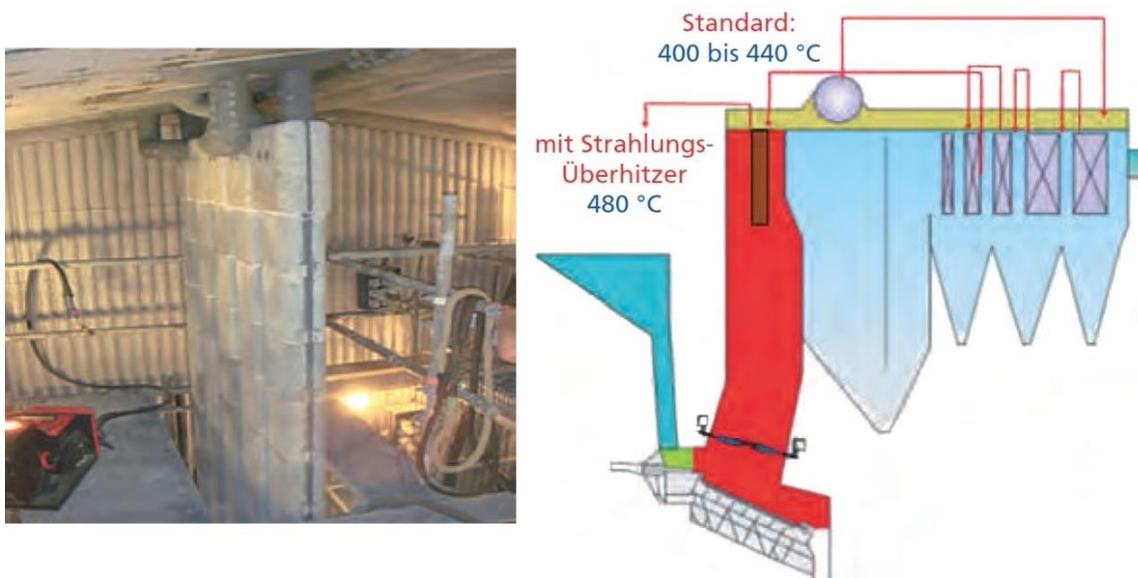


Abbildung 3.10: Strahlungsüberhitzer im Kesselbereich [Martin 2013].

Andere Wege für die Steigerung des Wirkungsgrades sind möglich, wenn umfangreichere Veränderungen in der Anlagentechnik in Betracht gezogen werden. Damit wird das in Abbildung 3.2 (S. 16) dargestellte System der Energiewandlungen durch zusätzliche Bauteile bzw. Schritte ergänzt.

Am Standort Mannheim wurde in der Vergangenheit der Kessel einer Abfallverbrennungsanlage mit einer kleinen, zusätzlichen Erdgasfeuerung für die Überhitzung ausgerüstet, so dass eine Anhebung der Dampfparameter bei gleichzeitiger Minderung des Korrosionsrisikos ermöglicht wurde [Seier 1998] (Siehe Abschnitt 3.5.4).

Eine andere Möglichkeit stellt die Zwischenüberhitzung dar, die an Kraftwerken Stand der Technik ist. An Abfallverbrennungsanlagen ist eine spezielle Variante erforderlich, in dem teilentspannter Dampf von der Turbine mit heißem Frischdampf aus dem Kessel erneut überhitzt wird. Dieses Prinzip wurde an der Abfallverbrennungsanlage in Amsterdam realisiert und wird weiter unten im Text (Abschnitt 3.5.1, S. 36) dargestellt. Eine Zwischenüberhitzung wurde auch am Ersatzbrennstoff-Kraftwerk Rüdersdorf [Schäfers 2006] installiert und ist auch für neue Biomassekraftwerke geplant, die für den entstehenden Markt in Großbritannien vorgesehen sind [Billotet 2012].

In Tabelle 3.2 (S. 29) wird die Basisauslegung für Kessel von Abfallverbrennungsanlagen (40 bar und 400 °C) den möglichen Wirkungsgradverbesserungen durch Anhebung der Dampfparameter und einer Zwischenüberhitzung gegenüber gestellt.

Aus der Tabelle 3.2 ergibt sich, dass durch die verschiedenen technischen Maßnahmen der elektrische Brutto-Wirkungsgrad einer Abfallverbrennungsanlage von 26,1 auf maximal 29,3 % steigt. Die größte Verbesserung des Nettowirkungsgrades beträgt 11,6 % und wird durch Anhebung der Dampfparameter auf 460 °C und 80 bar erreicht.

3.4 Grundlagen zu Energieerzeugung und Wirkungsgradsteigerungen

Tabelle 3.2: Mögliche Steigerung der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen [Benz 2009] (Zitiert nach [Keunecke 2016]).

Variante			Basis	1	2	3	4
Frischdampfparameter	Druck	bara	40	60	70	80	90
	Temperatur	°C	400	420	440	460	400
Zwischenüberhitzung	Druck ZÜ ein	bara	–	–	–	–	20
	Druck ZÜ aus	bara	–	–	–	–	16
	Temp. ZÜ ein	°C	–	–	–	–	219
	Temp. ZÜ aus	°C	–	–	–	–	310
Dampfproduktion		kg/h	64.680	64.365	63.570	62.746	61.442
Generatorleistung		kW	14.484	15.456	15.889	16.256	15.681
	% von B x Hu	%	26,1	27,8	28,6	29,3	28,2
Leistung Speisewasserpumpe		kW	142	196	220	244	265
Δ Nettoleistung gegenüber Basisvariante		kW	0	918	1.327	1.670	1.074
		%	0	6,4	9,2	11,6	7,5

Weitere Vergleiche von verschiedenen Möglichkeiten zur Wirkungsgradsteigerung durch innovative Überhitzungstechnologien findet man in [Schu 2009].

Andere Wege zur Wirkungsgradsteigerung basieren auf einer Kombination der Abfallverbrennungsanlage mit anderen Feuerungsanlagen. Ein entsprechendes Beispiel stellt die UPSWING-Technologie (Unification of Power plant and Solid Waste Incineration on the Grate) dar, die Kohlekraftwerk und Abfallverbrennungsanlage verbindet. Der in der Abfallverbrennungsanlage erzeugte Dampf wird zur Überhitzung und anschließenden Nutzung an das Kraftwerk übergeben; der Rauchgasstrom der Abfallverbrennung wird nach einer Vorreinigung ebenfalls dem Kraftwerk zugeführt. [Vehlow 2003] [Vehlow 2005]

Ein ähnliches System stellt das BiFuelCycle-Konzept dar, das von der Firma EcoEnergy entwickelt wurde. Für die externe Überhitzung ist eine zirkulierende Wirbelschicht vorgesehen, die mit festen Brennstoffen betrieben wird. Das Abgas aus der zirkulierenden Wirbelschicht wird der Rauchgasreinigung der Abfallverbrennungsanlage zugeführt. Eine genauere Beschreibung des Systems ist der Literatur [Schu 2006] [Schu 2007] zu entnehmen.

Zusätzliche Optimierungen im Kesselbereich ergeben sich im praktischen Anlagenbetrieb durch Maßnahmen, die zu einer Verbesserung der Kesselreinigung beitragen. Durch eine Kesselreinigung werden allgemein die Beläge auf den Heizflächen entfernt, die sich in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff bilden und den Wärmeaustausch zwischen Rauchgas und Wasserdampf-Kreislauf behindern. Folglich steigt mit zunehmenden Belägen auf den Heizflächen die Rauchgastemperatur am Kesselende, so dass der Kesselwirkungsgrad sinkt.

Durchgeführt wird eine Kesselreinigung bei laufendem Betrieb mit sogenannten Rußbläsern. Dabei handelt es sich im einfachsten Fall um ein Rohr mit kleinen Austrittsdüsen, das an den Heizflächen vorbei geführt wird. In der Regel werden die Ablagerungen mit Dampf, der durch die Austrittsdüsen strömt, von den Heizflächen entfernt. Durch den Einsatz von Dampf entstehen in den Heizflächen keine großen Wärmespannungen und Verbrennungsprozesse werden im

Vergleich mit Luft nicht beeinflusst. Zusätzlich zu Rußbläsern stehen heute für die Reinigung von Kesselheizflächen sehr unterschiedliche Technologien zur Verfügung, die von Vodegel und Harpeng [Vodegel 2005] beschrieben werden.

Für eine Bewertung der Kesselverschmutzung und der Effektivität einer Kesselreinigung lassen sich nach Wärmestromdichtemessungen heranziehen. Eine Reinigung nach festen Zeitintervallen oder einer bestimmten Rauchgastemperatur ist nicht zielführend. [Rostkowski 2012].

Genauere Kenntnisse über die chemische Zusammensetzung und mineralogischen Aufbau der Beläge auf den Kesselrohren ermöglichen gezielte Gegenmaßnahmen, so dass Stillstandzeiten der Abfallverbrennungsanlage für Reinigungsarbeiten und Revisionen reduziert werden können [Reichelt 2012].

3.4.3 Rauchgasreinigung

Im Zusammenhang mit den öffentlichen Diskussionen über den Bau und Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen kommt möglichst niedrigen Schadstoffkonzentrationen, die am Ende der Rauchgasreinigung im Abgas enthalten sind, eine große Bedeutung zu.

Ohne Frage haben in der Vergangenheit verstärkte Umweltschutzanforderungen eine deutliche Entlastung für die Umwelt gebracht. Einen Einblick in die historische Entwicklung der Rauchgasreinigung an Abfallverbrennungsanlagen ermöglicht eine ältere Dokumentation vom Umweltbundesamt [UBA 1978].

Die Emissionen aus Abfallverbrennungsvorlagen wurden u.a. durch eine Neufassung der TA Luft [TA Luft 86] im Jahr 1986 stärker begrenzt. Weitere Reduzierungen der Emissionsgrenzwerte ergaben sich aus der [17 BImSchV], die in der ersten Fassung im November 1990 verabschiedet und später mehrfach verschärft wurde.

Die herabgesetzten immissionsschutzrechtlichen Grenzwerte machten an existierenden Abfallverbrennungsanlagen Nachrüstungen im Bereich der Rauchgasreinigung erforderlich. Fehlende Erfahrungen mit der dauerhaften Einhaltung der neuen und sehr niedrigen Grenzwerte in Verbindung mit der Forderung nach einer möglichst weitgehenden Unterschreitung der Grenzwerte in den öffentlichen Diskussionen der 90er-Jahre führten zu mehrstufigen und komplexen Rauchgasreinigungsanlagen. In der Öffentlichkeit wird die Qualität der Rauchgasreinigungstechnik ausschließlich mit möglichst geringen Emissionen von Luftschadstoffen gleichgesetzt [Suritsch 2009].

Von Mitte der 80er Jahre bis Ende der 90er Jahre wurden Rauchgasreinigungsanlagen errichtet, die aus 6 bis 7 Komponenten aufgebaut waren. Eine typische Kombination aus der damaligen Zeit umfasste eine Flugascheabscheidung, ein dreistufiges Wäschersystem (Quenche, saure u. alkalische Wäsche), einen Katalysator zur Stickoxidminderung mit Wärmeverschiebsystem und einen mit Herdofenkoks und Kalziumhydroxid betriebenen Polzeifilter [Morun 2006] [Schulteß 2007]. Ein entsprechendes Beispiel aus dieser Zeit stellt die Abgasreinigung der Abfallverbrennungsanlage am Standort Köln [AVG 1995] dar. Zur Sicherheit wurden Maßnahmen

realisiert, mit denen teilweise die Emissionsgrenzwerte um das 10- bis 100-fache unterschritten wurden [Schulteß 1996]. In der Studie von Fehrenbach et al. [Fehrenbach 2007b] konnten keine Zusammenhänge zwischen der Rauchgasreinigungstechnik und Abgaswerten ermittelt werden.

Ferner stieg in der Vergangenheit der Aufwand für die Rauchgasreinigung durch die Forderung nach einem möglichst rückstandsfreien Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen, gekennzeichnet durch eine Aufbereitung der Rauchgasreinigungsrückstände zu Wertstoffen. Ein entsprechendes Beispiel stellt die Anlage am Standort Hamburg Borsigstraße (Inbetriebnahme 1994 [MVB 2005]) dar, deren schematischer Aufbau in Abbildung 3.11 dargestellt ist.

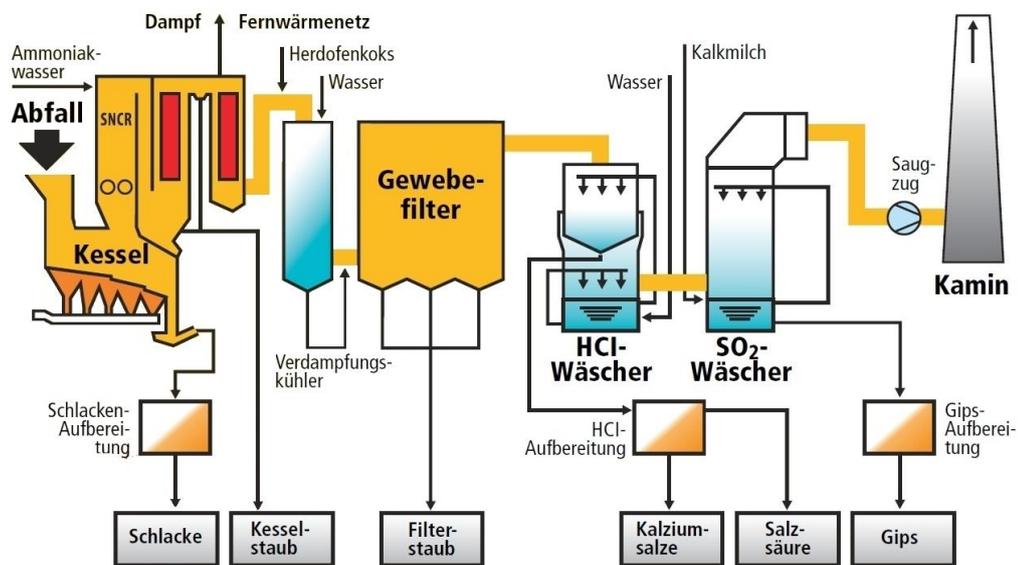


Abbildung 3.11: Schematischer Aufbau der Abfallverbrennungsanlage Borsigstraße [MVB 2005].

Entsprechend Abbildung 3.11 werden am Standort Hamburg Borsigstraße aus den Absalzungen der Wäscher durch verfahrenstechnische Aufbereitungsschritte als Produkte Salzsäure und Gips erzeugt. Bezogen auf eine 1 t verbrannten Restabfall entstehen 3 kg Gips und 11 kg Salzsäure (30 %) [Schäfers 1997]. In Rückstandsverbrennungsanlagen der chemischen Industrie wird die Salzsäuregewinnung wenig angewendet, denn die selektive Abtrennung einzelner Abgasbestandteile ist technisch und damit wirtschaftlich aufwändig [Lehner 2003].

Auf der anderen Seite spielt bei der Bewertung von Abfallverbrennungsanlagen allgemein die Effizienz eine zunehmende Rolle, so dass seit längerer Zeit ein Trend zu einfacheren Rauchgasreinigungskonzepten mit geringen Investitions- und Personal- und Betriebskosten existiert. Diese einfacheren Rauchgasreinigungskonzepte orientieren sich an allgemeinen Minderungsmöglichkeiten, indem möglichst wenige Aggregate und Rauchgasreinigungsstufen mit einem geringen Druckverlust errichtet werden. Berechnungen von Gohlke et al. [Gohlke 2008b] zeigen am Beispiel der Stickoxidminderung entsprechend Abbildung 3.12 (S. 32), dass eine SCR-Entstickungsanlage als separate, nach-geschaltete Rauchgasreinigungsstufe im Vergleich zu einer im Kessel installierten SNCR-Anlage zu einem niedrigeren elektrischen Wirkungsgrad führt.

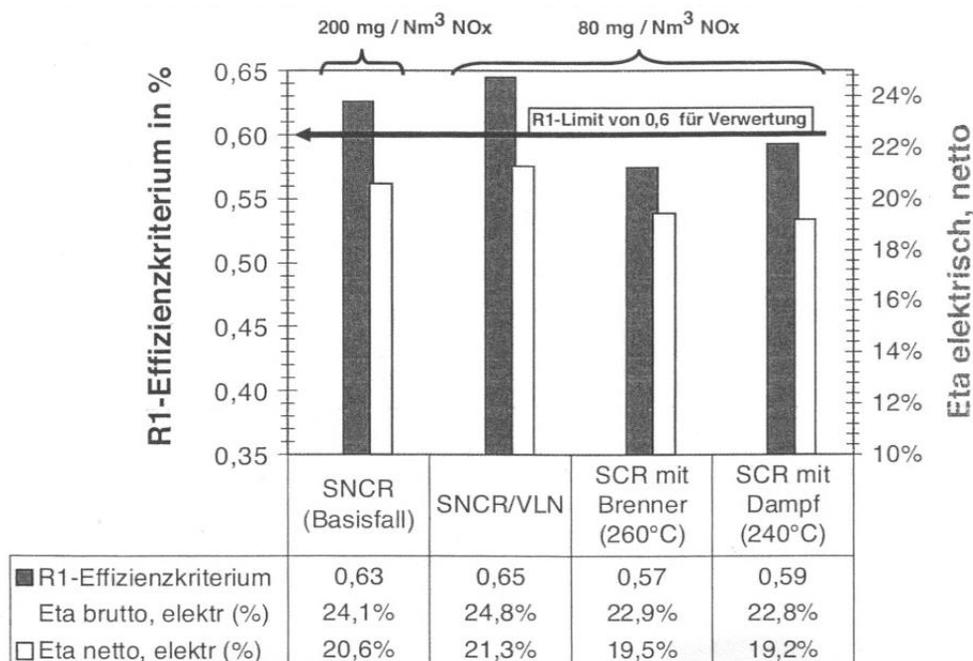


Abbildung 3.12: Einfluss der Entstickungsanlage auf den elektrischen Wirkungsgrad (VLN: Very-low NOx Technologie der Fa. Martin, München) [Gohlke 2008b].

Von besonderer Bedeutung in diesem Zusammenhang ist, dass die in der 17. BImSchV [17. BImSchV] geforderten Grenzwerte von Abfallverbrennungsanlagen ebenfalls mit einfacheren Rauchgasreinigungsanlagen sicher eingehalten werden können. Somit existieren heute in Deutschland Abfallverbrennungsanlagen mit sehr unterschiedlichen Rauchgasreinigungsanlagen.

Die Vielfältigkeit und die Veränderungen der Anlagenkonzepte für die Rauchgasreinigung an Abfallverbrennungsanlagen wird in einer schematischen Übersicht für die Standorte deutlich, die von der EEW Energy from Waste GmbH betrieben werden. Tabelle 3.3 (S. 33) zeigt eine Auswahl für sieben Standorte des Unternehmens.

Die älteren Abfallverbrennungsanlagen sind nach Tabelle 3.3 mit einer klassischen nass arbeitenden Rauchgasreinigungsanlage ausgerüstet, in der überwiegend die sauren Schadstoffe HCl und SO₂ mit Hilfe von zwei Wäschern bei unterschiedlichen pH-Werten aus dem Rauchgas abgetrennt werden. Die in den Absatzungen der Wäscher enthaltenen Salze werden anschließend aufbereitet (Beispiel siehe Abbildung 3.11, S. 31) oder in einem Sprühtrockner bzw. einem separaten Trockner in deponiefähige Feststoffe überführt.

Dem gegenüber erfolgt an den Anlagen in Magdeburg und Hannover die Abscheidung von HCl und SO₂ durch eine sogenannte quasitrockene Konzeption, die verfahrenstechnisch weniger aufwändig ist. In das heiße Rauchgas wird eine Kalkmilchlösung eingedüst; die entstehenden festen Reaktionsprodukte werden gemeinsam mit dem Flugstaub in einem nachfolgenden Staubfilter aus dem Rauchgas abgetrennt. Die Zugabe von Koks ermöglicht die simultane Abscheidung u.a. von organischen Schadstoffen und Quecksilber. Der entstehende Filterkuchen wird in einer Untertagedeponie entsorgt.

3.4 Grundlagen zu Energieerzeugung und Wirkungsgradsteigerungen

Tabelle 3.3: Entwicklung der Abgasreinigung bei der EEW Energy from Waste GmbH ([Büchner 2010], Tabelle um Spalten gekürzt).

	Kessel	Kessel mit SNCR	Elektrofilter	Sprüh-trockner	Sprüh-absorber	Flugstrom-absorber	Staub-afilter	HCl-Wäscher	SO ₂ -Wäscher		SCR-Kat	Filterbett-absorber
Bielefeld												
Göppingen												
Stappelfeld												
Buschhaus 1-2												
Buschhaus 3												
Rothensee												
Hannover												

Eine dritte Variante zur Abscheidung von sauren Schadstoffen bilden trockenconditioniert arbeitende Systeme, deren Aufbau den quasitrockenen Konzeptionen ähnelt. An Stelle einer Kalkmilchlösung wird festes Kalziumhydroxid-Pulver ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) in den Rauchgasstrom eingebracht. Zusätzlich muss insbesondere für eine bessere HCl-/SO₂-Abscheidung das Rauchgas durch Zugabe von Wasser conditioniert werden.

Ferner ist Tabelle 3.3 zu entnehmen, dass es auch bei den eingesetzten Entstickungsverfahren zu Veränderungen gekommen ist. Die älteren Abfallverbrennungsanlagen sind mit einer verfahrenstechnische relativ aufwändigen und damit teuren SCR-Anlage als Low Dust-Tail End-Variante (In Tabelle 3.3 schematisch gezeigt) ausgerüstet. Diese Technologie ermöglicht zwar einen stöchiometrischen Einsatz des Reduktionsmittels, aber andererseits ist eine energieintensive Wiederaufheizung der Rauchgase notwendig. Eine möglichst niedrige Betriebstemperatur der SCR-Anlage führt folglich zu einer besseren Energieeffizienz. Dagegen sind die neueren Abfallverbrennungsanlagen mit einem SNCR-Verfahren zur Entstickung der Rauchgase ausgerüstet, das einen relativ einfachen verfahrenstechnischen Aufbau mit geringen Investitionskosten aufweist. Ein Nachteil ist der aufgrund von Nebenreaktionen entstehende überstöchiometrische Reduktionsmittelbedarf. Energetische Vergleiche der erwähnten Entstickungsverfahren weisen Vorteile für das SNCR-Verfahren auf [Beckmann 2009] [Walk 2008a] [Walk 2008b].

Außerdem wurde entsprechend Tabelle 3.3 bei den neueren Anlagen auf einen Filterbettadsorber als letzte Rauchgasreinigungsstufe vor dem Kamin zur Abscheidung von noch im Rauchgas verbliebenen Schadstoffrestmengen verzichtet.

Der Umfang der Rauchgasreinigungstechnik wirkt sich zwangsläufig auf die Investitionskosten und den Energieverbrauch aus. Vergleicht man die verschiedenen Konzeptionen zur Rauchgasreinigung hinsichtlich des Energiebedarfs, so weist der Betrieb von quasitrockenen oder trocken-

konditioniert arbeitenden Rauchgasreinigungssystemen einen geringeren elektrischen Energiebedarf als die auf Wäschern basierenden nassen Systeme [Ragoßnig 2008].

Nach [Damgaard 2010] erforderte der Betrieb einer Abfallverbrennungsanlage 10 kWh pro Tonne verbranntem Abfall, wenn keine Rauchgasreinigungsanlage installiert ist (Bis 1973 möglich). Durch den Einbau eines trocken arbeitenden Rauchgasreinigungssystems, ergänzt um eine SNCR-Anlage zur Stickoxidminderung, steigt der Energiebedarf auf 45 kWh/t_A. Für den Betrieb einer Abfallverbrennungsanlage mit einer nassen Rauchgasreinigungsanlage, einem Filterbettadsorber zur Feinreinigung und einer SCR-Anlage zur Entstickung sind 80 kWh/t_A notwendig.

Eine weitere Entwicklung bei der Rauchgasreinigungstechnik, aus Tabelle 3.3 (S. 33) nicht zu entnehmen, stellt die verstärkte Nutzung von NaHCO₃ für die Abscheidung von sauren Schadstoffen dar. Der prinzipielle Aufbau entspricht weitgehend den trockenkonditioniert arbeitenden Systemen. Im Vergleich zu Ca(OH)₂ ist bei Verwendung von NaHCO₃ ein geringeres stöchiometrisches Verhältnis und somit ein geringerer Hilfschemikalienverbrauch als Vorteil zu nennen. Andererseits stellt der relativ hohe Preis für NaHCO₃ den einzigen und zum Teil wichtigsten Nachteil dar [Schulteß 2007].

Die Rauchgasreinigung an vielen älteren Standorten wurde im Rahmen von Modernisierungen auf dieses Verfahren umgestellt; ausgewählte Beispiele sind in Abschnitt 3.5 aufgeführt. Neben einer Deponierung besteht bei der Nutzung des NaHCO₃-Verfahrens die Möglichkeit, entstehende Rückstände aus der Abgasreinigung als verwertbare Sole aufzuarbeiten [Wandschneider 2015b].

Eine spezielle Variante des auf NaHCO₃ basierenden Rauchgasreinigungsverfahrens existiert an der Anlage der niederländischen Fa. Twence in Hengelo, die von Procede Gas Treating BV entwickelt und Ende 2014 in Betrieb genommen wurde. Eine schematische Übersicht zeigt Abbildung 3.13 (S. 35).

Entsprechend Abbildung 3.13 wird aus dem Rauchgas der Anlage mit einer Bilisol-CO₂-Abscheideanlage zunächst CO₂ abgetrennt, das anschließend mit Na₂CO₃ zu NaHCO₃ umgesetzt wird. In der Rauchgasreinigungsanlage erfolgt die Abscheidung der sauren Schadstoffe mit einer NaHCO₃-Suspension. [Huttenhuis 2016]

Neben Vereinfachungen im Bereich des prinzipiellen Aufbaus der Rauchgasreinigungsanlage kann die Energieeffizienz einer Abfallverbrennungsanlage durch verschiedene Wege der Wärmerückgewinnung verbessert werden. Die Temperatur der Rauchgase am Kesselende oder an anderen Stellen der Rauchgasreinigungsanlage kann über der erforderlichen Betriebstemperatur der nachfolgenden Rauchgasreinigungsstufe liegen, so dass eine Kühlung notwendig wird. Als Alternative zu einem Verdampfungskühler, der das Rauchgas durch Einspritzen und nachfolgende Verdampfung von Wasser abkühlt, kann ein Wärmetauscher eingesetzt werden. Die mit diesem Wärmetauscher zurückgewonnene Energie kann zur Vorwärmung des Kesselspeisewassers bzw. des Kondensats eingesetzt werden. [Karpf 2011]

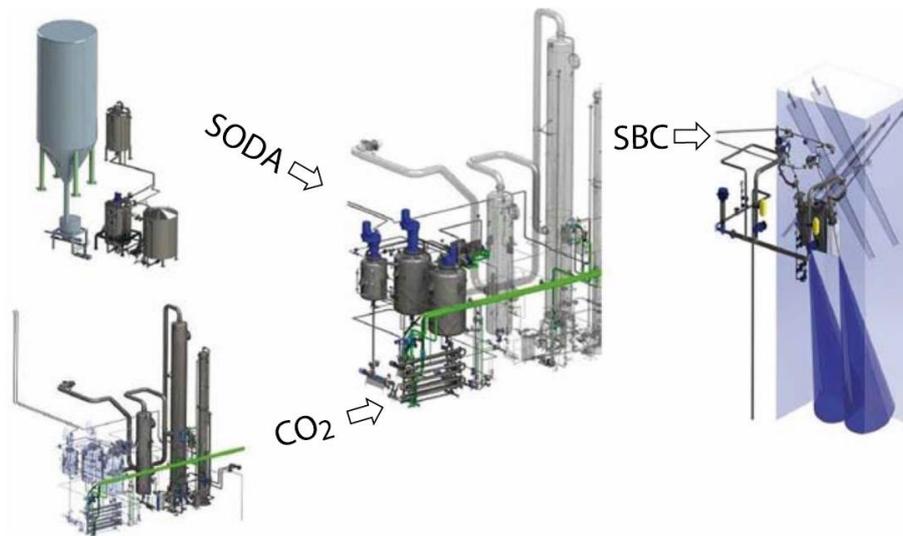


Abbildung 3.13: Schematisch Übersicht über das bei Twence installierte Rauchgasreinigungsverfahren (Soda: Na_2CO_3 ; SBC: NaHCO_3) [Huttenhuis 2016].

Eine weitere Möglichkeit der Wärmerückgewinnung bietet die Nutzung der Kondensationsenergie, indem das wasserdampfgesättigte Rauchgas hinter einem Wäschersystem ("nasse" Rauchgasreinigung) abgekühlt und die dabei frei werdende Kondensationswärme beispielsweise mit Hilfe von Wärmepumpen zur Fernwärmeerzeugung genutzt wird. [Baer 2010] [Karpf 2011]

Die angesprochenen Optimierungsmaßnahmen im Bereich der Rauchgasreinigung ermöglichen nach [Karpf 2011] eine Wärme bzw. Energierückgewinnung im Bereich von 200 bis 850 kW pro 10.000 Nm^3/h Rauchgas (feucht).

Diese Technologien der Rauchgaswärmenutzung werden auch an Kohlkraftwerken eingesetzt [Adamczyk 2003]. Durch die zurückgewonnenen Wärmemengen wird weniger Dampf für Heizzwecke benötigt, so dass größere Dampfmengen in der Turbine zur Stromerzeugung zur Verfügung stehen. Die Installation einer Rauchgaswärmenutzung führte am Standort Mehrum zu einer Wirkungsgradsteigerung von 2 % [Michels 2004], an drei anderen Standorten zwischen 0,2 bis 1,3 % [Adamczyk 2003].

Außerdem bietet der Einsatz von effizienteren elektrischen Antrieben u.a. für Pumpen, Kompressoren, oder Saugzüge einen Ansatz zur Steigerung der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen. Allerdings sind erreichbaren Verbesserungen insbesondere bei größeren Motoren teilweise sehr klein. [Müller 2015]

3.5 Maßnahmen an großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen in den Bereichen Feuerung, Kessel und Rauchgasreinigung vorgestellt. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden entsprechenden Maßnahmen für ausgewählte Standorte im In- und Ausland vorgestellt.

3.5.1 Amsterdam

Die existierende Abfallverbrennungsanlage bestand zunächst aus 4 Verbrennungslinien, jeweils ausgelegt für einen Durchsatz von 25 t/h [Wandschneider 2004]. Im Jahr 1999 begannen Planungen, die Gesamtverbrennungskapazität durch Ergänzung mit 2 weiteren Verbrennungslinien von 800.000 t/Jahr auf 1,3 Mio. t zu erhöhen [Wandschneider 2004]. Die letzten zwei Linien nahmen 2007 den kommerziellen Betrieb auf, so dass mit insgesamt sechs Verbrennungslinien die weltweit größte Abfallverbrennungsanlage entstand [Martin 2013].

Bei der Planung der neuen Verbrennungslinien bestand die Aufgabe, einerseits die Emissionen in die Atmosphäre zu minimieren und möglichst weitgehend verwertbare Rückstände zu erzeugen. Auf der anderen Seite wurden mit einem elektrischen Nettowirkungsgrad über 30 %, einer hohen Verfügbarkeit und einer Senkung der Verbrennungspreise anspruchsvolle Ziele definiert. [Wandschneider 2004]

Die neuen Verbrennungslinien und die getroffenen technischen Maßnahmen sind in [Wandschneider 2007] beschrieben. Neben den üblichen technischen Lösungen zur Steigerung des Wirkungsgrades wie hohe Dampfparameter, Wärmetauscher zur Rückgewinnung der Kondensationswärmen oder einem geringen Kondensationsdruck wurde eine neuartige Zwischenüberhitzung installiert. Der prinzipielle Aufbau des Wasser-Dampf-Kreislaufs ist in Abbildung 3.14 (S. 37) dargestellt.

Entsprechend Abbildung 3.14 (S. 37) wird der Frischdampf aus dem Dampferzuger zunächst zur Hochdruckturbine geleitet. Anschließend wird der teilentspannte Dampf aus der ersten Turbinenstufe einem Wärmetauscher zur Zwischenüberhitzung zugeführt. Dieser Wärmetauscher wird zur Vermeidung von Korrosionsproblemen allerdings nicht mit Rauchgas, sondern mit Sattedampf aus der Dampftrommel beheizt. [Wandschneider 2007]

Nach über 2 Jahren Betrieb ist festzustellen, dass die gesetzten Erwartungen erfüllt und elektrischer Wirkungsgrad oberhalb von 30 % erreicht wird [Wandschneider 2010].

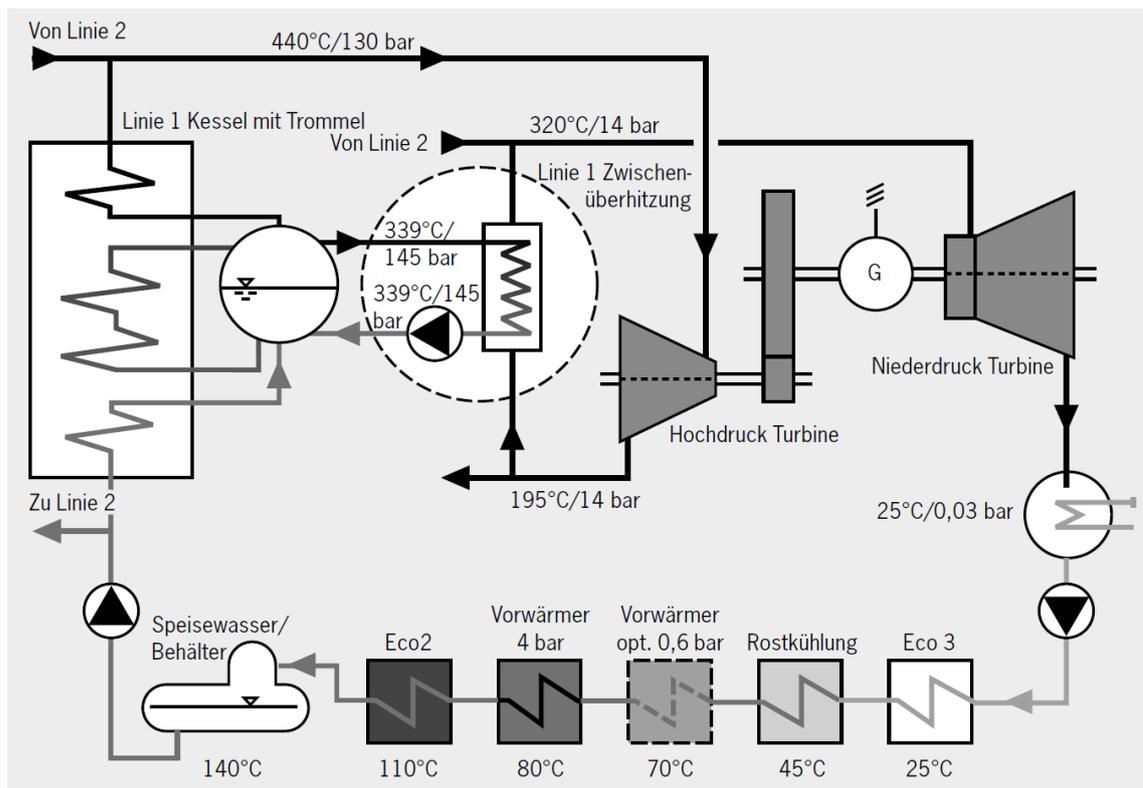


Abbildung 3.14: Wasser-Dampf-Kreislauf am Standort Amsterdam mit Zwischenüberhitzung [Wandschneider 2010].

3.5.2 Burgau

Neben den oben im Text beschriebenen Rostfeuerungsanlagen existiert in Deutschland seit 1987 am Standort Burgau eine Anlage, in der zur thermischen Behandlung von Restmüll eine Pyrolysetechnik eingesetzt wird. Eine frühe Beschreibung findet man in [Fichtel 1987], eine aktuelle Darstellung in [Meier 2015]. Das Energieeffizienzkriterium R1 (Siehe Abschnitt 4.3) wurde von der Anlage in Burgau mit 0,602 knapp erreicht; allerdings wurde der R1-Status aufgrund von Unsicherheiten bei der Datengrundlage und Anwendungsproblemen der für Rostfeuerungen entwickelten Berechnungsweise nicht zuerkannt [Meier 2015].

Der Betrieb dieser Anlage sollte zum Jahresende 2015 bzw. 30. Juni 2016 eingestellt werden [Meier 2015]. In dem entsprechenden Entscheidungsprozess wurden auch ökologische Gesichtspunkte einbezogen. Danach weisen einige Müllverbrennungsanlagen im Vergleich zur Pyrolyseanlage in Burgau niedrigere Emissionswerte und eine bessere Energieeffizienz auf [LRA 2014]. Entsprechend den Ausführungen in [Meier 2015], [LRA 2014] und [RE 2014 43] ist davon auszugehen, dass für die Stilllegung der Anlage am Standort wirtschaftliche Gründe im Zusammenhang mit anstehenden Investitionen und dem aktuellen Preisniveau bei der Abfallverbrennung ausschlaggebend gewesen sind.

3.5.3 Kassel

Die Abfallverbrennungsanlage in Kassel nahm 1967 mit einer Verbrennungslinie ihren Betrieb auf [Schreyer 2009]. Die später erfolgten Umbauten, Ergänzungen und Erneuerungen im Bereich der Kessel sowie der Rauchgasreinigung sind in Tabelle 3.4 aufgeführt.

