

Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz

Resümee:

In der Abfallrahmenrichtlinie der Europäischen Union hat sich der Gesetzgeber zur fünfstufigen Abfallhierarchie bekannt. Ressourceneffizienzprogramme wie ProgRes betonen zusätzlich die Notwendigkeit wertvolle Ressourcen durch effizientes Handeln zu schonen. Insgesamt nehmen die politischen Bemühungen zu, das stoffliche Recycling bei Abfallströmen zu erhöhen. Dennoch, ganz ohne energetische Verwertung wird es indes nicht gehen. Die Anlagen zur energetischen Verwertung sind weiterhin ein notwendiger Baustein des Gesamtsystems und stehen dort zur Verfügung, wo ein stoffliches Recycling nicht mehr möglich ist. Die Auslastung der energetischen Verwertungsanlagen ist bereits seit 2015 sehr hoch. Mit dem Auslaufen der landwirtschaftlichen Klärschlammnutzung sowie dem Import von Abfällen aus anderen EU-Staaten, drängen weitere Materialmengen in Müllverbrennungsanlagen oder EBS-Kraftwerke nach Deutschland. Trotz aller Auslastung, es werden weiterhin Abfälle, die für ein Recycling oder zur Aufbereitung für einen hochwertigen EBS geeignet sind unvorbehandelt verbrannt. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz entfaltet dabei keine Lenkungswirkung und wird in seiner Umsetzung der europarechtlichen Vorgabe der Abfallrahmenrichtlinie nicht gerecht. Die Entscheidung, ob ein Abfall letztendlich verbrannt oder recycelt wird, hängt von den technischen Aufwendungen und des Preises ab.

Um hinsichtlich der Ziele der Verwertungshierarchie eine Lenkungswirkung zu entfalten, bedarf es nach Ansicht des bvse der Nutzung der Abfallstoffe entlang einer Kaskade. Letztendlich sollte es in einer modernen Rohstoffwirtschaft darum gehen, das gesamte Spektrum der Abfallbehandlung möglichst sinnvoll miteinander zu verbinden. Dazu gehört die weitgehende Getrennthaltung der Abfallstoffe bereits an der Erfassungsstelle sowie ein Vorbehandlungsgebot, um den Recyclinganteil möglichst hoch zu halten.

Bei der energetischen Verwertung der nicht zu recycelnden Materialien, sollte nach Auffassung des bvse unbedingt innerhalb der Verfahren in Bezug auf die Energieeffizienz unterschieden werden. Denn es macht einen Unterschied, wie die Materialien verbrannt werden und in welcher Form die darin gebundene Energie genutzt wird. Eine Antwort auf die tatsächliche Energieeffizienz einer Anlage gibt die in die Abfallrahmenrichtlinie eingebettete „Energieeffizienzzahl R1“ jedenfalls nicht, denn sie ist in ihrem Aufbau kein Wirkungsgrad, wie er in technischen Merkblättern definiert ist. Aussagekräftiger ist vielmehr der Nettowirkungsgrad eines Prozesses. Der Nettowirkungsgrad bezieht sich auf die verfügbare Nettoleistung, also die vorhandene Leistung nach Abzug der Leistungsaufnahme der Eigenverbraucher. Insofern die Leistung, die tatsächlich für externe Prozesse zur Verfügung steht.

Der bvse hat sich daher zu einem Konzeptvergleich entschlossen und das CUTEC Institut mit der Erarbeitung der Studie zur „Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz“ beauftragt.

Die Studie ist ein Vergleich, welcher die Mitverbrennung vorbehandelter Abfälle besonders in Zementwerken, die Monoverbrennung in EBS-Kraftwerken und die Verbrennung überwiegend unvorbehandelter Abfälle in MVA mit unterschiedlichen energetischen Wirkungsgraden gegenüberstellt. Ausgewertet wurde, wie sich die unterschiedlichen Systeme hinsichtlich Netto-Wirkungsgrad, Primärenergie- und Primärrohstoff- sowie CO₂ – Einsparung verhalten.

Bei den Energiebetrachtungen werden die verschiedenen produzierten Energieformen nicht nach ihrer Wertigkeit gewichtet. Es wird ausschließlich die Ausnutzung der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie berücksichtigt.

Verglichen wurden:

MVA und EBS-Kraftwerke mit den Fallbeispielen

- Vollverstromung
- Dampfabgabe komplett
- Kraft - / Wärmekopplung

Daneben wurden Zementwerke gesondert betrachtet.

Zusammengefasst ergibt sich ohne Wertung der unterschiedlichen Energieformen (Dampf, Wärme, Strom) für die betrachteten Anwendungsfälle folgendes Bild der durchschnittlich erzielten energetischen Wirkungsgrade:

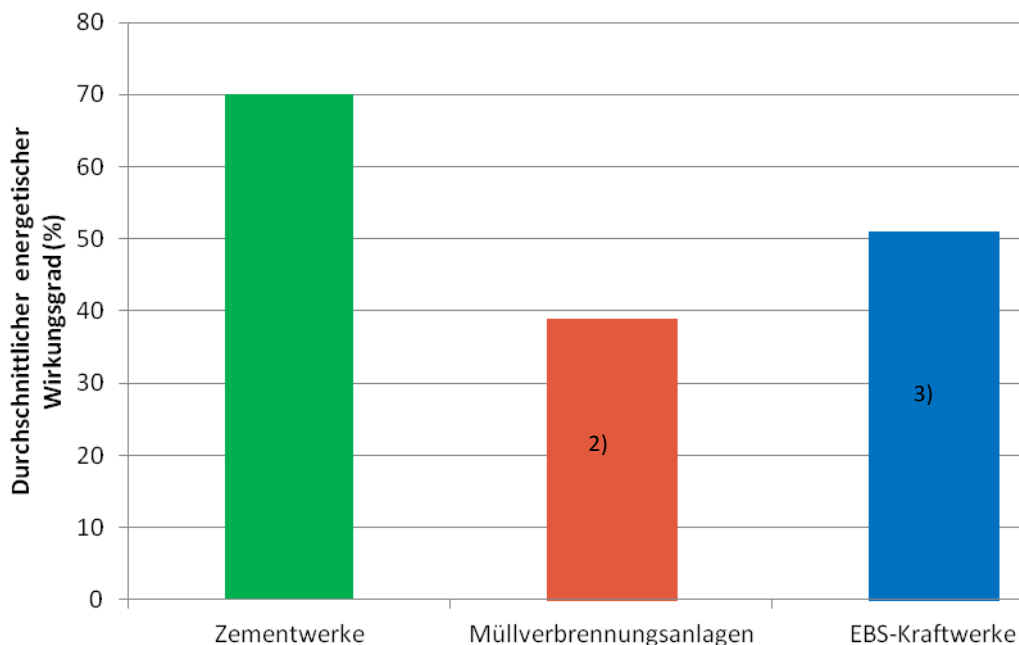


Abb 1: Durchschnittliche energetische Wirkungsgrade (Brennstoffausnutzungsgrade) beim Einsatz von EBS in verschiedenen Kraftwerkstypen und Produktionsanlagen¹⁾

Bemerkungen: ¹⁾ Daten aus öffentlich zugänglichen Quellen

²⁾ Daten aus Jahresbilanzen berechnet

³⁾ Daten teils aus Auslegungswerten, teils aus Jahresbilanzen berechnet

Fazit:

1. Zementwerke stellen die thermische Verwertung hochwertig aufbereiteter Ersatzbrennstoffe mit hohem Wirkungsgrad sicher. Durch den unmittelbaren Einsatz im Zementklinkerbrennprozess liegen die Nettowirkungsgrade bei über 70 %, genauso hoch wie beim Einsatz substituierter Primärbrennstoffe wie Braun- oder Steinkohle. Ein Alleinstellungsmerkmal stellt die stoffliche Nutzung des Ascheanteils dar, der als anfallender Sekundärrohstoff in den Zementklinker, also in das Produkt eingebunden wird. Natürliche Primärrohstoffe in der Größenordnung von 200.000 bis 250.000 t/a werden dadurch in Deutschland ersetzt. Diese Art der stofflichen Nutzung können MVA oder EBS-Kraftwerke nicht erbringen.
2. EBS-Kraftwerke dienen zur energieeffizienten Versorgung von Industriestandorten. Ihr Standort ist in der Regel an einen Industrieprozess gebunden. Ihnen genügen einfach aufbereitete Ersatzbrennstoffe, meist aus gemischten Siedlungsabfällen per MBA, MBS oder MPS oder aus geeigneten Mittelkalorikfraktionen aus Gewerbe- oder produktionsspezifischen Industrieabfällen hergestellt. Die Nettowirkungsgrade von EBS-Kraftwerken hängen stark davon ab, welche Nutzenergien produziert werden. So liegt der Nettowirkungsgrad bei Anlagen mit Vollverstromung bei lediglich ca. 20%. Bei reiner Prozessdampfabgabe aber schon bei ca. 80%. Bei Kraft-Wärmekopplung zwischen 30 und über 70%.
3. Die klassische MVA entwickelte sich in den letzten Jahren an vielen Standorten zum Energielieferanten. Auch hier gilt, der Brennstoffausnutzungsgrad hängt davon ab, welche Nutzenergie produziert wird. Durch ihren primären Zweck der Abfallentsorgung bzw. -beseitigung sind MVAs allerdings räumlich oft von ihren Energieabnehmern getrennt. Aber erst die Möglichkeit zur Abgabe von Prozessdampf oder Fernwärme über kurze Wege ermöglicht echte Wirkungsgradsteigerungen aufgrund von Kraft-Wärme Kopplung, über das Niveau der reinen Stromproduktion hinaus. Dies ist umso besser möglich, je näher die MVA zum Abnehmer liegt. So fällt das Ergebnis für die verschiedenen MVA Konzepte auch sehr unterschiedlich aus. Als reiner Entsorger mit Vollverstromung werden Nettowirkungsgrade von 12% (Altanlagen) bis über 20% (neuere Anlagen) erreicht. Bei reiner Dampfabgabe z.B. direkt an ein Kraftwerk liegt der Wirkungsgrad bei knapp 80%, bei KWK-Nutzung je nach Wärmeabgabe zwischen ca. 20 und 70%.

Abbildung 2 enthält eine Übersicht über die in die Studie eingeflossenen EBS-Kraftwerke und Müllverbrennungsanlagen. Wie vorweg beschrieben, hängt die Höhe des Gesamt-Nettowirkungsgrades vom jeweiligen Anlagenkonzept ab, dementsprechend groß ist die Spannweite. Das Gros der untersuchten Anlagen, bewegt sich mit dem jeweiligen Gesamt-Nettowirkungsgrad unterhalb von 60%. Detaillierte Aussagen zum Konzeptvergleich, sowie dem Effekt zusätzlicher CO₂-Einsparungen sind der Kurzstudie zu entnehmen.

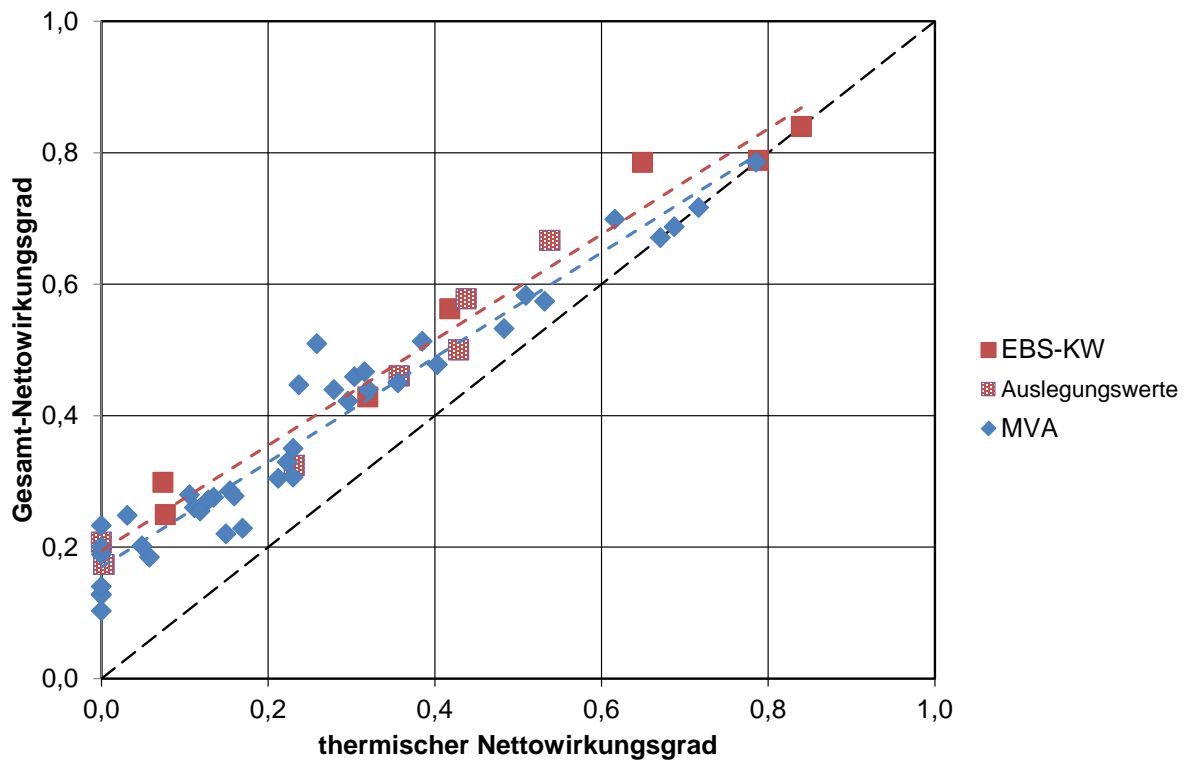


Abbildung 2: Gesamt-Nettowirkungsgrade aller Anlagen nach Höhe der thermischen Nutzung

Zusammenfassend zeigt sich, dass auch bei der energetischen Verwertung die Anwendung einer Kaskadennutzung innerhalb der möglichen Verfahren sinnvoll erscheint.

Ressourcenpolitisch betrachtet, sollten von den nicht recycelbaren Abfällen vorrangig die heizwertreichen Fraktionen abgeschieden und als Primärenergiesubstitut einer hochwertigen energetischen Verwertung zugeführt werden. Dabei stellte sich im Ergebnis der Studie die Mitverbrennung im Zementherstellungsprozess mit gleichzeitiger rohstofflicher Nutzung des Ascheanteils als besonders vorteilhaft dar.

Die dafür nicht geeigneten mittel- und niederkalorischen Abfälle sollten ihren Einsatz zur energetischen Verwertung in Kraftwerken mit möglichst hohen Nettowirkungsgraden finden.

Somit werden insgesamt in den einzelnen Anlagen möglichst hohe Einsatzraten mit einer maximalen CO₂-Einsparung realisiert.