Tabelle 3.4: Chronologische Zusammenstellung der Veränderungen an der Abfallverbrennungsanlage Kassel (Auswahl).

1967 / 1968	Inbetriebnahme der Müllverbrennungsanlage mit den Kesseln 1 und 2.
1981 - 1982	Anpassung der Kessel an geänderte Heizwerte.
Dez. 1985	Auftrag zum Bau einer neuen Rauchgasreinigung an die Firma Noell-KRC Umwelttechnik GmbH, Würzburg.
1987	Errichtung der Rauchgasreinigung nach dem Sprühabsorptionsverfahren mit Kalkmilch und Rezirkulation zur Emissionsreduzierung, Inbetriebnahme ab Mai 1987.
1994	Seit 1994 wird die Anlage den gesetzlichen Vorgaben der 17. BImSchV angepasst.
1997	Inbetriebnahme des neuen Kessels 3, Rückbau von Kessel 1.
1999	Inbetriebnahme des neuen Kessels 4, Rückbau von Kessel 2.
ab 2004	Erneuerung der Rauchgasreinigung.
Quellen:	[MHKW 2016] [Noell 1990] [Schreyer 2009] [Tanner 2008] [Tanner 2011] [Thomé-K. 1983]

Die Erneuerung der Rauchgasreinigung war erforderlich, da die vorhandenen Sprühabsorber einen erhöhten Verschleiß und starke Korrosionserscheinungen zeigten. Außerdem waren die Rauchgaskanäle stark korrodiert und die vorhandenen Gewebefilter hatten die Betriebsstundengrenze erreicht. Für den Neubau wurde eine verfahrensoffene Ausschreibung durchgeführt, an die sich eine zweiphasige Auswertung der Angebote anschloss. [Tanner 2008]

Im Rahmen des Neubaus der Rauchgasreinigung hatten durchgeführte energetische Betrachtungen zur Optimierung des Prozesses eine große Bedeutung [Tanner 2009]. Die alten Rauchgasreinigungsanlagen, in Betrieb bis 2007 bzw. 2008 [MHKW 2016], und die neue Rauchgasreinigungstechnik sind in Abbildung 3.15 (S. 39) zum Vergleich gegenübergestellt.

Aus Abbildung 3.15 ist zu entnehmen, dass mit Erneuerung der Rauchgasreinigung der verfahrenstechnische Aufbau durch Demontage der Elektrofilter vereinfacht wurde. Außerdem erfolgt die Abscheidung saurer Schadstoffe nicht mehr mit einem quasitrockenen System (Sprühabsorption) auf Basis von Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ - Kalkmilch), sondern durch ein trockenes Verfahren mit Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3 - Bicarbonat).

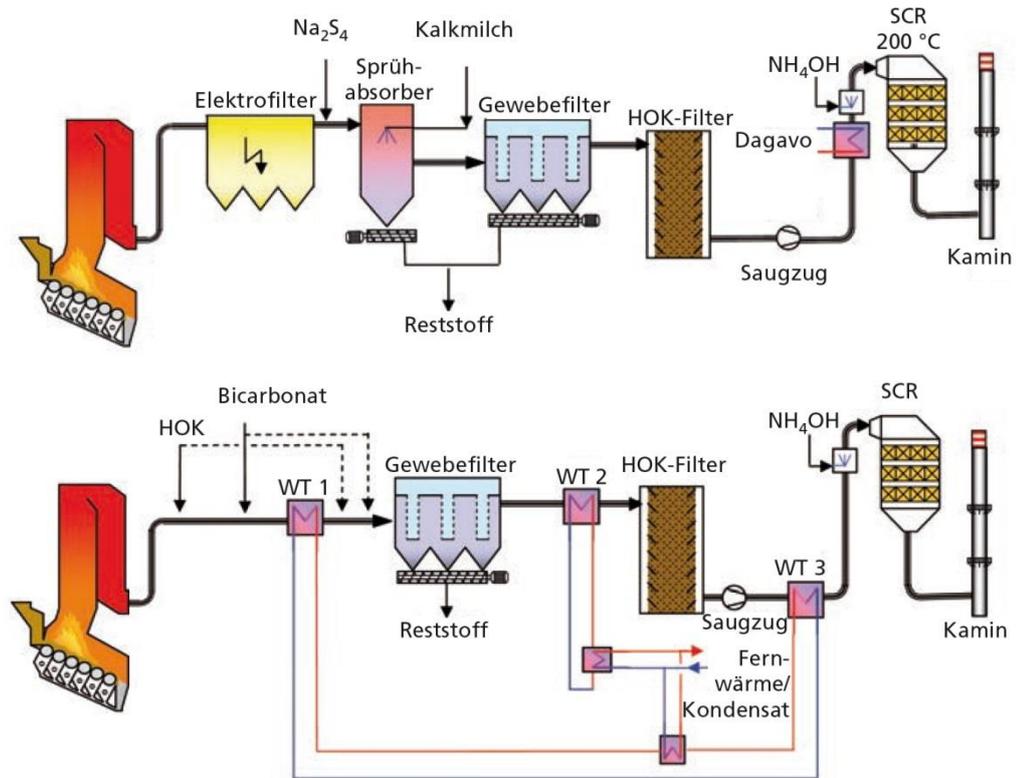


Abbildung 3.15: Rauchgasreinigung am Standort Kassel vor (oben) und nach dem Umbau ([Karpf 2011] korrigiert).

Ähnliche Rauchgasreinigungsanlagen existieren auch an anderen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken, allerdings ohne den Herdofenkoksfilter (HOK-Filter). Am Standort Kassel wären die bisherigen, sehr niedrigen Emissionswerte ohne den HOK-Filter mit der neuen Rauchgasreinigung nicht erreichbar gewesen. Durch die weitere Nutzung des HOK-Filters vereinfachte sich die Genehmigung für den Umbau der Rauchgasreinigung [Tanner 2008]. Am Standort Kassel wurde dieses Rauchgasreinigungsaggregat in Eigenregie saniert; der Druckverlust konnte durch Verwendung eines grobkörnigeren Adsorbens von 16 auf 2 mbar reduziert werden [Tanner 2009].

Mit dem Umbau der Rauchgasreinigung am Standort Kassel wurde neben einer bessern Wirtschaftlichkeit eine bessere Energieeffizienz erreicht. Zusätzlich zu verschiedenen Optimierungen führte der Neubau einer Turbine zu einer weiteren Wirkungsgradsteigerung [Tanner 2008] [RE 2012 42]. Ergänzende Informationen zur Energienutzung am Standort Kassel findet man in [Schreyer 2009] und [Tanner 2011].

3.5.4 Mannheim

Verschiedene Veränderungen zur Verbesserung der Energieeffizienz wurden auch am Heizkraftwerk Mannheim Nord durchgeführt. Der Standort gehört zum Konzern der MVV Energie AG und liegt auf der Friesenheimer Insel zwischen Rhein, Neckar und Altrhein. An diesem Standort wurde der Betrieb 1963 mit zwei konventionellen Kraftwerksanlagen mit

bivalenter Feuerung für Erdgas und Heizöl aufgenommen. Die Abfallverbrennung begann 1965 mit zwei Kesseln; die Inbetriebsetzung eines dritten Müllkessels erfolgte im Jahr 1973. [Albert 1991] [Albert 1997] [MVV 1992a] [MVV 1992b]

Die bei der Abfallverbrennung freigesetzte Energie wird an diesem Standort nach dem Prinzip der Kraftwärmekopplung genutzt. Bedingt durch den Aufbau des Kraftwerks als Sammelschienenkraftwerk wurden auch die Kessel zur Abfallverbrennung mit hohen Dampfparametern (120 bar, 520 °C) betrieben [Knapp 2012] [Reith 2004].

Eine kontinuierliche Modernisierung und Anpassung der Anlagen an die Bedürfnisse führte zu umfangreichen Veränderungen in der Anlagentechnik und bei der Energienutzung [Albert 2004] [Knapp 2012]. Die Einführung einer neuen Feuerleistungsregelung auf Basis von Fuzzy Logic begann 1995 und beeinflusste den Anlagenbetrieb positiv [Albert 1997] [Gierend 1996]. Bis 2009 wurden drei weitere Kessel (ohne Biomassekraftwerk) für die Abfallverbrennung als Ersatz für die Altanlagen errichtet [Knapp 2012].

Die Konstruktion und Auslegung dieser Kessel orientierte sich an Betriebserfahrungen und Veränderungen im Energiesektor. Der Kessel 4 wurde 1997 in Betrieb genommen und ist mit einer separaten Brennkammer zur Dampfüberhitzung ausgerüstet, die mit Erdgas betrieben wird [Albert 2004]. Mit dieser Technologie soll Korrosionsprozessen entgegengewirkt werden, die aufgrund der am Standort Mannheim genutzten hohen Dampfparameter besondere Probleme im Betrieb bereiten [Albert 2004]. Die energetischen Vorteile dieser Fremdüberhitzung am Kessel 4 in Mannheim wurden von Seier und Albert [Seier 1998] näher untersucht; der thermodynamische Wirkungsgrad steigt um 5 % gegenüber konventionellen Abfallverbrennungsanlagen mit 400 °C und 40 bar als Dampfparametern. Beschränkt man den Vergleich auf die Stromerzeugung, so können im Kessel 4 in Mannheim 9 % mehr Strom erzeugt werden als bei gleichem Brennstoffeinsatz in einer konventionellen Anlage [Seier 1998].

Die Liberalisierung des Strommarktes führte am Standort Mannheim dann dazu, dass der seit 2003 genutzte Kessel 5 zwar für ca. 40 bar ausgelegt wurde, aber lediglich als Prozessdampferzeuger ohne Stromerzeugung mit einem Druck von ca. 28 bar betrieben wird [Albert 2004] [Reith 2004].

Der dritte Neubaukessel wurde zum Jahresende 2009 mit den für Abfallverbrennungsanlagen üblichen Dampfparametern (40 bar, 400 °C) in Betrieb genommen. Dieser Kessel erreichte mit mehr als 8000 jährlichen Betriebsstunden schnell hohe Verfügbarkeiten und lange Wartungsintervalle (über 1 Jahr) [Knapp 2012].

Für die Dampfnutzung am Standort Mannheim existieren unterschiedliche Angaben. Nach [Albert 1991] wurden 1991 etwa 60 Abnehmer mit Prozessdampf beliefert; in [Reith 2004] werden ca. 50 Verbraucher erwähnt. Entsprechend einer älteren Beschreibung [MVV-U 2006] für das Heizkraftwerk wurde Prozessdampf für 25 Industriebetriebe (Dampfmenge 100 t/h) bereitgestellt. Ab 2006 wurde ein Prozessdampfkunde nicht mehr beliefert, so dass 80 t/h Fernwärmedampf verstromt werden mussten [Knapp 2012]. In einem Flyer für das Heizkraftwerk

Mannheim [MVV-U 2012] wird eine Prozessdampfversorgung für 15 Industriekunden mit einer Dampfmenge von 65 t/h erwähnt.

Aufgrund der Veränderungen bei der Dampfnutzung und verstärkten Konkurrenz auf dem Entsorgungsmarkt wurde am Standort Mannheim die Energieeffizienz verbessert, die insbesondere mit einer höheren elektrischen Energieabgabe verbunden ist. In einem umfangreichen Projekt wurden Umbauten an den Kesseln und Veränderungen an den Turbinenanlagen vorgenommen. Insgesamt konnte die Stromerzeugung bei unverändertem Brennstoffeinsatz um 12 % gesteigert werden, so dass elektrische Bruttowirkungsgrade von über 31 % erreicht werden. [Knapp 2012]

3.5.5 Offenbach

Das Müllheizkraftwerk Offenbach nahm für die Abfallentsorgung in der Rhein-Main-Region im Jahr 1970 mit drei Verbrennungslinien den Betrieb auf [Füle 2016]. Zunächst war die Anlage, wie in Abbildung 3.16 gezeigt, mit einer sehr einfachen Rauchgasreinigung ausgerüstet.

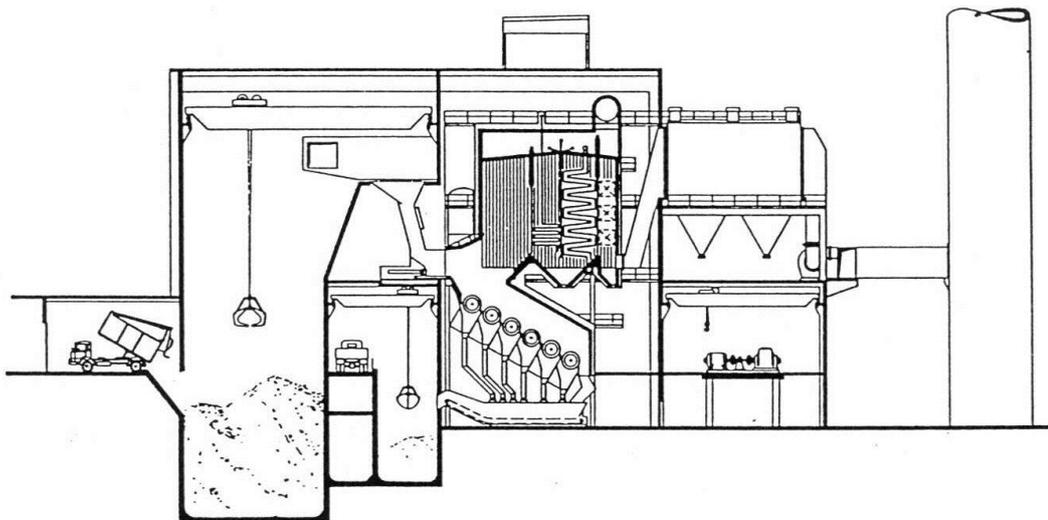


Abbildung 3.16: Längsschnitt durch das Müllheizkraftwerk Offenbach [Thomé-K. 1985].

Nach Abbildung 3.16 umfasste die Rauchgasreinigungsanlage am Standort Offenbach zunächst nur einen Staubabscheider (Elektrofilter [Thomé-K. 1985]). Im Lauf der Zeit wurde die Anlage mehrfach umgebaut und die Rauchgasreinigung ergänzt.

Den genauen Aufbau der Rauchgasreinigung ab 1989 mit der zweistufigen Nasswäsche findet man in [ZAO 1990]. Die Umbaumaßnahmen für die Einhaltung der Anforderungen aus der 17. BImSchV sind in [UVF 1993] aufgeführt. Die spätere Installation der Dampf-Gas-Wärmetauscher vor der Entstickungsanlage ist in [Wallstein 2009] etwas näher beschrieben.

3 Grundlagen der thermischen Abfallbehandlung

Die umfangreichen Änderungen im Bereich der Rauchgasreinigung am Standort Offenbach sind in Tabelle 3.5 aufgeführt.

Tabelle 3.5: Veränderungen am Müllheizkraftwerk Offenbach [EVO-HP 2016] [Füle 2016].

Zeit	Veränderung
1986-1987	Umbau der Feuerung nach Vorgaben der TA Luft
1989	Inbetriebnahme der Rauchgasreinigung mit abwasserfrei arbeitender, zweistufiger Nasswäsche
1996-1997	Nachrüstung entsprechend der 17. BImSchV, Erneuerung der Feuerräume und Kessel
2001	Inbetriebnahme der Fernwärmeverbindungsleitung nach Dietzenbach
2005	Bau eines neuen Luftkondensators, Inbetriebnahme der Herdofenkoks-Zugabe (Quecksilberabscheidung)
2006	Installation einer neuen Turbine (2,2 MW)
2008	Einbau von Dampf-Gas-Wärmetauschern vor der Entstickungsanlage zur Minderung des Erdgasbedarfs
2009	Inbetriebnahme der Fernwärmeleitung nach Heusenstamm
2010	Erneuerung der Leittechnik

Der zurzeit noch aktuelle Aufbau des Müllheizkraftwerks am Standort Offenbach ist in Abbildung 3.17 dargestellt.



Abbildung 3.17: Aktuelles Schema des Müllheizkraftwerks Offenbach [EVO 2013].

Entsprechend Abbildung 3.17 weist die Anlage am Standort Offenbach eine relativ aufwändige Rauchgasreinigungsanlage auf. Zur Staubabscheidung ist ein Elektrofilter installiert, dem ein zweistufiges Wäschersystem zur Abtrennung von sauren Rauchgasbestandteilen, insbesondere HCl und SO₂, nachgeschaltet ist. Am Ende der Rauchgasreinigung ist ein Kombinationskatalysator installiert, mit dem Stickoxide und Dioxine aus dem Rauchgas entfernt werden.

Die Abwässer aus dem Wäschersystem werden einem Sprühtrockner zugeführt, der direkt hinter dem Kessel installiert ist. Die hier entstehenden Salze werden mit dem Flugstaub im bereits erwähnten Elektrofilter aus dem Rauchgas abgetrennt.

Durch eine umfassende Modernisierung der Anlage am Standort Offenbach bis Herbst 2016 wurde die bisherige auf zwei Wäschern basierende nasse Rauchgasreinigung durch eine quasi-trockene Verfahrenskonzeption ersetzt. Durch diese Maßnahme sinken der elektrische Eigenbedarf der Rauchgasreinigung von 1,2 auf 0,3 MW und der Wärmebedarf von 5,2 auf 0,2 MW [Füle 2016].

Außerdem wird eine neue Dampfturbine installiert, um die jährliche Stromabgabe von 40.000 auf 90.000 MWh steigern zu können [RE 2015 31] [EVO PM 2015].

3.5.6 Stuttgart

Im Stadtteil Münster von Stuttgart existiert seit 1908 ein Kraftwerksstandort, an dem heute die EnBW AG ein Heizkraftwerk betreibt. Heute wird an diesem Standort neben drei Kohlekraftwerksanlagen und zwei Gasturbinen eine Abfallverbrennungsanlage mit drei Verbrennungslinien betrieben. Die Abfallverbrennung begann bereits im Jahr 1965; die zurzeit betriebene Anlage ist für einen Durchsatz von 420.000 t pro Jahr ausgelegt. [EnBW 2008]

Am Standort Stuttgart wurde in einem Projekt die teilweise über 20 Jahre alte Leittechnik bis zum Jahresende 2007 ausgetauscht. Die neue Leittechnik sollte die Nachteile des alten Systems beseitigen, die durch eine große Systemvielfalt, personalintensiven Betrieb und beginnende Schwierigkeiten bei der Ersatzteilbeschaffung gekennzeichnet waren. Ein weiteres Ziel der neuen Leittechnik war ein höherer Automatisierungsgrad. [Gotschlich 2008]

Wie Abbildung 3.18 (S. 44) am Beispiel des Dampfmassenstroms eines Müllkessels zeigt, wurde ein gleichmäßigeres Regelverhalten bei der Abfallverbrennung erreicht.

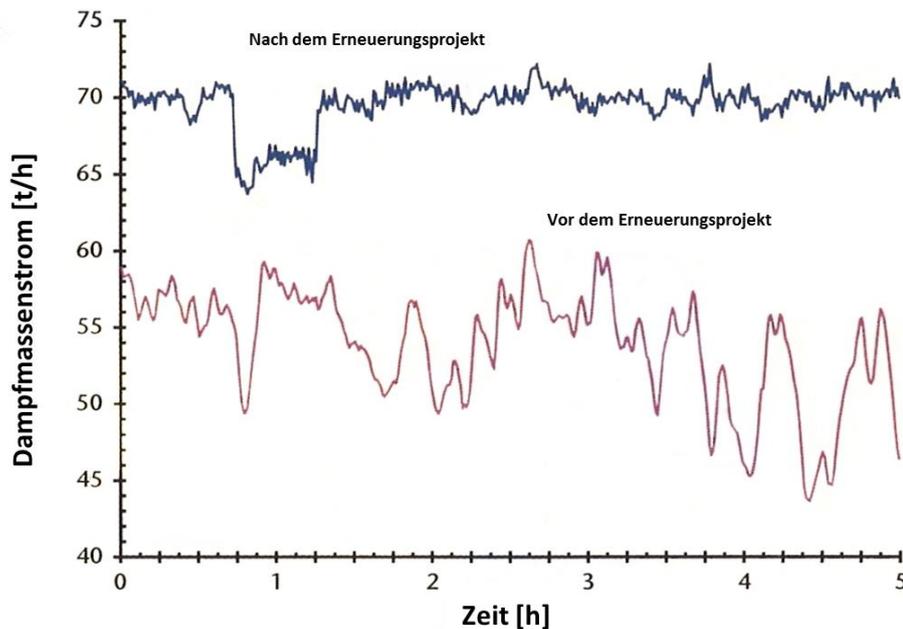


Abbildung 3.18: Dampfmassenstrom am Austritt eines Müllkessels am Standort Stuttgart vor und nach der Sanierung [Gotschlich 2008].

3.5.7 Weitere Standorte im In- und Ausland

In der Vergangenheit wurden am Abfallheizkraftwerk Augsburg Verbesserungen im organisatorischen Bereich und der Verfahrenstechnik durchgeführt. Im Rahmen der technischen Optimierungen wurde die Betriebstemperatur der katalytisch arbeitenden Entstickungsanlage (SCR-Verfahren) von 270 auf 230 °C gesenkt. Außerdem wird für die Aufheizung der Rauchgase jetzt Heißdampf an Stelle von Erdgasbrennern verwendet, so dass die Betriebskosten und die CO₂-Emissionen gesenkt werden konnten. [Barth 2004]

Eine entsprechende Optimierung wurde ebenfalls an der MVA Bielefeld durchgeführt. Die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen auf den spezifischen Erdgasverbrauch sind Abbildung 3.19 (S. 45) zu entnehmen.

Eine umfangreiche Modernisierung erfolgte für ein Müllheizkraftwerk am Standort Bremen, in der u.a. die Dampfparameter für zwei Kessel gesteigert und eine neue Dampfturbinenanlage installiert wurde. Als Resultat konnte eine Verdreifachung der Stromerzeugung und damit ein R1-Kriterium (Siehe Abschnitt 4.3) von 0,7 erreicht werden [SWB 2013].

Am Restmüllheizkraftwerk Böblingen ist eine Umstellung der Rauchgasreinigung von einer nass-chemischen Anlage auf ein trockenes Verfahren geplant. Das Ziel dieser Maßnahme ist eine Senkung der Instandhaltungs- und Personalkosten sowie eine Steigerung der Energieabgabe in Form von elektrischem Strom und Fernwärme. [RE 2016 30]

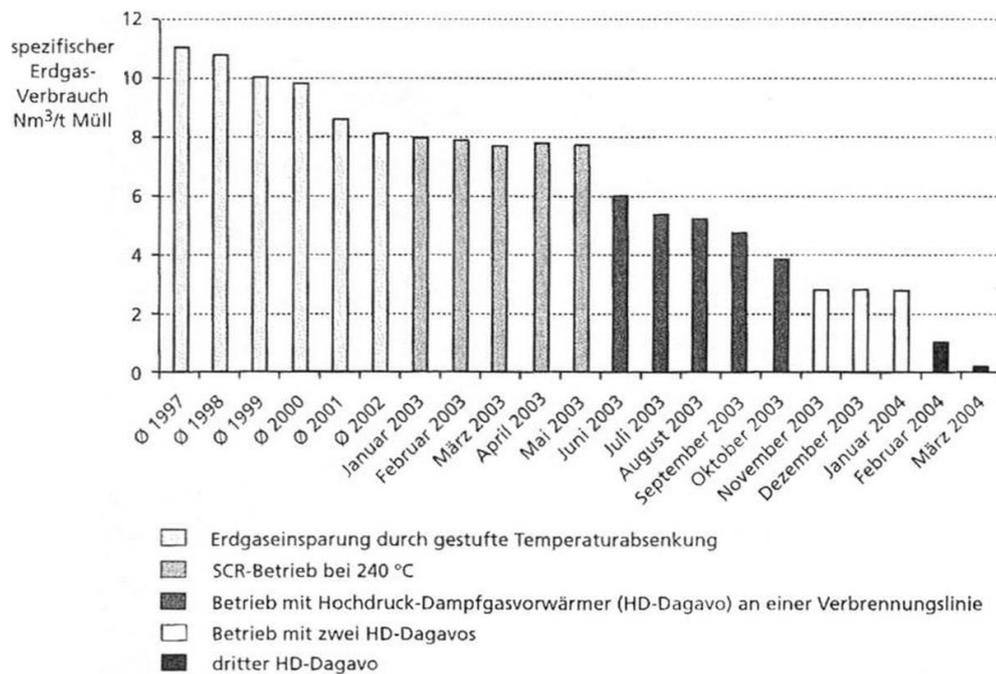


Abbildung 3.19: Veränderung der Erdgas mengen für die SCR-Anlage an der MVA Bielefeld [Kriete 2004].

Verschiedene Optimierungen wurden ebenfalls an der Müllverbrennungsanlage am Standort Velsen durchgeführt, die im Jahr 1998 mit einer jährlichen Verbrennungskapazität von 230.000 bis 240.000 t Abfall den Betrieb aufnahm. Neben einer gezielten Verteilung der Primärluft auf die Rostbahnen sollte eine bessere Ausnutzung der maximalen Dampfleistung erreicht werden. [Orloff 2016]

Im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen wurde am Standort Weisweiler die Rauchgasreinigung umgebaut. Neben einer Senkung der Betriebskosten sollte die Energieeffizienz der Anlage verbessert werden. Die bestehende Rauchgasreinigungsanlage, aufgebaut aus Sprühtrockner, Gewebefilter, zweistufigem Wäschersystem und SCR-Anlage, wurde gegen eine einstufige Trockensorption mit NaHCO_3 und Herdofenkoks sowie anschließender SCR-Anlage ersetzt. [Karpf 2011] [Karpf 2012]

Am MHKW Schwandorf wurde ein wassergekühlter Rost installiert, so dass die Standzeit der hochbelasteten Abschnitte von 7000 auf 50.000 bis 80.000 Betriebsstunden gesteigert werden konnte [Krüger 2015]. Die bei der Rostkühlung abgeführte Wärme, die im Bereich von 1 % der Kesselleistung liegt, wird zur Speisewasservorwärmung genutzt [Krüger 2015]. Außerdem wurde die Betriebstemperatur der SCR-Anlage von 280 °C auf 180 °C gesenkt [Metschke 2005]. Eine weitere Betriebsoptimierung ergab sich im Lauf der Zeit bei der quasi-trockenen Rauchgasreinigung; deren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Verbrauch im Zeitraum von 1993 bis 2003 von 29,1 kg/t Abfall auf 16,3 kg/t reduziert werden konnte [Metschke 2005].

Ein Umbau an der niederländischen Abfallverbrennungsanlage AZN Moerdijk führte neben Verbesserungen bei Durchsatz und Instandhaltungskosten auch zu einem verringerten Verbrauch an Elektrizität und Ammoniakwasser [Diederer 2004].

In Italien wurde die Abfallverbrennungsanlage am Standort Brescia mit Blick auf eine möglichst hohe Stromerzeugung optimiert. Neben Dampfparametern von 60 bar und 450 °C bzw. 73 bar und 480 °C wurden der Eigenbedarf möglichst weit reduziert und die Abgastemperatur nach der Rauchgasreinigung gesenkt. Der elektrische Netto-Wirkungsgrad liegt über 27 % [Fleck 2005] [Martin 2013].

Am Standort Bilbao in Spanien wird der in der Abfallverbrennungsanlage erzeugte Dampf (100 bar, 330 °C) dem Abhitzeessel einer Gasturbine zugeführt. Der elektrische Netto-Wirkungsgrad, bezogen auf die durch den Abfall eingebrachte Energie, liegt über 40 % [Martin 2013]. Der gleiche Wirkungsgrad wird mit einem ähnlichen System am Standort Mainz in Deutschland erreicht [Martin 2013].

Tabelle 3.6 zeigt eine Gegenüberstellung von Kesselbetriebsparametern und erreichbaren Wirkungsgraden für ausgewählte Abfallverbrennungsanlagen.

Tabelle 3.6: Beispiele für Wirkungsgrade [Fleck 2005].

	Einheit	Brescia	Mainz	Amsterdam	Bilbao
besondere Merkmale		energie-optimiert	Kombination mit GuD-Erdgas-Kraftwerk	Zwischenüberhitzung	integriert in GuD-Erdgas-Kraftwerk
Druck des überhitzten Dampfes	bar	60	40	130	100
Temperatur des Sattedampfes	°C	276	250	330	311 (330)
Temperatur des überhitzten Dampfes	°C	450	400/555 (Abfall/Erdgas)	440	540 (Erdgas)
Abgastemperatur vor Abgasreinigung	°C	130	200	Wärmenutzung nach Gewebefilter	200
projektierter elektrischer Wirkungsgrad	%	27	> 40	30	42
Feuerungssystem		Martin-Rückschub-Rost	Martin-Rückschub-Rost (wassergekühlt)	Martin-Horizontal-Rost (wassergekühlt)	Martin-Rückschub-Rost

Im Rahmen eines größeren Umbauprojekts wurde die Kehrichtverbrennungsanlage am Standort Horgen in der Schweiz von zwei auf eine Verbrennungslinie zurückgebaut und eine bessere Energieeffizienz erreicht. Zu den durchgeführten Maßnahmen gehörte u.a. eine strömungstechnische Verbesserung des Kessels für eine bessere Wärmeausnutzung und eine Optimierung des Verbrennungsprozesses durch einen geringeren Luftüberschuss. Außerdem wurde die mit einer Nasswäsche ausgestattete Rauchgasreinigungsanlage durch ein trockenes Rauchgasreinigungssystem ersetzt, so dass eine Wiederaufheizung vor der SCR-Anlage nicht mehr notwendig ist. Einen weiteren Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz liefert die Optimierung der Wärmeauskopplung für die Fernwärmeversorgung. [Keunecke 2016]

Informationen zu neuen energieeffizienten Abfallverbrennungsanlagen sowie Umbauten an weiteren Standorten zur Steigerung der Energieeffizienz können der Literatur [Karpf 2011] [Karpf 2012] [Keunecke 2016] entnommen werden.

3.6 Zusammenfassung und Erkenntnisse

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen der thermischen Abfallbehandlung vorgestellt und die möglichen Wege für eine Verbesserung der Energieeffizienz aufgezeigt. Ergänzend wurden für einige ausgewählte Standorte die durchgeführten Maßnahmen beschrieben.

Aus den vorangegangenen Abschnitten wird deutlich, dass es keine wesentliche Verbesserung durch eine Einzelmaßnahme gibt. Vielmehr beruht die Steigerung der Energieeffizienz bzw. der Wirkungsgrade auf einer Kombination von bekannten Maßnahmen, die eine Abhängigkeit vom Anlagenstandort aufweisen. Folglich ist eine Übertragung von Optimierungsmaßnahmen auf andere Standorte nicht immer möglich. Eine genauere Untersuchung von drei bayrischen Abfallverbrennungsanlagen hinsichtlich von Optimierungsmaßnahmen in [Faulstich 2008] führt zu dem gleichen Ergebnis.

Die aufgeführten Beispiele zeigen, dass es neben der eigentlichen Optimierung der Verbrennung auch technischen Maßnahmen gibt, um die Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen zu erhöhen. Dazu gehören Verbesserungen im Bereich des Kessels und der Rauchgasreinigung. Maßnahmen im Bereich der Rauchgasreinigung fokussieren sowohl einfachere Rauchgasreinigungssysteme, die aus wenigen Stufen bestehen und auf diesem Weg den Eigenbedarf reduzieren, als auch zusätzliche Wärmetauscher zur Nutzung der im Rauchgas enthaltenen Wärme.

Die erreichbaren Beiträge von einzelnen Verbesserungen zur Steigerung der Netto-Stromproduktion von Abfallverbrennungsanlagen sind vergleichend in Abbildung 3.20 (S. 48) dargestellt. Weitere Daten zur Verbesserung der Effizienz durch prozesstechnische Veränderungen findet man in [Müller 2009] und [Pacher 2008].

Aus Abbildung 3.20 ergibt sich, dass die Steigerung der Dampfparameter die wirkungsvollste Einzelmaßnahme darstellt. Andererseits lässt sich mit allen anderen Optimierungsmaßnahmen gemeinsam fast die doppelte Steigerung der Stromproduktion erreichen.

Die Steigerung des Wirkungsgrades durch anlagentechnische Veränderungen führt in der Regel zu komplizierteren und somit eher reparaturanfälligen und wartungsintensiveren Anlagen. Dies bedeutet, dass neben steigenden Investitionskosten zumindest indirekt eine geringere Verfügbarkeit entsteht. Auf der anderen Seite sind durch eine erhöhte Produktion von elektrischer Energie oder Bereitstellung von Wärme höhere Erlöse möglich.

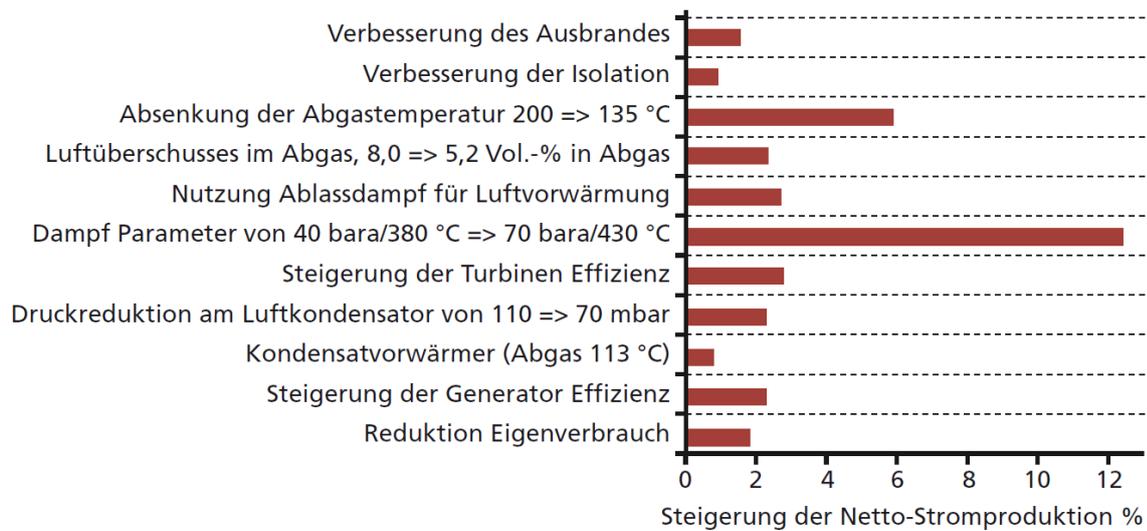


Abbildung 3.20: Vergleich der Maßnahmen zur Steigerung der Stromproduktion [Benz 2009]
(Zitiert nach [Keunecke 2016]).

Den höchsten Einfluss auf Erneuerungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an Abfallverbrennungsanlagen haben allerdings EU-Richtlinien und nationale Gesetze sowie die Steigerung der Anlagenwirtschaftlichkeit [TR 2013]. Aufwändige und kostenintensive Umbauten der Rauchgasreinigung werden in der Regel aufgrund von Verschleiß in der vorhandenen Verfahrenstechnik ausgeführt, denn unter Berücksichtigung der Marktpreise für Strom und den Verbrennungspreisen für Abfall sind Investitionen in Maßnahmen für eine Wirkungsgradsteigerung oft nicht wirtschaftlich [Gohlke 2011]. Fehlende Wirtschaftlichkeit wird auch in [UBA 2008b] als Hinderungsgrund für energetische Optimierungsmaßnahmen angeführt. Für eine Wirkungsgradsteigerung um 5 % sind an jeder Anlage Investitionen von ca. 10 bis 20 Mio. EUR erforderlich; für den Fernwärmeausbau sind 0,5 bis 1,5 Mio. EUR pro Kilometer zu veranschlagen [UBA 2008a].

Rentable Bedingungen für eine weitere Nutzung von Energieeffizienzpotenzialen in Abfallverbrennungsanlagen erfordern eine stärkere finanzielle Förderung der Strom- und Wärmeerzeugung [RE 2006 39].

4 Rechtliche Grundlagen

In Deutschland sind Umweltschutz und somit der umweltverträgliche Betrieb großtechnischer Anlagen als Staatsziel im Grundgesetz [Grundgesetz] festgeschrieben. Nach § 20a des Grundgesetzes schützt der Staat *in Verantwortung für die künftigen Generationen die natürlichen Lebensgrundlagen und die Tiere im Rahmen der verfassungsmäßigen Ordnung durch die Gesetzgebung und nach Maßgabe von Gesetz und Recht durch die vollziehende Gewalt und die Rechtsprechung.*

Entsprechend werden in Deutschland die Errichtung, der Betrieb und der spätere Abbau von großtechnischen Anlagen durch verschiedene Rechtsvorschriften geregelt. Dabei werden Gesetze durch ein umfangreiches untergesetzliches Regelwerk ergänzt, das u.a. Verordnungen und Verwaltungsvorschriften umfasst.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass aktuelle Veränderungen in deutschen Rechtsvorschriften oft durch Vorgaben auf europäischer Ebene bewirkt werden. In der Regel werden europäische Richtlinien verabschiedet, die anschließend in jedem europäischen Staat in nationale Rechtsvorschriften integriert werden müssen.

In diesem Kapitel werden lediglich die wichtigsten europäischen Richtlinien und deutschen Rechtsvorschriften vorgestellt, soweit dies für die vorliegende Arbeit notwendig ist. Im Mittelpunkt stehen der Umgang mit Abfällen und der Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen.