Informationen
Ressourcen
Energie

Studie: Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz

Projektnummer: 60 3584

für:

bvse - Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.
Fränkische Straße 2
53229 Bonn

vorgelegt von:

CUTEC Institut
Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH
- Abteilung Thermische Prozesstechnik -
Leibnizstraße 21 + 23
38678 Clausthal-Zellerfeld

Clausthal-Zellerfeld, 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Leistungsumfang	5
3	Zusammenfassung	6
4	Abfälle und Sekundärbrennstoffe	9
5	Anlagen zur energetischen Verwertung von Abfällen und SBS	11
6	Bewertungskriterien	12
6.1	Wirkungsgrade	12
6.2	Primärenergieeinsparung	17
6.3	Einsparung von CO ₂ -Emissionen	17
6.4	Zusätzliche Bewertungskriterien	19
7	Ergebnisse	20
7.1	Verbrennung nicht vorbehandelter Abfälle in MVA sowie von aufbereiteten Abfällen in EBS-Kraftwerken	20
7.2	Verbrennung von Sekundärbrennstoffen in Zementwerken	25
8	Konzeptvergleich	29
9	Unterschriften	30
10	Anhang	31
10.1	Abbildungsverzeichnis	31
10.2	Tabellenverzeichnis	32
10.3	Quellenverzeichnis	33
10.4	Abkürzungsverzeichnis	41
10.5	R1-Kennzahl: „Energieeffizienz“ nach Abfallrahmenrichtlinie	42

1 Aufgabenstellung

Auf europäischer und deutscher Gesetzgebungsebene nehmen die Bemühungen zu, das stoffliche Recycling bei Abfallströmen zu erhöhen. Parallel entstehen durch die Energiewende, das Verbot der landwirtschaftlichen Klärschlammverbringung und den Import von Ersatzbrennstoffen (EBS) nach Deutschland neue Materialmengen zur energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen (MVA) und EBS-Kraftwerken (EBS-KW). Die deutschen Anlagen arbeiten daher seit 2013 mit hoher Auslastung.

Aufgrund unterschiedlicher Nutzungsmöglichkeiten der Brennstoffwärme können die energetischen Wirkungsgrade der MVA und EBS-KW sehr unterschiedlich sein. Damit einher geht die Ausstrahlung auf ökologische Faktoren.

Für aus der Vorbehandlung von Abfällen gewonnene Ersatzbrennstoffe bieten auch Zementwerke, Kohlekraftwerke und in Sonderfällen Industriefeuerungen eine hochwertige energetische Verwertung; bei den Zementwerken kommt die stoffliche Nutzung der Asche im Klinker hinzu.

Bei den verschiedenen Anlagen zur thermischen Verwertung von Abfall ist zu beachten, dass die Techniken auf unterschiedliche Qualitäten von Brennstoffen ausgelegt sind. Die klassische Müllverbrennungsanlage ist für unaufbereitete Siedlungsabfälle und ursprünglich zur Hygienisierung konzipiert. Für die mit dem Ablagerungsverbot unbehandelte Abfälle auf den Markt gekommenen EBS-Kraftwerke reichen einfach aufbereitete Abfälle aus. Hohe Anforderungen bezüglich Stückigkeit, maximaler Konzentrationen an bestimmten Elementen und Mindestheizwert stellen Kohlekraftwerke, Zement- und Kalkwerke. Daher unterscheidet die Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V. (BGS e.V.) auch in die Begriffe Heizwertreiche Fraktionen und Sekundärbrennstoffe. Letztere besitzen festgelegte Qualitäten und eine technisch anspruchsvolle Aufbereitung.

Für die erforderliche Aufbereitungsart und –tiefe zur Erzielung einer vorgegebenen Qualität des Sekundärbrennstoffes ist die Herkunft des verwendeten Abfalls von entscheidender Bedeutung. So werden produktionsspezifische Abfälle oder Gewerbeabfälle häufig bereits vorsortiert angeliefert und sind im Wesentlichen nur noch zu zerkleinern, während aus gemischten Siedlungsabfällen in einem aufwändigen Aufbereitungsverfahren heizwertreiche Fraktionen separiert werden müssen. Diese Kurzstudie befasst sich vorrangig mit den erstgenannten Produktions- und Gewerbeabfällen.

Aufgabe der vorliegenden Kurzstudie ist ein Konzeptvergleich, welcher die Mitverbrennung vorbehandelter Abfälle besonders in Zementwerken, die Monoverbrennung in EBS-Kraftwerken und die Verbrennung überwiegend unvorbehandelter Abfälle in MVA mit unterschiedlichen energetischen Wirkungsgraden gegenüberstellt. Ausgewertet wird unter Gesichtspunkten wie Netto-Wirkungsgrad, Primärenergie- und CO₂-Einsparung.

Bei den Energiebetrachtungen werden die verschiedenen produzierten Energieformen nicht nach ihrer Wertigkeit gewichtet, dass also z.B. Strom wertvoller ist als Wärme. Es wird aus-

schließlich die Ausnutzung der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie berücksichtigt.

2 Leistungsumfang

Die Leistung besteht in einer Studie, welche auf dem langjährigen Wissen und den Erfahrungen des CUTEC Instituts auf dem Gebiet der thermischen Prozesstechnik und der Abfallverbrennung aufbaut. Folgende Leistungen sind zu erbringen:

- 1.** Gegenüberstellung energetischer Nettowirkungsgrade von
 - 1.1** EBS-Mitverbrennung in Zementwerken und Industriefeuerungen
 - 1.2** EBS-Kraftwerken mit den energetischen Nutzungsarten elektrischer Strom, Fernwärme und Prozessdampf
 - 1.3** Verbrennung überwiegend unvorbehandelter Abfälle in MVA mit den energetischen Nutzungsarten elektrischer Strom, Fernwärme und Prozessdampf
- 2.** Gegenüberstellung der Primärenergieeinsparungen bei den Punkten 1.1 bis 1.3
- 3.** CO₂-Einsparungen bei den Punkten 1.1 bis 1.3

3 Zusammenfassung

Verglichen wurden zu den Themen Energie (Nettowirkungsgrade, Primärenergieeinsparung) und Einsparung von CO₂-Emissionen folgende Verbrennungsanlagen für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen:

- MVA und EBS-Kraftwerke mit den Fallbeispielen
 - Vollverstromung
 - Dampfabgabe komplett
 - Kraft-/Wärmekopplung
- Zementwerke

• Ergebnisse:

1. Zementwerk:

Bei einem Energieaustauschverhältnis von 1,0 ($H_{u,EBS} > 25 \text{ MJ/kg}$) liegt der Nettowirkungsgrad, bezieht man die Bilanzgrenze auf das Werk, bei über 70 %, genau wie bei den ersetzten Regelbrennstoffen Braun- und Steinkohle. Die Primärenergieeinsparung beträgt dann also 100%. Durch den Brennstoffeinsatz am Produktionsort des Zementklinkers entsteht automatisch eine Standortunabhängigkeit und keinerlei Effizienzverlust durch Energietransport wie bei strom- oder wärmeproduzierenden Kraftwerken.

Ein Alleinstellungsmerkmal beim Einsatz von EBS in Zementwerken ist die Schonung natürlicher Ressourcen durch die Einbindung der Asche in den Zementklinker. Rechnet man mit einem Ascheanteil von 10 bis 12 % im EBS, so ergibt sich bei einer Einsatzmenge von 2,15 bis 2,5 Mio t/a ein Ersatz an Primärrohstoffen in der Größenordnung von 200.000 bis 250.000 t/a. Unter den betrachteten thermischen Verfahren ist der EBS-Einsatz in Zementwerken das einzige thermische Verfahren, was auch eine stoffliche Verwertungskomponente enthält.

2. EBS-Kraftwerk:

Der Nettowirkungsgrad bei Vollverstromung liegt bei ca. 20 %, bei reiner Prozessdampfabgabe bei ca. 80 % und bei Kraft-Wärmekopplung zwischen 30 und über 70 %.

3. MVA:

Als reiner Entsorger mit Vollverstromung werden Nettowirkungsgrade von 12 % (Altanlagen) bis über 20 % (neuere Anlagen) erreicht. Bei reiner Dampfabgabe z.B. an ein Kraftwerk liegt der Wirkungsgrad bei knapp 80 %, bei KWK-Nutzung je nach Wärmeabgabe zwischen ca. 20 und 70 %.

Zusammengefasst ergibt sich ohne Wertung der unterschiedlichen Energieformen (Dampf, Wärme, Strom) für die vier betrachteten Anwendungsfälle folgendes Bild der durchschnittlich erzielten energetischen Wirkungsgrade, siehe Abbildung 3-1.

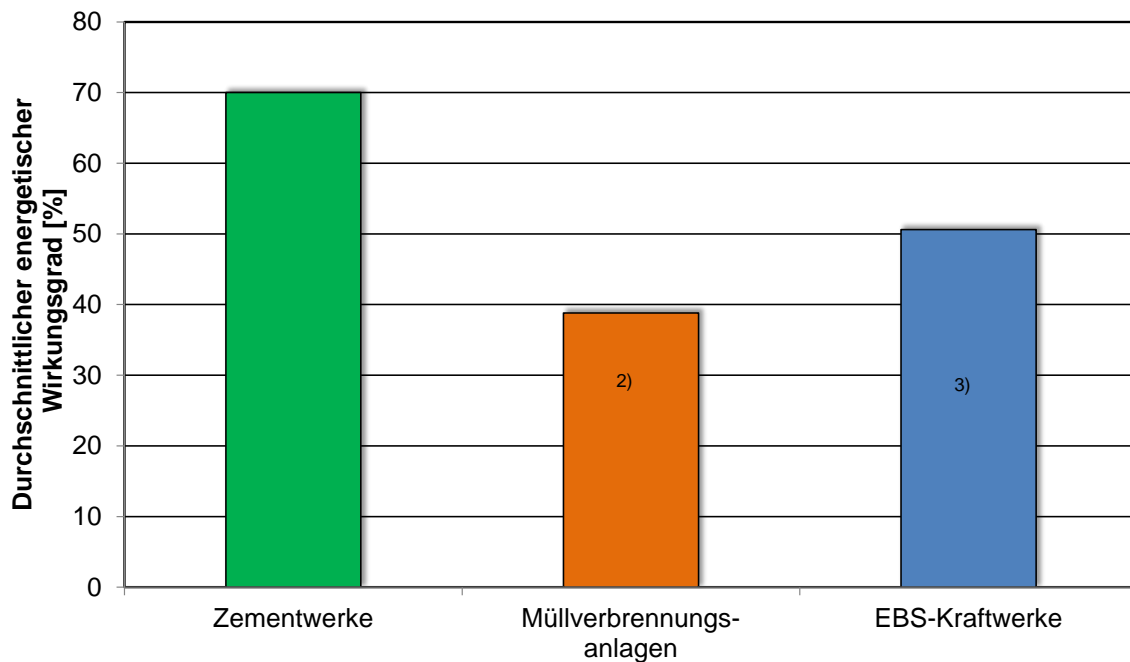


Abbildung 3-1: Durchschnittliche energetische Wirkungsgrade (Brennstoffausnutzungsgrade) beim Einsatz von EBS in verschiedenen Kraftwerkstypen und Produktionsanlagen ¹⁾

- Bemerkungen:
- ¹⁾ Daten aus öffentlich zugänglichen Quellen
 - ²⁾ Daten aus Jahresbilanzen berechnet
 - ³⁾ Daten teils aus Auslegungswerten, teils aus Jahresbilanzen berechnet

• **Fazit:**

- Zementwerke stellen die thermische Verwertung hochwertig aufbereiteter Ersatzbrennstoffe mit hohem Wirkungsgrad sicher. Hier wird nicht nur die chemisch gebundene Energie der Brennstoffe genutzt, sondern die nach Verbrennung verbleibenden Asche-komponenten als Bestandteile des Zements mit eingebunden, wodurch weniger natürliche Ressourcen eingesetzt werden müssen. Diese Art der stofflichen Nutzung können Kraftwerke (MVA oder EBS-Kraftwerke) nicht erbringen.
- EBS-Kraftwerke dienen zur energieeffizienten Versorgung von Industriestandorten. Ihnen genügen einfach aufbereitete Ersatzbrennstoffe, meist aus gemischten Siedlungsabfällen

per MBA, MBS oder MPS oder aus geeigneten Mittelkalorikfraktionen von Gewerbe- oder produktionsspezifischen Industrieabfällen hergestellt.

- Die klassische MVA entwickelte sich in den letzten Jahren an vielen Standorten zum Energielieferanten. Die Tendenz ist anhaltend. Durch ihren primären Zweck der Entsorgung besteht an den vorhandenen Standorten jedoch oft eine mangelnde Kundenkapazität für Prozessenergie oder Wärme. Der energetische Gesamtwirkungsgrad hängt sehr von der Möglichkeit zur Abgabe von Prozessdampf, Fern- oder Nahwärme ab.

4 Abfälle und Sekundärbrennstoffe

Unvorbehandelte Restabfälle werden überwiegend in MVA verbrannt. Für die Verbrennung in Zementwerken, Kohle-, Ersatzbrennstoff- und anderen Kraftwerken werden Abfälle meistens vorbehandelt und dann als Ersatzbrennstoffe (im weiteren Sinne) bezeichnet, d.h. Brennstoffe auf Abfallbasis, die Regelbrennstoffe ersetzen.

Im Rahmen dieser Studie wurden die von der Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V. (BGS e.V.) verwendeten Begriffe, welche auch in [Grundmann 2013] beschrieben sind, übernommen:

- **Ersatzbrennstoff:** Oberbegriff für Brennstoffe, die aus Abfällen hergestellt werden. Dieser Begriff umfasst Brennstoffe, die mitverbrannt oder einer Monoverbrennung (in eigens errichteten Ersatzbrennstoffkraftwerken) zugeführt werden [BGS e.V.].
- **Heizwertreiche Fraktionen:** Aus Abfällen abgetrennte Anteile bzw. Fraktionen, die auf Grund ihrer Zusammensetzung und Eigenschaften deutlich höhere Heizwerte aufweisen als das Abfallgemisch. Sie zeichnen sich durch eine relativ geringe Aufbereitungstiefe und gröbere Körnung aus. Beispiele sind heizwertreiche Fraktionen aus Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlungsanlagen oder Gewerbeabfallsortieranlagen.
- **Sekundärbrennstoffe SBS[®]:** Endkonfektionierte Brennstoffe aus produktionsspezifischen Abfällen oder Siedlungsabfällen nach weitergehender Aufbereitung zur Mitverbrennung – z.B. in Zement-, Kalk- und Kraftwerken – mit definierter Qualität [Grundmann 2013].

Unabhängig davon, ob die Brennstoffe einer Mit- oder Monoverbrennung zugeführt werden sollen, sind unter anderem die folgenden Randbedingungen einzuhalten:

- definierter Heizwert und geringer Chlorgehalt,
- definierte Korngröße sowie Schüttdichte,
- geringe Störstoffanteile,
- geringe Schwermetallgehalte (bei der Mitverbrennung),
- in ausreichender Menge und gleichbleibender Qualität verfügbar [Flamme 2006],
- definierte Zündfähigkeit und Aus-/Abbrandverhalten [Glorius 2012].

Abhängig vom Einsatzort der Ersatzbrennstoffe sind unterschiedliche Kriterien zu beachten. Beispielsweise sind in Kalkwerken sehr hohe Heizwerte und sehr geringe Aschegehalte relevant, in Zementwerken ist der Chlorgehalt deutlich begrenzt [Flamme 2007].

Die gemischten Siedlungs- und produktionsspezifischen Abfälle können in Anlagen verschiedener Typen der Behandlungstechnologie wie

- Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung (MBA),
- Mechanisch-Biologische Stabilisierung (MBS),

- Mechanisch-Physikalische Stabilisierung (MPS),
- Mechanische Aufbereitung (MA)

zum Ersatzbrennstoff aufbereitet werden.

Im Rahmen dieser Studie werden ausschließlich Ersatzbrennstoffe berücksichtigt, die aus Gewerbeabfällen oder produktionsspezifischen Industrieabfällen durch mechanische Aufbereitung (MA) hergestellt werden. Die aus gemischten Siedlungsabfällen durch MBA, MBS oder MPS aufbereiteten Ersatzbrennstoffe, die vor allem in EBS-Kraftwerken eingesetzt werden, sind nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Der spezifische elektrische Energieaufwand liegt nach Angaben der ELM Recycling GmbH & Co. KG in Bissingen / Teck für diese Fraktionen je nach Aufbereitungsaufwand in folgenden Größenordnungen:

- ca. 38 kWh/to EBS für die Verarbeitung von ausschließlich störstofffreien Vormaterialien (spezifisch separierte Produktionsabfälle, sorgfältig separierte hochkalorische Fraktionen etc.)
- ca. 40 – 43 kWh/to EBS für die Aufbereitung mit aufwändigerer Störstoffabscheidung (Windsichtung, NIR-Technik etc.)

Der größte Anteil des Energieeinsatzes entfällt dabei auf die mehrstufige Zerkleinerung auf blasfähige Korngrößen von 20 bis 30 mm. Thermische Energie zum Trocknen wird nicht eingesetzt.

In der Studie wird von einem elektrischen Energieeinsatz von 40 kWh/to EBS ausgegangen. Bei einem Heizwert des Ersatzbrennstoffs von 20 MJ/kg entspricht dies weniger als 0,8% der im Brennstoff gespeicherten Energie. Berücksichtigt man zusätzlich die bei der Stromerzeugung anfallenden Umwandlungsverluste mit einem Wirkungsgrad von 25% für EBS-Kraftwerke, läge der spezifische Energieeinsatz bei ca. 3% des Heizwertes.

5 Anlagen zur energetischen Verwertung von Abfällen und SBS

In der vorliegenden Studie werden für die energetische Verwertung von Siedlungs-, Gewerbe- und produktionsspezifischen Abfällen sowie aus ihnen hergestellter Sekundärbrennstoffe folgende Verbrennungsanlagen betrachtet: Hausmüllverbrennungsanlagen, Ersatzbrennstoff-Kraftwerke, Zementwerke und in zweiter Linie andere Industriefeuerungen, beispielsweise Hochöfen zur Stahlerzeugung oder Kalkwerke. Tabelle 5-1 zeigt für die bedeutenderen Einsatzfälle die Anzahl der jeweiligen Anlagen in Deutschland und deren Abfallinput im Jahr 2012.

Tabelle 5-1: Anzahl der Anlagen mit energetischer Nutzung von Abfällen in Deutschland [Alwast 2014], [Proplanta 2014], [VDZ 2014], [BDEW 2015], [Destatis 2014]

Art der Anlagen ¹	Anzahl der Anlagen	Input gesamt 2012 bzw. 2014 [Mio. Mg]	Nennkapazität [Mio. Mg]
Abfallverbrennungsanlagen (MVA)	68	20,0	19,6
EBS-Kraftwerke	35	5,1	5,4
Zementwerke mit Drehrohren, gesamt	45	3,1 (2014)	k.A.
- Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen		1,9 (2014)	

¹ nicht betrachtet: Anlagen zur Monoverbrennung von bestimmten Abfallfraktionen (z.B. Klärschlamm, Sonderabfälle, Biomasse) sowie die vom statistischen Bundesamt (Destatis) geführten Heizwerke mit energetischer Verwertung von Abfällen

Während in MVA überwiegend nicht vorbehandelte gemischte Siedlungsabfälle verbrannt werden, ist insbesondere für den Einsatz in industriellen Kohlefeuerungen (Zementwerke, Kraftwerke) eine zusätzliche Aufbereitung zu heizwertreichen Sekundärbrennstoffen mit höheren Qualitätsmerkmalen erforderlich. EBS-Kraftwerke verwenden hauptsächlich aufbereitete Abfälle aus gemischten Siedlungsabfällen und die Mittelkalorik aus aufbereiteten Gewerbe- und Produktionsabfällen.

Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in anderen Industriefeuerungen wird zurzeit zwar praktiziert oder getestet, jedoch sind die durchgesetzten Mengen im Vergleich zu den oben genannten Anwendungen praktisch bedeutungslos. In der Kalkindustrie beispielsweise werden weniger als 30.000 t jährlich eingesetzt. Durchgeführte Versuche in Hochöfen der Stahlindustrie haben bisher nicht zu einem nennenswerten Ersatz der üblicherweise als „Einblaskohle“ eingesetzten Fossilbrennstoffe (Öl, Kohle, Gas) geführt. Der Einsatz von hochwertigen Ersatzbrennstoffen in Kohlekraftwerken verliert zunehmend an Bedeutung.

6 Bewertungskriterien

6.1 Wirkungsgrade

Ein energetischer Wirkungsgrad, der allgemein durch das Verhältnis von einem Nutzen zu dem dazugehörigen Aufwand definiert ist, lässt sich für eine Verbrennungsanlage als Bruttogröße aus den zu- und abgeführten Energien wie folgt berechnen:

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Summe der nutzbaren produzierten Energien (Strom, Dampf, Wärme)}}{\text{Summe der eingesetzten Energien (Brennstoffenthalpie, Hilfsenergien)}}$$

(Glg. 6-1)

Je nach gewähltem Bilanzkreis, siehe Abbildung 6-1, können so für verschiedene Anlagenteile energetische Wirkungsgrade berechnet werden, z.B. der Feuerungs- oder der Kesselwirkungsgrad. Für die vorliegende Studie ist nur das Gesamtverfahren, bestehend aus thermischem Hauptverfahren, Energiewandlung und Abgasreinigung, von Interesse: siehe Gesamtanlage in Bilanzkreis Q. Der Nutzen besteht dann aus der produzierten Energie in Form von elektrischem Strom, Prozessdampf und Fernwärme. Die Enthalpien von Abgas und Reststoffen sind energetisch gesehen Verluste. Der zugehörige Aufwand besteht aus den Brennstoffenthalpien von Abfall und Zusatzbrennstoffen sowie den von außen zuzuführenden Energien an Strom, Dampf und ggf. Wärme. Die Enthalpien von Verbrennungsluft, Wasser und Hilfsstoffen sind in der Regel vernachlässigbar klein gegenüber den Brennstoffenthalpien.

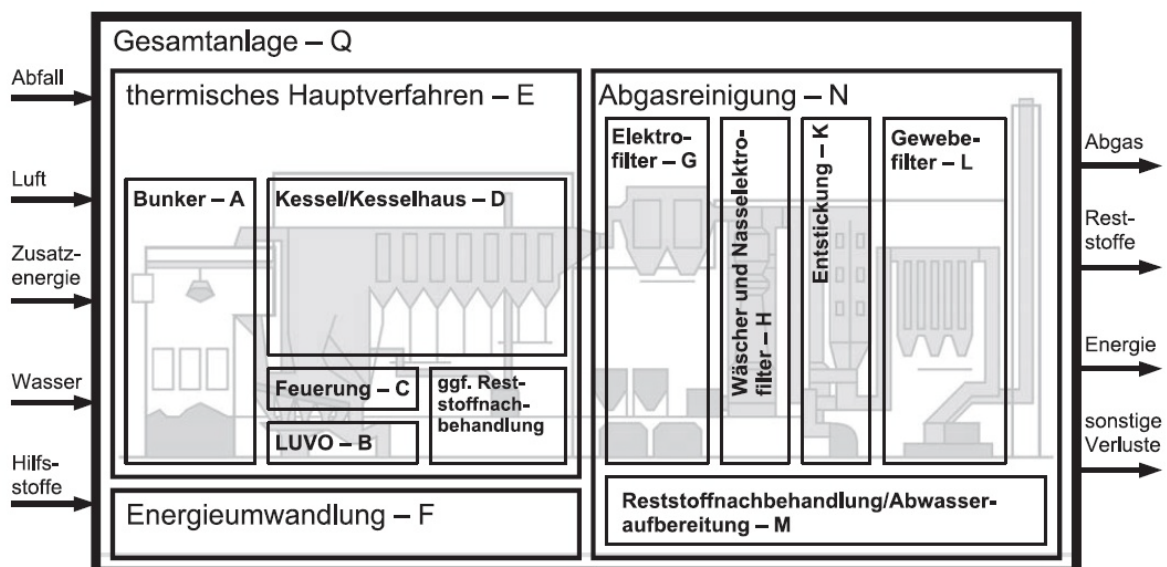


Abbildung 6-1: Beispiel für verschiedene Bilanzkreise zur Bilanzierung einer Abfallverbrennungsanlage [VDI 3460-2]

Um die Anlage ausschließlich hinsichtlich der eingesetzten Brennstoffe (Abfall und Zusatzbrennstoffe zum An- und Abfahren oder zur Temperaturerhöhung des Rauchgases) beurteilen zu können, werden die erforderlichen Zusatzenergien (Strom für Ventilatoren etc., Dampf für Luftvorwärmung und Abgasreinigung, Wärme für Gebäudeheizung) durch rechnerische Rückführung wertgleicher Beträge aus den Produktenergien eliminiert, siehe Abbildung 6-2, Bilanzkreis R. Dies ist nur für den Fremdenergiebezug erforderlich, die Eigenverbräuche von selbst produzierten Produktenergien sind üblicherweise bereits in Bilanzkreis Q berücksichtigt.

Die übrig bleibenden austretenden Energien sind Netto-Zielenergien. Mit ihnen lassen sich Netto-Anlagenwirkungsgrade berechnen.

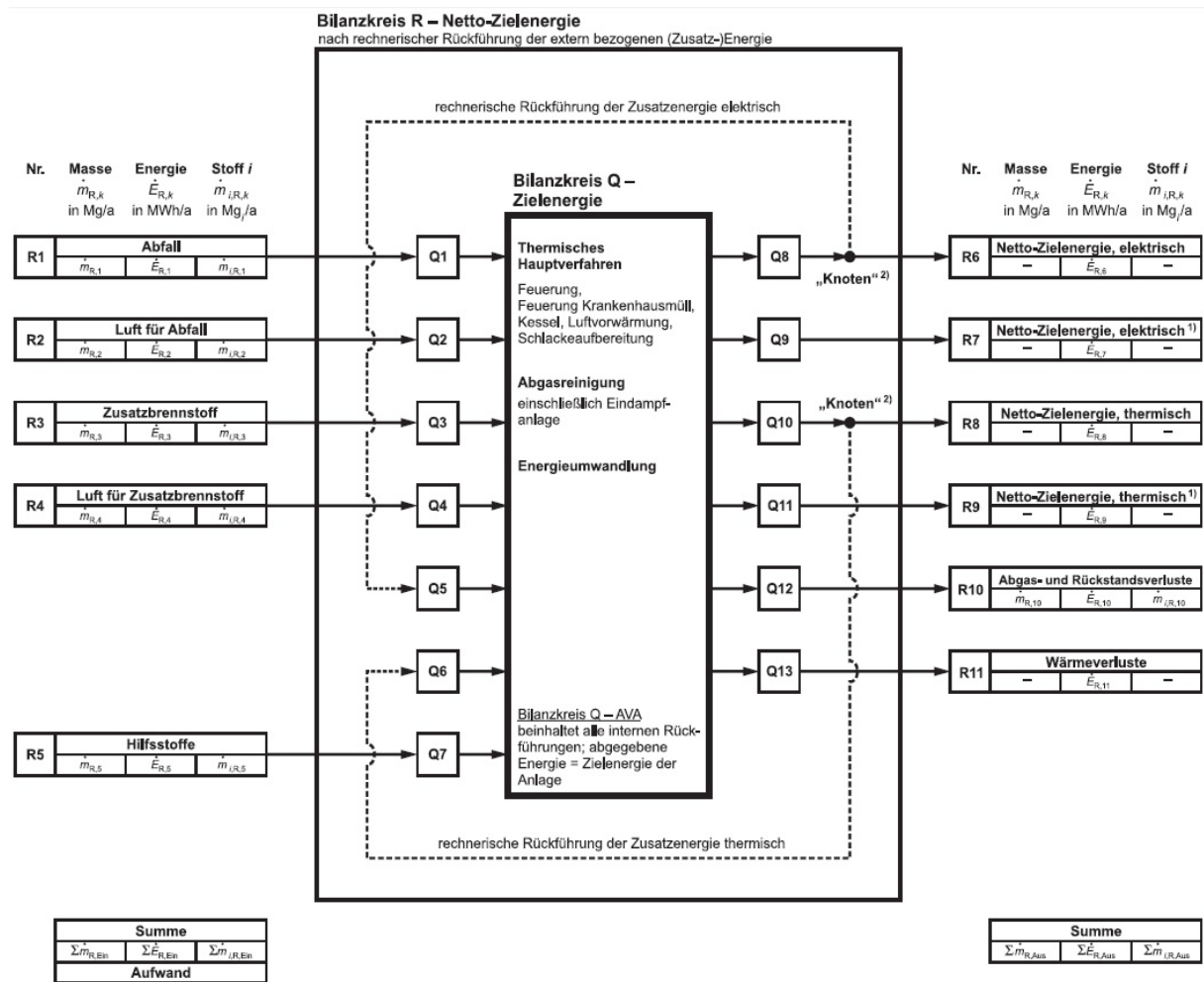


Abbildung 6-2: Beispiel eines vollständigen Bilanzschemas zur Berechnung des Nettowirkungsgrades nach VDI 3460 Blatt 2 mit bilanztechnischer Rückführung von elektrischer und thermischer Zusatzenergie

Eine noch detailliertere Betrachtung mittels rechnerischen Ersatzes von Primärenergieaufwand für die Herstellung von Hilfsstoffen (z.B. Sauerstoff, Zusatzstoffe für die Abgasreinigung, nicht

selbst erzeugter elektrischer Strom), wie sie in Form von Netto-Primärwirkungsgraden in VDI 3460 Blatt 2 dargestellt ist, wird hier nicht durchgeführt. Hierfür fehlen meistens belastbare Daten.

Abbildung 6-3 zeigt ein Beispiel für das hier verwendete vereinfachte Energiebilanzschema mit den Inputgrößen Abfall und Zusatzbrennstoff und den Netto-Zielenergien elektrischer Strom, Fernwärme und Prozessdampf, jeweils nach Abzug der Eigenverbräuche und Fremdenergiebezüge.

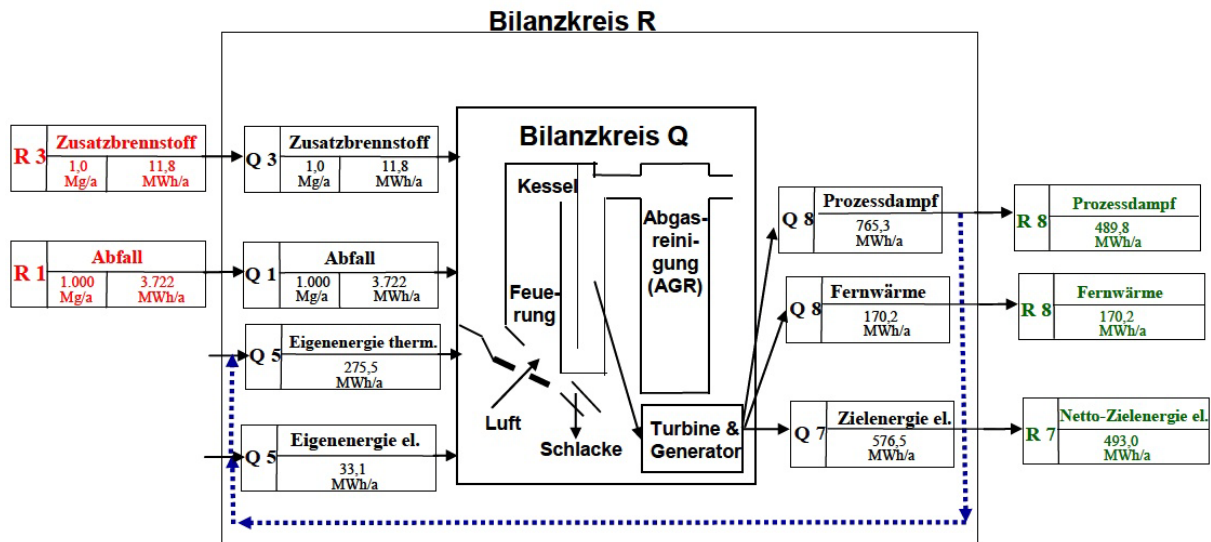


Abbildung 6-3: Beispiel eines vereinfachten Bilanzkreises zur Berechnung des Nettowirkungsgrades eines EBS-KW mit Stromerzeugung, Prozessdampf- und Fernwärmeabgabe [Sachsen 2009]

Als Netto-Anlagenwirkungsgrad der betrachteten Anlage ergibt sich nach rechnerischer Rückführung der eingesetzten elektrischen und thermischen Zusatzenergien innerhalb des Bilanzkreises R:

$$\eta_{\text{netto,Anlage}} = \frac{R7+ER8}{R1+R3} * 100\% \quad (\text{Glg. 6-2})$$

- mit R1: Energieinhalt des eingesetzten Abfalls
- R3: Energieinhalt der eingesetzten Zusatzbrennstoffe
- R7: Netto-Zielenergie elektrisch (R7 = Q7 – Q5_{el}: produzierter Strom - Eigenverbrauch)
- ΣR8: Netto-Zielenergie thermisch (ΣR8 = Q8_{PD}+Q8_{FW} – Q5_{therm}: produzierter Prozessdampf + produzierte Fernwärme – Dampf-/Wärme-Eigenverbrauch)

Als *thermischer Netto-Anlagenwirkungsgrad* werden die exportierten Energiearten Prozessdampf und Wärme ($\Sigma R8$), bezogen auf den Nettoenergieinput aus Abfall (R1) und Zusatzbrennstoff (R3), definiert:

$$\eta_{\text{netto,therm.,Anlage}} = \frac{\Sigma R8}{R1+R3} * 100\% \quad (\text{Glg. 6-3})$$

Vom Energieoutput sind dabei die jeweiligen Eigenenergieverbräuche von Prozessdampf und Wärme abgezogen.