4.1 Europäische Emissionsrichtlinie

Die Richtlinie über Industrieemissionen [R 2010 75] (engl.: Industrial Emissions Directive – IED) stellt allgemein die wichtigste europäische Richtlinie für den Betrieb von großtechnischen Anlagen dar, beispielsweise aus den Bereichen Energieerzeugung oder chemische Industrie. Die IED löst neben der alten europäischen Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie) [R 1996 61] zusätzlich mehrere europäische Richtlinien zu verschiedenen Industrieprozessen ab, zu denen auch die Abfallverbrennung gehört. Folglich ist die IED wesentlich umfangreicher als die ältere IVU-Richtlinie.

Mit der IED erfolgt im Vergleich zur Vorgängerrichtlinie allerdings keine umfassende Neufassung der umweltbezogenen Vorschriften für Industrieanlagen. Das Ziel war eine Weiterentwicklung, die einer Verbesserung und Vereinheitlichung der Umweltstandards beim Bau und Betrieb von Industrieanlagen dienen soll [Kopp-A. 2015].

Insgesamt ist die IED in sieben Kapitel aufgeteilt. Die Kapitel 1 und 2 betreffen die Definition von Begriffen und allgemeine Anforderungen an die Genehmigung und den Betrieb von großtechnischen Anlagen. Die folgenden Kapitel 3 bis 6 enthalten detaillierte Sondervorschriften für Kraftwerke, Abfallverbrennungsanlagen und industrielle Prozesse, bei denen organische Löse-

mittel eingesetzt werden. Übergangsvorschriften, die Aufhebung von Richtlinien und das Inkrafttreten sind u.a. Bestandteile des letzten Kapitels.

Das Ziel der IED entsprechend Artikel 1 ist ein möglich hohes Schutzniveau für die Umwelt durch eine integrierte Vermeidung bzw. Verminderung der Umweltverschmutzung. Im Einzelnen werden der Schutz der Umweltkompartimente Luft, Wasser und Boden sowie die Abfallvermeidung erwähnt.

Der Anwendungsbereich der IED ist allerdings nicht auf die Industrieprozesse beschränkt, für die detaillierte Sondervorschriften in separaten Kapiteln enthalten sind. Aufgrund von Artikel 10 und Anhang I unterliegen sehr unterschiedliche industrielle Prozesse wie die Verarbeitung von Metallen, chemische Produktionsanlagen oder Fabrikationsanlagen für Baustoffe wie Zement ebenfalls der IED.

Die wichtigsten Grundpflichten für den Bau und Betrieb von Anlagen sind in Artikel 11 der IED enthalten. Demnach sind eine geeignete Vorsorge gegen Umweltverschmutzungen sowie Maßnahmen zur Verhinderung von Unfällen erforderlich. Es besteht die Pflicht, die besten verfügbaren Techniken anzuwenden, um eine erhebliche Verschmutzung der Umwelt zu vermeiden. Der Anlagenbetrieb ist darüber hinaus energieeffizient und möglichst abfallfrei zu gestalten. Bei einer Stilllegung von Anlagen sind Umweltaspekte zu beachten.

Durch diese Grundpflichten werden neben einem energieeffizienten Betrieb eine Schonung von Ressourcen und indirekt Klimaschutzaspekte adressiert. Somit weist die IED für den Betrieb technischer Anlagen einen Anwendungsbereich auf, der erheblich größer ist als es der Titel der Richtlinie bzw. die verwendeten Abkürzungen erwarten lassen.

Im Rahmen der IED wird ferner der Austausch zwischen den Mitgliedsländern bezüglich von Umweltschutztechnologien fortgeführt, der bereits unter der IVU-Richtlinie begonnen worden war. Dieser Informationsaustausch, an dem Vertreter von Behörden, der Industrie und Umweltverbänden teilnehmen, führt zu abgestimmten Merkblättern über die "Beste Verfügbare Technik" (BVT-Merkblätter). Diese Merkblätter werden auch als "Best Available Techniques Reference Document" (BREF-Dokument) oder "Best Available Techniques Document" (BAT-Dokument) bezeichnet.

Die Kriterien für die Auswahl der besten verfügbaren Techniken, aufgeführt in Tabelle 4.1 (S. 51), orientieren sich nicht nur an möglichst geringen Emissionen, sondern erfassen sehr unterschiedliche Aspekte.

Die Zusammenstellung der Kriterien in Tabelle 4.1 zeigt, dass die oben im Text erwähnte lediglich auf Emissionsgrenzwerte beschränkte Beurteilung von Rauchgasreinigungsanlagen, wie von der Öffentlichkeit immer wieder veranlasst, nicht korrekt ist. Denn ein nur auf die Emissionsgrenzwerte bezogene Beurteilung entspricht nicht der von den Richtlinien (IED und IVU-Richtlinie) geforderten integrierten Betrachtungsweise.

Tabelle 4.1: Kriterien für die Ermittlung der besten verfügbaren Techniken (Anhang III [R 2010 75]).

1.	Einsatz abfallarmer Technologie.
2.	Einsatz weniger gefährlicher Stoffe.
3.	Förderung der Rückgewinnung und Wiederverwertung der bei den einzelnen Verfahren erzeugten und verwendeten Stoffe und gegebenenfalls der Abfälle.
4.	Vergleichbare Verfahren, Vorrichtungen und Betriebsmethoden, die mit Erfolg im industriellen Maßstab erprobt wurden.
5.	Fortschritte in der Technologie und in den wissenschaftlichen Erkenntnissen.
6.	Art, Auswirkungen und Menge der jeweiligen Emissionen.
7.	Zeitpunkte der Inbetriebnahme der neuen oder der bestehenden Anlagen.
8.	Für die Einführung einer besseren verfügbaren Technik erforderliche Zeit.
9.	Verbrauch an Rohstoffen und Art der bei den einzelnen Verfahren verwendeten Rohstoffe (einschließlich Wasser) sowie Energieeffizienz.
10.	Die Notwendigkeit, die Gesamtwirkung der Emissionen und die Gefahren für die Umwelt so weit wie möglich zu vermeiden oder zu verringern.
11.	Die Notwendigkeit, Unfällen vorzubeugen und deren Folgen für die Umwelt zu verringern.
12.	Von internationalen Organisationen veröffentlichte Informationen.

In der Praxis wurden die BVT-Merkblätter in Europa im Zusammenhang mit dem Bau und Betrieb von technischen Anlagen sehr unterschiedlich gehandhabt. Entsprechend der bisherigen IVU-Richtlinie mussten die BVT-Merkblätter im Rahmen von Genehmigungsverfahren lediglich zur Kenntnis genommen werden.

Aus diesem Grund wird mit der neuen IED-Richtlinie die rechtliche Position der Merkblätter deutlich gestärkt. Zukünftig wird es zu den einzelnen Merkblättern sogenannte "BVT-Schlussfolgerungen" geben, die in einem in der IED festgelegten Prozess in eine rechtsverbindliche Form auf europäischer Ebene überführt werden. Somit sind die in den BVT-Merkblättern bzw. BVT-Schlussfolgerungen enthaltenen Anforderungen zukünftig im Rahmen von Genehmigungen für technische Anlagen in der EU verbindlich zu berücksichtigen.

Die IED sieht außerdem eine Verschärfung bei der Überwachung von industriellen Anlagen vor, indem die zuständigen Aufsichtsbehörden Überwachungsprogramme für die entsprechenden Industrieanlagen erstellen müssen.

Die inhaltlichen Details der IED können dem Richtlinien text [R 2010 75] entnommen werden. Weitere Informationen zu den Auswirkungen im Vollzug findet man in der Literatur [Gleis 2012] [Kalmbach 2011] [Kersting 2014] [Kopp-A. 2015].

4.2 BVT-Merkblatt "Waste Incineration"

Die Arbeiten zum BVT-Merkblatt "Waste Incineration" [BVT WI] begannen im Dezember 2001 in Sevilla (Spanien) [Johnke 2002]. Publiziert wurde das BVT-Merkblatt zur Abfallverbrennung nur in englischer Sprache im August 2006¹. Erstellt wurde dieses Merkblatt noch unter der alten IVU-Richtlinie, so dass noch keine entsprechenden BVT-Schlussfolgerungen existieren.

Inhaltlich beschränkt sich dieses Merkblatt auf die thermische Behandlung von Abfällen mit verschiedenen Verbrennungs-, Pyrolyse und Vergasungstechnologien. Die Mitverbrennung in Kraftwerken oder Anlagen zur Zementherstellung wird nicht erfasst. Für die Abfallbehandlung mit mechanischen, biologischen und chemisch-physikalischen Verfahren existiert ein weiteres BVT-Merkblatt [BVT T].

In den ersten drei Kapiteln des BVT-Merkblatts werden zunächst allgemeine Informationen zum betrachteten Industriesektor, die angewandten Technologien sowie aktuelle Emissions- und Verbrauchswerte zusammengestellt. Die Betrachtung und Festlegung der besten verfügbaren Techniken erfolgt in zwei weiteren Kapiteln. Ergänzend werden in der Entwicklung befindlichen Technologien berücksichtigt.

Die in dem Merkblatt beschriebenen besten verfügbaren Techniken erfassen den gesamten Betrieb der thermischen Abfallbehandlungsanlage. Dazu gehören u.a. die Lagerung der zu behandelnden Abfälle, die Kontrolle und Optimierung der Verbrennungsbedingungen, die Energienutzung und die Emissionen in die Atmosphäre.

Das BVT-Merkblatt "Waste Incineration" enthält für die zu berücksichtigten thermischen Abfallbehandlungsverfahren insgesamt 82 einzeln aufgeführte Techniken. Neben eher allgemein formulierten Beschreibungen werden für viele Techniken konkrete Daten mitgeteilt. Dies gilt zum Beispiel für die erreichbaren Emissionswerte, für die eine Auswahl in Tabelle 4.2 (S. 53) zusammengestellt ist.

Außerdem sind in dem BVT-Merkblatt Daten für die Energienutzung aufgeführt. Für eine Anerkennung als Beste Verfügbare Technik müssen beispielsweise bei der Verbrennung von Hausmüll im Kessel mindestens 80 % der Wärmeenergie des Rauchgases für eine spätere Nutzung zur Strom- oder Wärmeerzeugung genutzt werden.

Ferner werden verschiedene Wirkungsgrade der Abfallverbrennungsanlagen als Beste Verfügbare Technik festgelegt. Ausgehend von einem Abfallheizwert von 2,9 MWh/tonne ist bei optimaler Nutzung der Kraftwärmekopplung bzw. der Dampf- und Wärmenutzung insgesamt eine Energieabgabe von 1,9 MWh/Tonne Abfall erforderlich. Wird lediglich Strom erzeugt, so sind pro Tonne verbranntem Abfall 0,4 bis 0,65 MWh elektrische Energie bereitzustellen.

¹ Eine deutsche Teilübersetzung ist beim UBA (Dessau) verfügbar.

Tabelle 4.2: Ausgewählte Emissionswerte für Abfallverbrennungsanlagen aus dem BVT-Merkblatt "Waste Incineration" [BVT-WI].

Schadstoff	Einzelmessung	Halbstunden-Mittelwert [mg/m ³]	Tages-Mittelwert [mg/m ³]
Staub		1 - 20	1 - 5
HCl		1 - 50	1 - 8
SO ₂		1 - 150	1 - 40
NOX SCR		40 - 300	40 - 100
NOX SNCR		3 - 350	120 - 180
TOC		1 - 20	1 - 10
CO		5 - 100	5 - 30
Hg	< 0,05 [mg/m ³]	0,001 - 0,03	0,001 - 0,02
PCDD/PCDF	0,01 - 0,1 [ng/m ³]		
NH ₃	< 10 [mg/m ³]	1 - 10	< 10

Für detaillierte Informationen zu der Entwicklung und den Inhalten des BVT-Merkblatts wird auf die Literatur [Gleis 2008a] und den Text des Merkblatts [BVT-WI] verwiesen.

Das aktuelle BVT-Merkblatt zur Abfallverbrennung, publiziert 2006, beruht auf noch älteren Daten. Mit einer notwendigen Überarbeitung des BVT-Merkblatts wurde im Januar 2015 auf europäischer Ebene offiziell begonnen [Gleis 2015].

4.3 Europäische Abfallrichtlinie

Im Mittelpunkt der europäischen Rechtsvorschriften für den Umgang mit Abfällen steht die "Richtlinie über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien" (Abfallrichtlinie) [R 2008 98]. Diese Richtlinie ersetzte die später mehrfach angepasste "Abfallrahmenrichtlinie" [R 1975 442] (Erstfassung) aus dem Jahr 1975 sowie die Richtlinien über gefährliche Abfälle und Altölbeseitigung.

Die neue Abfallrichtlinie erfasst wie die abgelöste Abfallrahmenrichtlinie allerdings nicht alle anfallenden Abfälle. Ausgeschlossen vom Geltungsbereich sind beispielsweise gasförmige Emissionen in die Atmosphäre, radioaktive Abfälle, ausgesonderte Sprengstoffe sowie Materialien, die in anderen europäischen Rechtsvorschriften geregelt sind. Separate Richtlinien in Ergänzung zur Abfallrichtlinie gibt es u.a. für Elektronikschrott [R 2012 19], Batterien [R 2006 66] oder Altfahrzeuge [R 2000 53].

Das Hauptziel der Abfallrichtlinie stellt nach Artikel 1 der Schutz der Umwelt und der menschlichen Gesundheit durch passende Anforderungen an den Bereich der Abfallwirtschaft dar, ergänzt durch eine effizientere Nutzung von Ressourcen. Diese Forderungen waren ebenfalls in der alten Abfallrahmenrichtlinie enthalten.

Der Erlass der neuen Abfallrichtlinie zielt allgemein auf eine intensiviertere Abfallverwertung, indem die alte dreistufige Abfallhierarchie der Abfallrahmenrichtlinie (Vermeidung, thermische/stoffliche Verwertung, Beseitigung) durch eine fünfstufige Prioritätenfolge (Artikel 4 in [R 2008 98]) ersetzt wird. Die einzelnen Hierarchiestufen sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

Tabelle 4.3: Hierarchiestufen beim Umgang mit Abfällen (Artikel 4 in [R 2008 98]).

	[R 2008 98] deutsche Fassung	[R 2008 98] englische Fassung
a	Vermeidung	prevention
b	Vorbereitung zur Wiederverwendung	preparing for re-use
c	Recycling	recycling
d	sonstige Verwertung, z.B. energetische Verwertung	other recovery, e.g. energy recovery
e	Beseitigung	disposal

Aus Tabelle 4.3 ergibt sich zunächst, dass es im Vergleich zu der alten dreistufigen Prioritätenfolge bei der ersten Stufe (Vermeidung) und der letzte Stufe (Beseitigung) keine Veränderungen gegeben hat. Dagegen werden die Verwertungsmaßnahmen durch die Abfallrichtlinie in drei Stufen aufgeteilt. Dem Recycling, auch als stoffliche Verwertung bezeichnet, wird in der Rangfolge verbindlich eine höhere Stufe zugeordnet als der thermischen Verwertung. Eine genauere Analyse der neuen Abfallhierarchie findet man in [Gharfalkar 2015].

In der Praxis soll die fünfstufige Abfallhierarchie nach Artikel 4 so umgesetzt werden, dass sich das beste Ergebnis unter Umweltschutzaspekten ergibt. Nach Artikel 4 kann allerdings bei der Erzeugung und Entsorgung von Abfällen von der vorgegebenen Hierarchie abgewichen werden, wenn sich aus einem "Lebenszyklusdenken" eine Begründung ergibt.

Durch die europäische Abfallrichtlinie erfolgt ferner eine genauere Festlegung von abfallwirtschaftlichen Begriffen. Genauer festgelegt wird durch die Abfallrichtlinie auch der Abfallbegriff, denn es waren Abgrenzungsschwierigkeiten bei der Entsorgung von kontaminierten Böden entstanden [Kopp-A. 2009].

Außerdem werden in Artikel 5 der Abfallrichtlinie die Voraussetzungen für die Abgrenzung von Nebenprodukten und Abfällen aufgeführt; Artikel 6 enthält erstmals Festlegungen für das Ende der Abfalleigenschaft.

Von besonderer Bedeutung für die Abfallverbrennung sind die im Anhang II aufgeführten Verwertungsverfahren. Als R1-Verfahren ist eine "Hauptverwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung" nur möglich, wenn vorgegebene Werte für die Energieeffizienz erreicht werden. Werden die geforderten Energieeffizienzwerte nicht erreicht, so handelt es sich um ein Verfahren zur Abfallbeseitigung. Somit existieren erstmals europaweite Vorschriften für die eindeutige Unterscheidung zwischen energetischer Verwertung und thermischer Beseitigung.

Für die Berechnung der Energieeffizienz ist eine in [R 2008 98] mitgeteilte Formel zu verwenden, die durch [R 2015 1127] um einen Klimakorrektureffizienzfaktor (Climate Correction Factor - CCF) erweitert wurde:

$$\text{Energieeffizienz} = \frac{(E_p - (E_f + E_i))}{(0,97 \times (E_w + E_f))} * CCF$$

In dieser Formel bedeuten:

- Ep die jährlich als Wärme oder Strom erzeugte Energie. Der Wert wird berechnet, indem Elektroenergie mit dem Faktor 2,6 und für gewerbliche Zwecke erzeugte Wärme mit dem Faktor 1,1 (GJ/Jahr) multipliziert wird.
- Ef der jährliche Input von Energie in das System aus Brennstoffen, die zur Erzeugung von Dampf eingesetzt werden (GJ/Jahr).
- Ew die jährliche Energiemenge, die im behandelten Abfall enthalten ist, berechnet anhand des unteren Heizwerts des Abfalls (GJ/Jahr).
- Ei die jährliche importierte Energiemenge ohne Ew und Ef (GJ/Jahr).
- 0,97 ist ein Faktor zur Berechnung der Energieverluste durch Rost- und Kesselasche sowie durch Strahlung.
- CCF Klimakorrektureffizienzfaktor

Genauere Informationen für die Bestimmung der einzelnen Variablen und des Klimakorrektureffizienzfaktors zur Berechnung der Energieeffizienz können der Literatur [EU L 2011] [LAGA M38] [R 2015 1127] entnommen werden.

Für eine Anerkennung als Verwertungsverfahren müssen Abfallverbrennungsanlagen bei der Energieeffizienz einen Wert von 0,60 mindestens erreichen, wenn die Anlage vor dem 1. Januar 2009 genehmigt wurde; für nach dem 31. Dezember 2008 genehmigte Anlagen gilt ein Wert von 0,65.

Die Formel für die Berechnung der Energieeffizienz weist auf den ersten Blick Ähnlichkeiten mit einem Wirkungsgrad auf, der allgemein das Verhältnis der erzeugten Nutzenergie zur zuge-

fürten Energie beschreibt. Eine genauere Betrachtung zeigt dagegen, dass es sich nicht um einen Wirkungsgrad, sondern um eine Kennzahl handelt [Beckmann 2007a] [Löschau 2010].

Ergänzend fordert die europäische Abfallrichtlinie von den einzelnen Mitgliedsstaaten die Erstellung von Abfallbewirtschaftungsplänen und Abfallvermeidungsprogrammen, um eine Reduzierung der anfallenden Abfallmengen und damit eine Entkopplung des Wirtschaftswachstums von den mit der Abfallerzeugung verbundenen Umweltauswirkungen zu erzielen.

Detaillierte Hinweise zu der Abfallrichtlinie können dem Richtlinienentwurf [R 2008 98] oder der Literatur [Epiney 2013] [Kopp-A. 2009] [Simon 2007] [Thomé-K. 2009b] entnommen werden.

4.4 Bundes-Immissionsschutzrecht

Das deutsche Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [BImSchG] steht im Zentrum der Rechtsvorschriften, die auf den Immissionsschutz, d.h. den Schutz von Menschen und Umwelt vor schädlichen Emissionen, ausgerichtet sind. Dieses Gesetz wurde in der ersten Fassung 1974 verabschiedet [BImSchG 74] und seitdem mehrfach geändert; auch in Folge der Umsetzung der IVU-Richtlinie und der aktuellen IED-Richtlinie in nationale Rechtsvorschriften.

Ergänzt wird das BImSchG u.a. durch verschiedene Verordnungen, die überwiegend den Betrieb von technischen Anlagen und deren Emissionen umfassen. Dazu gehört auch die Festlegung, welche Anlagen entsprechend dem BImSchG zu genehmigen sind und wie das Genehmigungsverfahren durchzuführen ist. Weitere Rechtsvorschriften zum BImSchG erfassen den gebietsbezogenen Umweltschutz, in dem Luftqualitätsstandards, nationale Emissionshöchstmengen oder Forderungen zur Lärmbegrenzung festgelegt werden. Weitere Verordnungen betreffen den produktbezogenen Immissionsschutz, indem beispielsweise die Beschaffenheit von Kraft- und Brennstoffen reguliert wird.

Der große Geltungsbereich des BImSchG umfasst neben chemischen Produktionsanlagen, Kraftwerken, Abfallverbrennungsanlagen und ähnlichen Industrieprozessen beispielsweise auch Kraftfahrzeuge und den Bau von Verkehrswegen. Die Vorgaben des BImSchG sind nicht anzuwenden, wenn wasserrechtliche oder ausgewählte andere Rechtsvorschriften existieren. Ausgeschlossen vom Anwendungsbereich sind ferner kerntechnische Anlagen.

Entsprechend den Zielen des BImSchG in § 1 dient das Gesetz dazu, *Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen*. Im Fall von genehmigungsbedürftigen Anlagen soll durch das BImSchG auch *eine integrierte Vermeidung und Verminderung schädlicher Umwelteinwirkungen durch Emissionen in Luft, Wasser und Boden unter Einbeziehung der Abfallwirtschaft* erreicht werden.

Für das Erreichen dieser Ziele sind die wesentlichen Anforderungen für die Errichtung und den Betrieb genehmigungsbedürftiger Anlagen² in § 5 Abs. 1 BImSchG aufgeführt, die in vier Einzelaspekte gegliedert sind:

- Allgemeine Schutz- und Gefahrenabwehrpflicht
- Pflicht zur Vorsorge, insbesondere Emissionsminderung entsprechend dem Stand der Technik
- Pflicht zur Vermeidung, Verwertung bzw. Beseitigung von Abfällen
- Sparsame und Effiziente Energieverwendung

Diese Grundpflichten haben für den Betreiber einer entsprechenden Anlage weitreichende Konsequenzen. Beispielsweise vertraten Deggim et al. [Deggim 1987] die Auffassung, dass ein Kraftwerksbetreiber entsprechend dem Verwertungsgebot die Aufgabe hat, bei der Gips-erzeugung in der Rauchgasreinigung die Qualitätsanforderungen der weiterverarbeitenden Industrie zu erfüllen. Eine Deponierung (Beseitigung) wird von den Autoren als Verlagerung der Umweltschutzaufgabe gesehen.

Mit Bezug auf die Energienutzung existiert in der aktuellen Fassung des BImSchG nur die allgemeine Forderung nach einer sparsamen und effizienten Verwendung von Energie. Diese relativ kurze Formulierung entspricht den Ausführungen in der älteren IVU-Richtlinie [R 1996 61] und der aktuellen IED [R 2010 75].

Allerdings haben sich im § 5 BImSchG die Formulierungen bezüglich der Verwendung von Energie im Lauf der Zeit mehrfach verändert. Die erste Fassung des BImSchG von 1974 [BImSchG 74] enthielt bezüglich der Energienutzung keine Anforderungen. Im Rahmen der 2. Novelle des BImSchG wurde 1985 der Anlagenbetreiber verpflichtet, sofern zumutbar, die beim Anlagenbetrieb entstehende und nicht abgegebene Wärme selbst zu nutzen. Die entsprechenden Anlagen sollten in einer separaten Verordnung bestimmt werden. Neben Einsparungen beim Einsatz fossiler Brennstoffe zielte diese Forderung auf eine Verringerung der Schadstoffemission [Bender 1990].

Im Zusammenhang mit den Anforderungen an den Umweltschutz wird im BImSchG der Stand der Technik gefordert. Die Definition und Kriterien für den Stand der Technik wurde im Rahmen der früheren Umsetzung der europäischen IVU-Richtlinie in das BImSchG übernommen [Gleis 2008b], so dass der Stand der Technik den besten verfügbaren Techniken entspricht.

Neben den Grundpflichten zum Betrieb großtechnischer (genehmigungsbedürftiger) Anlagen behandelt das BImSchG auch die Voraussetzungen für die Erteilung einer Genehmigung und das eigentliche Genehmigungsverfahren.

Das BImSchG enthält allerdings keine genauen Anforderungen an den Anlagenbetrieb oder Grenzwerte für die Emissionen in die Atmosphäre. Diese Vorgaben sind in Verordnungen oder Verwaltungsvorschriften enthalten, durch die das BImSchG, wie bereits erwähnt, ergänzt wird.

² Abfallverbrennungsanlagen sind genehmigungsbedürftige Anlagen

Für Abfallverbrennungsanlagen erfolgten die Festlegungen für den Anlagenbetrieb und die Emissionsgrenzwerten in der "Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV [17. BImSchV]. Die erste Fassung der 17. BImSchV stammt aus dem Jahr 1990; seitdem wurde diese Rechtsvorschrift wiederholt geändert.

Der Geltungsbereich der 17. BImSchV umfasst nicht nur den Betrieb, sondern auch die Errichtung und die Ausrüstung von Abfallverbrennungs- und Abfallmitverbrennungsanlagen³. Eingeschlossen sind ebenfalls Pyrolyse- und Vergasungsprozesse. Nicht der Verordnung unterliegen u.a. bestimmte Rückstände und Prozesse aus der Erdgas- und Erdölindustrie sowie kleine Forschungsanlagen.

Die 17. BImSchV unterscheidet nicht zwischen einer Anlage zur thermischen Beseitigung und einer Anlage zur thermischen Verwertung. Ferner gelten entsprechend der Verordnung für die Verbrennung von Hausmüll sowie von gefährlichen Abfällen⁴ weitgehend die gleichen Vorgaben⁵.

Die Anforderungen an Abfallverbrennungsanlagen sind in § 3 bis § 12 der 17. BImSchV aufgeführt. Es existieren Vorschriften für die Anlieferung und Zwischenlagerung der eingesetzten Abfallmaterialien sowie für allgemeine Betriebsbedingungen, die u.a. einer vollständigen Verbrennung dienen. Zudem werden für die bei der Verbrennung gebildeten Gase bestimmte Verweilzeiten in Kombination mit Betriebstemperaturen vorgegeben.

Für Abfallverbrennungsanlagen enthält die 17. BImSchV an verschiedenen Stellen Emissionsgrenzwerte. Die Tagesmittelwerte, in der 17. BImSchV wie die Halbstundenmittelwerte Bestandteil von § 8, sind in Tabelle 4.4 (S. 59) aufgeführt.

In Ergänzung zu den Grenzwerten in § 8 sind in der 17. BImSchV Jahresmittelwerte für Quecksilber und NO_x aufgeführt. Außerdem existieren Vorgaben für Schwermetalle und ausgewählte organische Schadstoffe. In der 17. BImSchV sind außerdem Vorschriften an die Messplätze für die Emissionsüberwachung und Berichtspflichten enthalten.

Von besonderer Bedeutung im Zusammenhang mit der Fragestellung der vorliegenden Arbeit ist § 13 der 17. BImSchV, in dem eine Wärmenutzung vorgeschrieben wird. Falls die Möglichkeiten zur Wärmeabgabe am Standort beschränkt oder nicht vorhanden sind, muss Strom erzeugt werden, sofern eine elektrische Leistung von 0,5 MW überschritten werden kann.

Genauere Informationen zu den hier lediglich als Auswahl zusammengestellten Vorschriften aus dem BImSchG und der 17. BImSchV können den Texten der Rechtsvorschriften [BImSchG] [17. BImSchV] entnommen werden.

³ Insbesondere Anlagen zur Zementherstellung und Kraftwerke

⁴ In der Regel sind dies Industrie- und Gewerbeabfälle; oft als Sonderabfälle bezeichnet.

⁵ Gefährliche Abfälle mit mehr als 1 Gew.-% Chlor erfordern höhere Verbrennungstemperaturen

Tabelle 4.4: Emissionsgrenzwerte für Abfallverbrennungsanlagen (Auswahl, Tagesmittelwerte [17. BImSchV]).

Schadstoff	Konzentration	
Gesamtstaub	5	mg/m ³
organische Stoffe Angabe: Gesamtkohlenstoff	10	mg/m ³
gasförmige anorganische Cl-Verbindungen Angabe: Chlorwasserstoff (HCl)	10	mg/m ³
gasförmige anorganische F-Verbindungen Angabe: Fluorwasserstoff (HF)	1	mg/m ³
Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid Angabe: Schwefeldioxid (SO ₂),	50	mg/m ³
Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid Angabe: Stickstoffdioxid (NO ₂),	150	mg/m ³
Quecksilber und seine Verbindungen Angabe: Quecksilber (Hg)	0,03	mg/m ³
Kohlenmonoxid (CO)	50	mg/m ³
Ammoniak (NH ₃)	10	mg/m ³

4.5 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Für den Umgang und die Entsorgung von Abfällen existiert in Deutschland seit über 40 Jahren ein zentrales Gesetz, dessen Name im Lauf der Zeit mehrfach verändert wurde. Das derzeit aktuelle "Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen" (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG) [KrWG] wurde im Februar 2012 verabschiedet. Mit diesem Gesetz werden, wie bereits mit den älteren Vorläufergesetzen, europäische Richtlinien in nationales Recht überführt. Das Gesetz bezweckt eine noch stärker auf den Ressourcen-, Klima- und Umweltschutz ausgerichtete Bewirtschaftung von Abfällen.

Neben dem Kreislaufwirtschaftsgesetz wurden für die Abfallentsorgung verschiedene Rechtsvorschriften als Ergänzung erlassen. Die entsprechenden Gesetze und Verordnungen enthalten überwiegend Vorschriften für die Entsorgung ausgewählter Abfallfraktionen, wie Batterien, Elektronikschrott, Altholz, Bioabfall oder Gewerbeabfall. Außerdem existieren Verordnungen für die Organisation der Abfallentsorgung sowie für den Betrieb von Deponien. Somit enthält das KrWG keine detaillierten Anforderungen an die technische Ausgestaltung von Abfallbehandlungs- und Entsorgungsanlagen sowie für die Entsorgung ausgewählter Abfallfraktionen.

Im Rahmen des KrWG wurden für eine Angleichung an die europäische Abfallrichtlinie die Definition von Abfällen überarbeitet und Vorgaben für das Abfallende eingeführt. Ferner existieren jetzt Regelungen für die Eigenschaften von Nebenprodukten, die nicht dem Abfallrecht unterliegen.

Die bedeutendste Vorschrift für den Umgang mit Abfällen ist in Abschnitt 1 des KrWG enthalten, der nur aus § 6 besteht. Dort sind die bei der Abfallentsorgung zu beachtende Hierarchie und die entsprechenden Kriterien festgelegt. Im Vergleich zum älteren Kreislaufwirtschafts und Abfallgesetz [KrW/AbfG] wurde die drei Stufen umfassende Regelung durch eine fünfstufige Abfallhierarchie ersetzt. Die Begriffe der einzelnen Hierarchiestufen im KrWG entsprechen exakt den Abfassungen in der europäischen Abfallrichtlinie [R 2008 98] (Siehe Tabelle 4.3 auf S. 54).

Für die genauere Auswahl eines Entsorgungsverfahrens sind nach § 6 Absatz 2 auf Basis des gesamten Lebenszyklus des Abfalls verschiedene Kriterien zu beachten:

- Zu erwartende Emissionen
- Ressourcenschonung
- Energiegewinnung bzw. Energieaufwand
- Schadstoffanreicherung in Produkten
- Technische Möglichkeit
- Wirtschaftliche Zumutbarkeit
- Soziale Folgen.

Für die Anwendung der Abfallhierarchie nach § 6 existiert ergänzend ein Leitfaden [BMUB 2017]. Präzisere Anforderungen an die Kreislaufwirtschaft werden durch § 7 bis § 14 KrWG vorgegeben.

Von Engler et al. [Engler 2015] wurden die Vorschriften für einzelne Bewertungsschritte entsprechend dem KrWG ohne Berücksichtigung der Abfallvermeidung in einem Flussdiagramm dargestellt, das in Abbildung 4.1 (S. 61) gezeigt ist.

In § 8 KrWG ist das vorläufige⁶ Heizwertkriterium enthalten, das bei Fehlen einer entsprechenden Rechtsverordnung eine Gleichrangigkeit von energetischer und stofflicher Verwertung festlegt, wenn der Heizwert der zu entsorgenden und unvermischten Abfälle über 11.000 KJ/kg liegt. Diese Festlegung wurde von der EU-Kommission nicht akzeptiert.

Im Rahmen einer Studie [Zotz 2016] wurden die möglichen Auswirkungen untersucht, die sich durch eine Abschaffung dieser Vorschrift ergeben würden. Zur Vermeidung einer Klage vor dem Europäischen Gerichtshof hat die Bundesregierung im Sommer 2016 die Abschaffung dieser Regelung beschlossen; der Bundesrat stimmte der Streichung ebenfalls zu [RE 2016 42].

⁶ Eine Überprüfung durch die Bundesregierung bis zum 31.12.2016 war vorgesehen.

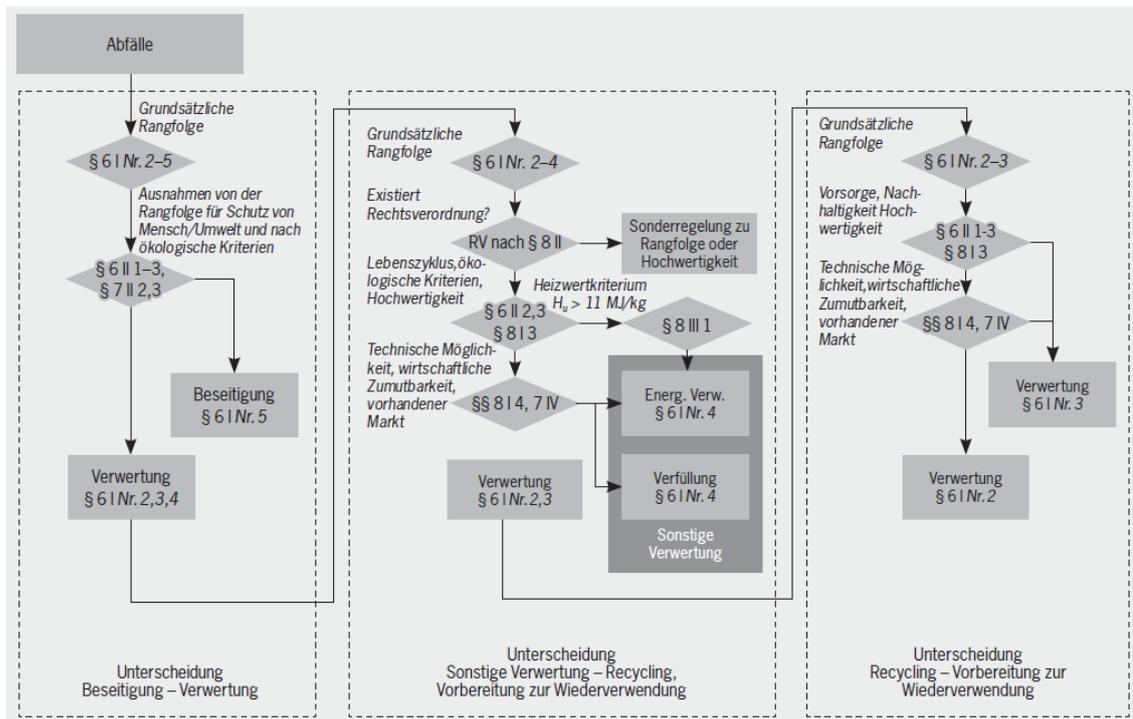


Abbildung 4.1: Flussdiagramm zur Abfallhierarchie nach KrWG [Engler 2015].

Die möglichen technischen Abfallbehandlungs- und Entsorgungsverfahren zur Erfüllung der fünfstufigen Abfallhierarchie sind im Anhang 1 des KrWG (Beseitigungsverfahren) bzw. im Anhang 2 (Verwertungsverfahren) aufgeführt. Demnach kann die Abfallentsorgung in Abfallverbrennungsanlagen sowohl dem Beseitigungsverfahren D10 "Verbrennung an Land" als auch dem Verwertungsverfahren R1 "Hauptverwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung" zugeordnet werden.

Für die Differenzierung zwischen der (thermischen) Beseitigung (D10) und der thermischen (sonstigen) Verwertung (R1) wird das Kriterium der Energieeffizienz aus der europäischen Abfallrichtlinie [R 2008 98] übernommen (Siehe Abschnitt 4.3).

Ferner enthält das KrWG viele Anordnungen, die den gesamten Abfallwirtschaftsbereich betreffen. In Abschnitt 2 (§ 30 bis § 33) wird z.B. die Ausarbeitung von Abfallwirtschaftsplänen und Abfallvermeidungsprogrammen gefordert. Durch eine getrennte Sammlung von bestimmten Abfallfraktionen und festgelegten Recyclingquoten sollen das Recycling und die sonstigen stofflichen Verwertungen unterstützt werden. Weitere Teile des KrWG betreffen die Betriebsorganisation und die Überwachung durch die zuständigen Behörden.

Für detaillierte Informationen über die Vorschriften des KrWG wird auf den Gesetzestext [KrWG] und ausgewählte Literatur [Beckmann 2012] [CUTEC 2016] [Engler 2015] [Kopp-A. 2012] [Frenz 2013] verwiesen.

4.6 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Inhalte der wichtigsten europäischen und deutschen Vorschriften vorgestellt. Erwartungsgemäß wurde ein großer Einfluss von europäischen Richtlinien auf nationale Rechtsvorschriften deutlich.

Sowohl bei den europäischen Richtlinien als auch bei den deutschen Gesetzen und Verordnungen, die der Umsetzung des europäischen Rechts dienen, handelt es sich nicht um wirklich neue Vorschriften.

Vielmehr folgt auf eine durchgeführte Überarbeitung europäischer Richtlinien eine Anpassung auf nationaler Ebene. Für die Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen (IED) [R 2010 75] mussten in Deutschland neben dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) [BImSchG] weitere Gesetze und eine große Anzahl an Verordnungen geändert werden. Eine ähnliche Entwicklung ist im Abfallrecht zu beobachten.

Die IED und das deutsche BImSchG enthalten als eine allgemeine Grundpflicht für den Betreiber großtechnischer Anlagen eine sparsame und effiziente Energieverwendung. Darüber hinaus besteht für deutsche Abfallverbrennungsanlagen entsprechend der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV) [17. BImSchV] eine Pflicht zur Wärmenutzung bzw. Stromerzeugung.

Hinsichtlich der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen sind in der europäischen Abfallrichtlinie [R 2008 98] und im deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) [KrWG] identische Anforderungen für eine Anerkennung als Verwertungsanlage enthalten. Mit der Einstufung als Verwertungsanlage ist ein Aufstieg in der Abfallhierarchie verbunden.

Zu beachten ist, dass Abfälle zur Beseitigung aus Umweltschutzgründen vorrangig in der Nähe und im Inland entsorgt werden müssen. Dagegen werden Abfälle zur Verwertung dem freien Warenverkehr in der EU zugeordnet, so dass Abfallverbrennungsanlagen mit Verwertungsstatus auch Abfälle importieren dürfen.

5 Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung

In diesem Kapitel werden zunächst die Energieformen kurz vorgestellt, die im Bereich der Energiewirtschaft unterschieden werden. Anschließend werden die Basisdaten für die Bestimmung der Energiebeiträge zusammengestellt, die von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken geleistet werden können. Im Mittelpunkt stehen die jährlichen Verbrennungskapazitäten und Heizwerte der Brennstoffe.

In Abschnitt 5.3 erfolgt, ausgehend von den zuvor beschriebenen Basisdaten, die Ableitung von einfachen Szenarien für die Berücksichtigung von denkbaren Veränderungen im Rahmen der Berechnungen.

In Abschnitt 5.4 werden in einem ersten Vergleich die Anteile der thermischen Abfallbehandlung am Primärenergieverbrauch in Deutschland bestimmt. Der folgende Abschnitt enthält Aussagen, wie groß das mögliche Brutto-Wärmepotenzial von Abfallverbrennungsanlagen im Vergleich zum gesamten Wärmebedarf ist. Anschließend bezieht sich Abschnitt 5.6 auf die Möglichkeiten der Strombereitstellung.

5.1 Energieformen der Energiewirtschaft

In der Energiewirtschaft wird zwischen verschiedenen Energieformen unterschieden. Als Primärenergien werden verschiedene Energiearten in der Form aufgefasst, wie sie der Umwelt oder natürlichen Quellen entnommen werden. Es handelt sich somit um Energiearten, die noch keine technische Umwandlung erfahren haben.

Die Primärenergien sind in den entsprechenden Primärenergieträgern gespeichert, zu denen z.B. Steinkohle, Braunkohle, Uranerz, Wind, strömendes Wasser, Biomasse oder auch die Sonnenstrahlung gehören.

Diese Primärenergieträger enthalten die Primärenergie in unterschiedlichen Formen, die für eine spätere Nutzung oder Verbesserungen bei der Logistik in der Regel durch entsprechende Prozesse umgewandelt werden muss.

Wind oder "strömendes" Wasser enthalten die Primärenergie in Form von mechanischer Energie, so dass eine direkte Umwandlung in elektrische Energie durch Antrieb von Windrotoren oder Turbinen möglich ist. Dagegen ist in Brennstoffen wie Braun- und Steinkohle, Biomasse sowie Abfällen die Primärenergie als chemische Energie in den molekularen Strukturen gespeichert, die in dieser Form nicht nutzbar ist. Für eine Nutzung wird die chemische Energie dieser Brennstoffe zunächst durch Verbrennen in Wärmeenergie und anschließend weiter umgewandelt.

Die Umwandlungsschritte werden vom Verwendungszweck bestimmt und überführen die Primärenergie in die Zwischenstufen Sekundär- und Endenergie. Diese Zwischenstufen können durch mehrstufige verfahrenstechnische Umwandlungen, einfache technische Prozesse bzw. Transporte oder Kombinationen erreicht werden. Unter Sekundärenergien versteht man in technischen Anlagen erzeugte Energieträger, Endenergien werden direkt beim Verbraucher eingesetzt. Durch Einsatz beim Verbraucher wird als letzter Schritt die Endenergie in Nutzenergie überführt.

In Abbildung 5.1 sind Beispiele für diese vier erwähnten Energieformen sowie die Umwandlungskette für die Nutzung der in Abfällen gespeicherten Primärenergie in elektrische Energie dargestellt.



Abbildung 5.1: Umwandlung von Energiearten.

Nach Abbildung 5.1 wird in Abfallverbrennungsanlagen die Primärenergie der Abfälle durch Verbrennung und weitere Umwandlungsschritte in Strom als Sekundärenergie umgewandelt. Der verfahrenstechnische Prozess für die Umwandlung der in Abfällen chemisch gebundenen Primärenergien in die Sekundärenergie Strom wird in Abschnitt 3.4 mit Abbildung 3.2 (S. 16) veranschaulicht.

Der elektrische Strom, der die gewerblichen oder privaten Verbraucher nach verlustbehafteten Transporten bzw. weiteren Umwandlungen durch Spannungsänderungen erreicht, wird als Endenergie bezeichnet. Der Verbraucher überführt die Endenergie Strom durch eine letzte Umwandlung in Nutzenergie, wie beispielsweise für Beleuchtungszwecke oder für den Betrieb von EDV-Geräten.

5.2 Basisdaten für die Berechnungen

Für die Berechnungen der Beiträge der thermischen Abfallbehandlung zur Energiewende sind zunächst Informationen über die verbrannten Abfallmengen erforderlich. Außerdem folgt aus Abschnitt 3.4 (S.16) und 5.1, dass für die Nutzung und damit für den Wert eines Brennstoffs die bei der Verbrennung freigesetzte Wärmeenergie sehr wichtig ist, die durch den Heizwert charakterisiert wird. Auf diese beiden Datenbereiche wird in den folgenden Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 näher eingegangen.

5.2.1 Verbrennungskapazitäten deutscher Abfallverbrennungsanlagen

Über deutsche Abfallverbrennungsanlagen findet man in der Literatur an vielen Stellen tabellarische Zusammenstellungen zu der Anzahl der Standorte und den Verbrennungskapazitäten. In der Regel fehlen allerdings genauere Informationen zu der Datenbasis, so dass die Herkunft der Daten nicht nachvollziehbar ist. In Tabelle 5.1 (S. 66) sind Daten aus der Literatur zu der Anzahl der deutschen Standorte und zu den verbrannten Abfallmengen aufgeführt.

Anscheinend beruhen die jüngeren Angaben für die Anzahl der Standorte (68) und die jährliche Gesamtverbrennungskapazität (19,6 Mio. t) auf einer Liste vom UBA aus dem Jahr 2013 [UBA MVA 2013]. Die früher mitgeteilte Anzahl von 70 Standorten folgt aus der nicht immer erfolgten Berücksichtigung der Pyrolyseanlage am Standort Burgau (Siehe Abschnitt 3.5.2) und dem Umbau der Abfallverbrennungsanlage am Standort Landshut in ein Biomassekraftwerk [RE 2011 51]. Ein Vergleich der Listen vom UBA aus den Jahren 2013 [UBA MVA 2013] und 2016 [UBA MVA 2016] zeigt, dass zwischenzeitlich keine Aktualisierung durchgeführt wurde.

Die Ersatzbrennstoff-Kraftwerke sind im Vergleich zu Abfallverbrennungsanlagen in der Regel für geringere Behandlungskapazitäten ausgelegt. Vergleicht man die Angaben aus [Thiel 2013] mit der Zusammenstellung vom UBA [UBA EBSK 2016], so gibt es Unterschiede sowohl bei der Anzahl der Standorte als auch bei der jährlichen Gesamtverbrennungskapazität. Außerdem weichen die Angaben für die Verbrennungskapazität bei 14 Standorten voneinander ab.

Darüber hinaus führen abweichende Anlagendefinitionen und vermutlich unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Datenerfassung im Rahmen von statistischen Erhebungen zu Unterschieden bei der Anlagenanzahl und der Verbrennungskapazität. In der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur [BNetzA 2017] sind viele Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke nicht aufgeführt, die in den Quellen von Tabelle 5.1 (S. 66) enthalten sind. Die relative hohe Angabe von 89 Standorten in [Destatis 2014] ergibt sich aufgrund der erweiterten Erfassung von Anlagen, die auch flüssige oder gasförmige Stoffe behandeln.

5 Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung

Tabelle 5.1: Verbrennungskapazität und Anzahl der Standorte für thermische Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland.

Anlagentyp ^A	Anzahl der Standorte	Kapazität [Mio. t/Jahr]	Quelle
MVA ^B	70	18,7	[UBA MVA 2008]
MVA ^B	70	20,4 ^M	[Richers 2010]
MVA	69	18,8	[UBA MVA 2011]
EBSK	36	4,8 ^S - 6,27 ^G	[Thiel 2013]
MVA	68	19,6	[UBA MVA 2013]
MVA EBSK	68 35	19,6 5,4	[Alwast 2014]
k.A. EBSK	89 39	21,5 4,5	[Destatis 2014]
MVA ^B EBSK	68 34	19,0 6,3	[Löschau 2014]
MVA u. EBSK	k.A.	24,7	[Roll 2014]
MVA	68	19,6	[UBA MVA 2016]
MVA	73	17,8	[BMUB L 2016]
EBSK	32	5,6	[UBA EBSK 2016]
MVA EBSK	68 35	19,6 5,4	[Treder 2016a]
MVA EBSK	68 35	20,0 5,1	[Faulstich 2016a]
MVA, EBSK	k. A.	25,0	[Thomé-K. 2016]
MVA	68	19,6	[UBA MVA 2017]
MVA, EBSK	etwa 66 etwa 33	ca. 25 (Summe)	[Huneke 2017]

^A MVA: Abfallverbrennungsanlage, EBSK: Ersatzbrennstoff-Kraftwerk

^B Einschließlich Pyrolyseanlage Burgau

^M Maximale mögliche Verbrennungskapazität

^S Anteil Siedlungs- und Gewebeabfall

^G Alle Abfälle

Die Verbrennungskapazität der einzelnen Anlagen stellt, wie oben im Text bereits erwähnt, keine konstante Größe dar, sondern unterliegt vielfältigen Einflüssen. Einen großen Einfluss auf die Verbrennungskapazität an einem Standort stellen Veränderungen in der Anlagentechnik dar. Dazu gehört der Neubau von Verbrennungseinheiten, beispielsweise als altersbedingter Ersatz für vorhandene Einheiten. Außerdem können sich größere Umbauten an den Kesseln oder im Bereich der Rauchgasreinigung auf die Verbrennungskapazität auswirken.

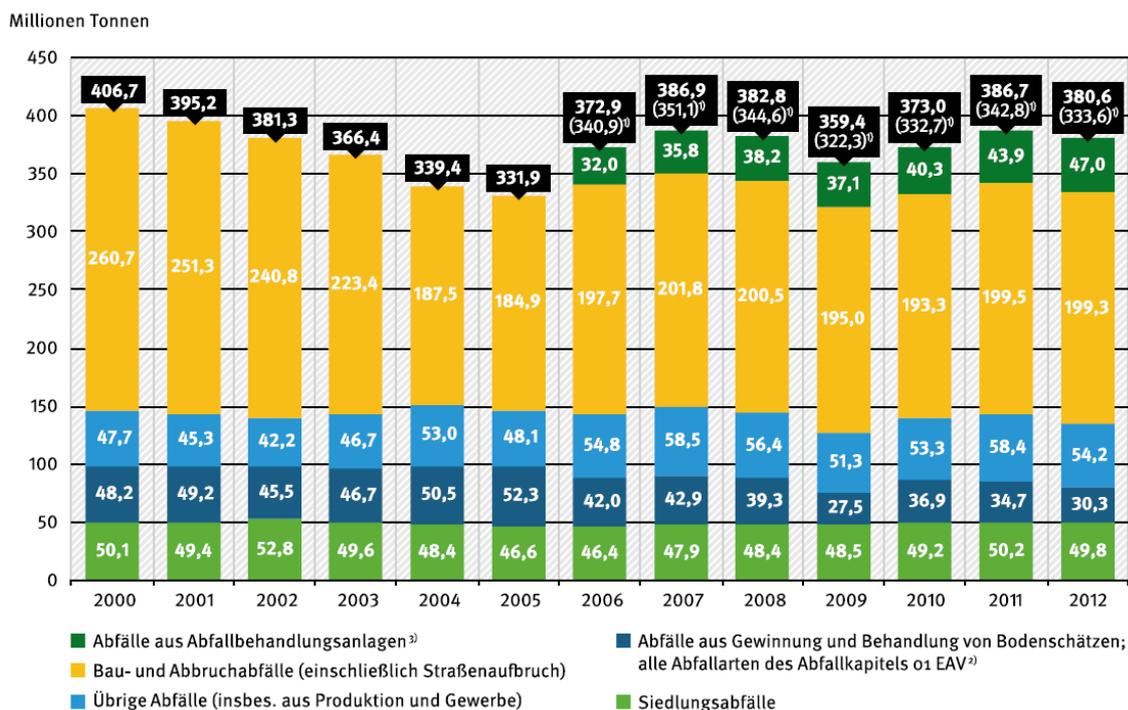
Der technische Fortschritt führt selbst heute noch in Teilbereichen zu Verbesserungen, die u.a. die Anlagenleistung (Abfalldurchsatz pro Stunde) oder die Verfügbarkeit (Betriebsstunden pro Jahr) verbessern. In beiden Fällen steigt die jährliche Verbrennungskapazität der Anlage.

Außerdem wird die Verbrennungskapazität durch Veränderungen des Abfallwirtschaftssystems im Einzugsgebiet der einzelnen Abfallverbrennungsanlagen beeinflusst. Dazu gehören beispielsweise die Einführung einer separaten Bioabfallsammlung, der Bau von Sortieranlagen oder Veränderungen bei der Struktur der Abfallanlieferung aufgrund von gewonnenen oder verlorenen Ausschreibungen.

Im Rahmen einer auf Deutschland bezogenen Analyse zum künftigen Bedarf von Abfallverbrennungskapazitäten wurde festgestellt, dass im Gegensatz zur teilweise in der Öffentlichkeit existierenden Meinung die Abfallverbrennungsanlagen seit 2013 wieder gut ausgelastet sind [Faulstich 2016a] [Faulstich 2016b]. Im Vergleich zum Jahr 2014 wird von einem Preisanstieg ausgegangen [Faulstich 2016b]. Aufgrund dieser Situation auf dem deutschen Entsorgungsmarkt wird derzeit ein Anlagenzubau diskutiert [Thiel 2017].

Die ermittelten Verbrennungskapazitäten der Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke erscheinen, wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, zunächst relativ hoch. Eine Gegenüberstellung mit dem Abfallaufkommen in Deutschland zeigt, dass nur ein geringer Anteil der anfallenden Abfälle thermisch behandelt wird. Aus Abbildung 5.2 (S. 68) ist zu entnehmen, dass in den vergangenen Jahren in Deutschland insgesamt etwa 350 bis 400 Mio. Tonnen Abfälle angefallen sind. Mit ca. 25 Mio. Tonnen pro Jahr stellen die in Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken verbrannten Abfälle nur einen kleinen Anteil dar, die entsprechend Abbildung 5.2 überwiegend aus den Bereichen "Siedlungsabfälle" und "übrige Abfälle" stammen.

5 Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung



¹⁾ Nettoabfallaufkommen, ohne Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen; 2006 erstmals als Bestandteil des Abfallaufkommens erhoben.

²⁾ Abfälle aus Gewinnung und Behandlung von Bodenschätzen

³⁾ Ohne Abfälle aus Abwasserbehandlungsanlagen (EAV 1908), Abfälle aus der Zubereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch oder industriellem Brauchwasser (EAV 1909), Abfälle aus der Sanierung von Böden und Grundwasser (EAV 1913) und Sekundärabfälle, die als Rohstoffe/Produkte aus dem Entsorgungsprozess herausgehen.

Abbildung 5.2: Abfallaufkommen einschließlich gefährlicher Abfälle [UBA DzU 2015].

5.2.2 Abfallheizwerte in Deutschland

Entsprechend den Ausführungen im Text oben stellt neben den Abfallmengen der Heizwert der zu verbrennenden Abfälle eine wichtige Größe dar, um den Beitrag der Abfallverbrennung zur Energieversorgung berechnen zu können.

Der Heizwert wird auf die Brennstoffmenge bezogen und beschreibt die bei der Verbrennung maximal nutzbare Wärmemenge, ohne dass der im Abgas enthaltenen Wasserdampf kondensiert.

Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen mit homogenen Eigenschaften weisen Abfälle eine heterogene und variierende Zusammensetzung auf, so dass der Heizwert entscheidend durch seine Zusammensetzung bestimmt wird. In Abbildung 5.3 (S. 69) sind die Heizwerte von einzelnen Abfallfraktionen und deren Beiträge zum Gesamtheizwert des Siedlungsabfalls anhand einer älteren Abfallanalyse [Marb 2003] dargestellt.

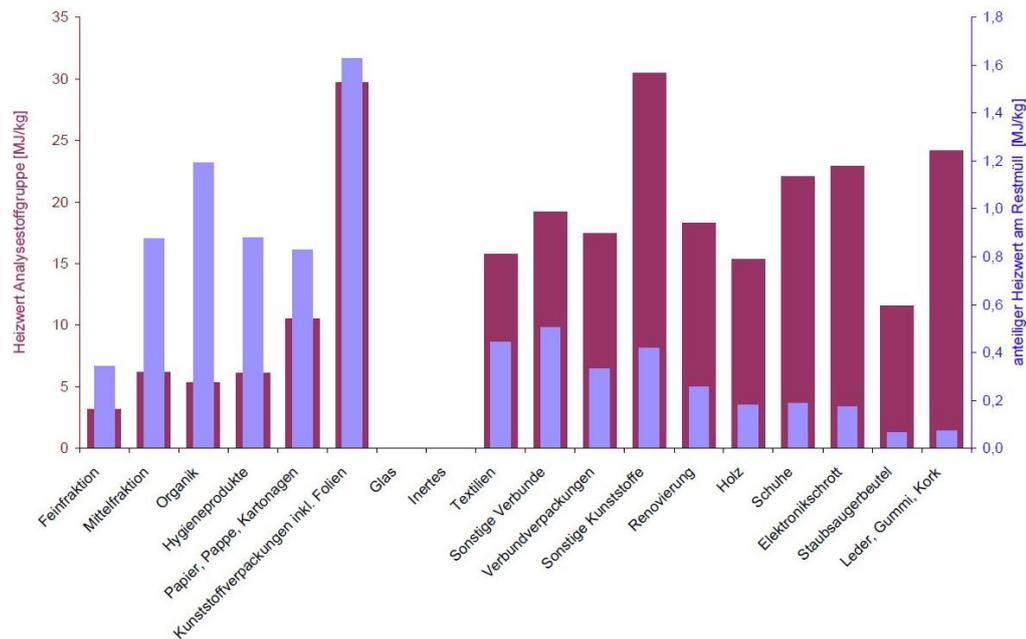


Abbildung 5.3: Heizwerte für Abfallfraktionen (linke Achse, breite Säulen) und Anteil am Gesamtheizwert (8,4 MJ/kg) des Restmülls (rechte Achse, schmale Säulen) [Marb 2003].

Entsprechend Abbildung 5.3 weist die Feinfraktion mit ca. 3 MJ/kg den niedrigsten Heizwert auf; Kunststofffraktionen besitzen dagegen sehr hohe Heizwerte im Bereich um 30 MJ/kg. Die Kunststoffverpackungen haben mit ca. 20 % einen großen Anteil am Gesamtheizwert von 8,4 MJ/kg; der Anteil der sonstigen Kunststoffe ist mit etwa 5 % deutlich niedriger. Umfangreiche Informationen und Berechnungen zur brennstofftechnischen Charakterisierung von Abfallstoffen wurden u.a. von Danz et al. [Danz 2008] und Kost [Kost 2001] publiziert.

Aus Abbildung 5.3 ergibt sich ergänzend, dass sich die Einführung von Wertstoffsammlungen oder deren Veränderung auf den Heizwert der restlichen, zu entsorgenden Siedlungsabfälle auswirken müssen.

Die sich ergebenden Auswirkungen zeigt Abbildung 5.4 (S. 70) durch die Entnahme von Papier, Kunststoffen, Metallen, Glas und Biomüll auf den Heizwert von Siedlungsabfällen. Abbildung 5.4 dokumentiert, dass der Heizwert bei Entnahme von nicht brennbaren Materialien wie Glas oder Metallen steigt; aufgrund hoher Wassergehalte gilt dies auch für Biomüll. Dagegen sinkt der Heizwert, wenn Fraktionen mit einem hohen Heizwert wie Kunststoffe oder Papier aus den gemischten Siedlungsabfällen abgetrennt werden.

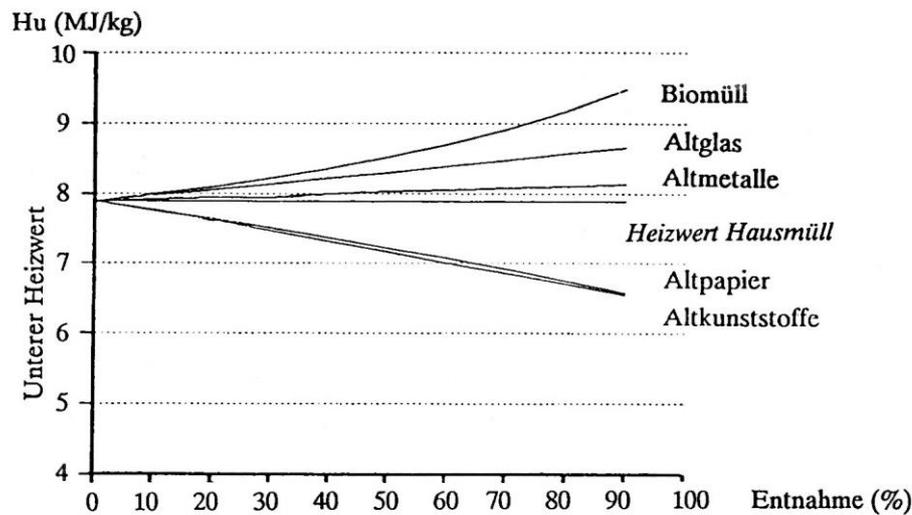


Abbildung 5.4: Auswirkungen der Wertstoffentnahme auf den Heizwert [Förstner 1993].

Neben abfallwirtschaftlichen Maßnahmen wird die Zusammensetzung der zu verbrennenden Siedlungsabfälle auch durch die allgemeine wirtschaftliche Situation, die Jahreszeit und Veränderungen im Einzugsgebiet der Abfallverbrennungsanlage beeinflusst. Beispielsweise wurden aufgrund von Änderungen bei den Eigentümerverhältnissen und den Entsorgungsverträgen am Standort Hamburg Borsigstraße ab Anfang 2014 von der Stadtreinigung keine kommunalen Siedlungsabfälle mehr angeliefert [RE 2015 22].

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass der Heizwert und die Verbrennungskapazität einer Abfallverbrennungsanlage nicht unabhängig voneinander sind. Die Feuerung und der Kessel werden für einen festgelegten Primärenergieeintrag ausgelegt. Steigt der Heizwert der zu verbrennenden Abfälle, so nimmt die Verbrennungskapazität ab. (Siehe Abschnitt 3.4)

Für Siedlungsabfälle, die in Abfallverbrennungsanlagen überwiegend eingesetzt werden, sind in Tabelle 5.2 (S. 71) die Heizwerte aus verschiedenen Quellen zusammengestellt.

In Tabelle 5.2 (S. 71) sind überwiegend "Mittelwerte" oder Auslegungsdaten aufgeführt. Aufgrund der vielfältigen Einflüsse auf den Heizwert von Abfällen ist davon auszugehen, dass es sich um keine konstante Größe handelt. Eine langfristige Veränderung der Heizwerte am Standort Mannheim in Abbildung 5.5 (S. 72) zeigt eine deutliche Zunahme der Heizwerte zu Beginn der 70er Jahre und ab Mitte der 80er Jahre.

Tabelle 5.2: Heizwerte für Siedlungsabfälle.

Heizwert	Quelle	Bemerkungen
5 – 8 MJ/kg	[Kolbusch 1979]	
11 – 16 MJ/kg	[Kolbusch 1979]	Bezogen auf Trockensubstanz
6 – 10 MJ/kg	[Kremers 1982]	
8,3 MJ/kg	[Blume 1988]	
9,0 MJ/kg	[Urban 1990]	Aktueller Mittelwert
6 – 12 MJ/kg	[Mayr 1997]	
9 – 11 MJ/kg	[Zwahr 2001]	Betrieb MVR Hamburg
10,175 MJ/kg	[Johnke 2004]	Mittelwert
10,5 MJ/kg	[Treder 2005]	Mittelwert für 45 Anlagen
8,85 MJ/kg	[Treder 2005]	MVA Hamm
11,0 MJ/kg	[Höling 2005]	Auslegung MVA Eschbach
10,5 - 15,1 MJ/kg	[Schäfers 2006]	Auslegungsbereich für 12 Anlagen ¹
7,2 – 15 MJ/kg	[Jäger 2007]	Auslegung MHKW Rothensee
10,9 MJ/kg	[Jäger 2007]	Auslegungsmittelwert MHKW Rothensee
12,5 MJ/kg	[Büchner 2010]	Auslegungswert Neuanlagen
9,0 - 10,0 MJ/kg	[Kranert 2010]	Europäischer Mittelwert
10,27 MJ/kg	[Keune 2012]	Auslegung der neuen Kessel
10,9 MJ/kg	[ITAD 2013]	Mittelwert für 80 Standorte ³
6,5 – 14 MJ/kg	[MVR 2015]	Auslegung MVR Hamburg
10,2 MJ/kg	[Lechtenberg 2015]	Mittelwert für 10 ältere Anlagen
12,4 MJ/kg	[Lechtenberg 2015]	Mittelwert für 12 Anlagen mit Inbetriebnahme ab 2004 ²
11,3 MJ/kg 10,9 MJ/kg	[RE 2017 15] [RE 2017 15]	MVA Schwandorf 2015 MVA Schwandorf 2016
9 – 11 MJ/kg	[VDI 3925.1]	Auslegung moderner Rostfeuerungen
9,7 MJ/kg	[VDI 3925.2]	Wert für Modellrechnungen

¹ Neben Abfallverbrennungsanlagen wurden auch Ersatzbrennstoff-Kraftwerke erfasst; Inbetriebnahme der Anlagen zwischen 2005 und 2008.

² Der hohe Gewerbeabfallanteil von ca. 40 % lässt den Schluss zu, dass es sich vermutlich um Ersatzbrennstoffkraftwerke handelt.

³ Beim ITAD erfolgt keine Unterscheidung zwischen Abfallverbrennungsanlagen für Siedlungsabfall und Ersatzbrennstoffkraftwerken.

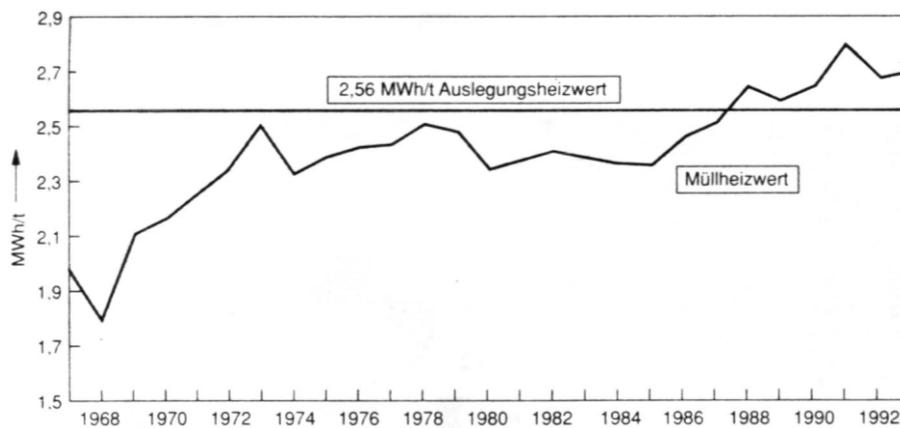


Abbildung 5.5: Historische Entwicklung der Heizwerte am Standort Mannheim [Albert 1994]
(1 MWh/t entspricht 3,6 MJ/kg).

In Abbildung 5.6 sind neuere Veränderungen der durchschnittlichen Heizwerte für die Standorte Kassel und Frankfurt dargestellt.

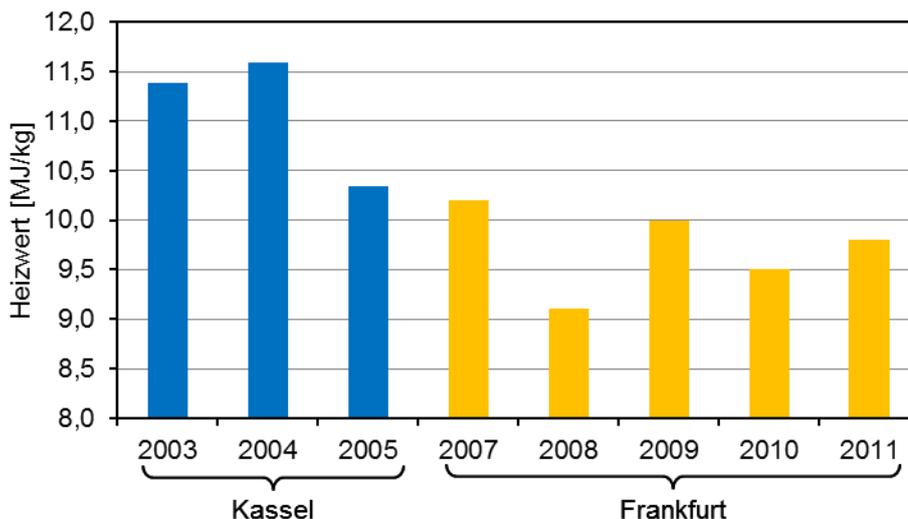


Abbildung 5.6: Zeitliche Veränderung der Heizwerte an der MVA Kassel [Tanner 2008] und an der MVA Frankfurt [Keune 2012].

Entsprechend Abbildung 5.6 sind die Heizwerte am Standort Kassel tendenziell etwas höher als am Standort Frankfurt. In den betrachteten Zeiträumen variieren die Heizwerte am Standort Kassel zwischen 10,3 und 11,6 MJ/kg, am Standort Frankfurt zwischen 9,1 und 10,2 MJ/kg. Für Restabfälle sind in der heutigen Zeit Heizwerte im Bereich um 10 MJ/kg zu erwarten.

Im Vergleich zu Abfallverbrennungsanlagen werden in Ersatzbrennstoff-Kraftwerken sehr unterschiedliche und aufbereitete Brennstoffe eingesetzt, wie beispielsweise Produktionsrückstände oder die heizwertreiche Fraktion aus Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlungsanlagen.

Allgemein liegen die Heizwerte der eingesetzten Ersatzbrennstoffe über den aktuellen Heizwerten, die an Abfallverbrennungsanlagen auftreten. In Beschreibungen von Ersatzbrennstoff-Kraftwerken und Literatur zu Ersatzbrennstoffen, die auch die Mitverbrennung in Zementanlagen und Kohlekraftwerken umfasst, findet man Werte im Bereich zwischen 11 und 20 MJ/kg.

5.3 Beschreibung der Szenarien

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass die Anzahl der deutschen Abfallverbrennungsanlagen sowie deren Technik und Verbrennungskapazität verschiedenen Veränderungen und Schwankungen unterliegen. Außerdem weisen die Heizwerte der Abfälle, die in Abfallverbrennungsanlagen eingesetzt werden, keine konstanten Werte auf. Im Fall der Heizwerte ist zwar davon auszugehen, dass der Mittelwert bei ca. 10 MJ/kg liegt, aber entsprechend Abbildung 5.6 (S. 72) können an einem Standort bei den Jahresdurchschnittswerten größere Abweichungen auftreten.

Bedingt durch diese Datenlage werden in dieser Arbeit für eine bessere Aussagekraft der Berechnungen zu den Beiträgen der Abfallverbrennungsanlagen zur Energieversorgung in Deutschland einfache Szenarien festgelegt, um mögliche Schwankungen bei den Basisdaten und eventuelle zukünftige Entwicklungen abzudecken. Zunächst wird für die Berechnungen von einer jährlichen Abfallmenge von insgesamt 25 Mio. Tonnen ausgegangen. Davon werden 20 Mio. Tonnen den Abfallverbrennungsanlagen und die restlichen 5 Mio. Tonnen den Ersatzbrennstoff-Kraftwerken zugeordnet.

Aufgrund der möglichen Schwankungen bei den Heizwerten erfolgt die Berechnung für drei einfache Szenarien ohne Veränderung der Abfallmengen, wobei neben dem heute überwiegend vorliegenden Heizwert von 10 MJ/kg zusätzlich 8 und 12 MJ/kg als durchschnittliche Heizwerte für Restabfälle berücksichtigt werden.

Für den Einsatz in den Ersatzbrennstoff-Kraftwerken wird für alle Szenarien ein Heizwert von 16 MJ/kg angenommen, um einen möglichst breiten Heizwertbereich von Ersatzbrennstoffen sicher abzudecken.

Darüber hinaus könnten zukünftig im Vergleich zur aktuellen Situation steigende Rohstoffpreise und sinkende Kosten für die Sortierung zu einer verstärkten Separierung von heizwertreichen Abfallfraktionen wie Kunststoffen führen. Die Folge wäre eine Abnahme der Abfallmengen und eine Verringerung der Heizwerte.

Für Kunststoffabfälle existieren relativ genaue Informationen, die den Entstehungsort und die Mengen erfassen. Die Daten sind in Tabelle 5.3 (S. 74) aufgeführt.

5 Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung

Tabelle 5.3: Entstehungsorte und Mengen von Kunststoffabfällen Deutschland [Consultic 2016].

Entstehungsorte	Abfallmenge 10 ³ t
Gewerbeabfälle über private Entsorger	1.162
Verkaufsverpackungen (Duale Systeme und Branchenlösungen)	1.532
Restmüll Haushalte	967
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle durch öffentlich-rechtliche Entsorger	207
Sperrmüll Haushalte (u.a. Möbel, Teppiche "weiße"/"braune" Ware	210
Wertstoffsammlung durch öffentlich-rechtliche Entsorger (Rohre, Behälter Folien)	58
Schredderbetriebe (nur Altkarossern) inkl. Autoverwerter und Reparaturwerkstätten	197
Wertstoffsammlung Elektronikschrott aus Privathaushalten, Gewerbe und Industrie (Rücknahme über öffentlich-rechtliche Entsorger, Handel und private Entsorger)	188
Sammel- und Verwertungssysteme für gewerbliche Verpackungen (auch Transport- und Umverpackungen)	375
sonstige Sammlungs- und Verwertungssysteme (AgPR, Kunststoffrohrverband, Dachbahnen, Rewindo etc.)	109
Kunststoffherzeuger	60
Kunststoffverarbeiter (Extrusion, Spritzgießen, Verarbeitung im Fensterbau)	856
Summe	5.921

Aufbauend auf [Consultic 2016] wurde im Auftrag des UBA von Wilts et al. [Wilts 2016] eine Studie für die Entwicklung von Maßnahmen und Instrumenten zur Steigerung der Sekundärrohstoffverwendung erstellt. Gemäß dieser Studie würden nach Einführung entsprechender Maßnahmen zusätzlich 1.687.000 Tonnen Kunststoffabfälle für eine werkstoffliche Verwertung jährlich zur Verfügung stehen. Dieses Potenzial stammt entsprechend [Wilts 2016] aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen (850.000 t), Leichtverpackungen aus privatem Endverbrauch (780.000 t), Elektroaltgeräten (45.000 t) und Altfahrzeugen (12.000 t).

Die Berücksichtigung dieser Mengen im Rahmen der Berechnungen gestaltet sich allerdings schwieriger als es entsprechend den vorliegenden Daten erscheint: Die Verbrennung von Kunststoffabfällen erfolgt nicht nur als Bestandteil verschiedener Abfallfraktionen in Abfallverbrennungsanlagen, sondern auch als Brennstoff in Ersatzbrennstoff-Kraftwerken, Anlagen zur Zementherstellung und Kohlekraftwerken. Aus [Consultic 2016] und [Wilts 2016] kann nicht abgeleitet werden, welche Anteile der für eine stoffliche Verwertung nutzbaren Gesamtmenge

(1.687.000 t) in Abfallverbrennungsanlagen bzw. Ersatzbrennstoff-Kraftwerken derzeit eingesetzt werden.

Daher wird für die Berechnungen angenommen, dass in der Zukunft 1 Mio. Tonnen Kunststoffabfälle mit einem Heizwert von 30 MJ/kg (Vergl. Abbildung 5.3, S. 69) zusätzlich stofflich verwertet werden könnten und somit als Brennstoff für Abfallverbrennungsanlagen bzw. Ersatzbrennstoff-Kraftwerke nicht mehr zur Verfügung stehen.