Entsprechend wird der *elektrische Netto-Anlagenwirkungsgrad* gebildet:

$$\eta_{\text{netto,elektr.,Anlage}} = \frac{R7}{R1+R3} * 100\% \quad (\text{Glg. 6-4})$$

Die in den Gleichungen 6-3 und 6-4 definierten Nettowirkungsgrade berücksichtigen nicht die unterschiedlichen Wertigkeiten von thermischer und elektrischer Energie. Letztere lässt sich beliebig in andere Energieformen konvertieren, beispielsweise in mechanische Energie zum Antrieb von Maschinen. Dies ist mit thermischer Energie nicht bzw. nur zum Teil möglich. Dieser Anteil von frei konvertierbarer Energie wird „Exergie“ genannt und ist vom angewendeten Umwandlungsprozess abhängig. Vereinfachend kann man von einem Idealprozess, dem sog. Carnotprozess, ausgehen, wobei der thermodynamisch maximal mögliche Exergieanteil bestimmt wird [VDI 3925-1]. Für die Berechnung des Carnot-Wirkungsgrades genügt die Kenntnis des Temperaturniveaus der thermischen Energie und der Umgebungstemperatur des Prozesses aus:

$$\eta_{\text{Carnot}} = \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{Wärme}}}\right) \quad (\text{Glg. 6-5})$$

- η_{Carnot} : Carnot-Wirkungsgrad oder Carnotfaktor
- T_0 : Umgebungstemperatur des Prozesses in K
- $T_{\text{Wärme}}$: Temperatur, bei der die thermische Energie verfügbar ist, in K

Beispielsweise ergibt sich für eine MVA mit Fernwärmeauskopplung bei 2,3 bar/125 °C aus einer Entnahme-Kondensationsturbine ein Carnotfaktor für die Fernwärme von 0,25 (Umgebungstemperatur = 25 °C). Also kann man höchstens 25% dieser thermischen Energie in Exergie umwandeln. Wurden nach den Gleichungen 6-3 und 6-4 Nettowirkungsgrade von $\eta_{\text{therm}} = 21,2\%$ und $\eta_{\text{elektr.}} = 9,2\%$, also $\eta_{\text{gesamt}} = 30,4\%$, berechnet, verbleibt nach Berücksichtigung von Gleichung 6-5 ein exergetischer Nettowirkungsgrad der thermischen Energie von $\eta_{\text{therm,Exergie}} = 5,3\%$, also ein exergetischer Gesamt-Nettowirkungsgrad von elektrischer und thermischer Energie von $\eta_{\text{gesamt,Exergie}} = 14,5\%$.

Wird die thermische Energie auf einem höheren Temperaturniveau geliefert, beispielsweise als Prozessdampf für eine Papierfabrik mit 8 bar/180 °C, erhöht sich der Carnotfaktor entsprechend Glg. 6-5 auf 35%.

Mit diesem Verfahren der exergetischen Betrachtung könnten die diversen Verbrennungsanlagen mit unterschiedlicher Nutzenergieverteilung besser miteinander verglichen werden als mit der rein energetischen Betrachtung. Allerdings fehlen in der Datenbasis meistens die Temperaturniveaus der abgegebenen Wärme bzw. des Dampfes. Daher wird im Folgenden eine ausschließlich energetische Bewertung vorgenommen und der Vergleich unterschiedlicher Anlagen auf solche mit ähnlicher Nutzenergieverteilung beschränkt. Diese Vorgehensweise hat durchaus seine Berechtigung, da nur die tatsächlich exportierte thermische Energie (Dampf, Wärme) berücksichtigt wird, also auch ein Abnehmer vorhanden ist. Die ermittelten Gesamt-Nettowirkungsgrade können auch als Brennstoffausnutzungsgrad bezeichnet werden, also dem Anteil der genutzten Energie von der im Brennstoff chemisch gebundenen Energie.

Für Abfallbehandlungssysteme, die beispielsweise gemäß Abbildung 6-4 aus einem Abfallvorbehandlungsverfahren und einem energetischen Verwertungsverfahren bestehen (z.B. MBA + EBS-Kraftwerk), muss für die Berechnung eines Nettowirkungsgrades, der mit direkt Abfall verbrennenden MVA vergleichbar ist, normalerweise die gesamte Prozesskette berücksichtigt werden. Dazu gehören im genannten Beispiel der Fremdenergiebedarf der Abfallvorbehandlung, der reduzierte Massenstrom der heizwertreichen Fraktion, die zur energetischen Verwertung gelangt, eventuelle Zusatzaufwendungen für die aussortierte heizwertarme Fraktion (z.B. Nachbehandlung in MVA) sowie der Nutzen für aussortierte Wertstoffe.

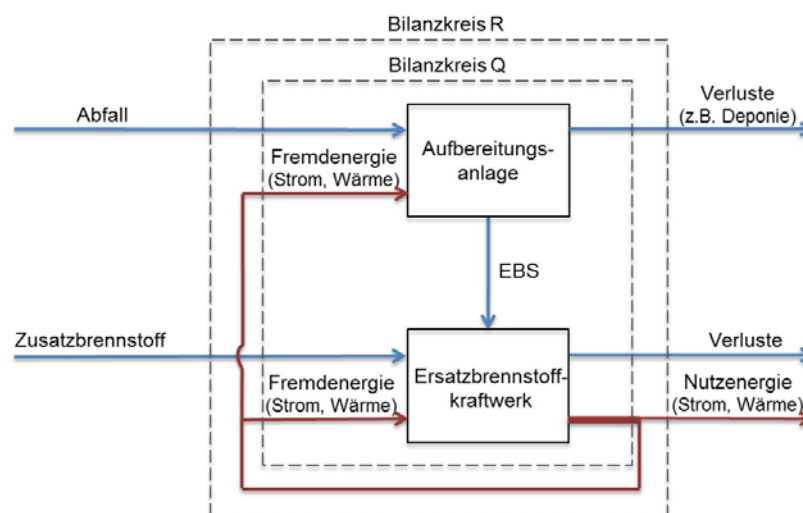


Abbildung 6-4: Schema zur Berechnung des Nettowirkungsgrades von Abfallbehandlungssystemen

Im Rahmen der vorliegenden Studie wird zunächst auf diese umfassendere Betrachtung von Prozessketten verzichtet, weil die dafür erforderliche vollständige Datenbasis der Abfallvorbehandlung einzelfallspezifisch ermittelt werden müsste. Insbesondere wären verschiedene

Aufbereitungsvarianten mit unterschiedlicher Aufbereitungstiefe (z.B. erforderliche Trocknung bei gemischten Siedlungsabfällen, die jedoch bei produktionsspezifischen Abfällen meistens entfallen kann) zu betrachten.

6.2 Primärenergieeinsparung

Die Einsparung von Primärenergie (z.B. beim Ersatz von Braun- oder Steinkohle durch SBS) ist als Beurteilungskriterium innerhalb dieser Studie bei Kohlekraftwerken und Zementwerken relevant. Sie entspricht der Brennstoffenthalpie der ersetzten Regelbrennstoffmasse, die im Kraftwerksprozess gleich der Brennstoffenthalpie der Ersatzbrennstoffmasse ist, sofern man den Primärenergieaufwand zur Herstellung des Ersatzbrennstoffes vernachlässigt.

$$\Delta H_{\text{primär}} = \Delta m_{\text{RBS}} \cdot h_{\text{u,RBS}} = m_{\text{EBS}} \cdot h_{\text{u,EBS}} \quad (\text{Glg. 6-6})$$

mit:

$\Delta H_{\text{primär}}$: Primärenergieeinsparung

Δm_{RBS} : ersetzte Menge des Regelbrennstoffs

$h_{\text{u,RBS}}$: Heizwert des Regelbrennstoffs

m_{EBS} : Menge des Ersatzbrennstoffs

$h_{\text{u,EBS}}$: Heizwert des Ersatzbrennstoffs

Bei Industriefeuerungen mit einem feststehenden erforderlichen Temperaturniveau des Verbrennungsgases (z.B. Stoffumwandlung im Klinkerbrennprozess eines Zementwerks) ist ggf. ein Energieaustauschverhältnis mit zu berücksichtigen. Dieses ergibt sich aus den Forderungen nach der vorgegebenen Guttemperatur bei gleichbleibend übertragenem Wärmestrom (Ofenleistung), d.h. in guter Näherung auch gleicher Verbrennungs- bzw. Bilanztemperatur des Abgases. Infolge der unterschiedlichen Heizwerte von Regel- und Ersatzbrennstoff differieren auch deren kalorische Verbrennungstemperaturen und damit die erreichbare maximale Prozesstemperatur bei vorgegebenem zu übertragenden Wärmestrom. Sofern diese differierenden Verbrennungstemperaturen nicht durch andere Maßnahmen wie z.B. Absenkung der Luftzahl oder Verbrennungsluftvorwärmung ausgeglichen werden können, muss dies durch einen entsprechenden Zusatz an Energiezufuhr, also durch höhere Brennstoffzufuhr erfolgen.

6.3 Einsparung von CO₂-Emissionen

Für die Aufstellung einer vollständigen Klimabilanz ist normalerweise eine Ökobilanz zu erstellen. Für die vorliegende Kurzstudie wird der einfachere Weg der Einsparung von CO₂-

Emissionen gegenüber einem bisher praktizierten Vergleichsfall beschriften. Als Beispiel möge die Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen im Vergleich zur Verbrennung von Steinkohle in einem Kohlekraftwerk dienen. Beide Brennstoffe enthalten einen Anteil von fossilem Kohlenstoff, aus dem sich die einsatzenergiebezogenen CO₂-Emissionen nach [VDI 3460-2] wie folgt berechnen lassen:

$$\varepsilon_{e,CO_2,Q} = \frac{\dot{m}_{CO_2,Q,12}}{\sum \dot{E}_{Q,Ein}} = \frac{\dot{m}_{C,Q,12} \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_C}}{\sum \dot{E}_{Q,Ein}} \quad (\text{Glg. 6-7})$$

Durch Multiplikation der Differenz dieser beiden spezifischen Werte von klimawirksamen CO₂-Emissionen für Steinkohle und Ersatzbrennstoff mit der Brennstoffenthalpie des ersetzten Brennstoffs Steinkohle ergibt sich die Gesamt-CO₂-Einsparung. In Abbildung 6-5 sind die biogenen und fossilen einsatzenergiebezogenen CO₂-Emissionen diverser Abfallfraktionen dargestellt, die sich teilweise auch in den verschiedenen Ersatz- oder Sekundärbrennstoffen wiederfinden. Die Anteile aus Papier oder Holz sind beispielsweise rein biogenen, Kunststoffe weitgehend fossilen Ursprungs mit jeweils unterschiedlichen Kohlenstoffanteilen zwischen ca. 20 bis 50 Ma.-%.

Bemerkenswert ist, dass die heizwertreichen Kunst- und Verbundstoffe fast ausschließlich fossiles C beinhalten und ihre einsatzenergiebezogenen CO₂-Emissionen in der Größenordnung von Heizöl EL oder Erdgas liegen, also bei ca. 0,06 bis 0,07 t CO₂/GJ. Stein- und Braunkohle liegen erwartungsgemäß bezüglich dieses Kennwertes im obersten Bereich von 0,09 bis 0,11 t CO₂/GJ.

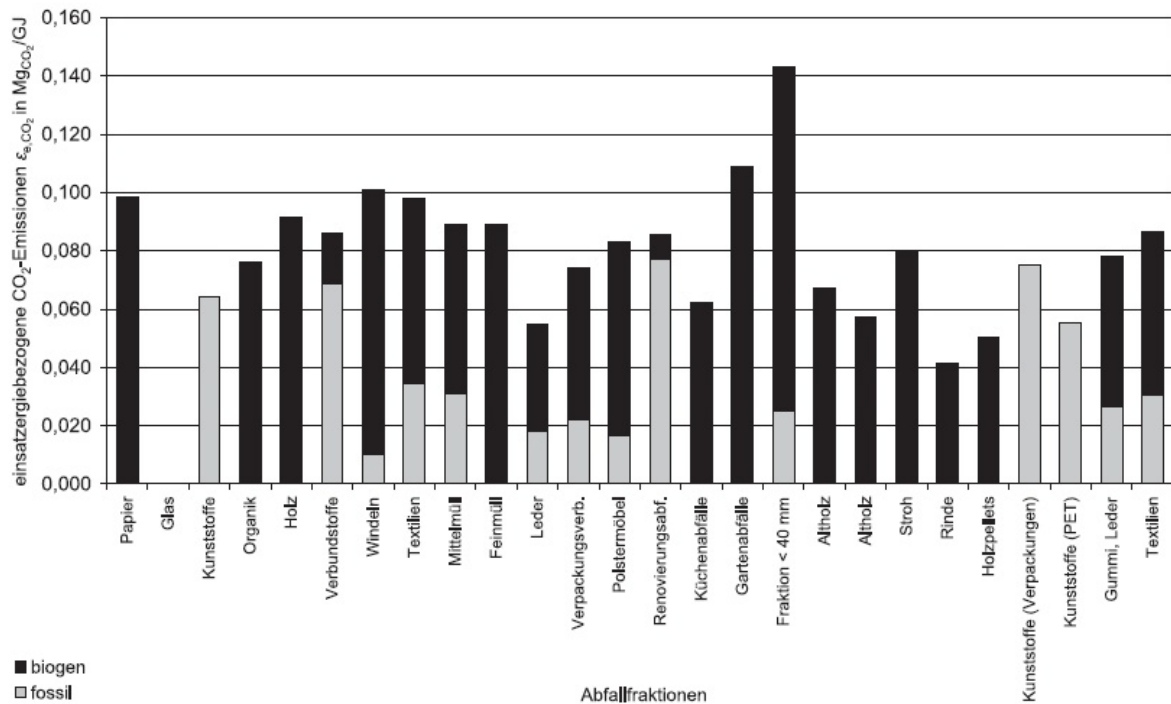


Abbildung 6-5: Biogene und fossile einsatzenergiebezogene CO₂-Emissionen diverser Abfallfraktionen [VDI 3460-2]

6.4 Zusätzliche Bewertungskriterien

Weitergehende Betrachtungen zur Energieeffizienz, welche die beim Nutzer ankommende Nettoendenergie zugrunde legen, also Übertragungs- oder Leitungsverluste mit berücksichtigen, werden hier nicht vorgenommen. Diese Verluste hängen linear von der Entfernung zwischen Energieproduktions- und Energieverbrauchsstätte ab, was sowohl für die Elektrizität als auch die Wärme gilt. Die verbrauchernahe Errichtung von Kraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung entweder im urbanen Gebiet oder besser noch in Industrieparks oder bei Großbetrieben mit hohem Energieverbrauch ist deshalb vom Gesichtspunkt der Energiebereitstellung gesehen stets vorteilhafter als Standorte, die zur Vermeidung langer Transportwege nahe der Brennstoffgewinnung liegen (z.B. Braunkohletagebaue). Diesen Vorteil vermögen kleinere Industriekraftwerke, wie sie beispielsweise in jüngerer Zeit als EBS-Kraftwerke errichtet wurden, eher zu nutzen als Großkraftwerke, die die Grundlast des Stromnetzes sichern sollen.

7 Ergebnisse

Die hier zu untersuchenden diversen Einsatzmöglichkeiten von nicht vorbehandeltem Müll, EBS oder SBS werden mit den o.g. Bewertungskriterien wie folgt miteinander verglichen:

- Müllverbrennungsanlagen und EBS-Kraftwerke anhand des Netto-Anlagenwirkungsgrades,
- Einsatz von EBS in Zementwerken anhand der Primärenergieeinsparung,
- alle betrachteten Fälle anhand der CO₂-Einsparung.

7.1 *Verbrennung nicht vorbehandelter Abfälle in MVA sowie von aufbereiteten Abfällen in EBS-Kraftwerken*

Ziel der Studie ist u.a. ein energetischer Vergleich des Einsatzes von nicht vorbehandeltem Müll in MVA und durch Aufbereitung hergestellten Ersatzbrennstoffen in EBS-Kraftwerken. Dazu wurden von insgesamt 67 MVA und 31 EBS-KW öffentlich verfügbare Daten recherchiert [ITAD 2015, Thiel 2013], wovon bei 41 MVA und 7 EBS-KW durch Auswertung der Jahresbilanzen für das Jahr 2014 eine vollständige Datenbasis für eine Auswertung zur Berechnung der Nettowirkungsgrade ermittelt werden konnte. Für 7 weitere EBS-KW sind die unvollständigen Daten durch Auslegungswerte ergänzt worden.

Weil diese Verbrennungsanlagen verschiedene Arten von Nutzenergien (Strom, Dampf, Wärme) produzieren, die thermodynamisch betrachtet unterschiedliche Wertigkeiten aufweisen, ist ein direkter Vergleich nur von solchen Anlagen zulässig, die die gleiche Nutzenergieverteilung aufweisen. Dies ist praktisch nur für ausschließlich Strom und ausschließlich Dampf bzw. Wärme produzierende Anlagen möglich. Bei in Kraft-Wärme-Kopplung betriebenen Anlagen kommen sehr unterschiedliche Verteilungen der Nutzenergiearten vor, weshalb ein Vergleich anhand von Nettowirkungsgraden zunächst schwer fällt.

Deshalb wurde in Abbildung 7-1 eine Darstellung mit einer Differenzierung der KWK-Nutzung gewählt. Hier ist der Gesamt-Nettoanlagenwirkungsgrad (Berücksichtigung aller exportierten Energiearten, also Strom, Dampf und Wärme) über dem thermischen Nettowirkungsgrad (nur Berücksichtigung von exportierten thermischen Energiearten, also Dampf und Wärme) aufgetragen. Ist letztgenannter Wirkungsgrad gleich Null, liegt ausschließlicher Stromexport vor. Sind Gesamt- und thermischer Nettowirkungsgrad gleich (Werte liegen auf der Winkelhalbierenden) findet kein Stromexport statt.

Ausschließlich Dampf bzw. Wärme produzierende Anlagen müssen ihren Eigenstrombedarf importieren. Dies würde bei einer standardisierten Auswertung gemäß Abschnitt 6.1 zu negativen elektrischen Nettowirkungsgraden führen. Andererseits sind bei diesen Anlagen sehr hohe thermische Wirkungsgrade bis nahe dem Kesselwirkungsgrad zu verzeichnen, da außer dem Abgasverlust sonst kaum Umwandlungs- oder Wärmeverluste auftreten. Damit diese Verbrennungsanlagen mit denen verglichen werden können, die ihren selbst verbrauchten Strom auch

selbst mit entsprechenden Umwandlungsverlusten produzieren, wird hier von der konservativen Annahme ausgegangen, dass dieser Strom mit einem Wirkungsgrad von 20% aus der vorhandenen thermischen Energie hypothetisch erzeugt wird. Das heißt, dass von dem nach Abschnitt 6.1 berechneten thermischen Wirkungsgrad der fünffache Betrag des negativen elektrischen Wirkungsgrads subtrahiert wird.

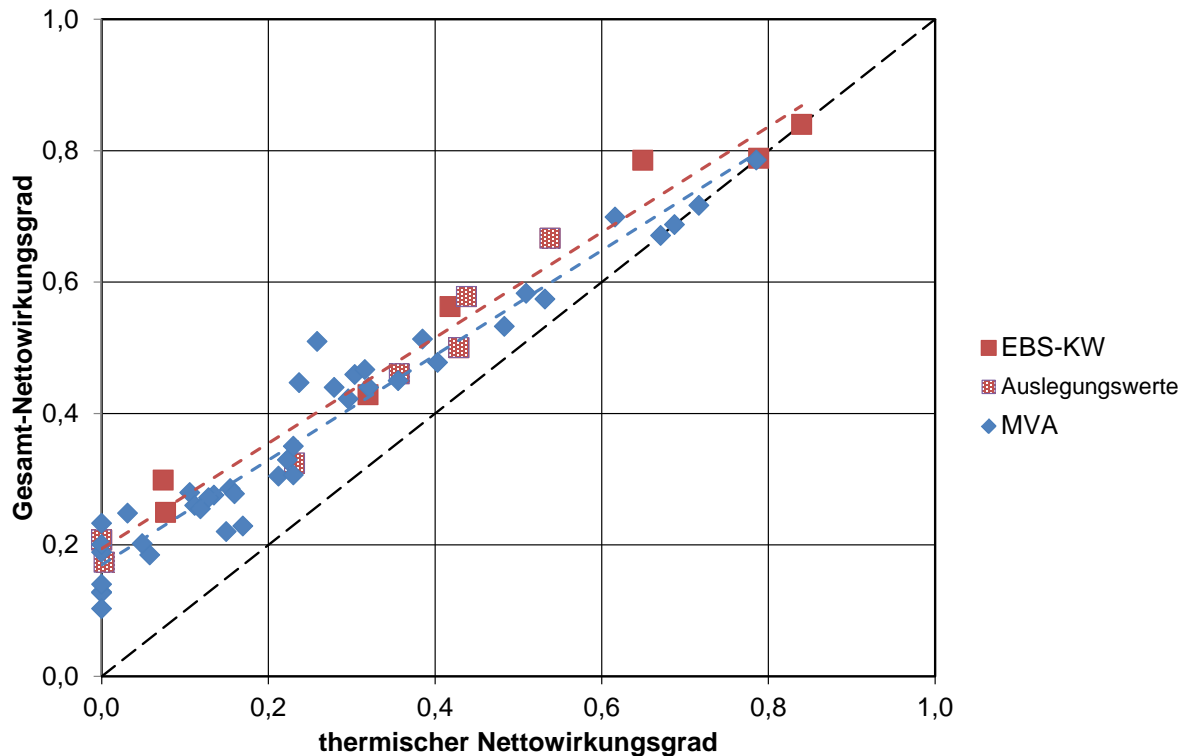


Abbildung 7-1: Gesamt-Nettowirkungsgrade aller Anlagen nach Höhe der thermischen Nutzung

Neben der teils erheblichen Streuung der Ergebnisse, insbesondere im Bereich hoher Stromerzeugung, sind nun die Unterschiede zwischen MVA und EBS-Kraftwerken sichtbar. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 7-1 zusätzlich Ausgleichsgeraden für die aufgetragenen Punkte der MVA und EBS-Kraftwerke eingezeichnet. Danach würde sich für die untersuchten EBS-Kraftwerke ein kleiner Vorteil gegenüber Müllverbrennungsanlagen im Nettowirkungsgrad ergeben. Dies ist durch die unterschiedlichen primären Geschäftszwecke auch verständlich: Das Gros der MVA wurde zur Entsorgung gebaut; die EBS-Kraftwerke zur Energieversorgung v.a. von Industrieanlagen.

Für ausschließlich Strom produzierende Abfallverbrennungsanlagen (thermischer Nettowirkungsgrad = 0) sind in Abbildung 7-1 sechs MVA erfasst. Die drei mit sehr niedrigem Gesamt-Nettowirkungsgrad von 10-15% sind alten Anlagen (größtenteils in den 1960er und -70er Jahren errichtet) zuzuordnen. Modernere MVA erreichen 19-23%. Die beiden berücksichtigten ausschließlich Strom produzierenden EBS-Kraftwerke weisen Nettowirkungsgrade von ca. 20% auf, also ähnlich denen von modernen MVA.

Das Ergebnis erscheint plausibel, auch wenn die Anzahl der berücksichtigten EBS-Kraftwerke etwas gering ist. Die anlagentechnischen Unterschiede zwischen MVA und EBS-Kraftwerken sind nicht so groß, dass bei vergleichbaren Randbedingungen wesentlich differierende Effizienzen der Dampf- und Stromproduktion zu erwarten wären. Beide Anlagentypen sind auf die Verbrennung von Siedlungsabfällen ausgelegt und nach 17. BImSchV genehmigt. Die Dampfparameter der Kessel und die Intensität der Rauchgasreinigung sind auf ähnlichem Niveau. Wenn die Möglichkeiten zur Nutzung von thermischer Energie ebenfalls gleich sind, sollten sich auch die Nettowirkungsgrade nicht erheblich unterscheiden. Dies gilt insbesondere für Anlagen neueren Datums. Vor den 1990er Jahren errichtete MVA waren hauptsächlich Entsorgungs- und noch nicht Verwertungsanlagen, weshalb ältere MVA mit deutlich geringeren Wirkungsgraden arbeiten.

Um diese Aussage zu belegen, wurden die Daten der berücksichtigten Anlagen nach Altersgruppen bezüglich der Erstinbetriebnahme differenziert. Alle 14 EBS-Kraftwerke wurden nach dem Jahr 2007 errichtet, während die MVA in zwei Gruppen eingeteilt sind:

- MVA der 4. Generation (Gen.4): Seit dem Jahr 2000 errichtet, d.h. im Vergleich mit MVA der 3. Generation mit apparatetechnisch vereinfachter Abgasreinigung ausgestattet und im Wirkungsgrad gesteigert.
- MVA der 3. Generation (Gen.3): Vor dem Jahr 2000 errichtet, vorwiegend ab 1990. Im Vergleich mit älteren Anlagen mit verbesserter Feuerungstechnik und komplexer Abgasreinigung ausgestattet.

Die Anzahlverteilung der so gebildeten Altersgruppen auf die verschiedenen Nutzenergiearten bzw. -kombinationen ist in Tabelle 7-1 dargestellt.

Tabelle 7-1: Anzahl der betrachteten MVA und EBS-Kraftwerke, differenziert nach Alter und Nutzenergiekombination

Nutzenergiearten	MVA Gen.4 (ab 2000)	MVA Gen.3 (vor 2000)	EBS-Kraftwerke
Strom (S)	4	3	2
Dampf (D)		3	2
Wärme (W)		1	
S+W	4	20	
S+D		1	7
S+D+W		5	3

Von diesen Gruppen von Anlagen mit ähnlichem Alter und mit gleichen Nutzenergiekombinationen wurden nun mittlere Nettowirkungsgrade berechnet, und zwar gewichtet mit den Anlagenkapazitäten (Istwerte der Abfallenthalpie), damit sehr kleine Verbrennungsanlagen das Ergebnis nicht überproportional beeinflussen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-2 für MVA und in Abbildung 7-3 für EBS-Kraftwerke grafisch dargestellt.

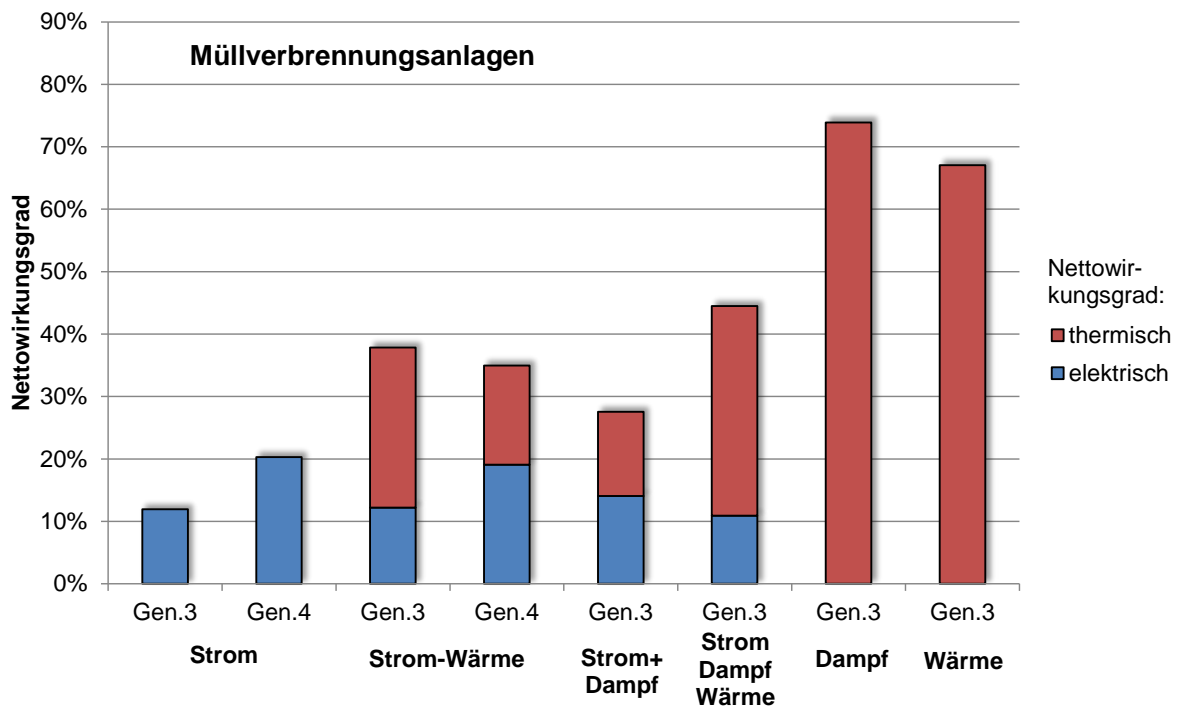


Abbildung 7-2: Durchschnittliche Nettowirkungsgrade von Müllverbrennungsanlagen der 3. (vor 2000 errichtet) und 4. Generation (ab 2000 errichtet), differenziert nach Nutzenergiekombinationen

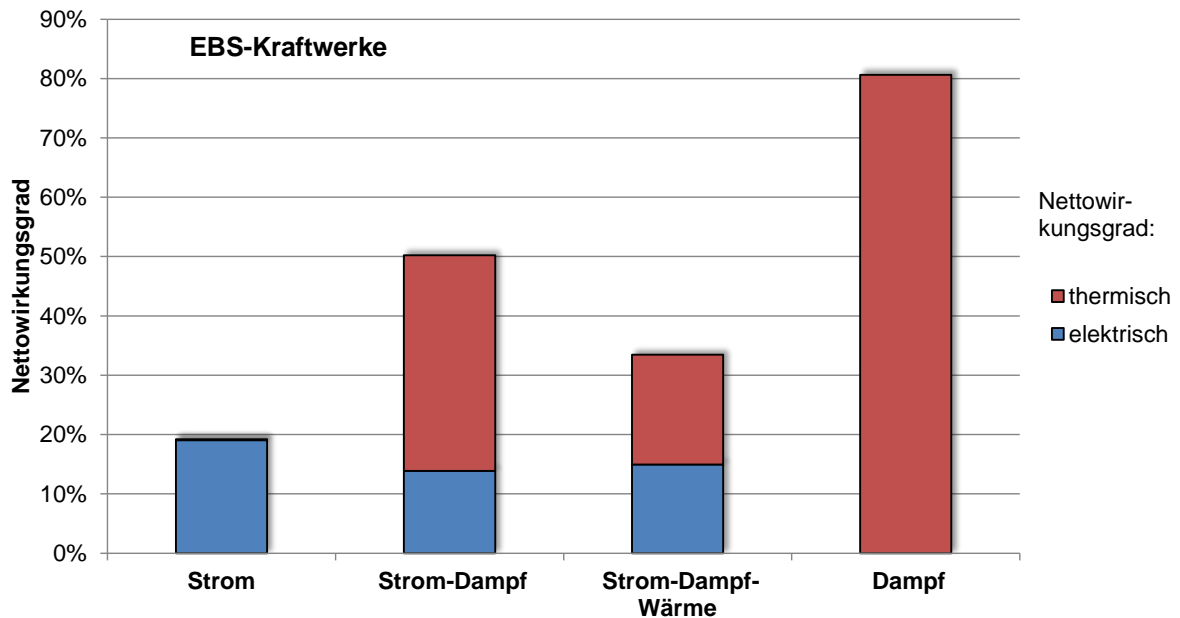


Abbildung 7-3: Durchschnittliche Nettowirkungsgrade von EBS-Kraftwerken (alle nach 2000 errichtet), differenziert nach Nutzenergiekombinationen

Der Vergleich von älteren MVA der 3. Generation mit neueren der 4. Generation in Abbildung 7-2 bestätigt für die reinen Stromerzeuger die oben getätigte Aussage des signifikant höheren Wirkungsgrades der neueren MVA. Dieser liegt mit gut 20% in der gleichen Größenordnung der betrachteten EBS-Kraftwerke mit reiner Stromerzeugung mit knapp 20%. Die älteren MVA der 3. Generation erreichen im Mittel einen Wirkungsgrad von nur ca. 12%.

Eine ähnliche Aussage erlaubt der Vergleich von MVA der 3. und 4. Generation in Abbildung 7-1 für die Strom und Wärme produzierenden Anlagen. Zwar ist der Gesamt-Nettowirkungsgrad der älteren MVA etwas größer, allerdings nur aufgrund der deutlich höheren Wärmeabgabe – also abhängig von Standortvorteilen, denn für die Wärme benötigt man geeignete Abnehmer. Hinsichtlich der Stromproduktion sind die neueren MVA auch hier wesentlich im Vorteil: im Mittel 19% gegenüber 12% bei älteren Anlagen.

Bei den Kombinationen Strom+Dampf oder Strom+Dampf+Wärme zeigen sich die thermodynamischen Grenzen des Dampfkraftprozesses: je mehr Dampf oder Wärme abgegeben werden, desto weniger Strom kann man produzieren, denn dieser Dampf wird vor oder in der Turbine abgezapft und steht dann nicht oder nur teilweise für deren Antrieb zur Verfügung.

Der Vergleich zwischen den MVA in Abbildung 7-2 und den EBS-Kraftwerken in Abbildung 7-3 gestaltet sich deshalb für diese Kombinationen der Nutzenergien schwierig. Zwar liegt der Gesamt-Nettowirkungsgrad für die Strom und Dampf produzierenden EBS-Kraftwerke deutlich höher als der der einzig betrachteten MVA - bei gleich hoher Stromproduktion. Für die Kombination Strom-Dampf-Wärme jedoch ist keine Vergleichbarkeit möglich, denn die drei betrachteten EBS-Kraftwerke produzieren vorwiegend Strom ($\eta \approx 15\%$), während die 5 älteren MVA hauptsächlich Dampf und Wärme mit einem thermischen Wirkungsgrad von $\eta_{\text{therm.}} \approx 34\%$ abgeben und Strom nur mit einem Wirkungsgrad von $\eta_{\text{elektr.}} \approx 11\%$ bereitstellen. Eine bessere Vergleichbarkeit der hochwertigen Energieform Strom mit den weniger wertvollen thermischen Energien Dampf und Wärme wäre über Exergiebetrachtungen möglich. Dazu fehlen aber in den Datensätzen die erforderlichen Angaben zu den Temperaturniveaus von abgegebener Wärme und Dampf.

Für die reine Dampf- oder Wärmeabgabe ist eine gute Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Anlagentypen gegeben. Es werden sowohl von MVA als auch von EBS-Kraftwerken Wirkungsgrade im Bereich des Kesselwirkungsgrades erreicht, also bis max. 85%.

Der wesentliche Faktor zur Erzielung eines hohen energetischen Wirkungsgrades im Sinne eines Brennstoffausnutzungsgrades liegt vor allem im Standort der Anlage begründet. Erst die Möglichkeit zur Abgabe von Prozessdampf oder Fernwärme eröffnet Chancen der Wirkungsgradsteigerung über das Niveau der reinen Stromproduktion hinaus aufgrund von Kraft-Wärme-Kopplung. Dies ist umso besser möglich, je näher ein Kraftwerk an entsprechenden Abnehmern gebaut werden kann. Im urbanen Raum sind für Abfallverbrennungsanlagen wegen der erforderlichen Transportdichte und nicht vollständig vermeidbaren Geruchsbelästigungen deutliche Grenzen gesteckt. Für die Versorgung von Wohnungen lässt sich daher Wärme nur über lange Fernwärmeleitungen zu den Verbrauchern transportieren – mit entsprechend hohem Investitionsaufwand. Besser geeignet erscheinen dagegen industrielle Abnehmer, die unabhängig von Tages- oder Jahreszeiten ihren Energiebedarf decken müssen und

ebenso wie die Kraftwerke in Randlagen der Städte bzw. Gewerbe- oder Industrieparks angesiedelt sind. Es spielt keine große Rolle, ob es sich dabei um eine MVA oder ein EBS-Kraftwerk handelt. Wichtig ist letztlich nur die möglichst umfangreiche Abgabe von überschüssiger Wärme oder Prozessdampf.

Nicht berücksichtigt in den obigen Ausführungen ist der Zusatzaufwand für die Produktion von EBS. Wie bereits in Abschnitt 6.1 gesagt, kann dieser je nach erforderlicher Aufbereitungstiefe sehr unterschiedlich sein: Die Aufbereitung in MBA/MA/MBS aus gemischten Abfällen ist viel aufwändiger als z.B. die Herstellung aus produktionsspezifischen, sortenreinen und weitgehend trockenen Abfällen.

Für die Bewertung der CO₂-Emissionen der thermischen Abfallbehandlung in Deutschland sind nach ITAD [Bezug zum Teil auf Originalquelle Bilitewski 2011] folgende massenbezogene Emissionsfaktoren zu berücksichtigen:

Hausmüll (AVV 200301)	0,315 t CO _{2eq} /t Abfall
AVV 191210 und 191212	0,468 t CO _{2eq} /t Abfall
Sonstige Abfälle	0,446 t CO _{2eq} /t Abfall

Neben den eingesetzten Zusatzbrennstoffen (hauptsächlich Heizöl oder Erdgas) sind CO_{2eq}-Gutschriften für die Substitution von sonst mit anderen Primärenergieträgern zu produzierenden Nutzenergien in folgender Höhe anzusetzen:

Strom, produziert	0,806 t CO _{2eq} /MWh
Prozessdampf, exportiert	0,360 t CO _{2eq} /MWh
Fernwärme, exportiert	0,296 t CO _{2eq} /MWh

7.2 Verbrennung von Sekundärbrennstoffen in Zementwerken

Der thermische Wirkungsgrad des Zementklinkerbrennprozesses in heute üblichen Drehofenanlagen ist mit über 70% im Vergleich zu anderen industriellen Verbrennungsprozessen als sehr hoch einzustufen [Hoening 2013 b]. Selbst ein Ersatz aller Zementdrehöfen durch neugebaute, optimierte Anlagen würde höchstens zu einer weiteren Brennstoffeinsparung von 7% bis 12% führen [Hoening 2013]. Dies lässt den Einsatz von hochwertigen Sekundärbrennstoffen als Ersatz für fossile Regelbrennstoffe interessant erscheinen.

Wie bereits in Abschnitt 6.2 erwähnt, sind insbesondere bei der Beurteilung der Primärenergieeinsparung durch Einsatz von Sekundärbrennstoffen bei der Zementherstellung die kalorischen Eigenschaften des Substitutbrennstoffs von großer Bedeutung, da hierdurch das erforderliche Energieaustauschverhältnis und damit die erforderliche spezifische SBS-Menge maßgeblich beeinflusst wird. Unter der Annahme, dass das in Abbildung 7-4 dargestellte Beispiel mit realistischen Randbedingungen berechnet wurde (d.h. Heizwert des Primärbrennstoffs Steinkohle = 25 MJ/kg), würde eine Substitution durch einen Sekundärbrennstoff mit einem Heizwert von 20 MJ/kg bei einer angestrebten Gastemperatur der Hauptfeuerung von 2000°C und Berücksichtigung der Wärmerückgewinnung durch Verbrennungsluftvorwärmung

im Klinkerkühler auf 950°C ein Energieaustauschverhältnis von $E_a \approx 1,1$ erfordern. Das Brennstoffmassenaustauschverhältnis $BA = E_a \cdot h_{u,RBS} / h_{u,EBS}$ beträgt dann ca. 1,38 – es muss also dem Prozess die 1,1-fache Energiemenge und die 1,38-fache Brennstoffmasse im Vergleich zum Regelbrennstoff zugeführt werden, falls keine weiteren Prozessoptimierungen stattfinden. Die spezifische Primärenergieeinsparung wäre dann der Kehrwert daraus, also als Massenverhältnis 0,73 t Steinkohle/t EBS oder als Energieverhältnis 0,9 MJ Steinkohle/MJ EBS. Für getrockneten Braunkohlestaub mit einem Unteren Heizwert von 21 MJ/kg sind die Massen- und Energieverhältnisse ähnlich.

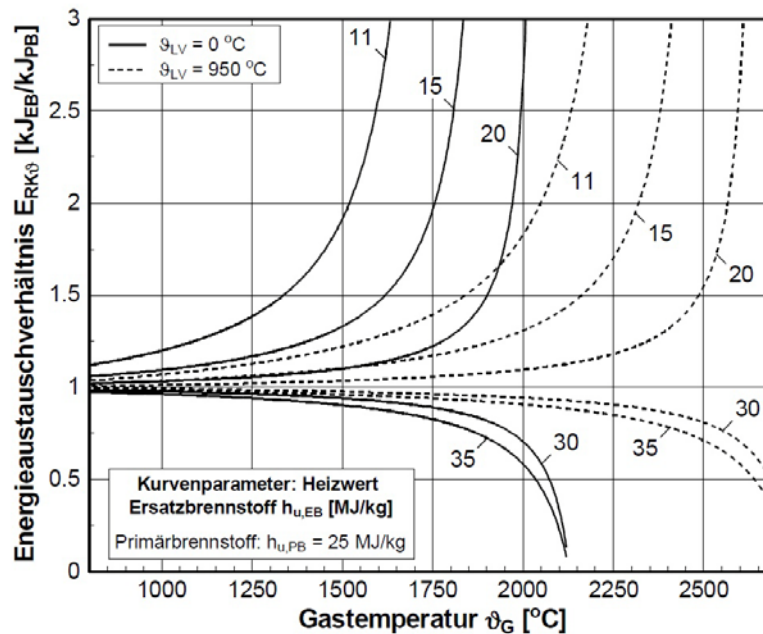


Abbildung 7-4: Energieaustauschverhältnis als Funktion von Prozesstemperatur, EBS-Heizwert und Luftvorwärmung [Beckmann 2002]

Für Zementöfen mit einer separaten Calcinatorfeuerung vor der Materialaufgabe in das Drehrohr ist der oben dargestellte Effekt des erhöhten Energiebedarfs bei Energieaustauschverhältnissen $E_a > 1$ meist vernachlässigbar. Hier wird die eingebrachte Zusatzenergie auf niedrigerem Temperaturniveau genutzt und führt dazu, dass weniger Brennstoff in der Zweitfeuerung des Calcinator benötigt wird.

Da die meisten deutschen Zementwerke nicht über getrennte Calcinatoren verfügen, erscheint vor dem Hintergrund der erheblichen Steigerung des Anteils der Sekundärbrennstoffmengen in den letzten 15 Jahren die Frage interessant, ob dadurch der Energieeinsatz beim Klinkerbrennen negativ beeinflusst worden ist. Die vom VDZ jährlich veröffentlichten Umweltdaten geben nur den spezifischen Energieverbrauch bezogen auf das Fertigprodukt Zement an. Hier zeigen sich Anfang der 2000er Jahre leicht sinkende und danach konstante Brennstoffverbräuche. Der Zement besteht jedoch aus einer Mischung aus dem energieintensiv hergestellten Klinker und diversen Zuschlagstoffen, deren Anteil im Laufe der Jahre erhöht wurde. Bezieht man dagegen die eingesetzte Brennstoffenergie auf das Zwischenprodukt Klinker, so zeigt sich

gemäß Abbildung 7-5 eine deutliche Erhöhung des Energieeinsatzes, die sich durchaus mit dem zeitgleich erhöhten Einsatz von alternativen Brennstoffen korrelieren lässt. Dies liegt einerseits an dem niedrigeren Heizwert der Substitutbrennstoffe (Energieaustauschverhältnis $E_a > 1$) sowie an der erforderlichen Trocknungsenergie für die meistens feucht angelieferten Ersatzbrennstoffe. Im Vergleich dazu wird z.B. die substituierte Braunkohle, die heute vorzugsweise als Primärbrennstoff eingesetzt wird, üblicherweise vorgemahlen und vorgetrocknet im Zementwerk angeliefert und belastet dadurch nicht dessen Energiebilanz [Hoenig 2013 b].