Neben einer Abnahme der Abfallmengen aufgrund einer verstärkten stofflichen Verwertung von Kunststoffen ist andererseits eine Zunahme der Abfallmengen denkbar. Bereits in den vergangenen Jahren war eine Zunahme der zu entsorgenden Abfallmengen zu beobachten. Entsprechend den Angaben des Statistischen Bundesamts, dargestellt in Abbildung 5.7, stieg die Menge der Siedlungsabfälle von 46,4 Mio. Tonnen im Jahr 2006 auf 51,6 Mio. Tonnen an. Zu den Siedlungsabfällen gehören neben dem in privaten Haushalten anfallenden Restmüll zusätzlich u.a. Sperrmüll, Bioabfall, getrennt gesammelte Fraktionen (u.a. Altpapier, Glas, Verpackungen) und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle.

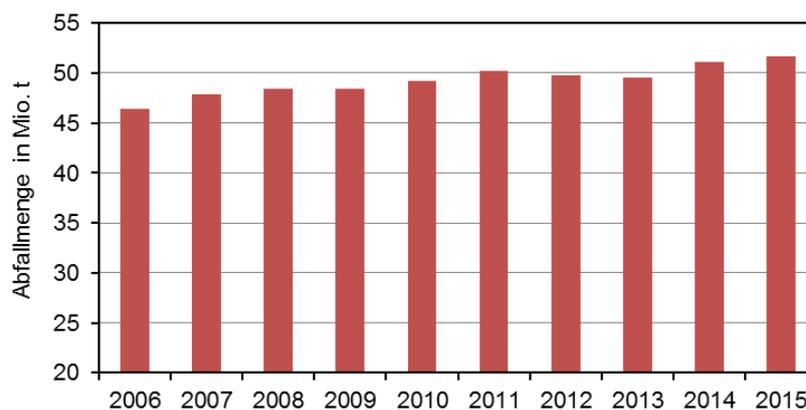


Abbildung 5.7: Zeitlicher Verlauf der Siedlungsabfallmengen in Deutschland. Eigene Darstellung mit Daten aus [StaBa 2017].

Für die Berücksichtigung einer Abfallmengen Zunahme wird davon ausgegangen, dass die zu verbrennende Abfallmenge um 10 % zunimmt. Dem entsprechend steigt die in Abfallverbrennungsanlagen zu entsorgende Abfallmenge auf 22 Mio. Tonnen pro Jahr. In Ersatzbrennstoff-Kraftwerken würden 5,5 Mio. Tonnen Abfälle verbrannt. Somit ergeben sich im Rahmen der Berechnungen fünf einfache Szenarien, die in Tabelle 5.4 (S. 76) zusammengefasst werden.

Tabelle 5.4: Basisdaten für die Berechnungen.

Szenario	1	2	3*	4	5
Restmüllmenge	20 Mio. t	20 Mio. t	24 Mio. t	22 Mio. t	20 Mio. t
EBS-Menge	5 Mio. t	5 Mio. t		5,5 Mio. t	5 Mio. t
Heizwert	8 MJ/kg	10 MJ/kg	10 MJ/kg	10 MJ/kg	12 MJ/kg
EBS-Heizwert	16 MJ/kg	16 MJ/kg	16 MJ/kg	16 MJ/kg	16 MJ/kg

* Berechnung erfolgt aus Szenario 2, die Primärenergie der stofflich verwerteten Kunststoffmengen wird subtrahiert

5.4 Anteil der Abfallverbrennung am Primärenergiebedarf von Deutschland

Mit dem Primärenergiebedarf werden alle Energieträger ohne technische Umwandlung erfasst, die für die unterschiedlichen Sektoren wie Verkehr, Stromerzeugung, Wärmebereitstellung oder einen nichtenergetischen Verbrauch im Inland eingesetzt werden.

Allgemein ist der Primärenergieverbrauch für volkswirtschaftliche Betrachtungen von Bedeutung, denn ein Vergleich mit der inländischen Primärenergiegewinnung zeigt, ob und in welchem Ausmaß ein Staat von Energieimporten abhängig ist.

Die Untersuchung des Primärenergieanteils am Gesamtbedarf bietet zunächst den Vorteil, dass Umwandlungsverluste zu Sekundär- und Endenergien ausgeklammert werden. Außerdem hat die Auswahl der erzeugten Sekundärenergien (Verhältnis Strom- zu Wärmeabgabe), die bei Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken maßgeblich vom Anlagenstandort abhängig ist, keinen Einfluss.

Für die Berechnung der in Abfallverbrennungsanlagen eingesetzten Primärenergiemenge wird wie bei allen anderen Primärenergieträgern, die mit Hilfe einer Verbrennung ihre gespeicherte chemische Energie umwandeln, die freigesetzte Primärenergiemenge durch Multiplikation der eingesetzten Brennstoffmengen mit den entsprechenden Heizwerten bestimmt.

Die Berechnung der in Abfallverbrennungsanlagen eingesetzten Primärenergiemengen beruht auf den in Abschnitt 5.2.1 (S. 65) und Abschnitt 5.2.2 (S. 68) abgeleiteten Daten, die in Tabelle 5.5 gemeinsam mit den errechneten Primärenergiemengen für die fünf Szenarien zusammengestellt sind.

5.4 Anteil der Abfallverbrennung am Primärenergiebedarf von Deutschland

Tabelle 5.5: In deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken pro Jahr eingesetzte Primärenergien (Siehe Text).

Szenario	1	2	3 *	4	5
Restmüllmenge	20 Mio. t	20 Mio. t	24 Mio. t	22 Mio. t	20 Mio. t
EBS-Menge	5 Mio. t	5 Mio. t		5,5 Mio. t	5 Mio. t
Heizwert	8 MJ/kg	10 MJ/kg	10 MJ/kg	10 MJ/kg	12 MJ/kg
EBS-Heizwert	16 MJ/kg	16 MJ/kg	16 MJ/kg	16 MJ/kg	16 MJ/kg
Primärenergie	240 PJ	280 PJ	250 PJ	308 PJ	320 PJ

* Berechnung erfolgt aus Szenario 2, die Primärenergie der stofflich verwerteten Kunststoffmengen wird subtrahiert

In Abhängigkeit von den Daten, die den einzelnen Szenarien zugrunde liegen, beträgt der Primärenergieeinsatz in Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken zusammen 240 bis 320 PJ pro Jahr.

Um die Bedeutung dieser Primärenergien beurteilen zu können ist ein Vergleich mit dem gesamten Primärenergiebedarf von Deutschland erforderlich. Die chronologische Entwicklung des Primärenergiebedarfs ist Abbildung 5.8 zu entnehmen.

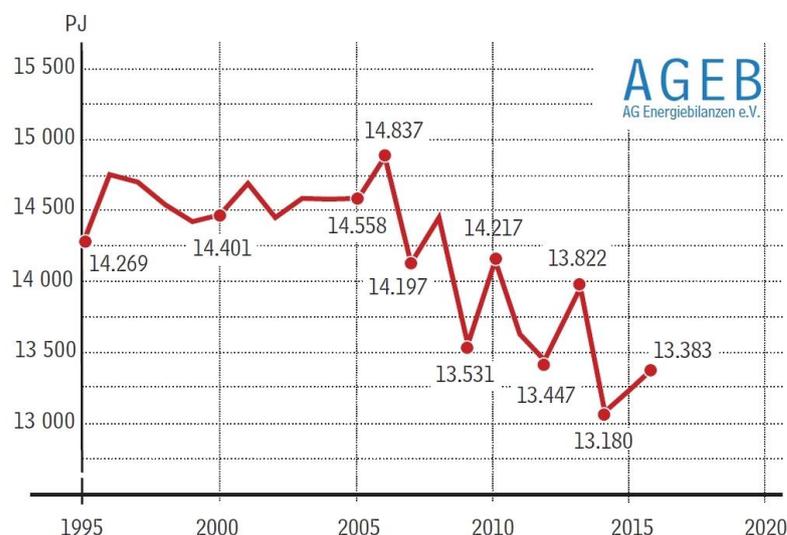


Abbildung 5.8: Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland 1995 - 2016 [AGEB 2017a].

In Abbildung 5.8 ist dargestellt, dass der deutsche Primärenergiebedarf sich in den vergangenen zehn Jahren zwischen 13.000 und 15.000 PJ bewegt hat. Im Vergleich stieg der Primärenergiebedarf im Jahr 2016 u.a. aufgrund der kühleren Witterung und der guten Wirtschaftsentwicklung leicht an [AGEB 2017a], so dass im Jahr 2016 entsprechend Abbildung 5.8 insgesamt 13.383 PJ Primärenergie benötigt wurden.

5 Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung

Ein Vergleich mit den in Tabelle 5.5 errechneten Werten zeigt, dass der Primärenergieeinsatz in deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken nur einen sehr geringen Anteil darstellt, der für 2016 lediglich im Bereich um 2 % liegt. Die errechneten Werte sind in Tabelle 5.6 aufgeführt.

Tabelle 5.6: Anteil der in Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken Primärenergiemengen am Gesamtbedarf (Siehe Text).

Szenario	1	2	3	4	5
Primärenergie	240 PJ	280 PJ	250 PJ	308 PJ	320 PJ
Anteil	1,79 %	2,09 %	1,87 %	2,30 %	2,39 %

Aufgrund dieses sehr geringen Beitrags wirken sich die im Rahmen der Szenarien berücksichtigten Heizwertschwankungen, verbesserten Recyclingtechnologien und steigenden Abfallmengen im Vergleich zum Gesamt-Primärenergiebedarf kaum aus, denn die errechnete Schwankungsbreite liegt zwischen 1,79 und 2,39 %.

Die Ursache für den errechneten sehr geringen Beitrag ergibt sich aus den prozentualen Beiträgen der einzelnen Primärenergieträger zum gesamten Primärenergieverbrauch. Abbildung 5.9 zeigt, dass insbesondere fossile Energieträger einen großen Anteil haben.

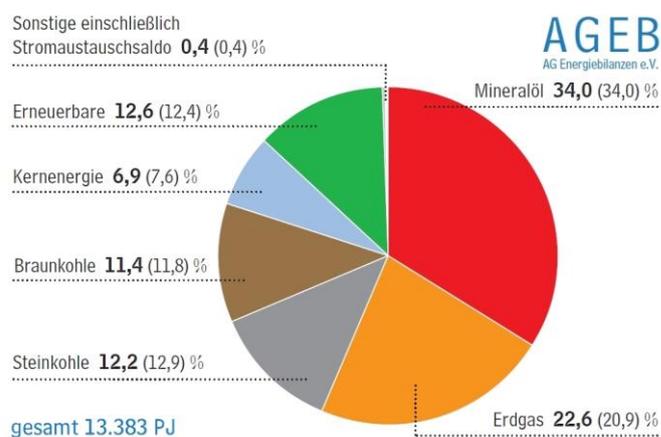


Abbildung 5.9: Prozentuale Anteile der Primärenergieträger am Gesamtverbrauch für 2016, Vorjahr in Klammern. [AGEB 2017a] (Daten im Anhang)

Aus Abbildung 5.9 erkennt man, dass bereits 34 % des gesamten Primärenergieverbrauchs auf Mineralöl entfällt und somit überwiegend im Bereich Verkehr verbraucht wird. Erdgas, Braun- und Steinkohle als typische fossile Energieträger, die größtenteils für die Strom- und Wärmebereitstellung genutzt werden, weisen zusammen einen Anteil von 46,2 % am gesamten Primärenergiebedarf auf.

5.5 Potenzial der Abfallverbrennung für den Wärmebedarf

In Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken werden die als Primärenergie-träger zugeführten Abfallbrennstoffe zunächst im Kessel in Dampf umgewandelt. Der erzeugte Dampf kann, wie oben im Text erwähnt, mit Hilfe von einer Turbine zur Stromerzeugung genutzt werden. Weitere Möglichkeiten bieten die Verwendung als direkt nutzbare Sekundär- bzw. Endenergie in Form von Prozesswärme, beispielsweise für Produktionsprozesse, oder die Bereitstellung von Wärme für Heizzwecke bzw. Warmwasservorhaltung mit Hilfe von Wärmetauschern. Weit verbreitet ist die kombinierte Erzeugung von elektrischer Energie und Wärme, bezeichnet als Kraft-Wärme-Kopplung.

Für eine exakte Berechnung der Beiträge von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken zur Wärmeversorgung in Deutschland müssten die entsprechenden Daten von den einzelnen Anlagen erhoben werden. Allerdings stellen die betrachteten Anlagen Unikate dar, deren verfahrenstechnischer Aufbau Veränderungen unterliegt (Siehe Beispiele in Abschnitt 3.5). Zusätzlich erwies sich für die Berechnungen die Datenlage für viele Standorte als nicht ausreichend.

Aus diesen Gründen wird in diesem Abschnitt nicht der exakte Anteil am deutschen Wärmebedarf, sondern das von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken maximal mögliche Potential errechnet. Für diese Berechnung wird davon ausgegangen, dass kein Strom erzeugt wird und der Dampf bzw. die daraus erzeugte Wärmeenergie direkt an andere Verbraucher abgegeben wird.

Die Berechnungen erfassen nur die maximal möglichen Wärmemengen, die abgegeben werden können. Der Eigenverbrauch der Anlagen bleibt unberücksichtigt, denn er kann aufgrund der Datenlage nicht zuverlässig bestimmt werden. Berechnet wird folglich das mögliche Bruttopotenzial der Wärmebereitstellung durch Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke.

Die Umwandlung der zugeführten Primärenergie in nutzbare Wärme für Produktions- oder Heizzwecke ist allerdings mit Verlusten verbunden. Den größten Beitrag zu den Verlusten bildet das Rauchgas, das mit Blick auf die Vermeidung von Kondensationsprozessen beim Austritt aus dem Kessel noch Temperaturen im Bereich um 200 °C aufweist. Weitere Verluste ergeben sich aus der Abstrahlung des Kessels und die Abführung der heißen Schlacke am Ende des Rostes.

Diese Verluste werden durch den Kesselwirkungsgrad beschrieben. Erfasst wird der Anteil der Wärmeenergie, der von den im Feuerraum gebildeten heißen Rauchgasen auf den Wasser-Dampf-Kreislauf des Kessels übertragen wird. Für Informationen zum Kesselwirkungsgrad wird das BVT-Merkblatt "Waste Incineration" [BVT WI] (Siehe Abschnitt 4.2) herangezogen. In diesem Merkblatt wird für den Kesselwirkungsgrad ein Bereich zwischen 75,2 und 84,2 % angegeben, der Mittelwert liegt bei 81,2 % (Siehe Abschnitt 3.4.2).

Eine Verbesserung kann erreicht werden, wenn zusätzlich die latente Wärme der Rauchgase durch Einsatz einer Abgaskondensation im Bereich der Rauchgasreinigung genutzt wird. Zu erreichen ist in diesem Fall ein Kesselwirkungsgrad von über 90 % [Martin 2013] bzw. 92 % [Damgaard 2010] (Siehe Abschnitt 3.4.2).

Für die Berücksichtigung eines breiten Standards der Anlagentechnik, der ältere Anlagen ohne Rauchgaskondensation und optimierte, moderne Standorte mit Rauchgaskondensation umfasst, wird das Brutto-Potenzial der Wärmebereitstellung sowohl mit 81,2 % als auch mit 92 % als Kesselwirkungsgrad bestimmt.

Ferner wird von einem Primärenergieeinsatz von 20 Mio. Tonnen Restabfall mit einem Heizwert von 10 MJ/kg und 5 Mio. Tonnen Ersatzbrennstoff mit einem Heizwert 16 MJ/kg ausgegangen. Somit stehen 280 PJ als Primärenergie zur Verfügung (Siehe Szenario 2 in Abschnitt 5.3). Die Ausgangsdaten und Ergebnisse der Berechnungen zeigt Tabelle 5.7.

Tabelle 5.7: Brutto-Potenzial der Wärmebereitstellung in Abhängigkeit vom Kesselwirkungsgrad.

Eingesetzte Primärenergiemenge	Rauchgas-kondensation	Kessel wirkungsgrad	Brutto-Potenzial Wärmebereitstellung
280 PJ	nein	81,2 %	227,4 PJ
280 PJ	ja	92,0 %	257,6 PJ

Für eine Einschätzung, wie bedeutsam das Brutto-Potenzial von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken ist, muss ein Vergleich mit dem gesamten Wärmebedarf in Deutschland erfolgen. Aus Abbildung 5.10 (S. 80) kann der Wärmebedarf für verschiedene Sektoren entnommen werden.

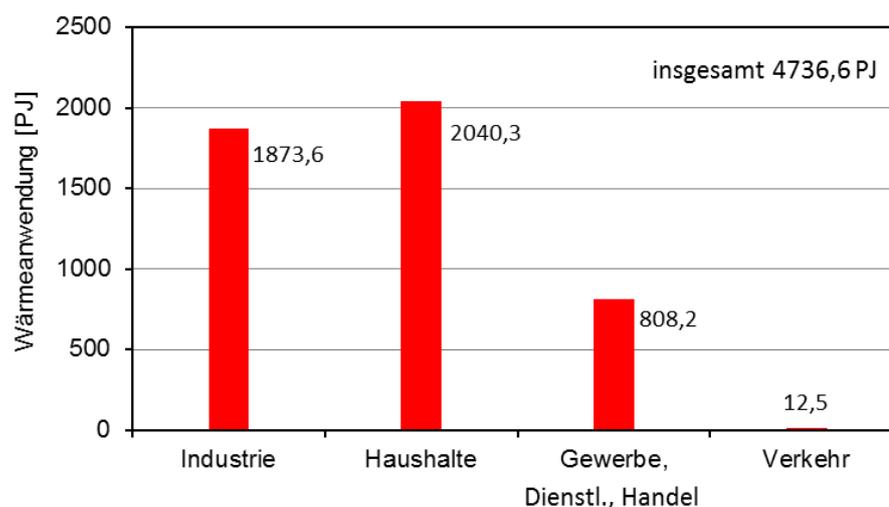


Abbildung 5.10: Verteilung der Wärmeanwendung auf verschiedene Sektoren, eigene Darstellung mit Daten aus [AGEB 2016].

Nach Abbildung 5.10 weisen die Sektoren "Industrie" und "Haushalte" mit 1873,6 und 2040,3 PJ den größten Wärmebedarf auf. Im Sektor "Gewerbe, Dienstleistungen und Handel" wird mit 808,2 PJ wesentlich weniger Wärmeenergie benötigt; der Sektor "Verkehr" spielt mit lediglich 12,5 PJ keine Rolle. Insgesamt ergibt sich ein Wärmebedarf von 4736,6 PJ.

Ein Vergleich dieser Verbrauchsdaten mit dem errechneten Bruttopotenzialen in Tabelle 5.7 (S. 80) zeigt, dass durch Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke mit maximal 4,8 % bzw. 5,4 % nur sehr geringe Anteile erzeugt werden können.

5.6 Potenzial der Abfallverbrennung für die Stromerzeugung

Elektrischer Strom stellt aus verschiedenen Gründen eine hochwertige Energieform dar. Strom lässt sich mit Kabeln gut über große Strecken transportieren und zur Nutzung relativ einfach in andere Energieformen umwandeln. Außerdem ist elektrischer Strom eine vollständig arbeitsfähige Energieform und somit als reine Exergie aufzufassen.

Zur Erzeugung von elektrischem Strom als Sekundärenergie werden verschiedene Technologien eingesetzt. Dazu gehören u.a. konventionelle, mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerke sowie die Nutzung von Umwandlungsprozessen, die auf erneuerbaren Energien beruhen. Außerdem können, wie oben im Text erwähnt, Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke wie konventionelle Kraftwerke durch Dampfprozessnutzung Strom erzeugen.

Eine exakte Bestimmung der elektrischen Energiemengen, die in Deutschland durch Verbrennung von Abfällen erzeugt werden können, ist wie bei der Wärmebereitstellung nicht möglich. Die Ursache liegt ebenfalls in der unterschiedlichen technischen Ausführung der einzelnen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke, insbesondere bei der Dampfprozessnutzung. Außerdem kommt es an diesen Abfallbehandlungsanlagen zu Veränderungen in der Anlagentechnik, die Auswirkungen auf den Eigenverbrauch und damit auf die Bereitstellung elektrischer Energie haben. Aus diesen Gründen wird in diesem Abschnitt das mögliche Potenzial der Strombereitstellung bestimmt. Dieses Potenzial ergibt sich, wenn die im Kessel der Anlagen erzeugten Dampfmen gen ausschließlich zur Stromerzeugung mit Turbinen genutzt werden.

Aufgrund der internen Verluste, die bei der Stromerzeugung durch Kombination von Dampfkesselanlagen mit Turbinen auftreten, kann die zugeführte Primärenergie nur teilweise in elektrischen Strom überführt werden. Der elektrische Wirkungsgrad beschreibt den Primärenergieanteil, der in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Dabei ist zwischen dem elektrischen Bruttowirkungsgrad und dem elektrischen Nettowirkungsgrad zu differenzieren. Der elektrische Bruttowirkungsgrad beschreibt das Verhältnis der erzeugten elektrischen Energie zu der mit dem Brennstoff zugeführten Primärenergie; der Eigenverbrauch der Anlage wird nicht berücksichtigt. Dagegen wird der Eigenbedarf der betrachteten Anlage durch den Nettowirkungsgrad erfasst, der als Verhältnis der in das Stromnetz abgegebene elektrische Energie zu der mit dem Brennstoff zugeführten Primärenergie definiert ist.

5 Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung

Aus diesen Definitionen ergibt sich, dass Brutto- und Nettowirkungsgrade der Charakterisierung der Anlagentechnik dienen, aber keine Angaben über die absolute Energiemenge und somit über den Beitrag zur Energieversorgung enthalten. In Tabelle 5.8 sind Brutto- und Nettowirkungsgrade für Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke aufgeführt.

Tabelle 5.8: Zusammenstellung elektrischer Wirkungsgrade von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken.

Anlage	Standort ¹	Wirkungsgrad [%]	Quelle
MVA		21,0 el. netto	[Hnida 1996]
MVA	Amsterdam	34,0 el. brutto 30,0 el. netto 30,5 el. netto ²	[Fleck 2005] [Gohlke 2007] [Wandschneider 2007]
MVA	Neapel	31,0 el. brutto 27,3 el. netto	[Schäfers 2006]
EBSK	Rüdersdorf	32,3 el. brutto	[Schäfers 2006]
MVA		22,0 el. brutto 18,0 el. netto	[Gohlke 2007]
MVA	MVA Brescia 1,2 MVA Brescia 3	27,0 el. brutto 24,0 el. netto 28,0 el. brutto 25,0 el. netto	[Gohlke 2007]
MVA	Zella Mehliis	20,6 el. netto	[Gohlke 2008b]
MVA		24,0 el. brutto 20,6 el. netto	[Gohlke 2011]

¹ Bei fehlender Standortangabe allgemeiner Durchschnittswert

² Simulationsrechnung

Die Angaben für den Nettowirkungsgrad in Tabelle 5.8 zeigen eine Schwankungsbreite zwischen 18 und 30 %. Die Ursachen für diesen relativ breiten Bereich liegen überwiegend in der Konstruktion und Auslegung des Kessels (Siehe Abschnitt 3.4.2) sowie der Ausgestaltung der Rauchgasreinigung (Siehe Abschnitt 3.4.3). Der Spitzenwert wird von der Anlage in Amsterdam erreicht, die mit einer Zwischenüberhitzung ausgerüstet ist (Siehe Abschnitt 3.5.1, S. 36).

Die Differenzen zwischen den Netto- und Bruttowirkungsgraden in Tabelle 5.8 werden durch Literaturangaben bestätigt. Nach [Hnida 1996] beträgt der Eigenenergiebedarf rund 3 % der im Abfall enthaltenen Energie. An anderer Stelle [Schäfers 2006] wird für Anlagen mit einfacheren Rauchgasreinigungsanlagen eine Reduzierung des Brutto-Wirkungsgrads um 2,5 bis 4 % erwähnt, im Fall mehrstufiger Rauchgasreinigungssysteme sinkt der Bruttowirkungsgrad um 5,5 bis 6,5 %.

Ausgegangen wird bei den Berechnungen für das durch Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke bereitstellbare Strompotenzial von 280 PJ, die als Primärenergie zur Verfügung stehen (Siehe Szenario 2 in Abschnitt 5.3). Diese Primärenergieemenge ergibt sich aus 20 Mio. Tonnen Restabfall, die einen Heizwert von 10 MJ/kg aufweisen, ergänzt um 5 Mio. Tonnen Ersatzbrennstoff (Heizwert 16 MJ/kg).

Für die Berechnung des Potenzials der Strombereitstellung werden verschiedene Wirkungsgrade angenommen, um den Einfluss der verschiedenen Kesselkonstruktionen und des Eigenverbrauchs insbesondere durch die Rauchgasreinigungsanlagen zu erfassen. In Tabelle 5.9 sind, ausgehend von 280 PJ Primärenergie, die angenommenen Wirkungsgrade und die entsprechenden Ergebnisse der Strombereitstellung aufgeführt.

Tabelle 5.9: Nettopotenzial der Strombereitstellung für die Energiewende durch Abfallverbrennungsanlagen.

Eingesetzte Primärenergieemenge	Elektrischer Nettowirkungsgrad	mögliche Strombereitstellung
280 PJ	15 %	42 PJ
280 PJ	20 %	56 PJ
280 PJ	25 %	70 PJ
280 PJ	30 %	84 PJ

Im Fall einer gleichzeitigen Erzeugung von Strom und Wärme (Kraft-Wärme-Kopplung) können nach Zunft [Zunft 2011] aus einer Tonne Siedlungsabfall 1,25 bis 1,5 MWh Wärme und 0,3 bis 0,7 MWh elektrische Energie erzeugt werden. Eine einfache Hochrechnung dieser Daten für die elektrische Energie auf 25 Mio. Tonnen Abfall ergibt, dass bei Kraft-Wärme-Kopplung 27 bis 63 PJ an elektrischer Energie bereitgestellt werden könnten.

Die erforderlichen Daten für einen Vergleich des durch Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke bereitstellbaren Strompotenzials mit der gesamten deutschen Stromerzeugung sind in Tabelle 5.10 (S. 84) aufgeführt. Enthalten sind in Tabelle 5.10 die Beiträge einzelner Energieträger zur Bruttostromerzeugung in Deutschland.

5 Beiträge der Abfallverbrennung zur Energieversorgung

Tabelle 5.10: Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern für das Jahr 2016 [AGEB 2017c].

Energieträger	Stromerzeugung	Stromerzeugung
Braunkohle	150,0 Mrd. kWh	540,0 PJ
Steinkohle	111,5 Mrd. kWh	401,4 PJ
Erdgas	80,5 Mrd. kWh	289,8 PJ
Mineralölprodukte	5,9 Mrd. kWh	21,2 PJ
Kernenergie	84,6 Mrd. kWh	304,6 PJ
Erneuerbare E.	188,2 Mrd. kWh	677,5 PJ
Übrige Energieträger	27,5 Mrd. kWh	99,0 PJ
Summe:	648,2 Mrd. kWh	2333,5 PJ

Aus der Summe der Stromerzeugung einzelner Energieträger ergibt sich, dass in Deutschland im Jahr 2016 insgesamt 648,2 Mrd. kWh bzw. 2333,5 PJ erzeugt wurden. Vergleicht man diese gesamte Strommenge mit den in Tabelle 5.9 errechneten Daten, so erkennt man, dass Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke nur einen sehr geringen Beitrag leisten können.

Aus den Berechnungen ergibt sich, dass bei einem angenommenen sehr niedrigen elektrischen Nettowirkungsgrad von 15 % das Beitragspotenzial von 42 PJ lediglich einen Anteil von 1,8 % an der gesamten Stromerzeugung darstellt.

Geht man von einem Wirkungsgrad im Bereich zwischen 20 und 25 % aus, der bei neueren Anlagen bei alleiniger Stromerzeugung sicher erreicht wird, so würde das Potenzial an elektrischer Energie 2,4 bis 3,0 % des gesamtdeutschen Strombedarfs betragen. Selbst wenn ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 30 % angenommen wird, der ein technisches Optimum darstellt, könnte das Potenzial der Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke lediglich auf 3,6 % der gesamten Stromerzeugung steigen.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen außerdem, dass eine technisch und somit wirtschaftliche aufwändige deutliche Verbesserung der Wirkungsgrade von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke, beispielsweise durch Kesselneubau, auf die Bereitstellung von elektrischer Energie und damit auf die Energiewende nur einen sehr geringen Einfluss hätte.

5.7 CO₂-Emissionen

Allgemein kommt im Zusammenhang mit der Energieversorgung dem Klimaschutz eine steigende Bedeutung zu, so dass im Rahmen von Untersuchungen zur Energiebereitstellung durch Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke die entsprechenden CO₂-Emissionen betrachtet werden müssen.

Ein weiterer Grund für die notwendige Betrachtung liegt in der Vergangenheit, denn aufgrund der Zunahme der Abfallverbrennung in Deutschland in Folge der Umsetzung der Anforderungen aus der TA Siedlungsabfall [TA Si] bzw. der Ablagerungsverordnung [AbfAbIV]¹ stiegen die CO₂-Emissionen in diesem Bereich an. Andererseits sind die Anteile der Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke am Primärenergieverbrauch gering, so dass nur kleine Beiträge zu den CO₂-Emissionen zu erwarten sind.

An Stelle eigener Erhebungen werden für die CO₂-Emissionen Daten aus einer Studie [Icha 2016] herangezogen. Die zeitliche Veränderung des fossilen Anteils der CO₂-Emissionen aus dem Bereich der Abfallverbrennung zeigt Abbildung 5.11. Die entsprechenden Daten beruhen auf einer Publikation vom Statistischen Bundesamt [StaBa 2014] und wurden aus Abfallmengen, entsprechenden Heizwerten und Emissionsfaktoren berechnet [Icha 2016]. Somit liegt für die Abbildung 5.11 eine andere Basis vor als für die eigenen Berechnungen in den vorangegangenen Abschnitten.

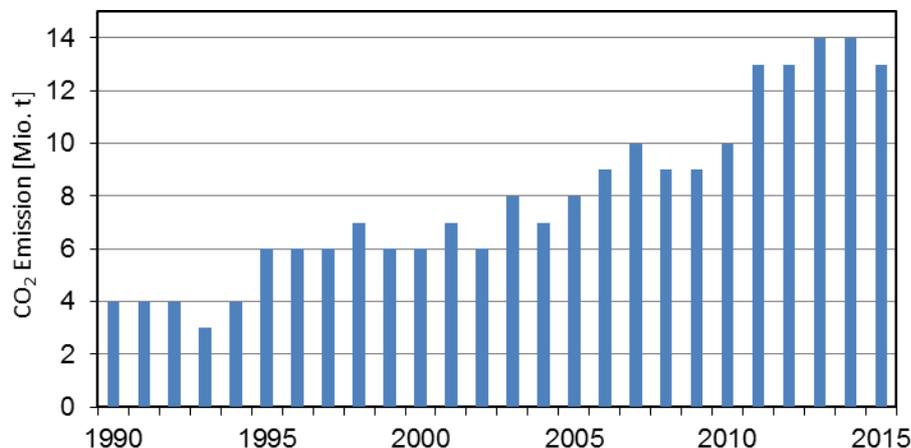


Abbildung 5.11: CO₂-Emissionen der Stromerzeugung aus Abfall (fossiler Anteil, eigene Darstellung mit Daten aus [Icha 2016], 2015 geschätzt).

Entsprechend der Abbildung 5.11 sind im Bereich der Abfallverbrennung die CO₂-Emissionen des fossilen Anteils in der Vergangenheit von ca. 4 Mio. t im Jahr 1990 auf 13 Mio. t im Jahr 2015 angestiegen. Der Neubau von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken aufgrund der ab Jahresmitte 2005 einzuhaltenden Anforderungen aus [TA Si] bzw.

¹ Die Vorgaben aus [TA Si] und [AbfAbIV] sind heute Bestandteil der Verordnung über Deponien und Langzeitlager [DepV].

[AbfAbIV] und die damit verbundene Zunahme der CO₂-Emissionen sind in Abbildung 5.11 gut zu erkennen.

Dagegen betragen im Jahr 2014 die CO₂-Emissionen aus der Stromerzeugung in Deutschland unter Berücksichtigung von Braunkohle, Steinkohle, Erdgas, Mineralölprodukten, Abfall (fossiler Anteil) sowie sonstigen Energieträgern 315 Mio. t [Icha 2016]. Die Verbrennung der fossilen Abfallanteile hat an den CO₂-Emissionen der Stromerzeugung somit einen Anteil von ca. 4,4 %.

Erweitert man die Betrachtung durch Berücksichtigung anderer Klimagase wie Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (Lachgas, N₂O) auf die CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq), so werden durch den Energie-/Verkehr-Bereich 732,2 Mio. t CO₂-Äq, Industrieprozesse 61,5 Mio. t CO₂-Äq, die Landwirtschaft 67 Mio. t CO₂-Äq und den Abfall/Abwasser-Bereich 11,2 Mio. t CO₂-Äq emittiert. Der Bereich Abfall/Abwasser weist somit einen Anteil von 1,2 % auf. [NE 2017 6]

Außerdem hat die allgemeine Bedeutung der Abfallwirtschaft für den Umweltschutz und in der Politik dazu geführt, dass allgemeine Themen aus dem Bereich Energietechnik und Klimaschutz stets im Zusammenhang mit der Abfallverbrennung diskutiert worden sind. Zu diesen Themen gehört auch die Abscheidung von CO₂ und anschließende Einlagerung in spezielle Gesteinsformationen im Untergrund, die als Carbon Capture and Storage-Technologie (CCS) bezeichnet wird.

Diese Technik wurde in der Vergangenheit für die Stromerzeugung auf Kohlebasis intensiv untersucht und ist Gegenstand zahlreicher Publikationen (Siehe z.B. [Duker 2008] [Fischer 2009] [Kuckshinrichs 2010] [Matthes 2007] [Notz 2010] [Oexmann 2009] [Schiffer 2010] [UBA 2009]).

Im Rahmen von Überlegungen zur Anwendung der CCS-Technologie weisen Faulstich et al. [Faulstich 2009] darauf hin, dass aufgrund der geringen Anlagengröße von Abfallverbrennungsanlagen im Vergleich zu Kohlekraftwerken die spezifischen Abscheidungskosten für CO₂ bei Abfallverbrennungsanlagen höher liegen. Außerdem erfordert die Rauchgaszusammensetzung besondere Anforderungen, um die Eigenschaften des zu lagernden CO₂ und der Lagerstätten nicht zu beeinträchtigen [RE 2009 12].

In anderen Arbeiten [Karpf 2016a] [Karpf 2016b] wurden genauere Untersuchungen zur Anwendung der CCS-Technologie an Abfallverbrennungsanlagen durchgeführt. Die durchgeführten Bilanzierungen zeigen auf, dass der Energieaufwand für die CO₂-Abscheidung so hoch ist, dass die aus dem Energieaufwand resultierenden CO₂-Emissionen im Vergleich zu den abgeschiedenen CO₂-Mengen unverhältnismäßig hoch sind. Für genauere Informationen über die betrachteten Abscheidungsverfahren wird auf die Literatur [Karpf 2016a] [Karpf 2016b] verwiesen.

Entgegen den aufgezeigten Nachteilen wurde an einer Abfallverbrennungsanlage im schwedischen Oslo eine Pilotanlage für die Abscheidung von CO₂ errichtet. Es handelt sich um eine mobile Abscheideanlage, der ein Rauchgasteilstrom zugeleitet wird. Es wird davon ausgegangen, dass 90 % des CO₂-Gehalts abgetrennt werden können. [RE 2016 7].

6 Zusammenfassung

In den letzten Jahren ist einerseits das Bewusstsein über die Abhängigkeit von Rohstoffen und Energieimporten gestiegen und andererseits bekam der Klimaschutz eine immer weiter zunehmende Bedeutung. Die resultierenden Entwicklungen bei der zukünftigen Energieversorgung werden in Deutschland derzeit als Energiewende bezeichnet, in deren Mittelpunkt sehr oft der Ersatz der fossilen Energieträger Braun- und Steinkohle durch regenerative Stromerzeugungstechniken gestellt wird. Dieser Ansatz ist allerdings nicht ausreichend, denn zusätzlich sind u.a. aufgrund der Volatilität der regenerativen Stromerzeugung eine Absicherung der Stromerzeugung und eine Anpassung der Stromnetze erforderlich.

Die Energie- und Rohstoffversorgung sowie der Klimaschutz betreffen viele Sektoren des öffentlichen Lebens und somit auch den Bereich der Abfallwirtschaft. Als abfallwirtschaftliches Entsorgungsverfahren ist die Abfallverbrennung im Zusammenhang mit energiebezogenen Themen Gegenstand zahlreicher Tagungsbeiträge, Publikationen und Studien. Insbesondere der Wirkungsgrad von Abfallverbrennungsanlagen und dessen Bestimmung nimmt einen breiten Raum ein.

Aus der Vielschichtigkeit der geführten Diskussionen entsteht der Eindruck, dass die Abfallverbrennung eine große Bedeutung für den Klimaschutz und die Energiewende hat. Allerdings enthalten die entsprechenden Veröffentlichungen in der Regel keine Informationen zu den Anteilen, die durch die Abfallverbrennungsanlagen zur Strom- oder Wärmeversorgung¹ erbracht werden können.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde der tatsächliche Beitrag der Abfallverbrennung zur Energieversorgung in Deutschland bestimmt. Außerdem wurden mögliche Auswirkungen von Maßnahmen zur Effizienzverbesserung untersucht.

Ein umfassendes Verständnis der Fragestellung und Interpretation der Ergebnisse erforderte zunächst eine Beschreibung der großtechnischen Abfallverbrennungsanlagen.

Abfallverbrennung

In Deutschland stehen heute für die thermische Behandlung von Hausmüll und ähnlichen Abfällen Anlagen zur Verfügung, die mit einer Rostfeuerung ausgerüstet sind. Diese Verbrennungstechnologie, die überwiegend auch in Ersatzbrennstoff-Kraftwerken zum Einsatz kommt, wurde in dieser Arbeit am Beispiel der Anlage in Mainz erläutert. In Deutschland werden 68 Abfallverbrennungsanlagen und ca. 35 Ersatzbrennstoff-Kraftwerke betrieben. Ergänzend ist zu erwähnen, dass mit einer Rostfeuerung ausgestattete Abfallverbrennungsanlagen weltweit als Entsorgungstechnologie genutzt werden.

¹ Mit dem Begriff Wärme werden in diesem Abschnitt die Dampfnutzung für Heizzwecke (Fernwärme) und die Dampfabgabe an andere Industrieanlagen zusammengefasst.

Während sich an der grundlegenden Technologie der Rostfeuerung in der Vergangenheit nichts geändert hat, so führten insbesondere in den vergangenen zwei Jahrzehnten wesentliche Fortschritte bei den elektronischen Regelungssystemen für die Verfahrenstechnik zu Verbesserungen im Betrieb und somit zu einer effizienteren Nutzung des Brennstoffs Abfall.

Außerdem sind Veränderungen im Bereich der Rauchgasreinigung zu beobachten. Die Betrachtung ausgewählter Standorte zeigte, dass es in der Vergangenheit an alten Abfallverbrennungsanlagen im Bereich der Rauchgasreinigung aufgrund verschärfter Emissionsgrenzwerte mehrere Nachrüstungen gab. Folglich wurde bis zum Ende der 90er Jahre die Rauchgasreinigungsanlage durch Ergänzung mit zusätzlichen Abscheidestufen immer umfangreicher; zeitgleich errichtete Neuanlagen erhielten ebenfalls aufwändige Rauchgasreinigungsanlagen. Das Ziel war nicht die sichere Einhaltung der geforderten Grenzwerte, sondern ein möglichst hohes Maß an Unterschreitung.

Dagegen haben sich in den letzten Jahren bei Nachrüstungen oder Neubauten von Abfallverbrennungsanlagen bzw. Ersatzbrennstoff-Kraftwerken relativ einfache Rauchgasreinigungsanlagen durchgesetzt, die neben der erforderlichen Einhaltung der Emissionsgrenzwerte einen effizienteren Betrieb ermöglichen.

Mit Blick auf die möglichen Beiträge der Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke zur Energie- und Wärmeversorgung wurden die Möglichkeiten zur Optimierung der Energieerzeugung genauer betrachtet. Die Maßnahmen sind im Prinzip allgemein bekannt und wurden in der Literatur von verschiedenen Autoren im Zusammenhang mit der Energienutzung von thermischen Abfallbehandlungsanlagen mehrfach publiziert:

- Erste Ansätze für eine Optimierung bietet der eigentliche Verbrennungsprozess. Beispielsweise können durch Einsatz einer möglichst geringen Luftmenge für die Verbrennung die Energieverluste mit dem Rauchgas reduziert werden.
- Aus thermodynamischen Gründen kommt insbesondere bei der Stromerzeugung den Betriebsparametern des Wasser-Dampf-Kreislaufs (Druck, Temperatur) zwischen Kessel und Turbine eine besondere Bedeutung zu. Korrosionsprobleme wirken hier allerdings beschränkend, so dass die Betriebsparameter von modernen Kohlekraftwerken nicht erreicht werden.
- Außerdem kann durch eine Reduzierung des Energieeigenbedarfs insbesondere im Bereich der Rauchgasreinigung die Energieeffizienz erhöht werden. Neben einem Aufbau mit möglichst wenigen verfahrenstechnischen Abscheidestufen bietet sich eine Wärmerückgewinnung aus dem Rauchgas an.
- Zusätzliche Ansätze bietet darüber hinaus der Wasser-Dampf-Kreislauf des Kessels durch Nutzung der Zwischenüberhitzung, Optimierung der Kondensattemperatur und der Speisewasservorwärmung.
- Weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz ergeben sich allgemein durch möglichst geringe thermische Verluste aller Bauteile.

Aus der genaueren Betrachtung ausgewählter Standorte lässt sich schließen, dass die aufgezeigten Möglichkeiten für eine bessere Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen ohne

Zweifel technisch ausgereift sind. Einer weitreichenden Umsetzung stehen allerdings hohe Investitionskosten entgegen, die aufgrund relativ kleiner Anlagengrößen und niedriger Energiepreise gleichzeitig mit vergleichsweise geringen Erlösen verbunden sind. Folglich stehen energetische Optimierungen an Abfallverbrennungsanlagen meistens in Verbindung mit dem verschleißbedingten Ersatz von Bauteilen, um den Anlagenbetrieb und damit die Verfügbarkeit der Anlage sicherzustellen.

Die Möglichkeiten zur Energienutzung und deren Optimierung werden maßgeblich vom Standort der Anlage bestimmt. Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke können mit elektrischer Energie und/oder Wärme verschiedene Nutzenergien zur Verfügung stellen. Aufgrund der erwähnten Limitierungen bei den Betriebsparametern des Wasser-Dampf-Kreislaufs (Druck, Temperatur) durch Korrosion bietet eine Wärmebereitstellung oder eine Kombination aus Wärme- und Stromerzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung) Vorteile. Die Auswertung der Literatur zeigte allerdings, dass in der Vergangenheit hinsichtlich der Energienutzung nicht immer ein optimaler Anlagenstandort ausgewählt wurde. Trotzdem kommt eine im Jahr 2007 durchgeführte Studie von Fehrenbach et al. ([Fehrenbach 2007b] S. 99)² zu dem Ergebnis, dass einige deutsche Abfallverbrennungsanlagen hinsichtlich der Energienutzung bereits als optimal beurteilt werden können.

Die standortabhängigen Varianten der Energienutzung haben zusammen mit unterschiedlichen Anlagengrößen, den Entwicklungen im Bereich der Rauchgasreinigung und herstellerabhängigen Konstruktionsdetails dazu geführt, dass es sich bei allen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken in Deutschland um Unikate handelt. Daraus folgt, dass für exakte Bewertungen von Abfallverbrennungsanlagen im Rahmen von abfallwirtschaftlichen Maßnahmen, beispielsweise durch eine Ökobilanz, stets der Aufbau und die standortspezifische Energienutzung der ausgewählten Anlage zu berücksichtigen sind.

Rechtliche Grundlagen

Neben der Anlagentechnik sind rechtliche Vorschriften von Bedeutung, durch die der Umgang mit Abfällen und der Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen reguliert werden.

Die Durchsicht der Rechtsvorschriften zeigte, dass für abfallwirtschaftliche Maßnahmen und den Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen eine relativ große Anzahl an europäischen Richtlinien existiert, deren Anforderungen durch zahlreiche deutsche Rechtsvorschriften umgesetzt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden nur die wichtigsten Inhalte von ausgewählten Vorschriften vorgestellt.

Entsprechend den Ausführungen in Kapitel 4 wird in Deutschland der Betrieb von Abfallverbrennungsanlagen maßgebend durch zwei Rechtsbereiche reguliert. Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) mit den dazugehörigen Verordnungen bezieht sich auf den technischen Betrieb der Abfallverbrennungsanlagen, indem u.a. Vorschriften für die technische Ausstattung und die zu erreichenden Emissionsgrenzwerte gemacht werden. Im Kreislauf-

² In der Kurzfassung von [Fehrenbach 2007b] findet man diese Aussage auf S. IV

wirtschaftsgesetz (KrWG) stehen Vorschriften für den Umgang mit Abfällen und deren Entsorgung im Mittelpunkt.

Mit dem KrWG wurde u.a. die bisherige dreistufige Abfallhierarchie durch die auf europäischer Ebene vorgegebene fünfstufige Hierarchie ersetzt. Als Hierarchiestufen werden Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung (energetische Verw.) und Beseitigung unterschieden.

Außerdem wurde mit dem KrWG ein für Europa einheitliches Kriterium für die Unterscheidung zwischen der thermischen Beseitigung und der thermischen Verwertung eingeführt. Eine Anerkennung als R1-Verwertungsverfahren, bezeichnet als "Hauptverwendung als Brennstoff oder als anderes Mittel der Energieerzeugung", ist für Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke nur möglich, wenn vorgegebene Werte für die Energieeffizienz (R1-Kriterium) erreicht werden.

Die Definition des R1-Kriteriums ähnelt auf den ersten Blick einem Wirkungsgrad. Genauere Betrachtungen in der Literatur legen offen, dass es sich lediglich um eine Kennzahl zur Beschreibung der Energieeffizienz handelt. Wichtig ist, dass Wirkungsgrade und das R1-Kriterium keine quantitativen Aussagen zu Energiemengen enthalten.

Die Durchsicht der Literatur zeigte zusätzlich, dass in Ergänzung zu aktuellen Veröffentlichungen mit Bezug zur Abfallrahmenrichtlinie, R1-Kriterium und KrWG bereits in den vergangenen Jahrzehnten energetische Fragestellungen im Kontext mit der Abfallverbrennung behandelt wurden. Insbesondere die komplizierte Abgrenzung von Abfallverwertungs- und Abfallbeseitigungsmaßnahmen mit Hilfe von Abfallheizwerten und anderen Kriterien in älteren Abfallgesetzen³ führte immer wieder zu Diskussionen.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Einstufung einer Abfallverbrennungsanlage als Verwertungsanlage nicht nur die rechtlich und somit auch politisch geforderte Abfallhierarchie besser einhält. Ergänzend entstehen Vorteile für den Betreiber der Anlage, denn Abfälle zur Verwertung können im Gegensatz zu Abfällen zur Beseitigung frei gehandelt werden, so dass sich verbesserte Möglichkeiten bei der Akquirierung von Abfallmengen ergeben.

Als Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist somit ergänzend festzustellen, dass die Diskussion um den Anlagenwirkungsgrad und die Kennzahlen eher einen Hintergrund haben, der auf abfallwirtschaftlichen und damit politischen Entscheidungen beruht. Der Bereich der Energieversorgung, d.h. der Beitrag der Abfallverbrennungsanlagen zur Energieversorgung, wurde in der Vergangenheit fast nicht betrachtet.

³ Dazu gehören das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) von 1994 und das Abfallgesetz (AbfG) von 1986.

Primärenergie

Für eine Untersuchung der Beiträge aus Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken bietet sich zunächst die Betrachtung der eingesetzten Primärenergien an. Als Primärenergien oder Primärenergieträger werden natürlich vorkommende Energieformen bezeichnet, die noch keine Veränderung erfahren haben. In Abfällen ist die Primärenergie wie bei Kohle oder anderen fossilen Brennstoffen als chemische Energie gespeichert, die im Verbrennungsprozess freigesetzt wird.

Für eine korrekte Berechnung des Anteils der verbrannten Siedlungsabfallmengen am gesamten Primärenergiebedarf Deutschlands wären für jeden Standort in Deutschland exakte Kenntnisse über die eingesetzten Abfallmengen und die entsprechenden Heizwerte erforderlich. Allerdings existiert in der Literatur keine zuverlässige Statistik über die Anzahl der Standorte und die jeweils eingesetzten Abfallmengen. Außerdem gibt es entsprechend den Ausführungen im vorangegangenen Text sowohl bei den eingesetzten Abfallmengen als auch bei den Heizwerten immer wieder Veränderungen. Vor diesem Hintergrund wurden in der vorliegenden Arbeit für die Berechnung der Primärenergien, die bei der Abfallverbrennung in Deutschland genutzt werden, fünf einfache Szenarien festgelegt.

Es wird davon ausgegangen, dass in Abfallverbrennungsanlagen insgesamt 20 Mio. t bzw. 22 Mio. t Restmüll und in Ersatzbrennstoff-Kraftwerken 5 bzw. 5,5 Mio. t verbrannt werden. Im Sinn einer Berücksichtigung von Heizwertschwankungen und verbesserten Recyclingtechnologien wurden für den Restmüll, drei verschiedene Heizwerte (8 MJ/kg, 10 MJ/kg, 12 MJ/kg) berücksichtigt. Im Fall der Ersatzbrennstoffe wurde ein Heizwert von 16 MJ/kg angenommen.

Im Vergleich mit dem gesamtdeutschen Primärenergiebedarf ist der Einsatz in Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken gering; für die ausgewählten fünf Szenarien bewegt sich der Anteil zwischen 1,8 und 2,4 %. Die denkbaren Veränderungen bei den Heizwerten und Abfallmengen beispielsweise durch bessere Recyclingtechnologien wirken sich kaum aus.

Wärme

Die eingesetzten Primärenergien können in Wärmeenergie⁴ als Sekundärenergie umgewandelt werden, die beispielsweise für Heizzwecke in Fernwärmnetzen oder Industrieanlagen genutzt werden kann. Eine exakte Bestimmung der Wärmemengen, die durch Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke in Deutschland zur Verfügung gestellt wird, war allerdings aufgrund einer unzureichenden Datenlage bei vielen Standorten nicht durchführbar. Außerdem kommt bei den betrachteten Anlagen im Bereich der Verfahrenstechnik und Energiebereitstellung häufig zu Veränderungen.

⁴ Mit dem Begriff Wärme werden in diesem Abschnitt die Dampfnutzung für Heizzwecke (Fernwärme) und die Dampfabgabe an andere Industrieanlagen zusammengefasst.

Als Alternative wurde das maximal mögliche Brutto-Wärmepotenzial bestimmt. Für die entsprechenden Berechnungen wird zunächst davon ausgegangen, dass kein Strom erzeugt wird und der erzeugte Dampf vollständig an andere Verbraucher (Fernwärmenetze, Industrieanlagen) abgegeben wird. Der Eigenverbrauch der Anlagen, beispielsweise für eine Wiederaufheizung der Rauchgase für bestimmte Rauchgasreinigungsaggregate, wird nicht erfasst.

Maßgeblich für die erzeugte Wärmeabgabe und damit für das maximale Brutto-Wärmepotential ist der Kesselwirkungsgrad. Mit Hilfe dieser Größe wird der Primärenergieanteil beschrieben, der in den Wasser-Dampf-Kreislauf des Kessels überführt wird und damit für eine Wärmeabgabe zur Verfügung steht. Verluste entstehen durch das aus dem Kessel austretende Rauchgas und Abstrahlung.

Für den Kesselwirkungsgrad wurde neben dem Mittelwert aus dem BVT-Merkblatt "Waste Incineration", der mit 81,2 % angegeben wird, ein weiterer Wert von 92 % berücksichtigt. Dieser höhere Wert dient der Berücksichtigung einer Rauchgaskondensation, die eine Reduzierung der rauchgasbedingten Energieverluste ermöglicht.

Ausgehend von 20 Mio. Tonnen Restabfall (Heizwert 10 MJ/kg) und 5 Mio. Tonnen Ersatzbrennstoff (Heizwert 16 MJ/kg) ergibt sich ein Bruttowärmepotenzial von 227,4 PJ bzw. 257,6 PJ. Ein Vergleich mit dem gesamten Wärmebedarf in Deutschland (4737,6 PJ) zeigt, dass das Bruttowärmepotenzial der Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerke 4,8 % bzw. 5,4 % des Gesamtbedarfs beträgt.

Strom

Als weiteren Weg für die Nutzung von Primärenergie, freigesetzt in Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken durch Verbrennung, wurde die Erzeugung von elektrischem Strom betrachtet. Für diese Umwandlung wird der im Kessel erzeugte Dampf einer Turbine zugeleitet, die einen Generator antreibt. Abweichend zu der Wärmebereitstellung ist der Dampfprozess mit relativ großen Verlusten verbunden, die auf der Dampfkondensation hinter der Turbine beruhen.

Für eine genaue Berechnung der Strommengen, die durch die Abfallverbrennung bereitgestellt werden, müssten exakte Daten von allen Anlagenstandorten vorliegen. Die zur Verfügung stehenden Informationen reichen dafür wie bei der Wärmebereitstellung allerdings nicht aus.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit das mögliche Nettopotenzial für den Beitrag der Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken zur Stromversorgung in Deutschland bestimmt. Zunächst wird davon ausgegangen, dass die eingesetzte Primärenergie nur in elektrischen Strom umgewandelt wird. Das Nettopotenzial errechnet sich dann aus der eingesetzten Primärenergie und dem elektrischen Nettowirkungsgrad. Dabei beschreibt der elektrische Nettowirkungsgrad den Anteil der zugeführten Primärenergie, der in elektrischen Strom umgewandelt und in das Stromnetz abgegeben wird. Der Nettowirkungsgrad erfasst somit den Eigenverbrauch der Anlage.

Für die Beiträge zur Stromerzeugung wurde von 20 Mio. t Restmüll (Heizwert 10 MJ/kg) und 5 Mio. t Ersatzbrennstoff (Heizwert 16 MJ/kg) ausgegangen; für den elektrischen Nettowirkungsgrad wurde die Literatur ausgewertet. Es wurden vier Werte zwischen 15 und 30 % angenommen, um die Auswirkungen von technischen Verbesserungen an den Anlagen berücksichtigen zu können. Ein elektrischer Nettowirkungsgrad von 15 % repräsentiert ältere Anlagen mit umfangreicher Rauchgasreinigung, neuere Anlagen erreichen dagegen einen Wirkungsgrad von 20 bis 25 %. Das Optimum für den elektrischen Nettowirkungsgrad von thermischen Abfallbehandlungsanlagen liegt heute bei 30 %, verbunden allerdings mit einem hohen technischen Aufwand und hohen Investitionskosten.

Auf Basis dieser Nettowirkungsgrade könnten von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken zwischen 42 PJ und 84 PJ an elektrischer Energie erzeugt werden. Dagegen wird die Bruttostromerzeugung in Deutschland für das Jahr 2016 mit 2333,5 PJ angegeben. Der Anteil des möglichen Nettopotenzials aus der Abfallverbrennung bewegt sich zwischen 1,8 und 3,6 %.

Abschließende Aussagen

Somit ist festzustellen, dass in Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken nur sehr geringe Anteile des gesamten Primärenergiebedarfs eingesetzt werden. Folglich sind die Beiträge zur Strom- und Wärmebereitstellung ebenfalls sehr gering. Es sei noch einmal darauf hinzuweisen, dass in der vorliegenden Arbeit für die Bereitstellung von Wärme Bruttopotenziale und im Fall der elektrischen Energie um Nettopotenziale handelt, die jeweils Maximalwerte darstellen. Ergänzend zeigten aus der Literatur übernommene Daten außerdem, dass nur relativ geringe Mengen an klimaschädlichen CO₂-Emissionen entstehen.

Der Bilanzraum bezog sich nur auf die Verbrennungsanlagen. Allerdings ist das deutsche Energiesystem im Zusammenhang mit der Energiewende sehr großen Veränderungen unterworfen. Insbesondere Kraftwerke werden zukünftig vermutlich nicht mehr nach der erzeugten Strommenge, sondern für eine flexible Leistungsbereitstellung bezahlt. Die mögliche Rolle der Abfallverbrennungsanlagen in diesem Zusammenhang war nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit darf allerdings nicht der Schluss gezogen werden, dass die Abfallwirtschaft durch Abfallentsorgung und die gleichzeitige Bereitstellung von ressourcenschonenden Ersatzroh- und Brennstoffen ihre Aufgaben erfüllt und zur Energiewende keine weiteren Beiträge leisten muss.

Dies wären die falschen Signale, denn die Energiewende ist eine Aufgabe von Politik und Gesellschaft, zu der die Abfallwirtschaft als Teil der öffentlichen Daseinsvorsorge Beiträge zu leisten hat.

In diesem Zusammenhang darf nicht übersehen werden, dass durch die auch zukünftig zunehmende Nutzung der Wind- und Solarenergie der Anteil der CO₂-Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen an den Gesamtemissionen steigen wird.

Auf der anderen Seite entsteht aufgrund der Intensität der geführten Diskussionen im Zusammenhang mit der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen der Eindruck, dass die Sachverhalte überbewertet werden.

Beispielweise wurde in der Vergangenheit ein Investitionsprogramm für Abfallverbrennungsanlagen gefordert, um das energetische Optimierungspotential umzusetzen [RE 2006 8]. Nach Angaben in [UBA 2008a] sind für Wirkungsgradsteigerungen um 5 Prozentpunkte bei der Stromerzeugung Investitionen im Bereich zwischen 10 bis 20 Millionen Euro pro Anlage erforderlich. Da es sich bei einem Investitionsprogramm um Steuergelder handelt, kommen die Bürgerinnen und Bürger für diese Beträge auf.

Andererseits wären die Auswirkungen auf die Beiträge zur Energiewende gering. Würde man davon ausgehen, dass die deutschen Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerk nur Strom mit einem elektrischen Netto-Wirkungsgrad von 25 % erzeugen, so würden durch eine Wirkungsgradverbesserung auf 30 % lediglich 0,6 % des deutschen Strombedarfs mehr an Strom bereitgestellt.

Es ist zu beachten, dass Wirkungsgrade allgemein und im Zusammenhang mit der Abfallverbrennung auch das R1-Kriterium keine Informationen dahingehend enthalten, wie groß die erzeugten und zur Verfügung gestellten Energiemengen letztlich sind. Das R1-Kriterium ist als rechtliche Kennzahl für die Abgrenzung zwischen Verwertung und Beseitigung aufzufassen.

Vor diesem Hintergrund gilt es vielmehr, die bisher eingeschlagenen Wege fortzuführen und die fünfstufige Abfallhierarchie mit Blick auf alle Effekte umzusetzen. Für die Auswahl eines Abfallentsorgungsverfahrens fordert das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) zunächst, den gesamten Lebenszyklus des Abfalls zu berücksichtigen. Weitere Kriterien stellen energetische Aspekte, die technischen Möglichkeiten, die wirtschaftliche Zumutbarkeit und soziale Folgen dar.

Dem entsprechend kann beispielsweise eine thermische Abfallbeseitigung in einer nahegelegenen Abfallverbrennungsanlage, die das R1-Kriterium nicht einhält, sinnvoller sein als eine thermische Verwertung in einem weit entfernten Ersatzbrennstoff-Kraftwerk, wo das R1-Kriterium erreicht wird.

Außerdem könnte man für abfallwirtschaftliche Entscheidungen bezüglich der Einhaltung der fünfstufigen Abfallhierarchie ausgewählte Kriterien zur Bestimmung des Standes der Technik aus dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) heranziehen. Dazu gehören beispielsweise die Zeitpunkte der Inbetriebnahme einer neuen oder bestehenden Anlage oder die für die Einführung einer besseren Technik erforderliche Zeit.

Es bleibt abzuwarten, ob und inwiefern in der Neufassung des europäischen BREF-Dokuments "Waste Incineration" die Energieeffizienz von thermischen Abfallbehandlungsanlagen berücksichtigt wird und wie diese Anforderungen bei zukünftigen Neubauten von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken sowie bei abfallwirtschaftlichen Entscheidungen berücksichtigt werden.

Anhang

Die folgende Tabelle, entnommen aus [AGEB 2017b], enthält die Daten für die Abbildung 5.9 auf S. 78 (1 PJ entspricht 10^{15} J).

Tabelle 1



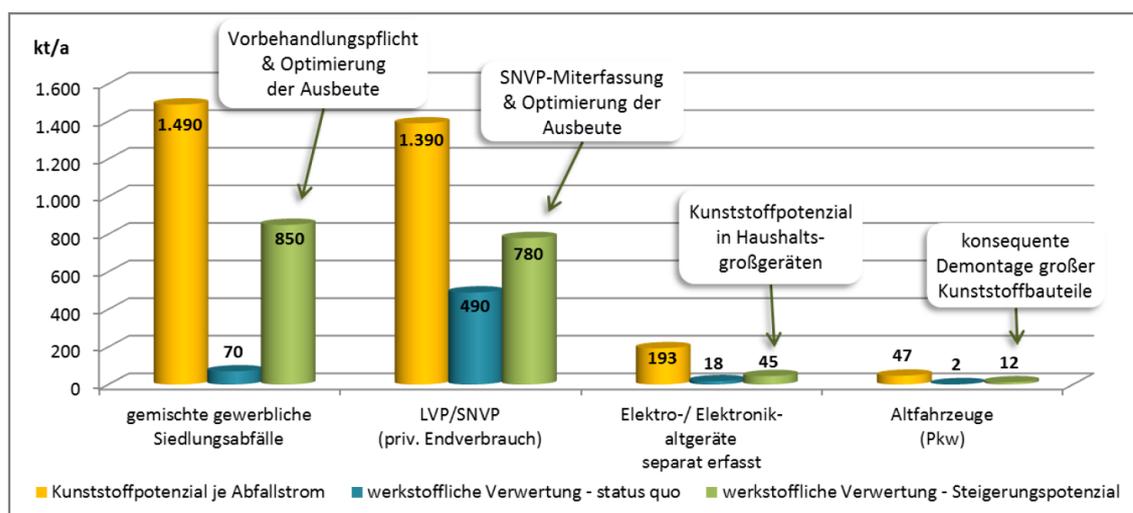
Primärenergieverbrauch in Deutschland 2015 und 2016 ¹⁾

Energieträger	2015	2016	2015	2016	Veränderungen 2016 geg. 2015			Anteile in %	
	Petajoule (PJ)	Petajoule (PJ)	Mio. t SKE	Mio. t SKE	PJ	Mio. t SKE	%	2015	2016
Mineralöl	4.489	4.550	153,2	155,3	61	2,2	1,5	33,9	34,0
Erdgas	2.761	3.022	94,2	103,1	261	8,9	9,5	20,9	22,6
Steinkohle	1.718	1.630	58,6	55,6	-88	-3,0	-5,1	13,0	12,2
Braunkohle	1.567	1.522	53,5	51,9	-45	-1,6	-2,8	11,8	11,4
Kernenergie	1.001	923	34,2	31,5	-78	-2,7	-7,8	7,6	6,9
Erneuerbare Energien	1.644	1.689	56,1	57,6	46	1,5	2,8	12,4	12,6
Stromaustauschsaldo	-187	-193	-6,4	-6,6	-6	-0,2	-	-1,4	-1,4
Sonstige	241	240	8,2	8,2	-1	0,0	-0,5	1,8	1,8
Insgesamt	13.234	13.383	451,5	456,7	149	5,2	1,1	100,0	100,0

1) Alle Angaben sind vorläufig, Abweichungen in den Summen durch Rundungen

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.

Die nachfolgende Abbildung wurde aus [Wilts 2016] entnommen und dokumentiert die möglichen Potenziale für eine verstärkte Nutzung von Sekundärkunststoffen.



Literatur

A

- [17. BImSchV] Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen. (Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – 17. BImSchV). 2. Mai 2013.
- [AbfAbIV] Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung - AbfAbIV). 20. Februar 2001.
- [Adamczyk 2003] Adamczyk, R.; Schmitt, K.: "Wirkungsgraderhöhung und Reduzierung des CO₂-Ausstoßes durch Wärmeverschiebesysteme in Kohlekraftwerken". In: VDI (Hrsg.): "Retrofit und Lebensdauerverlängerung energietechnischer Anlagen". VDI Berichte 1769. S. 189-199. VDI-Verlag Düsseldorf 2003.
- [AGEB 2016] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): "Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2015". Studie beauftragt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Projekt-nummer: 072/15. Stand Februar 2017.
- [AGEB 2017a] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): "Energieverbrauch 2016". Pressedienst. Nr. 1. 2017.
- [AGEB 2017b] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): "Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2016". Stand Februar 2017.
- [AGEB 2017c] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB): "Bruttostromverbrauch in Deutschland ab 1990 nach Energieträgern". Stand 11. August 2017.
- [Albert 1991] Albert, F.W.: "Neuere Betriebserfahrungen aus der Müllverbrennungsanlage Mannheim". VGB Kraftwerkstechnik 71 (1991) Heft 8, S. 776-784.
- [Albert 1994] Albert, F.; Schirmer, U.: "Betrieb von Hausmüllverbrennungsanlagen mit Restmüll". VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994) Heft 5. S.442-445.
- [Albert 1997] Albert, F.W.: "Die Niederungen des Alltags: Über den erfolgreichen betrieb einer Müllverbrennungsanlage". VGB Kraftwerkstechnik 77 (1997) Heft 1, S. 39-47.
- [Albert 2004] Albert, F.W.: "Betriebserfahrungen führt zu einfachen Lösungen". VGB Power-Tech 84 (2004) Heft 12, S. 56-64.
- [Alex 2015] Alex, B.: "Kanadas Kommunen setzen auf Wast-to-Energy". Umweltmagazin 45 (2015) Heft 3, S. 64-66.
- [AltholzV] Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung – AltholzV). 15. August 2002, letzte Änderung 12. Dezember 2016.

- [Alwast 2014] Alwast, H.: "Abfallwirtschaft im Gleichgewicht? Entwicklung von Restabfallmengen und die künftig notwendigen Behandlungskapazitäten in Deutschland". Vortrag am 8. Mai 2014 im Rahmen der IFAT, München 2014. Abgerufen am 22.03.2016.
http://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/140508_HAL_IFAT-Vortrag.pdf
- [Appel 2002] Appel, J.; Ott, S.; Schierholz, W.F.: "Einsatz von CFD-Simulationen zur Unterstützung der Auslegung und zur Optimierung von Müllverbrennungsanlagen". Chem.-Ing.-Tech. 74 (2002) Heft 9. S. 1248-1253.
- [ASA 2016] Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung (ASA): "Strategie 2030, Ressourcen- und Klimaschutz durch eine stoffspezifische Abfallbehandlung". Stand April 2016. Download von der Homepage, Zugriff 15.02.2017.
- [Auel 2009] Auel, W.; Bruns, W. Oellers, F.: "Betriebserfahrungen mit der Feuerleistungsregelung an Kesselanlagen mit Vorschubrostfeuerungen". VGB PowerTech 89 (2009) Heft 4. S. 33-36.
- [AVG 1995] Abfallentsorgungs- und Verwertungsgesellschaft Köln mbH (AVG): "Die Restmüllverbrennungsanlage Köln". Firmenschrift der AVG, Köln August 1995.

B

- [Baars 2007] Baars, B. A.; Nottrodt, A.: "Naturwissenschaftlich-technische und juristische Rationalität - ein Widerspruch?". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 2. S. 133-142. TK Verlag, Neuruppin 2007.
- [Baer 2010] Baer, M.; Holste, R.: "Energetisch optimierte MVA-Abgasreinigung". Umweltmagazin 40 (2010) Heft 12. S. 14-16.
- [Barin 1996] Barin, I.; Igelbüscher, A.; Zenz, F.-R.: "Thermodynamische Modelle zur Analyse der Verfahren für die thermische Entsorgung von Müll". Chem.-Ing.-Tech. 58 (1996) Heft 12. S. 1562-1571.
- [Barth 2004] Barth, E.: "Optimierung in der Abfallverbrennung - Beispiel Abfallheizkraftwerk Augsburg -". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 1. S. 257-276. TK Verlag, Neuruppin 2004.
- [Baumgärtel 1993] Baumgärtel, G.; May, K.-W.: "Das Siemens Schwel-Brenn-Verfahren". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Reaktoren zur thermischen Abfallbehandlung". S. 189-200. EF Verlag, Berlin 1993.
- [Beckmann 1994] Beckmann, M.; Scholz, R.: "Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen". BWK 46 (1994) Heft 5. S. 218-229.
- [Beckmann 2005] Beckmann, M.; Horeni, M.; Metschke, J.; Krüger, J.; Papa, G.; Englmaier, L.; Busch, M.: "Optimierung von Müllheizkraftwerken durch Einsatz eines Online-Bilanzierungsprogramms". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 219-239. TK Verlag, Neuruppin 2005.

- [Beckmann 2007a] Beckmann, M.; Kleppmann, F.; Martin, J.J.E.; Scholz, R.; Seifert, H.: "Classification of Waste-to-energy Plants in Terms of Energy recovery". VGB Power-Tech 87 (2007) Heft 10. S. 76-81.
- [Beckmann 2007b] Beckmann, M.; Scholz, R.: "Ermittlung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 2. S. 145-164. TK Verlag, Neuruppin, 2007.
- [Beckmann 2009] Beckmann, M.; Gampe, U.; Grahl, S.; Hellfritsch, S.: "Zielkonflikt Emissionen und Energieeffizienz am Beispiel der 37. BImSchV". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 6. S. 3-32. TK Verlag, Neuruppin, 2009.
- [Beckmann 2012] Beckmann, M.: "Erste Erfahrungen mit dem Kreislaufwirtschaftsgesetz". In: Thomé-Kozmiensky, K.J. et al.: "Immissionsschutz". Band 3. S. 19-31. TK Verlag, Neuruppin 2012.
- [Bender 1990] Bender, B.; Sparwasser, R.: "Umweltrecht". C.F. Müller Juristischer Verlag, 2. Auflage, Heidelberg 1990.
- [Bendix 2005] Bendix, D.; Faulstich, M.; Metschke, J.: "Korrosion in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung". Müll und Abfall 37 (2005) Heft 3. S. 137-142.
- [Benz 2009] Benz, M. P.: "Steigerung der energetischen Effizienz bei Müllverbrennungsanlagen". Von Roll Inova, interner Bericht, 2009. Zitiert nach [Keunecke 2016].
- [Berwein 1990] Berwein, H.-J.; Kanczarek, A.: "Müllentsorgung mit einer Schwel-Brenn-Anlage". Brennstoff Wärme Kraft 42 (1990) Heft 10, S. r26-r36.
- [Billotet 2012] Billotet, T.; Böffel, A.; Hümbert, A.: "Einbringen langjähriger Betriebserfahrung in die Konzeption eines neuen 25 MW el-Biomassekraftwerks". VGB Power-Tech 92 (2012) Heft 4. S. 60-63.
- [BImSchG] BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. 17. Mai 2013.
- [BImSchG 74] BImSchG - Bundes-Immissionsschutzgesetz. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. 15. März 1974.
- [BKB G 2005] BKB Göppingen: "BKB Göppingen Neue Energie aus Abfall". Firmenschrift des Unternehmens BKB Göppingen, ein Unternehmen von E.ON. Stand März 2005.
- [BKB H 2005] BKB Hannover: "BKB Hannover Neue Energie aus Abfall". Firmenschrift des Unternehmens BKB Hannover, ein Unternehmen von E.ON. Stand März 2005.
- [Blume 1988] Blume, H.; Brune, D.: "Entsorgungstechnologien". Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Band 25. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1988.

- [BMUB L 2016] Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Download von der Homepage. <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallbehandlung-abfalltechnik/muellverbrennung/>. Zugriff: 09.03.2016.
- [BMUB 2017] Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): "Leitfaden zur Anwendung der Abfallhierarchie nach § 6 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) - Hierarchiestufen Recycling und sonstige Verwertung". Stand 25.09.2017. Download von der Homepage. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/krwg_leitfaden_abfallhierarchie_bf.pdf. Letzter Zugriff: 17.10.2017.
- [BMWi 2006] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit sowie Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: "Energieversorgung für Deutschland". Statusbericht für den Energiegipfel am 3. April 2006". Berlin, März 2006.
- [BMWi 2008] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: "Energie in Deutschland – Trends und Hintergründe zur Energieversorgung in Deutschland". Berlin, Mai 2008.
- [BMWi 2014] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): "Smart Energy made in Germany - Erkenntnisse zum Aufbau und zur Nutzung intelligenter Energiesysteme im Rahmen der Energiewende". Berlin, Mai 2014.
- [BNetzA 2017] Bundesnetzagentur: "Kraftwerksliste Bundesnetzagentur (bundesweit; alle Netz- und Umspannebenen)". Excel-Datei. Stand 31.03.2017
- [Bogner 2008] Bogner, J. et al.: "Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)". Waste Management & Research 26 (2008) S. 11-32.
- [Born 1996] Born, M.; Seifert, P.: "Chlorkorrosion an Dampferzeugern". VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996) Heft 10. S. 832-828.
- [Both 2005] Both, G.; Fehrenbach, H.: "Stoff- und Energiebilanzen von Abfallverbrennungsanlagen in Nordrhein-Westfalen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 256-270. TK Verlag, Neuruppin 2005.
- [Bothe 2003] Bothe, D.: "Und sie verwerten doch!" Müll und Abfall 35 (2003) Heft 8. S. 396-405.
- [Brosch 2014] Brosch, B.; Scherer, V.; Wirtz, S.: "Simulation of municipal solid waste incineration in grate firing systems with a particle based novel Diskrete Element Method". VGB PowerTech 94 (2014) Heft 1/2. S. 75-83.

- [Brüggemann 2015] Brüggemann, H.; Gollnik, R.; Kübel, M.; Eckert, M.: "Feuerungskonzept im Steinkohlekraftwerk RDK 8 – Konzept und erste Betriebserfahrungen". VGB PowerTech 95 (2015) Heft 3. S. 81-84.
- [Brunner 1996] Brunner, M.; Rosenast, B.: "Eisen im Feuer". Müllmagazin 9 (1996) Heft 3, S.67-69.
- [Bucht 2003] Buch, T.: "Nur im Ausnahmefall". Müllmagazin 16 (2003) Heft 2. S. 36-39.
- [Büchner 2010] Büchner, H.-P.; Goedecke, H.: "Modernes MVA Anlagendesign aus der Sicht eines Betreibers". Müll und Abfall 42 (2010) Heft 5. S. 213-220.
- [Buekens 2011] Buekens, A. et al.: "Die thermische Abfallbehandlung in China". Müll und Abfall 43 (2011) Heft 8. S. 366-373.
- [Busch 1993] Busch, M.; Rampp, F.; Martin, J.; Horn, J.: "Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur Verbesserung der Verbrennungs-, Ausbrand- und Emissionsverhaltens einer Abfallverbrennungsanlage". VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993) Heft 7. S. 614-618.
- [BVT T] European IPPC Bureau: Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques for the Waste Treatments Industries. August 2006.
- [BVT WI] European Commission: Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration. August 2006.