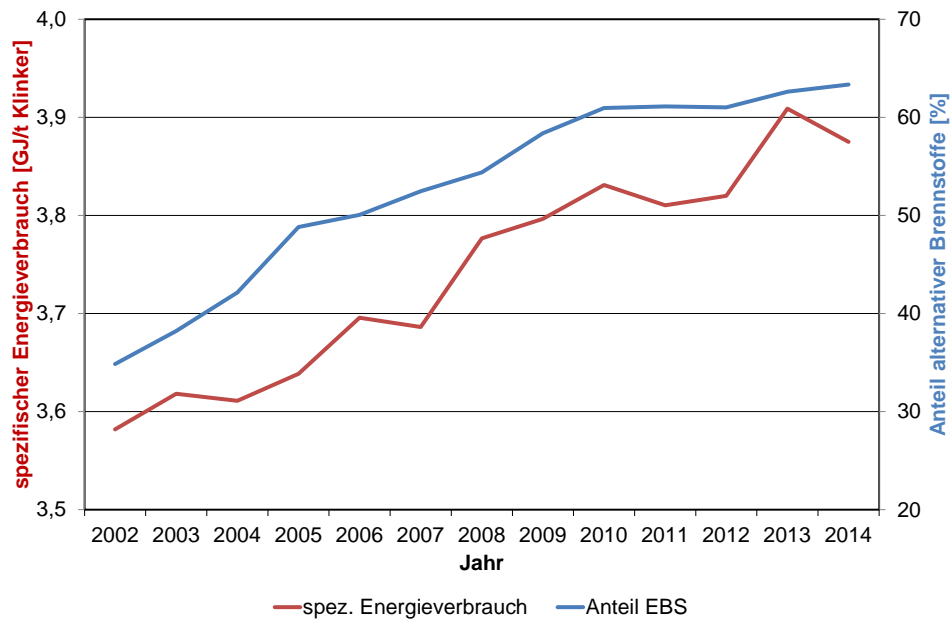


Abbildung 7-5: Entwicklung des Anteils alternativer Brennstoffe sowie des klinkerbezogenen spezifischen Brennstoffenergieverbrauchs bei der Zementherstellung, Daten aus [VDZ 2015 und frühere]

Für die Bewertung des Sekundärbrennstoffeinsatzes in Zementwerken bedeutet dies zunächst unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz eine Verschlechterung gegenüber dem Vergleichszustand mit Einsatz von hochkalorischen Regelbrennstoffen. Werden allerdings ähnlich hochkalorische Substitutbrennstoffe eingesetzt, ist hier kein Nachteil zu erwarten. Dies gilt ebenso, wenn der Nachteil eines geringeren Heizwerts durch Verbesserungen des Prozesses ausgeglichen werden kann, z.B. durch höhere Wärmerückgewinnung bei der Verbrennungsluftvorwärmung oder Verringerung des Luftüberschusses oder bei Vorhandensein eines separaten Calcinators mit eigener Feuerung.

Im Rahmen dieser Kurzstudie werden insbesondere für den Einsatz in Zementwerken ausschließlich hochwertige Sekundärbrennstoffe mit Heizwerten von über 20 MJ/kg betrachtet. Daher ist davon auszugehen, dass energetisch betrachtet ein nahezu 100%iger Ersatz der sonst eingesetzten fossilen Primärenergieträger stattfindet.

Ein weiterer Vorteil bei dem Einsatz in Zementdrehrohren im Vergleich zur Verbrennung in Kraft- oder Heizkraftwerken ist die vollständige Einbindung der Asche in den Klinker, wodurch

diese als Rohstoff genutzt wird. Dadurch erübrigt sich nicht nur die Entsorgung oder anderweitige Verwertung der Asche, sondern es werden auch natürliche Ressourcen ersetzt und damit geschont. Rechnet man mit einem Ascheanteil von 10 bis 12 % im EBS, so ergibt sich bei einer Einsatzmenge von 2,15 bis 2,5 Mio t/a ein Ersatz an Primärrohstoffen in der Größenordnung von 200.000 bis 250.000 t/a. Unter den betrachteten thermischen Verfahren ist der EBS-Einsatz in Zementwerken das einzige thermische Verfahren, was auch eine stoffliche Verwertungskomponente enthält.

Für das Bezugsjahr 2010 wurde vom Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) für alle eingesetzten alternativen Brennstoffe in der Menge von 2,91 Mio. t (entsprechend einer Energie von 53,7 Mio. GJ) eine Minderung der klimarelevanten CO₂-Emissionen von 2,15 Mio. t berechnet, entsprechend 0,74 kg CO₂/kg EBS oder 0,072 kg CO₂/kg Zement oder als einsatzenergiebezogener Wert 0,04 kg CO₂/MJ EBS.

8 Konzeptvergleich

In Abschnitt 7 wurden bereits Ergebnisse diverser Fallbeispiele für den Einsatz von Abfällen oder Ersatzbrennstoffen in Verbrennungsanlagen vorgestellt. Nun sollen diese im Zusammenhang dargestellt und miteinander verglichen werden. Dabei ist ggf. auch der Zusatzaufwand von Prozessketten zu berücksichtigen, der sich durch die Aufbereitung der Ersatzbrennstoffe im Vergleich zum Einsatz von nicht vorbehandelten Abfällen ergibt. Bei den hier betrachteten hochwertigen Sekundärbrennstoffen, die vorwiegend vorsepariert aus Gewerbeabfällen oder produktionsspezifischen Industrieabfällen stammen und im Wesentlichen nur noch zerkleinert werden müssen, spielt dieser Zusatzaufwand nur eine untergeordnete Rolle.

Sofern geeignete Abnehmer für thermische Energiearten (Dampf, Wärme) vorhanden sind, ist hinsichtlich eines möglichst hohen Brennstoffausnutzungsgrades der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in MVA oder EBS-Kraftwerken mit großer Wärme- oder Dampfabgabe zu bevorzugen. EBS-Kraftwerke haben oft Standortvorteile durch die gezielte Errichtung zur Versorgung von Industrieparks oder energieintensiven Industriebetrieben mit Strom, Prozessdampf und Wärme, wobei Gesamtwirkungsgrade von über 70% möglich sind. Leitungsverluste, die insbesondere beim Energietransport über große Distanzen auftreten – beispielsweise bei Großkraftwerken oder großen Fernwärmenetzen, sind hier kaum von Bedeutung.

Der Anlagenwirkungsgrad von Drehofenanlagen der Zementindustrie beträgt aufgrund der intensiven Wärmerückgewinnung aus dem Klinker und dem Verbrennungsgas mehr als 70%. Werden Ersatzbrennstoffe mit vergleichbarem Heizwert wie die substituierten Regelbrennstoffe Braun- und Steinkohle eingesetzt ($H_u > 20 \text{ MJ/kg}$), kann man von einem Energieaustauschverhältnis von $E_a < 1,1$ ausgehen, womit der Wirkungsgrad immer noch über 65% liegen sollte. Dieser Wirkungsgrad berücksichtigt die gesamte Prozesskette bis zum fertigen Produkt, anders als bei MVA oder EBS-Kraftwerken zur Prozessdampfversorgung von Industriebetrieben, deren Produktionsprozess in der Regel nicht mit betrachtet wird. Es treten keine Leitungsverluste auf, da die Energienutzung des Brennstoffs ausschließlich innerhalb der Produktionsanlage stattfindet.

Damit ist der EBS-Einsatz in Zementwerken im Hinblick auf die Brennstoffenergieausnutzung besser zu bewerten, als der Einsatz in Kraftwerken zur reinen Stromversorgung oder thermischen Verwertungsanlagen mit KWK-Nutzung. Für die Primärenergieeinsparung ergeben sich je nach Energieaustauschverhältnis Werte zwischen 91% ($E_a = 1,1$) und 100% ($E_a = 1,0$). Die Verminderung klimarelevanter CO_2 -Emissionen beträgt durchschnittlich für alle eingesetzten alternativen Brennstoffe 0,04 kg/MJ Einsatzenergie.

9 Unterschriften

Clausthal-Zellerfeld, 2016

Dr.-Ing. Stefan Vodegel
Abteilungsleiter Thermische Prozesstechnik

Dipl.-Ing. Milan Davidovic
Projektleiter

10 Anhang

10.1 *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 3-1:	Durchschnittliche energetische Wirkungsgrade beim Einsatz von EBS in verschiedenen Kraftwerkstypen und Produktionsanlagen.....	7
Abbildung 6-1:	Beispiel für verschiedene Bilanzkreise zur Bilanzierung einer Abfallverbrennungsanlage [VDI 3460-2].....	12
Abbildung 6-2:	Beispiel eines vollständigen Bilanzschemas zur Berechnung des Nettowirkungsgrades nach VDI 3460 Blatt 2 mit bilanztechnischer Rückführung von elektrischer und thermischer Zusatzenergie.....	13
Abbildung 6-3:	Beispiel eines vereinfachten Bilanzkreises zur Berechnung des Nettowirkungsgrades eines EBS-KW mit Stromerzeugung, Prozessdampf- und Fernwärmeabgabe [Sachsen 2009].....	14
Abbildung 6-4:	Schema zur Berechnung des Nettowirkungsgrades von Abfallbehandlungssystemen	16
Abbildung 6-5:	Biogene und fossile einsatzenergiebezogene CO ₂ -Emissionen diverser Abfallfraktionen [VDI 3460-2]	19
Abbildung 7-1:	Gesamt-Nettowirkungsgrade aller Anlagen nach Höhe der thermischen Nutzung	21
Abbildung 7-2:	Durchschnittliche Nettowirkungsgrade von Müllverbrennungsanlagen der 3. (vor 2000 errichtet) und 4. Generation (ab 2000 errichtet), differenziert nach Nutzenergiekombinationen.....	23
Abbildung 7-3:	Durchschnittliche Nettowirkungsgrade von EBS-Kraftwerken (alle nach 2000 errichtet), differenziert nach Nutzenergiekombinationen.....	23
Abbildung 7-4:	Energieaustauschverhältnis als Funktion von Prozesstemperatur, EBS-Heizwert und Luftvorwärmung [Beckmann 2002]	26
Abbildung 7-5:	Entwicklung des Anteils alternativer Brennstoffe sowie des klinkerbezogenen spezifischen Brennstoffenergieverbrauchs bei der Zementherstellung, Daten aus [VDZ 2015 und frühere]	27

10.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1:	Anzahl der Anlagen mit energetischer Nutzung von Abfällen in Deutschland [Alwast 2014], [Proplanta 2014], [VDZ 2014], [BDEW 2015], [Destatis 2014]	11
Tabelle 7-1:	Anzahl der betrachteten MVA und EBS-Kraftwerke, differenziert nach Alter und Nutzenergiekombination.....	22

10.3 Quellenverzeichnis

- AGR RZR Herten 2014 AGR RZR Herten (AGR Abfallentsorgungs-Gesellschaft Ruhrgebiet mbH): Im Profil. Herten, 2014.
<http://www.agr.de/agr-rzr-herten/> (Abgerufen am 24. November 2014)
- Aleßio 2013 Aleßio H.-P., Verhalten von Ersatzbrennstoffen in dafür konzipierten Industriekraftwerken, Verbrennungsverhalten, Emissionen, anlagentechnische Lösungsansätze. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 885-898
- Alwast 2009 Alwast H., Ersatzbrennstoffmarkt in Deutschland, Recycling Almanach, 2009
- 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.
http://www.prognos.com/uploads/tx_atwpubdb/140508_HAL_IFAT-Vortrag.pdf (Abgerufen am 24. November 2014)
- AVBKG 2014 Abfallverbrennung und Biokompost GmbH (AVBKG) Tornesch-Ahrenlohe: Eine heiße Sache: Wärme & Strom aus glücklichem Müll. Kummerfeld, 2014.
http://www.gab-tornesch.de/gab/~verbunds_partner/~avbkg/~verbrennungsanlage (Abgerufen am 24. November 2014)
- Baier 2014 Baier H., Horix M., Moderne Zementwerke und strategische Ansätze zur Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen, Eine aktuelle Bestandsaufnahme. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 859-869
- BDEW 2015 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW): Persönliche Mitteilung, Januar und Februar 2015
- Beckmann 1999 Beckmann M., Scholz R., Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1: ZKG International 52 (1999), Nr. 6, S. 281-303. Teil 2: ZKG International 52 (1999), Nr. 8, S. 411-419

- Beckmann 2002 Beckmann M., Horeni M., Scholz R., Hamaut T., Einfluss der Prozessführung auf den spezifischen Energieverbrauch in Verfahren der Grundstoffindustrie beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen. VDI Berichte 1708. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, 2002, S. 131-163
- Beckmann 2005 Beckmann M., Horeni M., Scholz R., Schnittstelle und Aufbereitungstiefe von Ersatzbrennstoffen für die energetische Verwertung Tagungsbeitrag zum 17. Kasseler Abfallforum 2005. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung IX biologisch – mechanisch – thermisch. Wilzenhaus, 2005, ISBN 3-928673-45-9
- Beckmann 2005a Beckmann M., Scholz R., Energetische Bewertung zur Optimierung von Müllheizkraftwerken. In: 37. Kraftwerktechnisches Kolloquium – Heizkraftwerke und dezentrale Energieerzeuger – Tagungsband 1, Dresden, 2005, V25
- Beckmann 2006 Beckmann M., Scholz R., Bewertung der Energieeffizienz in Anlagen zur thermischen Abfallbehandlung, Stellungnahme des Ausschusses VDI 3460 der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss KRdL, 15.11.2006
- Beckmann 2007 Beckmann M., Pohl M., Ncube S., Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S.203-218. ISBN 978-3-935317-30-6
- Beckmann 2007a Beckmann M., Kleppmann F., Martin J.J.E., Scholz R., Seifert H., Einordnung von Müllverbrennungsanlagen im Hinblick auf die energetischen Verwertung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S.47-60. ISBN 978-3-935317-30-6. Erscheinen auch als: Classification of Waste-to-Energy Plants in Terms of Energy Recovery. In: VGW Power Tech 10 (2007), Nr. 87, S. 76-81. ISSN 1435-3199
- BGS e.V. BGS e.V., Home, Unser Brennstoff, <http://bgs-ev.de/unser-brennstoff>
- BGS e.V. 2012 BGS e.V., Mitverbrennung von gütegesicherten Sekundärbrennstoffen und energetische Verwertung, Grundlagenpapier der Arbeitsgruppe Öffentlichkeitsarbeit des BGS e.V., Stand: Januar 2012

BGS e.V. 2012a	BGS e.V., Stellenwert der Mitverbrennung von gütegesicherten Sekundärbrennstoffen im Bereich der energetischen Verwertung, Stand: Januar 2012
BGS e.V. 2014	BGS e.V., Veränderte abfallwirtschaftliche Rahmenbedingungen in der Sekundärbrennstoffbranche, 26. Kassler Abfall- und Bioenergieforum, 08. bis 10. April 2014
Borghardt 2008	Borghardt R.: Einsatz von EBS in industriellen Kraftwerken Erfahrungen und Weiterentwicklungen. In: Bilitewski B., Urban A.I., Faulstich M. (Hrsg.): 13. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Universität Kassel, 2008
Dehoust 2002	Dehoust G., Gebhardt P., Gärtner S., Der Beitrag der thermischen Abfallbehandlung zu Klimaschutz, Luftreinhaltung und Ressourcenschonung, im Auftrag der Interessengemeinschaft der Betreiber Thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD). Öko-Institut e.V., Darmstadt, 2002
Destatis 2014	Statistisches Bundesamt: Umwelt – Abfallentsorgung 2012. Fachserie 19, Reihe 1. Wiesbaden, Juli 2014
EEW Heringen 2014	EEW Energy from Waste Heringen GmbH: Unsere Anlage. Heringen, 2014. http://www.eew-energyfromwaste.com/de/unsere-standorte/heringen.html (Abgerufen am 24. November 2014)
EEW Knapsack 2015	EEW Energy from Waste Saarbrücken GmbH: EBKW Knapsack. Anlageninformationen. http://www.eew-energyfromwaste.com/fileadmin/content/.../Materialbestellung/Knapsack_Standortflyer.pdf (Abgerufen am 10. Februar 2015)
Enertec Hameln 2014	Enertec Hameln GmbH: Enertec Hameln – Technische Anlagendaten. Hameln, 2014. http://www.enertec-hameln.de/Umwelt_und_Technik/Anlagendaten_Hameln.php (Abgerufen am 24. November 2014)
Endres 1998	Endres G., Verfahrenstechnische Gesichtspunkte zur Mitverbrennung von Abfällen in Drehrohröfen, 11. DVV-Kolloquium Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, Braunschweig, 1998, S. 69-102
Flamme 2002	Flamme S., Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung, Dissertation, Wuppertal, 2002