C

- [Ciroth 2002a] Ciroth, A.; Hagelüken, M.; Sonnemann, G.W.; Castells, F.; Fleischer, G.: "Geographical and Technological Differences in Life Cycle Inventories. Part I". Int. J LCA 7 (2002) Heft 5. S. 295-200.
- [Ciroth 2002b] Ciroth, A.; Hagelüken, M.; Sonnemann, G.W.; Castells, F.; Fleischer, G.: "Geographical and Technological Differences in Life Cycle Inventories. Part II". Int. J LCA 7 (2002) Heft 6. S. 363-368.
- [Consultic 2016] Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH: "Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 - Kurzfassung -" Stand 23. Sep. 2016. Herausgabe der Studie durch verschiedene Verbände. Die Daten findet man auch auf der Homepage des UBA (Themenbereich "Kunststoffabfälle").
- [CUTECH 2016] Clausthaler Umwelttechnik Institut GmbH (CUTECH): "Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz". Studie für den Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V., Clausthal-Zellerfeld 2016.

D

- [Damgaard 2010] Damgaard, A.; Riber, C.; Fruergaard, T.; Hulgaard, T.; Christensen, T.H.: "Life-cycle-assessment of historical development of air pollution control and energy recovery in waste incineration". Waste Management 30 (2010) S. 1244-1250.
- [Danz 2008] Danz, P.; Mrotzek, A.; Marzi, T. "Beprobung großer Siedlungsabfallmengen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zur Bestimmung der Feuchte und des Heizwerts". Müll und Abfall 40 (2008) Heft 2, S. 87-94.
- [Deggim 1987] Deggim, D.; Poller, J.; Weinzierl, K.: "Die Bedeutung der Chemietechnik für fortgeschrittene Technologien zur Stromerzeugung". Chem.-Ing.-Tech. 59 (1987) Heft 8. S. 629-636.
- [Dehoust 2005] Dehoust, G. et al.: "Statusbericht zum Beitrag der Abfallwirtschaft zum Klimaschutz und mögliche Potentiale". Im Auftrag von UBA. Forschungsbericht 205 33 314. August 2005.
- [Dehoust 2010a] Dehoust, G.; Vogt, R.; Schüler, D.; Giegrich, J.: "Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft. Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz". Im Auftrag von UBA, BMU und BDE. FKZ 3708 31 302. Darmstadt/Heidelberg/Berlin, Januar 2010.
- [Dehoust 2010b] Dehoust, G.; Schaubruch, W.; Wöbbing, K.H.; Wollny, V.: "Klimaschutz in der Abfallwirtschaft". Müll und Abfall 42 (2010) Heft 12. S. 586-591.
- [Dehoust 2015a] Dehoust, G.; Möck, A.; Harthan, R.O.; Hermann, H.: "Fit für die Energiewende? Anforderungen an und Chancen für die Kreislaufwirtschaft (Teil 1)". Müll und Abfall 46 (2014) Heft 5, S. 240-246.
- [Dehoust 2015b] Dehoust, G.; Möck, A.; Harthan, R.O.; Hermann, H.: "Fit für die Energiewende? Anforderungen an und Chancen für die Kreislaufwirtschaft (Teil 2)". Müll und Abfall 46 (2014) Heft 6, S. 296-302.
- [DepV] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV). 29. April 2009.
- [Destatis 2014] Statistischen Bundesamt: "Umwelt Abfallentsorgung". Fachserie 19. Reihe 1. Erschienen am 18.08.2016, korrigiert am 07.12.2016.
- [Diederer 2004] Diederer, H.; Ham, T.v.d.: "Umbau einer MVA zum Hochrenditekraftwerk am Beispiel AZN Moerdijk NL". VDI Bildungswerk. Seminar 435916. BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/Dioxin-/ Rauchgasreinigungstechniken 2004 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. München, 16.-17. September 2004.
- [Döing 2013] Döing, M.; Leonicker, J.: "Markt für thermische Abfallverwertung wächst unterschiedlich". Müll und Abfall 45 (2013) Heft 12. S. 650-654.

- [Döing 2014] Döing, M.: "Der Weltmarkt für Abfallverbrennungsanlagen". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Strategie - Planung - Umweltrecht". Band 8. S. 143-154. TK Verlag, Neuruppin 2014.
- [Döing 2015] Döing, M.: "Müllverbrennungsanlagen-Markt im Hoch". Umweltmagazin 45 (2015) Heft 12. S. 13-14.
- [Duker 2008] Dunker, R.: "CCS - Viele Wege führen zum Ziel". BWK 60 (2008) Heft 11. S. 26-28.

E

- [EC 2014] European Commission: "Report on critical raw materials for the EU". Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. Mai 2014. (Anmerkung: Ältere Ausgaben stammen aus den Jahren 2010 und 2013).
- [EEG 2000] Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG). 29. März 2000. Anmerkung: Dieses Gesetz wurde in den Jahren 2004, 2008 und 2014 überarbeitet; seit 2014 gibt es einen neuen Titel: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien.
- [Egeler 2013] Egeler, R.; Schmidt, J.; Martin, J. J. E.; Weber, T.: "Strahlungsüberhitzer im Feuerraum zur Effizienzsteigerung – Erste Erfahrungen am MHKW Rosenheim". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 10. S. 397-410. TK Verlag Neuruppin, 2013.
- [Ellersiek 2008] Ellersiek, D.-G.: "Hybrid-Regelung zur Optimierung des Betriebs von Müllverbrennungsanlagen. In: Bilibevski, B.; Urban, A.I.; Faulstich, M. (Hrsg.): Tagungsband zur "13. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung". S. 160-172. Kassel University Press GmbH, Kassel 2008.
- [EnBW 2008] EnBW Kraftwerke GmbH: "Heizkraftwerk Münster, Betriebsstelle Münster, Betriebsstelle Gaisburg". Flyer der EnBW
- [Engler 2015] Engler, M.; Klett, W.; Kummer, B.; Quicker, P.; Stengler, E.; Suchomel, H.; Wendler, O.: "Abfallhierarchie und Vollzug". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 2. S. 56-59.
- [Englmaier 2004] Englmaier, L.; Herzog, T. : "Recladding im MHKW Burgkirchen". VGB PowerTech 84 (2004) Heft 11. S. 66-73.
- [Epiney 2013] Epiney, A.: "Umweltrecht in der Europäischen Union". Nomos Verlagsgesellschaft, 3. Auflage, Baden-Baden 2013.
- [EUG 228] Europäischer Gerichtshof: Urteil in der Rechtssache C-228/00. 13. Feb. 2003.
- [EUG 458] Europäischer Gerichtshof: Urteil in der Rechtssache C-458/00. 13. Feb. 2003.

- [EU L 2011] Europäische Kommission: "Leitlinien zur Auslegung der R1- Energieeffizienzformel für Verbrennungsanlagen, deren Zweck in der Behandlung fester Siedlungsabfälle besteht, gemäß Anhang II der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle". Juni 2011. Rechtlich nicht verbindliche Interpretationshilfe zur Energieeffizienzformel.
- [EVO 2013] Energieversorgung Offenbach AG (EVO): "Für eine saubere Umwelt. Das Müllheizkraftwerk Offenbach - effizient und nachhaltig". Firmenschrift der EVO, Stand Juni 2013. Anmerkung: Das Verfahrensschema in dieser Firmenschrift ist mit dem Schema in der Ausgabe von ca. 2008 identisch.
- [EVO PM 2015] Energieversorgung Offenbach AG (EVO): "Mehr Strom aus Müll". Pressemitteilung des Unternehmens vom 20.07.2015. Abgerufen von der Homepage am 14. Juni 2016. <https://www.evo-ag.de/presse/pressemitteilungen/details/mehr-strom-aus-muell/>.
- [EVO-HP 2016] Energieversorgung Offenbach AG (EVO): "Geschichte des MHKW". Abgerufen von der Homepage am 14. Juni 2016. <https://www.evo-ag.de/technik-und-umwelt/muellheizkraftwerk/>.
- [Eyssen 2011] Eyssen, R.: "Abfallverwertung auf japanisch". Umweltmagazin 41 (201) Heft 1/2. S. 39-41.

F

- [Faulstich 2008] Faulstich et al.: "CO₂-Minderungspotenziale und Anwendung der Klimaschutzinstrumente in EFRE-Ziel-2-Gebieten (EULV 25)". Studie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. Publiziert ohne Datumsangabe, vermutlich 2008.
- [Faulstich 2009] Faulstich, M.; Eggenstein, U.; Leipprand, A.: "Relevanz der CCS-Technologie für die Abfallverbrennung". In: Bilitevski, B.; Urban, A.I.; Faulstich, M. (Hrsg.): Tagungsband zur "14. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung". S. 73-86. Kassel University Press GmbH, Kassel 2009.
- [Faulstich 2016a] Faulstich, M.; Vodegel, S.; Fedianina, E.; Franke, M.; Degener, P.; Aigner, J.; Reh, K.: "Umweltschutzgerechte Verwertung nicht etablierter Stoffströme in Abfallverbrennungsanlagen". Texte 18/2016. Umweltbundeamt, Dessau Februar 2016.
- [Faulstich 2016b] Faulstich et al.: "Stoffströme für Müll verbrennungsanlagen in 2025". Müll und Abfall 48 (2016) Heft 5. S. 220-226.
- [Fehrenbach 2007a] Fehrenbach, H.; Vogt, R.; Both, G.: "Life Cycle Assesment of Thermal Waste Treatment Systems". VGB PowerTech 87 (2007) Heft 12. S. 69-74.

- [Fehrenbach 2007b] Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Mahmood, S.: "Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz". Texte 16/2008. Umweltbundesamt, Dessau Oktober 2007.
- [FhG-ISI 2010] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung: "Energietechnologien 2050 - Schwerpunkte für Forschung und Entwicklung". Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Fraunhofer Verlag 2010.
- [Fichtel] Fichtel, K.: "Bericht über die Müllpyrolyse-Anlage Burgau". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Müllverbrennung und Umwelt 2". S. 662-678. EF-Verlag, Berlin 1987.
- [Fischer 2005] Fischer, B. "Energieeffizienz des Müllheizkraftwerkes Mainz". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 565-578. TK Verlag, Neuruppin 2005.
- [Fischer 2009] Fischer, B.; Kruhl, J.; Radgen, P.: CO₂-Abscheidung und -Speicherung im Spannungsfeld wirtschaftlicher, technischer und politischer Herausforderungen". VGB PowerTech 89 (2009) Heft 3. S. 26-32.
- [Fleck 2005] Fleck, E.: "Hoher elektrischer Wirkungsgrad und der Weg dorthin". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 637-649. TK Verlag, Neuruppin 2005.
- [Förstner 1993] Förstner, U.: "Umweltschutztechnik". Springer Verlag Berlin, 4. Auflage 1993.
- [Franck 1997] Franck, J.; Schellenberger, I.; Karpinski, A.: "100 Jahre thermische Abfallbehandlung - Abgasreinigungstechnik damals und heute, Betriebserfahrungen der MVA Stelling Moor, Hamburg". VGB Kraftwerkstechnik 77 (1997) Heft 6, S. 486-493.
- [Frenz 2013] Frenz, W.: "Energetische Verwertung nach dem neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz". Müll und Abfall 45 (2013) Heft 5. S. 228-232.
- [Füle 2016] Füle, T.: "Energieoptimierung von Abgasreinigungsanlagen am Beispiel einer Bestandsanlage". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 13. S. 347-359. TK Verlag, Neuruppin 2016.
- [Fuchs 2013] Fuchs, C.: "In der Bewertungsmatrix". Recourse 26 (2013) Heft 2. S. 17-23.

G

- [Gablinger 2005] Gablinger, H.; Hilgendorff, M.: "Under Construction - Building work underway on the new WTE plant in China". Waste Management World 6 (2005) Heft 11/12. S. 47-50.
- [GewAbfV] Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung - GewAbfV). 19. Juni 2002 (Diese Verordnung wird zurzeit überarbeitet).

- [Gharfalkar 2015] Gharfalkar, M.; Court, R.; Campbell, C.; Ali, Z.; Hillier, G.: "Analysis of waste hierarchy in the European waste directive 2008/98/EC". *Waste Management* 39 (2015) S. 305–313.
- [Gierend 1996] Gierend, C.: "Feuerungsregelung durch Fuzzy Control". *VGB Kraftwerkstechnik* 76 (1996) Heft 6. S. 487-197.
- [Gleis 2008a] Gleis, M.; Johnke, B.: "Standard für Europa". *Müllmagazin* 21 (2008) Heft 1. S. 31-37.
- [Gleis 2008b] Gleis, M.; Johnke, B.: "Beste verfügbare Technik - Vorgaben für ein hohes Niveau der Abfallverbrennung". In: Versteyl, A.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Planung und Umweltrecht". Band 1. S. 51-68. TK Verlag, Neuruppin 2008.
- [Gleis 2011a] Gleis, M. "Pyrolyse und Vergasung". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 8. S. 437-465. TK Verlag Neuruppin, 2011.
- [Gleis 2011b] Gleis, M.: "Alter Wein in neuen Schläuchen". *ReSource* 24 (2011) Heft 1. S. 43-49.
- [Gleis 2012] Gleis, M.; Wiechmann, B.: "Neue Konsequenzen". *ReSource* 25 (2012) Heft 3. S. 33-39.
- [Gleis 2015] Gleis, M.: "Auf den Punkt gebracht". *ReSource* 28 (2015) Heft 3. S. 25-29.
- [Görner 2003] Görner, K.: "Waste Incineration - European State of the Art and New Developments". *IFRF Combustion Journal*. Article Number 200303, July 2003.
- [Gohlke 2007] Gohlke, O.; Martin, J.: "Drivers for innovation in waste-to-energy technology". *Waste Management & Research* 25 (2007) . S. 214-219.
- [Gohlke 2008a] Gohlke, O.: "Verbesserungspotenziale der Energieeffizienz". In: Bilibevski, B.; Urban, A.I.; Faulstich, M. (Hrsg.): Tagungsband zur "13. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung". S. 135-150. Kassel University Press GmbH, Kassel 2008.
- [Gohlke 2008b] Gohlke, O.; Dräger, R.; Seitz, A.: "Druck im Kessel". *Müllmagazin* 21 (2008) Heft 2. S. 32-37.
- [Gohlke 2011] Gohlke, O.; Murer, M.J.: "Anwendung von Energiekennzahlen für Abfallverbrennung". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 8. S. 3-28. TK Verlag Neuruppin, 2011.
- [Gotschlich 2008] Gotschlich, K.; Schweiger, M.; Altvater, R.: "Erneuerung der Leittechnik im Kraftwerk Stuttgart-Münster". *BWK* 60 (2008) Heft 3. S. 42-45.
- [Grabke 1995] Grabke, H.J.; Reese, E.; Spiegel, M.: "The Effects of Chlorides, Hydrogen Chloride and Sulfur Dioxide in the Oxidation of Steels below Deposits". *Corrosion Science* 37 (1995) Heft 7. S. 1023-1043.

- [Grundgesetz] Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland (GG), 1. Fassung vom 23. Mai 1949, BGBl. I 1949 S1 ff, letzte Änderung vom 21.07.2010.
- [Grundmann 2016] Grundmann, T.; Ketelsen, K.: "ASA-Strategie 2030". Müll und Abfall 48 (2016) Heft 9. S. 478-484.

H

- [Hämmerli 1991] Hämmerli, H.: "Grundlagen zur Berechnung von Rostfeuerungen". in: Reimann, D.O.: "Rostfeuerungen zur Abfallverbrennung". S. 61-101. EF-Verlag Berlin 1991.
- [Heigl 1968] Heigl, F.: "Moderne Müllverbrennungsanlagen: Planung, Bau, Betrieb". Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 1. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1968.
- [Hellweg 1999] Hellweg, S.; Hungerbühler, K.: "Was bieten uns die neuen Technologien ?". Müll und Abfall 31 (1999) Heft 9. S. 524-536.
- [Hellweg 2001] Hellweg, S.; Hofstetter, T.B.; Hungerbühler, K.: "Modeling waste incineration for life-cycle inventory analysis in Switzerland". Environmental Modeling and Assessment 6 (2001) S. 219-235.
- [Hnida 1996] Hnida, U.: Fließende Wandlung - stetiger Kreislauf". ABB Firmenschrift 1996.
- [Höling 2005] Höling, M.: "Errichtung und erste Betriebserfahrungen mit der Thermischen Restanfallbehandlungs und Energieverwertungsanlage (TREA) Breisgau". VGB PowerTech 85 (2005) Heft 12. S. 38-43.
- [Huneke 2017] Huneke, F. et al.: "Beitrag thermischer Abfallbehandlungsanlagen zur Energie-wende". Studie der Energy Brainpool GmbH & Co. KG, Berlin im Auftrag der Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen Deutschland e.V. (ITAD). Berlin, Februar 2017.
- [Huttenhuis 2016] Huttenhuis, P.; Roeloffzen, A.; Versteeg, G.: "CO₂-Abscheidung und Wiederverwendung in einer Abfallverbrennungsanlage". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 13. S. 401-411. TK Verlag Neuruppin, 2016. Dieser Beitrag ist auch publiziert in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Löschau, M.: "Immissionsschutz. Band 5". S. 229-239. TK Verlag Neuruppin 2015.

I

- [Icha 2016] Icha, P.; Kuhs, G.: "Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2015". Climate Change 26/2016. Umweltbundesamt, Dessau Juni 2016.
- [IEA 2011] International Energy Agency (IEA): "Clean Energy Progress Report". Bericht der IEA, Paris (Frankreich). Stand Juni 2011.

- [IEA 2012] International Energy Agency (IEA): "Energy Technology Perspectives 2012". Bericht der IEA, Paris (Frankreich). 2012.
- [IEA 2015] International Energy Agency (IEA): "Energy Climate and Change". World Energy Outlook Special Report. Bericht der IEA, Paris (Frankreich). 2015.
- [IER RWI ZEW 2009] Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) und Zentrum für Europäische Wirtschaftsförderung (ZEW): "Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030 - Energieprognose 2009". Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.
- [ifeu 2005] Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH: "Beitrag der Abfallwirtschaft zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland. Teilbericht Siedlungsabfälle". UFO-Plan-Vorhaben FKZ 203 92 309 des Umweltbundesamtes. Heidelberg, April 2005.
- [ITAD 2013] Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. (ITAD): Jahresbericht 2013.

J

- [Jäger 2007] Jäger, A.; Strumpf, L.: "Müllheizkraftwerk (MHKW) Rothensee". VGB PowerTech 87 (2007) Heft 12, S. 42-46.
- [Jarras 1980] L. Jarras et al.: "Windenergie". Springer Verlag, Berlin 1980.
- [Jeschar 1992] Jeschar, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: "Verbesserung des Verbrennungsablaufs". in: Leithner, R. (Hrsg.): "Ist die thermische Behandlung von Abfallstoffen vermeidbar". Zentrum für Abfallforschung. Heft 7. S. 223-240. Braunschweig, 1992.
- [Johnke 2002] Johnke, B.: "Current Status of the Work on the Waste Incineration BREF in Seville". VGB PowerTech 92 (2002) Heft 12. S. 98-102.
- [Johnke 2004] Johnke, B.: "Die Zukunft der thermischen Abfallbehandlung". VGB Kraftwerkstechnik 84 (2004) Heft 10. S. 86-88.
- [Jopp 2005] Jopp, K.: "Neue Maßstäbe im GuD-Prozess". BWK 57 (2005) Heft 6. S. 52-54.
- [Joschek 1993a] Joschek, H.-I.; Janisch, G.; Römer, R.: "Thermische Verwertung von Rückständen, Abgrenzung zur Beseitigung". Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993) Heft 2. S. 133-136.
- [Joschek 1993b] Joschek, H.-I.; Mroß, W.D.: "Thermische Verwertung von Rückständen, Abgrenzung zur Beseitigung - Teil 2". Abfallwirtschaftsjournal 5 (1993) Heft 5. S. 419-421.

K

- [Kägi 2015] Kägi, T.: "Ökobilanz KS Verwertung in DE - Vergleich stoffliches Recycling mit thermischer Verwertung in einer MVA oder Zementwerk". Gutachtem im Auftrag der Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen Deutschland e.V. (ITAD). Carbotech AG, Zürich, 23.06.2015.
- [Kaimer 1999] Kaimer, M.; Schade, D.: "Bewerten von thermischen Abfallbehandlungsanlagen: Planung, Genehmigung, Konzept und Betrieb". Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis. Band 111. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1999.
- [Kalmbach 2012] Kalmbach, S.: "Stand der Technik und Anwendung der BVT-Dokumente im Anlagenzulassungsrecht". In: Thomé-Kozmiensky et al.: "Immissionsschutz". Band 2. S. 285-295. TK Verlag, Neuruppin 2012.
- [Kaminski 2003] Kaminski, R.; Figgen, M.: "Alles in den Ofen oder alles offen?". Umweltpraxis 3 (2003) Heft 4. S. 50-51.
- [Karpf 2011] Karpf, R.; Krüger, T.: "Energetische Optimierungspotenziale von Abgasreinigungsverfahren hinter Abfallverbrennungsanlagen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 8. S. 499-526. TK Verlag, Neuruppin 2011.
- [Karpf 2012] Karpf, R.: "Energieeffiziente Abgasreinigung bei der Abfallverbrennung". VGB PowerTech 92 (2012) Heft 4. S. 92-99.
- [Karpf 2016a] Karpf, R. H.; Dütge, V.: "Wo treibt uns der CO₂-Wahnsinn hin?". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 13. S. 413-438. TK Verlag, Neuruppin 2016.
- [Karpf 2016b] Karpf, R.; Bergins, C.: "CO₂-Abscheidung bei der Abfallverbrennung". Müll und Abfall 48 (2016) Heft 5. S. 228-239.
- [Keller 2007] Keller, H.B.; Matthes, J.; Zipser, S.; Schreiner, R.; Gohlke, O.; Horn, J.; Schönecker, H.: "Kamerabasierte Feuerungsregelung bei stark schwankender Brennstoffzusammensetzung". VGB PowerTech 87 (2007) Heft 3. S. 85-92.
- [Kersting 2014] Kersting, A.: "Leitfaden für Genehmigungsverfahren nach Umsetzung der IED-Richtlinie". Müll und Abfall 46 (2014) Heft 2. S. 94-98.
- [Keune 2012] Keune, R.; Herden, H.; Janssen B.: "Energetische und stoffliche Bewertung der thermischen Abfallverbrennung am Beispiel MHKW-Frankfurt/Nordweststadt". Müll und Abfall 44 (2012) Heft 12, S. 632-637.
- [Keunecke 2016] Keunecke, M.; Mengede, F.J.: "Energie aus Abfall – Steigerung der Energieeffizienz als Treiber für Neu- und Umbau von Energie-aus-Abfall-Anlagen". In: Thomé-Kozmiensky.: "Strategie Planung Umweltrecht". Band 10. S. 29-39. TK Verlag Neuruppin, 2016.

- [Klasen 2006] Klasen, T.; Görner, K.; Auel, W.; Sudau, B.: "Optimierung des Müllheizkraftwerks (MHKW) Bremen auf Basis von CFD-Simulationen und Betriebserfahrungen nach dem Umbau". VGB PowerTech 86 (2006) Heft 7. S. 45-48.
- [Knapp 2012] Knapp, P.: "OptiMa: Energieeffizienzoptimierung am über 45 Jahre alten MVA-Standort Mannheim". VGB PowerTech 92 (2012) Heft 4, S.72-76.
- [Kolbusch 1979] Kolbusch, Schäfer: "Biologisch-Technische Systeme zur Energiegewinnung, Biokonversion". Studie der Dornier-Systems GmbH im Auftrag des BMFT, Bonn 1979. Zitiert aus: Kleemann, M.; Meliß, M.: "Regenerative Energiequellen". Springer Verlag, Berlin 1988.
- [Kopp-A. 2009] Kopp-Assemacher, S.: "Neue Entwicklungen im europäischen und nationalen Abfallwirtschaftsrecht". VGB PowerTech 89 (2009) Heft 8. S. 84-87.
- [Kopp-A. 2012] Kopp-Assemacher, S.: "Novelle verabschiedet". ReSource 25 (2012) Heft 1. S. 43-46.
- [Kopp-A. 2015] Kopp-Assemacher, S.: "Recht und Praxis". ReSource 28 (2015) Heft 1. S. 28-33.
- [Kost 1999] Kost, T.: "Oberste Priorität - Die Abfallwirtschaft kann durch die Vermeidung von Methanemissionen aus Deponien einen wichtigen Beitrag für den Klimaschutz leisten". Müllmagazin 12 (1999) Heft 3. S. 62-70.
- [Kost 2001] Kost, T.: "Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen". Dissertation, Universität Dresden, 2001.
- [Krämer 2010] Krämer, P.; Walter, G.; Mamiya, T.; Flamme, S.: "Abfallwirtschaft in Japan". Müll und Abfall 42 (2010) Heft 4. S. 175-180.
- [Kranert 2010] Kranert, M.; Cord-Landwehr, K.: "Einführung in die Abfallwirtschaft". Vieweg + Teubner Verlag, 4. Auflage, Wiesbaden 2010. (Vieweg +Teubner Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien).
- [KRdL 2006] KRdL: "Bewertung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung". Stellungnahme des Ausschusses VDI3460 der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL, 15.11.2006". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 2. S. 119-132. TK Verlag, Neuruppin 2007.
- [Kremer 1998] Kremer, M.; Goldhan, G.; Heyde, M.: "Waste Treatment in Product Specific Life Cycle Inventories". Int. J LCA 3 (1998) Heft 1. S. 47-55.
- [Kremers 1982] Kremers, W.; Thiele, J.; Wahl, F.: "Neue Wege der Energieversorgung". Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden 1982.
- [Kriete 2004] Kriete, B.: "Stand und Perspektiven der deutschen Siedlungsabfallverbrennung". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 1. S. 171-184. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2004.

- [Krüger 2015] Krüger, S.; Krüger, J.: "Praxiserfahrungen bei der Optimierung von Abfall-, Ersatzbrennstoff- und Biomasseverbrennungsanlagen - einfache Umsetzung - große Wirkung". VGB PowerTech 95 (2015) Heft 5. S. 66-72.
- [KrWG] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). 24. Februar 2012.
- [KrW-/AbfG] KrW-/AbfG - Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen. 27. September 1994
- [Kuckshinrichs 2010] Kuckshinrichs et al.: "Weltweite Innovationen bei der Entwicklung von CCS-Technologien und Möglichkeiten der Nutzung und des Recyclings von CO₂". Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi). Projektnummer 25/08. Forschungszentrum Jülich. Reihe Energie und Umwelt, Band 60. März 2010.
- [Kühn 2007] Kühn, H.-J.; Simonis, K.: "Gretchenfrage beantwortet". Entsorga-Magazin 26 (2007) Heft 9. S. 22-25.
- [Kugler 1990] Kugeler, K.; Pflippen, P.-W.: "Energietechnik". Springer Verlag Berlin 1999.

L

- [LAGA M38] Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): "Vollzugshinweise für die Anwendung der R1-Formel für die energetische Verwertung von Abfällen in Siedlungsabfallverbrennungsanlagen gemäß der EU- Abfallrahmenrichtlinie". Mitteilungen der LAGA, Nr. 38. Stand September 2012.
- [Lechtenberg 2015] Lechtenberg, D.: "Wie beeinflussen die zunehmenden Importmengen an Ersatzbrennstoffen den Abfallverbrennungsmarkt in Deutschland?". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 11, S. 625-628.
- [Lee 2007] Lee, S.-H.; Themelis, N.J.; Castaldi, M.J.: "High-Temperature Corrosion in Waste-to-Energy Boilers". Journal of Thermal Spray Technology 16 (2007) Heft 1. S. 104-110.
- [Lehner 2003] Lehner, W.; Hoffmann, A.: "Systeme zur Abgasreinigung bei dezentralen Rückstandsverbrennungen in der chemischen Industrie". Chem.-Ing.-Tech. 75 (2003) Heft 7. S.823-830.
- [Liamsanguan 2007] Liamsanguan, C; Gheewala, A.H.: Environmental Assessment of Energy Production from Municipal Solid Waste Incineration". Int. J LCA 12 (2007) Heft 7. S. 529-536.
- [Löschau 2010] Löschau, M.: "Aussagekraft der Energieeffizienz". Umweltmagazin 40 (2010) Heft 9. S. 76-77.
- [Löschau 2014] Löschau, M.: "Reinigung von Abgasen". TK Verlag, Neuruppin 2014.

- [Lohe 2004] Lohe, G.; Porter, D.: "Stand der thermischen Abfallbehandlung in England". VDI Bildungswerk. Seminar 435916. "BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/Dioxin-/ Rauchgasreinigungstechniken 2004 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen". München, 16.-17. September 2004.
- [Lorson 1994] Lorson, H.; Schingnitz, M.: "Konversionsverfahren zur thermischen Verwertung von Rest- und Abfallstoffen". BWK 46 (1994) Heft 5, S. 214-217.
- [LRA 2014] Landratsamt Günzburg: "Niederschrift über die 3. Sitzung des Werkausschusses Kreisabfallwirtschaft". Günzburg, 06.10.2014.
- [LRAG 1985] Landkreis Göppingen: "Das Müllheizkraftwerk Göppingen". Broschüre anlässlich der Inbetriebnahme der neuen Rauchgasreinigungsanlage im Juni 1985. Landratsamt Göppingen, Juni 1985. Anmerkung: Nachrüstung hinsichtlich TA Luft 1986.

M

- [Maltry 2012] Maltry, H.; Gierend, C.; Schneider, U.: "Zwölf Jahre Fuzzy am Beispiel des Müllheizkraftwerks Ludwigshafen". VGB Powertech 92 (2012) Heft 5, S. 69-73.
- [Marb 2003] Marb, C.; Przybilla, I.; Neumeyer, F.; Fripan, J.: "Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen". Abschlussbericht. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2003.
- [Manzke 2016] Manzke, A.: "Technischer Stand beim Schweißplattieren – Cladding 2.0 –". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 13. S. 243-269. TK Verlag, Neuruppin 2016.
- [Markewitz 2011] Markewitz et al.: "Transformation des Stromerzeugungssystems mit forciertem Ausstieg aus der Kernenergie". Forschungszentrum Jülich. STE Research Report. 06/2011.
- [Martin 1993] Martin, J.; Busch, M.; Behnke, S.: "Entwicklung einer kamerageführten Feuerungsregelung zur primärseitigen Schadstoffreduzierung". in: VDI (Hrsg.): "Techniken der Restmüllbehandlung". VDI Berichte 1033. S. 191-208. Tagung in Würzburg, 10.-21. April 1993.
- [Martin 2007] Martin GmbH: "Thermische Abfallbehandlungsanlage MHKW Mainz, Deutschland". Broschüre der Martin GmbH, Stand Februar 2007.
- [Martin 2010] Martin, J.J.E.; Fleck, S.: "MVA-Bau geht auf Weltreise". Umweltmagazin 40 (2010) Heft 7/8. S. 35-38.
- [Martin 2013] Martin, J.J.E.: "Abfallverbrennung im 21. Jahrhundert: Energieeffiziente und klimafreundliche Recyclinganlage und Schadstoffsenske". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Versteyl, A.: "Strategie Planung Umweltrecht". Band 7. S. 85-206. TK Verlag, Neuruppin 2013.

- [Matthes 2007] Matthes, F.C. et al.: "CO₂-Abscheidung und –Ablagerung bei Kraftwerken. Rechtliche Bewertung, Regulierung, Akzeptanz". Öko-Institut, Berlin/Darmstadt 2007.
- [Mayer 1993] Mayer, F.; Rasch, B., Schwarz, V.: "Verfahrensvergleich zur Restabfallbehandlung: Biologisch-mechanische Verfahren und Schwel-Brenn-Verfahren". Müll und Abfall 25 (1993) Heft 8. S. 569-584.
- [Mayr 1997] Mayr, F. (Hrsg.): "Handbuch der Kesselbetriebstechnik". Verlag Dr. Ingo Resch, 7. Auflage, Gräfelfing 1997.
- [Meier 2015] Meier, M.; Heger, S.; Schmid, K.: "Müllpyrolyseanlage in Burgau – das Ende der letzten Drehrohranlage für Hausmüll". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 5. S. 248-263.
- [Metschke 2005] Metschke, J.: "Kostenoptimierung bei thermischen Abfallbehandlungsanlagen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 219-239. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2005.
- [MHKW 2016] Müllheizkraftwerk Kassel GmbH: "Historie - Vom Kohlekraftwerk zur modernen thermischen Abfallbehandlung". Homepage des Unternehmens. http://www.mhkw-kassel.de/mhkw/Das_MHKW/Historie/index.htm. Letzter Zugriff Juni 2016.
- [Michels 2004] Michels, B.; Adamczyk, F.; Koch, J.: "Retrofit of a Flue Gas Heat Recovery System at the Mehrum Power Plant". VGB PowerTech 84 (2004) Heft 10. S. 122-128.
- [Morun 2006] Morun, B.; Schmidt, P.-U.: "Einfachste Rauchgasreinigung bei höchster Abscheideleistung". wlb 50 (2006) Heft 1-2. S. 30-32.
- [Mosch 1985] Mosch, H.: "Entscheidungskriterien für die Auswahl eines Rauchgasreinigungssystems für Müllverbrennungsanlagen". VGB Kraftwerkstechnik 65(1985) Heft 12. S. 1151-1155.
- [Moss 2011] Moss, R.L. et al.: "Critical Metals in Strategic Energy Technologies". European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2011.
- [Müller 2009] Müller, C.: "Abfallverbrennung und Wärmeverwertung - Optimierung der Energieeffizienz". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall" Band 6. S. 223-237. TK Verlag, Neuruppin 2009.
- [Müller 2015] Müller, V.; Warnecke, R. "Optimierungsansätze im Bereich Werkstoff, Instandhaltung und Energie". VDI Wissensforum. "Beläge und Korrosion". München, 16.-17. Juni 2015.
- [MVA BH 1997] Müllverbrennungsanlage Bielefeld-Herford GmbH: "Abfall Energie Umwelt". Firmenschrift des Unternehmens, Stand 1997.

- [MVB 2005] Müllverwertung Borsigstraße GmbH: "Rund um die Uhr im Dienst für die Millionenstadt Hamburg". Firmenschrift, Stand Juli 2005.
- [MVR 2015] Müllverwertung Rugenberger Damm GmbH & Co. KG: "Sicher entsorgen - sinnvoll verwerten 2015". Umwelterklärung des Unternehmens, 2015.
- [MVV 1992a] Mannheimer Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft mbH (MVV): "Begleitbroschüre zur Ton-Dia-Schau: Abfall ist kein Zufall". Firmenschrift MVV, Mannheim, 1992.
- [MVV 1992b] Mannheimer Versorgungs- und Verkehrsgesellschaft mbH (MVV): "Fernwärmeversorgung in Mannheim". Firmenschrift MVV, Mannheim, 1992.
- [MVV-U 2006] MVV Umwelt GmbH: "Umweltgerechte Energie durch sichere thermische Entsorgung". Firmenschrift MVV Umwelt GmbH, 2006.
- [MVV-U 2012] MVV Umwelt Asset GmbH: "Nachhaltige Energieerzeugung aus Abfällen auf höchstem Niveau". Firmenschrift MVV Umwelt Asset GmbH, 2012.

N

- [Nachreiner 2015] Nachreiner, S.; Troßmann-Göll, M.; Dräger, R.: "Moderne Überhitzungskonzepte für Müllverbrennungsanlagen". VGB PowerTech 95 (2015) Heft 9. S. 89-92.
- [NE 2017 6] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Treibhausgasemissionen: Energiewirtschaft geht voran - Landwirtschaft macht sorgen". Neue Energien 2017 Nr. 6. S 17.
- [Nebocat 2012] Nebocat, G.; Löschau, M.: "Angepasste Lösungen". ReSource 25 (2012) Heft 4. S. 34-40.
- [Nelles 2015] Nelles, M.; Dorn, T.; Morscheck, G.; Wang, Y; Xu, A.: "Stand und Perspektiven der Abfallwirtschaft in der VR China". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 4. S. 185-182.
- [Neuss 2017] Neuss, A.; Suchomel, H.: "Rolle der Sonderabfallverbrennung in der Kreislaufwirtschaft – Schadstoffsенke und energetische Verwertung –". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 14. S. 521-539. TK Verlag, Neuruppin, 2017.
- [Noell 1990] Noell-KRC Umwelttechnik GmbH: "Abgasreinigungsanlage nach dem Noell/Niro-Atomizer-Sprühabsorptionsverfahren in der Müllverbrennungsanlage der Stadt Kassel." Firmenschrift, Würzburg ca. 1990.
- [Nottrodt 1995] Nottrodt, A.: "Rostfeuerung oder neue thermische Verfahren". Abfallwirtschaftsjournal 7 (1995) Heft 5. S. 291-297.
- [Notz 2010] Notz, R.; Tönnies, I.; Scheffknecht, G.; Hasse, H.: "CO₂-Abtrennung für fossil befeuerte Kraftwerke". Chem.-Ing.-Tech. 82 (2010) Heft 10. S. 1639-1653.