-
- Flamme 2006 Flamme S., Qualitätssicherung in Aufbereitungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S.431-438
- Flamme 2007 Flamme S., Hams S., Massen- und Energiebilanzen der Ersatzbrennstoffherstellung und -verwertung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S.87-94
- Fricke Fricke K., Bahr T., Bidlingmaier W., Turk T., Energieeffizienz der stofflichen und energetischen Verwertung ausgewählter Abfallfraktionen. In: Müll und Abfall 2.10, S.63-68
- Glorius 2012 Glorius T., Produktion und Einsatz von gütegesicherten Sekundärbrennstoffen, Entwicklungen und Perspektiven. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 741-755
- Gohlke 2008 Gohlke O.: Verbesserungspotenziale der Energieeffizienz. In: Bilitewski B., Urban A.I., Faulstich M. (Hrsg.): 13. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Universität Kassel, 2008
- Gohlke 2009 Gohlke O., Murer M.: Anwendung von Energie-Kennzahlen auf moderne europäische Beispielanlagen. In: Bilitewski B., Urban A.I., Faulstich M. (Hrsg.): 14. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Universität Kassel, 2009
- Grundmann 2013 Grundmann T., Balhar M., Entwicklungspotenzial der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 823-834
- Haimel 2013 Haimel B., Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in der Wirbelschicht am Beispiel HKW Eisenhüttenstadt, Weltweit größte EBS-Reststoff-Wirbelschicht mit der Powerfluid Technologie, In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 869-884
- HKW Mannheim 2014 MVV Energie AG: Heizkraftwerk Mannheim – thermische Abfallverwertung auf höchstem Niveau. Mannheim, 2014. http://www.mvv-umwelt.de/de/anlagen_und_emissionswerte/hkw_mannheim/hkw_mannheim_1.jsp (Abgerufen am 24. November 2014)
-

Hoenig 1998	Hoenig V., Einsatz von Sekundärstoffen in Drehofenanlagen der Zementindustrie, 11. DVV-Kolloquium Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in industriellen Hochtemperaturprozessen, Braunschweig, 1998, S. 47-68
Hoenig 2013	Hoenig, V. et.al., Energieeffizienz bei der Zementherstellung – Teil 1, Cement International, Vol. 11, 3/2013
Hoenig 2013 b	Hoenig, V. et.al., Energieeffizienz bei der Zementherstellung – Teil 2, Cement International, Vol. 11, 4/2013
ITAD 2015	Daten der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen 2014, abgerufen von der Homepage der ITAD im Dezember 2015: www.itad.de/information/abfallverwertungsanlagen
Ketelsen 2015	Ketelsen K., Nelles M., Stand und neue Entwicklungstendenzen / Perspektiven von MBA in Deutschland. In: Kühle-Weidemeier, Balhar (Hrsg.): Waste-to-Resources 2015, 6. Internationale Tagung MBA, Sortierung und Recycling, 05.-07.05.2015, Cuvillier Verlag Göttingen
Klein 2006	Klein H., Hoenig V., Modellrechnungen zum Brennstoffenergiebedarf des Klinkerbrennprozesses, Cement International 3/2006, S. 44-63
Klemm 2008	Klemm M., Beckmann M., Scholz R., Energetische Bewertung der Substitution von fossilen Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe und Biomasse. In: 40. Kraftwerktechnisches Kolloquium – Künftiges Brennstoff- und Technologieportfolio in der Kraftwerkstechnik. Tagungsband Kraftwerktechnisches Kolloquium 2008 – Band 1. Dresden, 2008, S. 399-416, ISBN 978-3-00-025948-7
Kurth 2015	Kurth P., Giern S., Ochs A., Bedarf an Restabfallbehandlungskapazitäten in Deutschland, In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Strategie Planung Umweltrecht, Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 127-138
Leitlinien 2008/98	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, Europäische Kommission, Generaldirektion, Umwelt
MVV TREA Leuna 2014	MVV Energie AG: Wirtschaftliche Abfallbehandlung im Kraftwerk TREA Leuna. Mannheim, 2014. https://www.mvv-energie.de/de/uiu/uiu_mvv_umwelt/anlagen_

- und_emissionswerte/trea_leuna/trea_leuna_1.jsp
(Abgerufen am 24. November 2014)
- Nolte 2015
Nolte M., Keldenich K., Alternative Brennstoffe im Verbund mit Kohlekraftwerken, Zukünftiger Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus Sicht der Kraftwerktechnik, In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 12. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2015, S. 587-602
- NRW 2005
Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement-, Kalk- und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen, 2. Auflage, 2005.
- PD energy 2014
Bitterfeld-Wolfen PD energy GmbH: Unternehmensinformationen. Bitterfeld-Wolfen, 2014.
http://www.danpower-gruppe.de/pd_energy/unternehmen.html
(Abgerufen am 24. November 2014)
- Pomberger 2014
Pomberger R., Sarc R., Use of Solid Recovered Fuel in the Cement Industry, In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Thiel, S. (Hrsg.): Waste Management, Volume 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, p. 471-488
- Pretz 2006
Pretz T., Herstellung von bedarfsgerechten Ersatzbrennstoffen, In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 247-256
- Proplanta 2014
Proplanta GmbH & Co. KG 2014: Kohlekraftwerke Deutschland Standorte 2014. Stuttgart-Hohenheim, 2014.
<http://www.proplanta.de/Maps/Kohlekraftwerke+Deutschland+Standorte-karten.html> (Abgerufen am 10. November 2014)
- Sachsen 2009
Freistaat Sachsen, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg): Klimarelevanz und Energieeffizienz - Untersuchungen zur Klimarelevanz der Abfallwirtschaft in den Abfallverbänden des Freistaates Sachsen, Abschnitt 4 (Born, M.): Energieeffizienzberechnung. März 2009
- Seifert 2008
Seifert H., Kolb T., Gehrman H-J., Beckmann M., Flamme S., Scholz R., Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen für den Einsatz in Industrie- und Kraftwerksfeuerungen. Abfalltage Baden-Württemberg 24.09-25.09.2008, Stuttgart, ISBN 978-3-8356-3163-2
- Scholz 1998
Scholz R., Beckmann M., Substitution von Brennstoffen und Rohstoffen durch Abfälle in Hochtemperaturprozessen, 11. DVV-Kolloquium Stoffliche und thermische Verwertung von Abfällen in

- industriellen Hochtemperaturprozessen, Braunschweig, 1998, S. 21-46
- 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. Tagung 20.03.-22.03.2006, Berlin, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 509-535. ISBN 3-935317-21-2
- Schulenburg 1999 Schulenburg, F.: Energetische Bewertung thermischer Abfallbehandlungsanlagen unter Berücksichtigung verschiedener Prozessführungen. Dissertation TU Clausthal, 1999, ISBN 3-89720-368-5
- Schönberger 2014 Schönberger H., Waltisberg J., Einfluss der Mitverbrennung von Abfällen in deutschen Zementwerken auf die Abgasemission. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 871-927
- Seeger 2009 Seeger H., Bedeutung der Kunststofffraktion für die EBS-Verwertung, Auszug aus der tecpol – Studie „Situation der EBS-Nutzung in EBS-Kraftwerken in Deutschland unter besonderer Berücksichtigung der Kunststoffanteile und Reflexion auf andere Länder“, Kassel, 2009
- Thiel 2011 Thiel S., Kohlekraftwerke zur Mitverbrennung von EBS, Anlagen, EBS-Mengen und -Qualitäten, Betriebserfahrungen, Trends und Prognosen. In: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 283-303
- Thiel 2013 Thiel S., Ersatzbrennstoff-Kraftwerke in Deutschland und Österreich. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 10. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 837-852
- TVS 2014 Thermische Verwertungsanlage Schwarza (TVS): Informationen zur Brennstoffaufbereitung. Pößneck, 2014.
http://www.zaso-tvs.de/techfaq_01.php
(Abgerufen am 24. November 2014)
- UBA 2008 Stellenwert der Abfallverbrennung in Deutschland, Umweltbundesamt, 2008
- UBA 2015 Faulstich M., Vodegel S., Fedianina E., Franke M., Degener P., Aigner J., Reh K. (10.2014 – 11.2015): Umweltschutzgerechte Verwertung nicht etablierter Stoffströme in Abfallverbrennungs-

	anlagen, Sachverständigengutachten, gefördert durch Umweltbundesamt (Dessau-Roßlau), Projektnummer 43834
Umwelt 2015	Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) 2013, Umwelt, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2015
VDI 3460-2	VDI-Richtlinie 3460 Blatt 2, Emissionsminderung Thermische Abfallbehandlung Energiewandlung, Juni 2014
VDI 3925-1	VDI-Richtlinie 3925 Blatt 1, Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsanlagen, Entwurf, Dezember 2013
VDZ 2014	Verein Deutscher Zementwerke e. V. (VDZ) (Hrsg.): Zementindustrie im Überblick 2014. Berlin, Dezember 2014
VDZ 2015	Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2014, herausgegeben 09/2015
VDZ 2015 a	Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), Zahlen und Daten, Zementindustrie 2015, Verlag Bau+Technik GmbH, 2015
Wagner 2013	Wagner S., Zeschmar-Lahl B., Born M., Erfolgskontrolle klimarelevanter Maßnahmen der Abfallwirtschaft in Abfallverbänden des Freistaates Sachsen, Schriftenreihe des LfULG, Heft 3/2013
Wallmann 2008	Wallmann R., Energieeffizienz bei mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung, In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2008, S. 163-179
Wengenroth 2014	Wengenroth K., Vier Jahre Betriebserfahrung mit der Verbrennung von Ersatzbrennstoffen in der zirkulierenden Wirbelschicht des EBS-Kraftwerks Witzenhausen, In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 11. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 845-858

10.4 Abkürzungsverzeichnis

a	jährlich
BA	Brennstoffmassenaustauschverhältnis
E_a	Energieaustauschverhältnis
EBS	Ersatzbrennstoff
GJ	Gigajoule
h_u	(unterer) Heizwert
KW	Kraftwerk
MA	Mechanische Abfallbehandlung
Mg	Megagramm
MJ	Megajoule
MBA	Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung
MBS	Mechanisch-Biologische Stabilisierung
MPS	Mechanisch-Physikalische Stabilisierung
MVA	Müllverbrennungsanlage
RBS	Regelbrennstoff
T	Tonne (1.000 kg)
TAB	Thermische Abfallbehandlung
therm	thermisch

10.5 R1-Kennzahl: „Energieeffizienz“ nach Abfallrahmenrichtlinie

Für die Einstufung einer Abfallverbrennungsanlage als Beseitigungs- oder Verwertungsanlage wurde 2008 mit der Novelle der europäischen Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) [Lit.] und der darin enthaltenen „Energieeffizienzformel“ ein entsprechendes Instrument geschaffen. Die Richtlinie ist seit 12.12.2010 durch alle Mitgliedstaaten der EU anzuwenden.

Die „Energieeffizienz R1“ nach Abfallrahmenrichtlinie berechnet sich zu:

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)}$$

mit:

- E_p : jährlich als Dampf, Wärme oder Strom erzeugte Energie, welche je nach Energieform mit Faktoren gewichtet wird: erzeugter und intern verwendeter oder exportierter Strom mit Faktor 2,6; intern verwendete oder exportierte Wärme mit Faktor 1,1; intern verwendeter oder exportierter Dampf mit Faktor 1,0
- E_f : jährlicher Energieinput in Form von Zusatzbrennstoffen, der zur Erzeugung von Dampf beiträgt
- E_i : jährlich importierte Energiemenge (ohne E_w und E_f), die nicht zur Dampferzeugung beiträgt (bei Strom mit Faktor 2,6)
- E_w : jährliche Energiemenge, die im behandelten Abfall enthalten ist, berechnet aus dem Produkt aus Abfallmenge und Heizwert

Der Faktor 0,97 ist zur Berücksichtigung von Energieverlusten aufgrund von Rost- und Kesselasche sowie von Wärmestrahlung vorgesehen.

Die Äquivalenzfaktoren für die verschiedenen Nutzenergiearten in den Größen E_p , E_f und E_i sollen eine Wertung dieser Energien herbeiführen. Elektrischer Strom als die höchstwertige Energie mit der man mechanische Arbeit verrichten kann erhält den Faktor 2,6 – entsprechend würde eine ausschließlich Strom produzierende Anlage mit 38,5% elektrischem Wirkungsgrad die Energieeffizienz $R1 = 1,0$ erhalten. Die Zahlen orientieren sich an den Durchschnittswerten europäischer Kraftwerke (nicht MVA) zu Beginn des 21. Jahrhunderts – zur Erzeugung von 1 MW elektrischer Energie benötigte man 2,6 MW Dampfenergie. Fernwärme wird mit dem Faktor 1,1 beaufschlagt – dies entspricht einem thermischen Wirkungsgrad von 91% eines durchschnittlichen europäischen Heizwerks (nicht MVA) zur Erzeugung externer thermischer Energie. Prozessdampf erhält den Faktor 1,0 – er liegt als primäres Produkt der Abgaswärmernutzung im Kessel vor und bedarf keiner weiteren Wandlung.

Es ist leicht zu sehen, dass eine ausschließlich Strom produzierende MVA bei den üblichen Dampfparametern 40 bar/400°C und einem elektrischen Wirkungsgrad von 20% auf eine Energieeffizienz R1 von nur 0,52 kommen würde. Dies würde nach Abfallrahmenrichtlinie nicht für den Verwertungsstatus ausreichen, für den folgende Werte gelten müssen:

$R1 \geq 0,6$ für Anlagen, die bis einschließlich des Jahres 2008 genehmigt wurden,

$R1 \geq 0,65$ für Anlagen, die ab Beginn des Jahres 2009 genehmigt wurden.

Allerdings fließen in die erzeugte Energie E_p neben den Exporten alle internen Verbräuche und Eigennutzungen von Strom, Dampf und Wärme, z.B. Dampfinjektion von NO_x -Reduktionsmitteln, Energie für Rußbläser und Dampfbegleitheizungen, dampfbetriebene Pumpen und Kompressoren, Dampf-Gas-Vorwärmer in der Rauchgasreinigung, Strom für alle elektrischen Systeme, Wärme für eine Klärschlamm-trocknung, Gebäudeheizung, Warmwasserbereitung usw. [EU-Kommission 2011].

Die „Energieeffizienz-zahl $R1$ “ nach AbfRRL ist ihrem Aufbau nach kein Wirkungsgrad wie solche in der VDI-Richtlinie 3460 definierten. Sie entspricht nicht einer als richtig anerkannten, auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und praktischen Erfahrungen beruhenden Darstellung des Standes der Technik und stand deshalb in ihrem Werdegang in der Kritik [Stellungnahme des Ausschusses VDI 3460, 2006]. Dabei wurde moniert, dass die Zusatzenergie E_f beim Nutzen im Zähler der Formel von der produzierten Energie abgezogen wird (d.h. die Netto-Nutzenergie darstellt), beim Aufwand im Nenner aber zur Abfallenergie hinzugezählt wird. Dies widerspricht aber den Regeln der Energiebilanzierung. Ferner wurde Kritik an den pauschalen Äquivalenzfaktoren für die Umwandlung der Dampfergie in Strom oder Wärme sowie der Berücksichtigung von Wärmeverlusten durch den Faktor 0,97 geäußert, was bei der Bilanzierung einer konkreten Anlage zu Fehlern und Interpretationsschwierigkeiten führt. Beispielsweise sind durchaus $R1$ -Zahlen größer als 1 möglich, was bei echten Wirkungsgraden schwer vorstellbar ist.

Man muss daher eine klare Trennung zwischen Anlagenwirkungsgraden und der „Energieeffizienz-zahl $R1$ “ ziehen. Letztere stellt ein ordnungspolitisches Instrument dar, mit dem Anreize geschaffen werden können, die Energienutzung von Abfallverbrennungsanlagen insgesamt zu verbessern. Ein Vergleich beispielsweise mit den Wirkungsgradangaben herkömmlicher Kraftwerke ist aber wegen der oben genannten Schwächen der Berechnungsformel unzulässig [Beckmann et.al. 2007].