- [Nürnberg 2010] Nürnberg, T.; Menner, M.; Ramsel, F.; Weber-Blaschke, G.; Faulstich, M.: "Energetische Verwertung von Mischkunststoffen in bayrischen Müllverbrennungsanlagen: Ökologischer und ökonomischer Vergleich mit Verfahren zur stofflichen Verwertung". Müll und Abfall 34 (2002) Heft 10. S. 651-658.

O

- [OECD 2010] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD): "Materials Case Study 1: Critical Metals and Mobile Devices". Working Document. Oktober 2010, Mechelen (Belgien).
- [Oexmann 2009] Oexmann, J.; Kather, A.: "Post-Combustion CO₂-Abtrennung in Kohlekraftwerken". VGB PowerTech 89 (2009) Heft 1/2. S. 92-102.
- [Orloff 2016] Orloff, E.: "Umbau und Erneuerung der Primärluftzuführung und Rostentscheidung in der AVA Velsen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 13. S. 587-600. TK Verlag, Neuruppin 2016.

P

- [Pacher 2007] Pacher, C.; Eggenstein, U.; Quicker, P.; Faulstich, M.: "Treibhausminderungspotentiale in Müllverbrennungsanlagen". In: Bayrisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): "Abfallwirtschaft und Klimaschutz". S. 61-69. Fachtagung am 8. Feb. 2007 in Augsburg. Bayrisches Landesamt für Umwelt, Augsburg 2007.
- [Pacher 2008] Pacher, C.: "Mehr Energie aus Abfall". UmweltMagazin 38 (2008) Heft 4/5. S. 68-70.
- [Paschlau 2003] Paschlau, H.; Rindorff, E.: "Die EuGH-Entscheidungen zur Abfall-Verbrennung und Abfall-Mitverbrennung und ihre Folgen". Müll und Abfall 35 (2003) Heft 6. S. 264-175.
- [Pauly 2003] Pauly, M.W.; Lück, D.R.: "Neue Kriterien für die Zulässigkeit der energetischen Verwertung". Müll und Abfall 35 (2003) Heft 5. S. 212-216.
- [Peters 1994] Peters, P.: "A Model for Numerical Simulation of Devolatization and Combustion of Waste Material in Packed Beds". Kernforschungszentrum Karlsruhe. Forschungsbericht. KfK 5385. November 1994.

Q

- [Quicker 2015] Quicker, P.; Noel, Y.: "Alternative Thermische Verfahren". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 5. S. 232-239.
- [Quicker 2017] Quicker, P. et al.: "Sachstand zu den alternativen Verfahren für die thermische Entsorgung von Abfällen". Texte 17/2017. Umweltbundesamt, Dessau November 2017.

R

- [R 1975 442] Richtlinie des Rates vom 15. Juli 1975 über Abfälle (75/442/EWG) - Abfallrahmenrichtlinie. Amtsblatt der Europäischen Union, L194, 25.07.1975, S.47.
- [R 1996 61] Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung. Amtsblatt der Europäischen Union, L257, 24.09.1996, S. 26.
- [R 2000 53] Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. September 2000 über Altfahrzeuge. Amtsblatt der Europäischen Union, L269, 21.10.2000, S. 34.
- [R 2006 66] Richtlinie 2006/66/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. September 2006 über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altalkumulatoren und zur Aufhebung der Richtlinie 91/157/EWG. Amtsblatt der Europäischen Union, L266, 26.09.2006, S. 1.
- [R 2008 98] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Amtsblatt der Europäischen Union, L312, 22.11.2008, S. 3.
- [R 2010 75] Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union, L334, 17.12.2010, S. 17.
- [R 2012 19] Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte. (waste electrical and electronic equipment – WEEE). Amtsblatt der Europäischen Union, L197, 24.07.2012, S. 38.
- [R 2015 1127] Richtlinie (EU) 2015/1127 der Kommission vom 10. Juli 2015 zur Änderung von Anhang II der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Amtsblatt der Europäischen Union, L184, 11.07.2015 S. 13.
- [Radde 2005] Radde, C.-A.; Bergs, C.-G.: "Werdegang der TA Siedlungsabfall und Abfallablagereungsverordnung - ein kritischer Rückblick". Müll und Abfall 37 (2005) Heft 5. S. 253-259.
- [Ragoßnig 2008] Ragoßnig, A.M.; Wartha, C.; Kirchner, A.: "Energy efficiency in waste-to-energy and its relevance with regard to climate control". Waste Management & Research 26 (2008) S. 70-77.
- [RE 2006 8] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Studie: Energieeffizienz von MVA über Investitionsanreize erhöhen". Recycling und Entsorgung 2006 Nr. 8. S 9.
- [RE 2006 39] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "UBA: Nötig wäre eine stärkere finanzielle Förderung". Recycling und Entsorgung 2006 Nr. 39. S 4.

- [RE 2009 12] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "CCS-Technologie zu teuer für Einsatz in MVA". Recycling und Entsorgung 2009 Nr. 12. S 8.
- [RE 2011 51] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Stadtwerke Landshut schreiben Umbau der MVA aus". Recycling und Entsorgung 2011 Nr. 51/52. S 6.
- [RE 2012 42] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "MHKW Kassel mit gleichem Gewinn wie im Vorjahr". Recycling und Entsorgung 2012 Nr. 42. S 10.
- [RE 2013 28] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "MHKW Ludwigshafen erhält Bestnoten bei Energieeffizienz". Recycling und Entsorgung 2013 Nr. 28. S 6.
- [RE 2014 43] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Landkreis Günzburg legt Müllpyrolyseanlage still". Recycling und Entsorgung 2014 Nr. 43. S 2.
- [RE 2015 19] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "MHKW Kiel energieeffizienteste Anlage in Deutschland". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 19. S 6.
- [RE 2015 22] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "MVA Borsigstraße verbrennt 2014 deutlich weniger Abfall". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 22. S 4.
- [RE 2015 24] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Itad: Deutsche Müllverbrennungsanlagen verbrennen 2014 rund 22,2 Mio. Tonnen Abfall". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 24. S. 1-2.
- [RE 2015 26] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Notiert - MHKW Ludwigshafen". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 26. S 10.
- [RE 2015 31] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "EVO modernisiert MHKW Offenbach für 25 Mio. EUR". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 31. S 15.
- [RE 2015 36] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Studie: Verbrennung von Kunststoffen in effizienter MVA genauso gut wie Recycling". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 36. S 6.
- [RE 2015 36a] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Ecoprog: Weltweit noch nie so viele Müllverbrennungsanlagen in Betrieb gewesen". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 36. S 31.
- [RE 2015 36b] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "VBSA: Schweiz braucht mehr Müllverbrennungsanlagen". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 36. S 30.
- [RE 2015 52] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Aus den Ländern". Recycling und Entsorgung 2015 Nr. 52. S 25.
- [RE 2016 3] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Drei Müllverbrennungsanlagen in Polen an den Kunden übergeben". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 6. S 37.
- [RE 2016 7] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Aker Solutions testet CO₂-Abscheidung an Müllverbrennungsanlage in Oslo". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 7. S 23.

- [RE 2016 16] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "ITAD: EU benötigt bis 2030 etwa 180 zusätzliche MVA". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 16. S 11.
- [RE 2016 18] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "2014 wurden mehr Abfälle in weniger Anlagen entsorgt". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 18. S 32.
- [RE 2016 22] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "IKW Rüdersdorf darf Hausmüll verbrennen". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 22. S 2.
- [RE 2016 25] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Anlagenbauer Martin erhält sechs neue Aufträge aus China". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 25. S 4.
- [RE 2016 30] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "MVA Böblingen investiert 10 Mio. EUR in neue Rauchgasreinigung". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 30. S 4.
- [RE 2016 42] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Bundesrat stimmt Streichung der umstrittenen Heizwertklausel zu". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 42. S 4.
- [RE 2016 46] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Zubaubedarf von 1,8 Mio Jahrestonnen in Italien". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 46. S 28.
- [RE 2016 48] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "Ecoprogramm: Waste-to-Energy-Market bleibt 2015 und 2016 auf Allzeithoch". Recycling und Entsorgung 2016 Nr. 48. S 31.
- [RE 2017 15] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "MVA Schwandorf verbrennt 2016 mehr Gewerbeabfälle". Recycling und Entsorgung 2017 Nr. 15. S 10.
- [RE 2017 18] Europäischer Wirtschaftsdienst (EUWID): "China befeuert den Boom auf dem Weltmarkt für neue Abfallverbrennungskapazitäten". Recycling und Entsorgung 2017 Nr. 18. S 17.
- [Reichelt 2012] Reichelt, J.; Pfrang-Stotz, G.; Bergfeldt, B.; Seifert, H.; Knapp, P.: "Steigerung der Energieeffizienz in Heizkraftwerken durch eine optimierte Wärmeausnutzung im Abhitzeessel". Abschlussbericht, gefördert unter dem Az: 26675 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.
- [Reimann 1992a] Reimann, D.O.; Hämmerli-Wirth, H.: "Verbrennungstechniken Bedarf - Entwicklung - Berechnung - Optimierung (Teil1)". Abfallwirtschaftsjournal 4 (1992) Heft 8, S. 605-679.
- [Reimann 1992b] Reimann, D.O.; Hämmerli-Wirth, H.: "Verbrennungstechniken Bedarf - Entwicklung - Berechnung - Optimierung (Teil2)". Abfallwirtschaftsjournal 4 (1992) Heft 12. S. 955-983.
- [Reimann 2003] Reimann, D.O.: "Ermittlung und Bedeutung von Kennzahlen zur Energie und Anlagennutzung sowie Wirkungsgraden für die Abfallverbrennung". Müll und Abfall 35 (2003) Heft 10. S. 512-520.

- [Reimann 2004] Reimann, D.O.: "Einsatz von Kennzahlen zur Energie-/Anlagennutzung und Wirkungsgraden mit zugehöriger Heizwertbestimmung an unterschiedlichen W-t-E Anlagen". VDI Bildungswerk. Seminar 435916. BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/Dioxin-/ Rauchgasreinigungstechniken 2004 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. München, 16.-17. September 2004.
- [Reith 2004] Reith, M.; Geider, A.; Arnold, G.: "Effizientes Energiemanagement mit optimierter Infrastruktur am Beispiel des MHKW Mannheim". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 1. S. 367-380. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2004.
- [Richers 1995] Richers, U.: "Thermische Behandlung von Abfällen in Drehrohröfen – eine Darstellung anhand der Literatur". Wissenschaftliche Berichte. FZKA 5548. Forschungszentrum Karlsruhe, 1995.
<http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA5548.pdf>
- [Richers 1996] Richers, U.; Bergfeldt, B.: "Das Siemens Schwel-Brenn-Verfahren". Wissenschaftliche Berichte. FZKA 5826. Forschungszentrum Karlsruhe, November 1996. <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA5826.pdf>
- [Richers 2010] Richers, U.: "Abfallverbrennung in Deutschland - Entwicklungen und Kapazitäten". KIT Scientific Reports 7560. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010. <http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000019325>
- [Röderer 2007] Röderer, M.; Wendenberger, K.; Austel, D.; Schopen, M.: "Erhöhter Durchsatz in Müllverbrennungsanlagen durch Einsatz einer hybriden Feuerleistungsregelung". Müll und Abfall 39 (2007) Heft 7. S. 328-333.
- [Roll 2014] Roll, H.; Chartschenko, P.: "Marktumfeld für die Abfallverbrennung in Deutschland". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Strategie - Planung - Umweltrecht". Band 8. S. 175-198. TK Verlag, Neuruppin 2014.
- [Rostkowski 2012] Rostkowski, S.; Beckmann, M.; Tanner, N.: "Optimierung der Online-Reinigung". In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): "Energie aus Abfall". Band 9. S. 337-344. TK Verlag, Neuruppin 2012.
- [Rummler 2007] Rummler, T.: "Klimaschutz und aktuelle Entwicklungen in der Abfallpolitik". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 3. S. 35-46. TK Verlag, Neuruppin, 2007.

S

- [Schäfers 1997] Schäfers, W.; Schumacher, W.; Zwahr, H.: "Die Müllverbrennungsanlage Rugenberger Damm in Hamburg". VGB Kraftwerkstechnik 77 (1997) Heft 9. S. 738-743.
- [Schäfers 2006] Schäfers, W.: "MVA-Wirkungsgrade und das lokale Umfeld". Umweltmagazin 36 (2006) Heft 11. S. 53-55.

- [Scharf 2006] Scharf, R.: "Erzeugung von Strom und Wärme aus Abfall". In: Versteyl, A.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Texte zur Abfall- und Energiewirtschaft". Band 2. S. 13-28. TK Verlag, Neuruppin 2006.
- [Schetter 1985] Schetter, G.: "Simulation von Feuerräumen in Müllverbrennungsanlagen". BWK (37) (1985) Heft 11. S. 441-449.
- [Schiffer 2010] Schiffer, H.W.: "CCS als zentraler Baustein einer nachhaltigen Stromerzeugung". BWK 62 (2010) Heft 11. S. 48-55.
- [Schmidt 2008] Schmidt, D.; Kampscheurer, T.: "Model Predictive Combustion Control Based on Neural Nets". VGB PowerTech 88 (2008) Heft 1/2. S. 72-74.
- [Schneider 2005] Schneider, T.; Vielhaber, B.; Franssen, A.: "Die Umsetzung der Ablagerungsverordnung am Beispiel der Region Hannover". Müll und Abfall 37 (2005) Heft 5. S. 140-145.
- [Scholz 1990] Scholz, R.; Jeschar, R.; Schopf, N.; Klöppner, G.: "Prozeßführung und Verfahrenstechnik zur schadstoffarmen Verbrennung von Abfällen". Chem.-Ing.-Tech. 62 (1990) Heft 11. S. 877-887.
- [Scholz 1991] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: "Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungsanlagen". BWK (1991) Heft 10. S. V22-V39 (Spezial "Müllverbrennung und Entsorgung").
- [Scholz 1994] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.; Brinker, W.: "Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren - Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung". BWK 46 (1994) Heft 11/12. S. 469-481.
- [Scholz 1995] Scholz, R.: "Thermische Verfahren zur Abfallbehandlung; Prozeßführung, Bausteine und Bewertung". in: VDI (Hrsg.): VDI Bericht 1192. S. 1-78. Tagung in Veitshöchheim, 27.-28. Juni 1995. VDI-Verlag, Düsseldorf 1995.
- [Scholz 2001] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: "Abfallbehandlung in thermischen Verfahren". Teubner-Reihe Umwelt. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart 2001.
- [Scholz 2004] Scholz, R.; Harnaut, T.; Beckmann, M.; Horeni, M.: "Zur systematischen Bewertung der Energieumwandlungen bei der thermischen Abfallbehandlung". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 1. S. 203-235. TK Verlag, Neuruppin 2004.
- [Scholz 2006] Scholz, R.; Beckmann, M.; Horeni, M.: "Energetische Bewertung von Konzepten zur Substitution von fossilen Brennstoffen". In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): "Optimierung der Abfallverbrennung 3". S. 509-535. TK Verlag, Neuruppin 2006.
- [Schreyer 2009] Schreyer, K.-H.; Tanner, N.: Entwicklung der Kraft-Wärme-Kopplung am Beispiel der Städtischen Werke AG in Kassel". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: Energie aus Abfall. Band 6". TK Verlag, Neuruppin 2009.

- [Schroer 2002] Schroer, C.; Konys, J.: "Rauchgasseitige Hochtemperatur-Korrosion in Müllverbrennungsanlagen - Ergebnisse und Bewertung einer Literaturrecherche". Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte, FZKA 6695, Februar 2002.
- [Schu 2006] Schu, R.; Born, M.: "Erhöhung der Energieeffizienz bei Abfallverbrennungsanlagen durch Prozessführung und Anlagenschaltung". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 3. S. 283-326. TK Verlag, Neuruppin 2006.
- [Schu 2007] Schu, R.: "Effizienter Abfall verbrennen". Umweltmagazin 37 (2007) Heft 4/5. S. 18-20.
- [Schu 2009] Schu, R.: "Optimierung von Kraftwerksprozessen". ReSource 22 (2009) Heft 4. S. 15-22.
- [Schüth 2007] Schüth et al.: "Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie –". Positionspapier von 26 Autoren. Koordinierungskreis Chemische Energieforschung, getragen von DECHEMA, GDCh, DBG, DGMK, VDI-GVC und VCI. März 2007.
- [Schulteß 1996] Schulteß, W.: "Multifunktionale Abgasreinigung für Abfallverbrennungsanlagen". Umwelt 26 (1996) Heft 4. S. 38-39.
- [Schulteß 2007] Schulteß, W.: "Was kostet die Halbierung der Grenzwerte für Verbrennungsanlagen?". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 3. S. 445-464. TK Verlag, Neuruppin 2007.
- [Schumacher 1991] Schumacher, W.; Schäfers, W.: "Regelung der Feuerungsleistung bei Müllverbrennungsanlagen". Entsorgungspraxis 9 (1991) Heft 6. S. 312-314.
- [Schumacher 1996] Schumacher, F.: "Korrosion in Abfallverbrennungsanlagen". BWK 48 (1996) Heft 11/12. S. 74-80.
- [Schumacher 1997] Schumacher, F.: "Korrosion in Abfallverbrennungsanlagen". BWK 49 (1997) Heft 1/2. S.53-59.
- [Schwaegerl 2002] Schwaegerl, C.: "Integration dezentraler Versorgungsstrukturen in das Versorgungsnetz". in: Hake, J.-F. et al.: "Erneuerbare Energien: Ein Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung". Schriften des Forschungszentrums Jülich, Energietechnik Band 22. S. 142-151. Forschungszentrum Jülich, 2002.
- [Schweitzer 1994] Schweitzer, F.J.: "Thermoselect-Verfahren zur Ent- und Vergasung von Abfällen". EF-Verlag, Berlin 1994.
- [Seier 1998] Seier, J.; Albert, F.: "Optimierung der energetischen Nutzung von Abfällen in Müllheizkraftwerken durch Anwendung der Fremdüberhitzung". in: VDI (Hrsg): "Modellierung und Simulation von Dampferzeugern und Feuerungen". VDI Berichte 1390. S. 349-358. Tagung in Braunschweig, 1. Bis 2. April 1998.

- [Seiler 2005] Seiler, U.: "Energetisches Optimierungspotential bei Abfallverbrennungsanlagen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 241-254. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2005.
- [Sieck 2006] Marlene Sieck, M.; Weiss, V.: "Energie aus Abfall. Ein bedeutender Beitrag zum Klimaschutz". Dokumentation des Workshops, Umweltbundesamt 6.-7. November 2006.
- [Simon 2007] Simon, H.-W.: "Sie köchelt noch". Entsorga-Magazin 26 (2007) Heft 9 S. 10-15.
- [Simsek 2009] Simsek, E.; Sudbrock, F.; Wirtz, S.; Scherer, V.: "Untersuchung von Schürung und Mischung auf Rostsystemen von Müll- und Biomasseanlagen". VGB PowerTech 89 (2009) Heft 9. S. 114-120.
- [Sohlenthaler 2003] Sohlenthaler, B.; Bunge, R.: "Müllverbrennung in China". Müll und Abfall 35 (2003) Heft 11. S. 593-596.
- [Spiegel 2005] Spiegel, W.; Müller, W.; Herzog, T.: "Beeinträchtigung der Wirtschaftlichkeit von Abfallverbrennungsanlagen durch Korrosion". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 272-283. TK Verlag, Neuruppin 2005.
- [StaBa 2014] Statistisches Bundesamt: "Umwelt - Abfallentsorgung 2014". Fachserie 19, Reihe 1. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2016.
- [StaBa 2016] Statistisches Bundesamt: "Statistisches Jahrbuch 2015". 18.3 Abfallbilanz 2014. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2016.
- [StaBa 2017] Statistisches Bundesamt: "Umwelt - Abfallbilanz 2015". Schriftenreihe vom Statistischen Bundesamt (DESTATIS), Erschienen am 10.07.2017.
- [Stamatelopoulos 2016] Stamatelopoulos, G.N.; Lorey, H.: "RDK8: Ein überkritisches Kohlekraftwerk als Beispiel für die neueste Generation steinkohlebefeuerter Anlagen". VGB PowerTech 96 (2016) Heft 3. S. 27-32.
- [StromEinspG] Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisungsgesetz). 7. Dezember 1990.
- [Suchomel 2016] Suchomel, H.; Neuss, A.: "Verbrennung gefährlicher Abfälle: Unterschiede bei der Behandlung in Rostfeuerung und Drehrohr". Müll und Abfall 48 (2016) Heft 5. S. 240-249.
- [Suritsch 2009] Suritsch, N.: "Fokus auf Energieeffizienz". Müllmagazin 22 (2009) Heft 1. S. 50-52.
- [SWB 2013] SWB (Boeckh, M.; Mühleisen, M.): "Stromerzeugung verdreifacht". Entsorga 32 (2013) Heft1/2. S. 12-13.
- [Syring 2000] Syring, U.; Hermanni, E.v.: "Müllheizkraftwerk Mainz geht neue Wege". wlb 44 (2000) Heft 1-2. S. 55-56.

T

- [Tanner 2008] Tanner, N.: "Energetische Optimierung der Abgasbehandlung im Müllheizkraftwerk Kassel". in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 4. S. 223-272. TK Verlag, Neuruppin 2008.
- [Tanner 2009] Tanner, N.; Schreyer, K.-H.; Beckmann, M.: "Optimierung von Müllverbrennungsanlagen am Beispiel des Müllheizkraftwerk Kassel". 2. Fachtagung. Stand und Zukunft zeitgemäßer thermischer Abfallbehandlung. Schloss Hohenkammer, 19.-20. März 2009.
- [Tanner 2011] Tanner, N.: "Energetische Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen -am Beispiel des MHKW Kassel-". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 8. S. 31-67. TK Verlag, Neuruppin 2011.
- [TA Luft 86] Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft). Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. 27. Februar 1986.
- [TA Si] Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TA Siedlungsabfall). 14. Mai 1993.
- [Thiel 2013] Thiel, S.: "Im Ländervergleich. Über Gemeinsamkeiten, Unterschiede und Kapazitäten von Ersatzbrennstoff-Kraftwerken in Deutschland und Österreich liegen aktuelle Daten vor". ReSource 26 (2013) Heft 1, S. 4-10. Daten und Text auch in: Thiel, S.: "Ersatzbrennstoff-Kraftwerke in Deutschland und Österreich". In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg): "Energie aus Abfall". Band 10. S. 845-84. TK Verlag, Neuruppin 2013.
- [Thiel 2017] Thiel, S.: "Markt unter Druck". ReSource 30 (2017) Heft 1. S. 23-26.
- [Thomé-K. 1983] Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): "Müllverbrennung und Rauchgasreinigung". EF-Verlag, Berlin 1983.
- [Thomé-K. 1985] Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Verbrennung von Abfällen". EF-Verlag, Berlin 1985.
- [Thomé-K. 1994] Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Thermische Abfallbehandlung". EF-Verlag, Berlin 1994.
- [Thomé-K. 2007] Thomé-Kozmiensky, K.J.; Thome, E.; Thiel, S. "Berechnung der Emissionen aus Abfallverbrennungsanlagen ". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 3. S. 333-370. TK Verlag, Neuruppin 2007.
- [Thomé-K. 2009a] Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Sonderabfallverbrennung in Drehrohröfen". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 6. S. 710-780. TK Verlag, Neuruppin 2009.
- [Thomé-K. 2009b] Thomé-Kozmiensky, K.J. "Recyclinggesellschaft - Die Abfallrahmenrichtlinie stellt hohe Anforderungen". ReSource 22 (2009) Heft 3. S. 4-11.
- [Thomé-K. 2016] Thomé-Kozmiensky, K.J.; Thiel, S.: "Keine Trendwende". Resource 29 (2016) Heft 1, S.48-50.

- [TR 2013] trend:research: "Hoher Bedarf an Instandhaltung- und "Retrotit"-Maßnahmen bei Müllverbrennungsanlagen in Deutschland, Österreich und der Schweiz". Müll und Abfall 44 (2012) Heft 12. S. 638-643.
- [Treder 2005] Treder, M.; Salamon, A.: "Energetische Verwertung von niederkalorischen Restabfallfraktionen in einer MVA". Müll und Abfall 37 (2005) Heft 3, S. 131-136.
- [Treder 2015a] Treder, M.: "Energetische Verwertung von Abfällen im Spannungsfeld der aktuellen Gesetzgebung und der Diskussion von Recyclingzielen". VGB PowerTech 95 (2015) Heft 6, S. 61-68.
- [Treder 2015b] Treder, M.: "Die thermische Abfallbehandlung im Energiemarktdesign der Zukunft". In: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): "Strategie Planung Umweltrecht". Band 9. S. 93-124. TK Verlag, Neuruppin 2015.
- [Treder 2016a] Treder, M.; Spohn, C.: "Betreiber von Abfallverbrennungsanlagen im Spannungsfeld des BVT-Merkblatts". Vortrag auf der Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz. Berlin, 25. und 26. Januar 2016. Download der Vortragsfolien: <https://www.itad.de/information/studien/BREFITADTKBerlin-Jan2016.pdf>. Letzter Zugriff 16.03.2016.
- [Treder 2016b] Treder, M.; Lenck, T.; Huneke, F.: "Chancen und Risiken von thermischen Abfallbehandlungsanlagen im Energiemarkt der Zukunft". Müll und Abfall 48 (2016) Heft 12. S. 617-624.

U

- [UBA 1978] Umweltbundesamt (Hrsg.): "Abgaswäsche bei Müllverbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung der Behandlung der Rückstände". Beihefte zu Müll und Abfall. Heft 13. Erich Schmidt Verlag, Berlin 1978.
- [UBA 2008a] Umweltbundesamt (Hrsg.): "Stellenwert der Abfallverbrennung in Deutschland". Informationsbroschüre des Umweltbundesamtes, Dessau. Stand Juli 2008.
- [UBA 2008b] Umweltbundesamt (Hrsg.): "Abfallverbrennung ist kein Gegner der Abfallvermeidung". Informationsbroschüre des Umweltbundesamtes, Dessau. Stand Juli 2008.
- [UBA 2009] Umweltbundesamt (Hrsg.): "CCS - Rahmenbedingungen des Umweltschutzes für eine sich entwickelnde Technik". Informationsbroschüre des Umweltbundesamtes, Dessau. Stand Mai 2009.
- [UBA 2011] Umweltbundesamt: "Klimarelevanz der Abfallwirtschaft". Dessau, Januar 2011.
- [UBA DzU 2015] Umweltbundesamt (UBA): "Daten zur Umwelt". Umweltbundesamt, Berlin Juni 2015.
- [UBA EBSK 2016] Umweltbundesamt (UBA): Thermische Behandlung von Ersatzbrennstoffen. Zusammenstellung vom UBA ohne Aktualisierungsangabe. Download von der Homepage am 16.03.2013.

- [UBA MVA 2008] Umweltbundesamt (UBA): "Auflistung der Abfallverbrennungsanlagen (MVA)". Zusammenstellung vom UBA, Dessau. Stand 2008. Auch in: Daten zur Umwelt". CD-Rom, Ausgabe 2009.
- [UBA MVA 2011] Umweltbundesamt (UBA): Abfallverbrennungsanlagen. Stand Dezember 2011.
- [UBA MVA 2013] Umweltbundesamt (UBA): Thermischen Behandlungsanlagen, die überwiegend Siedlungsabfälle verbrennen. Zusammenstellung vom UBA ohne Aktualisierungsangabe. Download von der Homepage am 22.10.2013.
- [UBA MVA 2016] Umweltbundesamt (UBA): Thermischen Behandlungsanlagen, die überwiegend Siedlungsabfälle verbrennen. Zusammenstellung vom UBA ohne Aktualisierungsangabe. Download von der Homepage am 16.03.2016.
- [UBA MVA 2017] Umweltbundesamt (UBA): Thermischen Behandlungsanlagen, die überwiegend Siedlungsabfälle verbrennen. Zusammenstellung vom UBA ohne Aktualisierungsangabe. Download von der Homepage am 06.02.2017.
- [Urban 1990] Urban, A.I.: "Roste und Rostfeuerungs-systeme". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Müllverbrennung und Umwelt 4". EF-Verlag Berlin 1990.
- [UVF 1993] Umlandverband Frankfurt: "Nachrüstung der MVA Offenbach, Kurzbeschreibung". Firmenschrift vom Umlandverband Frankfurt-Eigenbetrieb Abfallwirtschaft und Abfallentsorgung. Etwa 1993.

V

- [Vaccani 2015] Vaccani, A.; Asato, S.: "Internationale Märkte für alternative Verfahren zur Behandlung von Haus- und Gewerbeabfällen und Strategien der wichtigsten Marktteilnehmer". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 5. S. 240-243.
- [VDI 3460.1] VDI Richtlinie 3460. Blatt 1: "Emissionsminderung. Thermische Abfallbehandlung. Grundlagen". Februar 2014.
- [VDI 3460.2] VDI Richtlinie 3460. Blatt 2: "Emissionsminderung. Thermische Abfallbehandlung. Energieumwandlung". Juni 2014. Anmerkung: Die erste Ausgabe dieser Norm wurde im August 2007 publiziert, eine Berichtigung erfolgte im November 2007.
- [VDI 3925.1] VDI Richtlinie 3952. Blatt 1.: "Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren". September 2016.
- [VDI 3925.2] VDI Richtlinie 3952. Blatt 2. "Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren - Beispielberechnungen". Entwurf August 2016.
- [Vehlow 2003] Vehlow, J.; Hunsinger, H.; Kreis, S.; Seifert, H.: "UPSWING – A novel concept to reduce costs without changing the environmental standards of waste combustion". Proceedings zum IEA Bioenergy Joint Task Seminar "Operating experience and techno-economic benefits and environmental benefits of energy recovery from renewable waste materials", Tokyo, October 28, 2003.

- [Vehlow 2004] Vehlow, J.: "Japan liebt die Schlacke Flüssig - Stand der thermischen Verfahren in Japan". VDI Bildungswerk. Seminar 435916. BAT-, energie-, preisorientierte Verfahrens-/Dioxin-/ Rauchgasreinigungstechniken 2004 für Verbrennungs- und Feuerungsanlagen. München, 16.-17. September 2004.
- [Vehlow 2005] Vehlow, J.; Hilber, T.; Hunsinger, H.; Jay, K.; Kreis, S.; Maier, J.; Seifert, H.: "Dioxinzerstörung mit dem UPSWING-Prozess". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 651-660. TK Verlag, Neuruppin 2005.
- [Vehlow 2015] Vehlow, J.; Seifert, H.; Eyssen, R.: "Japans Abfallmanagement im Strukturwandel". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 5. S. 254-261.
- [Vodegel 2005] Vodegel, S.; Harpeng, J.: "Online-Kesselreinigung in Müllverbrennungsanlagen - Systeme und Belageigenschaften". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Optimierung der Abfallverbrennung". Band 2. S. 285-300. TK Verlag, Neuruppin 2005.
- [Vodegel 2006] Vodegel, S. et al.: "Optimierte Ausbeute - Am Beispiel einer Technikumsanlage entwickeln Wissenschaftler innovative Regelungssysteme für Rostfeuerungen". Müllmagazin 19 (2006) Heft 2. S. 16-21.
- [Vogt 2015a] Vogt, R.; Dehoust, G.; Radde, C.A.; Sieck, M.; Schwetje, A.: "Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft – Teil 1". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 4. S. 177-184.
- [Vogt 2015b] Vogt, R.; Dehoust, G.; Radde, C.A.; Sieck, M.; Schwetje, A.: "Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft - Teil 2". Müll und Abfall 47 (2015) Heft 6. S. 296-303.

W

- [Walk 2008a] Walk, W.; Richers, U.; Speck, V.: "Prozessübergreifende Bewertung von Entstickungstechniken der Abfallverbrennung vor dem Hintergrund der NEC-Richtlinie ". In: VDI (Hrsg.): Bericht 2035 "Emissionsminderung 2008". S. 71-79. VDI Verlag, Düsseldorf 2008. Tagung in Nürnberg, 9.-10. April 2008.
- [Walk 2008b] Walk, W.; Richers, U.: "DeNOx bei der Abfallverbrennung vor dem Hintergrund der NEC-Richtlinie ". In: Lorber, K.E. et al. (Hrsg.): "DepoTech 2008 - Abfallwirtschaft, Abfalltechnik, Deponietechnik und Altlasten". Tagungsband zur 9. DepoTech Konferenz, S. 661-664. Montanuniversität Leoben (Österreich), 12.-14. November 2008. VGE Verlag GmbH, Essen 2008.
- [Wallstein] Wallstein, D.: "Sparsamer Rauchgase reinigen". Umweltmagazin 39 (2009) Heft 9. S. 20.

- [Wandschneider 2004] Wandschneider, J.; Seiler, U.; Hölter, G.; Willmann, T.: "Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades bis 30 % durch eine Hochleistungskesselanlage am Beispiel der HR-AVI-Amsterdam". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: "Optimierungspotential der Abfallverbrennung". Band 1. S. 247-256. TK Verlag, Neuruppin 2004.
- [Wandschneider 2007] Wandschneider, J.: "Optimierungsmaßnahmen zur Steigerung des Wirkungsgrades". Müll und Abfall 39 (2007) Heft 5. S. 214-221.
- [Wandschneider 2010] Wandschneider, J.: "Erste Betriebserfahrungen der HR AVI Amsterdam". Müll und Abfall 42 (2010) Heft 5. S. 208-212.
- [Wandschneider 2012] Wandschneider, J.: "Technische Planung einer Abfallverbrennungsanlage". In: Thomé-Kozmiensky, K.J. et al.: "Immissionsschutz". Band 3. S. 417-430. TK Verlag, Neuruppin 2012.
- [Wandschneider 2015a] Wandschneider, J.: "Energetische Potenziale im Wasser-Dampf-Kreislauf in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 12. S. 149-168. TK Verlag, Neuruppin 2015.
- [Wandschneider 2015b] Wandschneider, J.: "Energetisch optimierte trockene Abgasreinigung mit hoher Abscheideleistung". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Löschau, M.: "Immissionsschutz. Band 5". S. 193-205. TK Verlag, Neuruppin 2015.
- [Warnecke 2014] Warnecke, R.: "Fünfzig Jahre und kein bisschen weise – Korrosion und Verfahrenstechnik in thermischen Abfallbehandlungsanlagen –". In: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: "Energie aus Abfall". Band 11. S. 441-457. TK Verlag, Neuruppin 2014.
- [Wilts 2016] Wilts, H.: "Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen – mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe". Texte 65/2016. Umweltbundesamt, Dessau September 2016.
- [Wirtz 2013] Wirtz, S.; Sudbrock, F.; Brosch, B.; Scherer, V.: "Simulation des reagierenden Brennbetts auf Rosten von Müllverbrennungsanlagen". VGB PowerTech 93 (2013) Heft 6. S. 85-91.
- [Wolf 2005] Wolf, C.: "Erstellung eines Modells der Verbrennung von Abfall auf Rostsystemen unter besonderer Berücksichtigung der Vermischung – ein Beitrag zur Simulation von Abfallverbrennungsanlagen". Dissertation, Universität Duisburg-Essen 2005.
- [Wollny 2000a] Wollny, V.; Weinem, P.; Dehoust, G.; Fritsche, U.: "Vergleich der rohstofflichen und energetischen Verwertung von Verpackungskunststoffen Teil 1". Müll und Abfall 32 (2000) Heft 10. S. 593-600.
- [Wollny 2000b] Wollny, V.; Weinem, P.; Dehoust, G.; Fritsche, U.: "Vergleich der rohstofflichen und energetischen Verwertung von Verpackungskunststoffen Teil 2". Müll und Abfall 32 (2000) Heft 11. S. 667-674.

- [Wünsch 2010] Wünsch, C.; Bilitewski, B.: "Vermeidung klimarelevanter Treibhausgasemissionen in der Abfallwirtschaft durch Müllverbrennung". Müll und Abfall 42 (2010) Heft 12. S. 592-595.

XYZ

- [ZAO 1990] Zweckverband Abfallentsorgung Offenbach (ZAO): "Müllverbrennungsanlage". Firmenschrift vom Zweckverband Abfallentsorgung Offenbach. Etwa 1990.
- [Zotz 2016] Zotz, F. et al. (BiPRO GmbH, München): "Evaluation der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des Wegfalls der Heizwertregelung des § 8 Abs. 3 Satz 1 KrWG". Umweltbundesamt. Texte 21/2016. Dessau, Februar 2016.
- [Zunft 2009] Zunft, J.; Fröhlig, B.: "Energy from waste - Zukunftsmärkte Europa". Müll und Abfall 41 (2009) Heft 7. S. 348-354.
- [Zunft 2011] Zunft, J.; Fröhlig, B.: "Abfallverbrennung in Europa". Resource 24 (2011) Heft 3. S. 39-43.
- [Zwahr 2001] Zwahr, H.; Schröder, W.: "Planung, Bau und Betrieb der Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm in Hamburg. Teil 1". Müll und Abfall 33 (2001) Heft 3. S. 128-142.



In Deutschland verändert sich die Energieversorgung im Rahmen der Energiewende entscheidend. In diesem Zusammenhang wird erneut über die thermische Abfallbehandlung diskutiert, denn die entsprechenden Anlagen stellen elektrische Energie oder Wärme zur Verfügung. Im Rahmen der Arbeit werden die Anteile der Abfallverbrennungsanlagen am deutschen Primärenergieverbrauch und die möglichen Potenziale zur Strombereitstellung und Wärmeversorgung bestimmt. Dabei werden mögliche Verbesserungen bei der Energieeffizienz von Abfallverbrennungsanlagen berücksichtigt.

ISSN 1869-9669
ISBN 978-3-7315-0751-2

