

## Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz

Stefan Vodegel, Milan Davidovic und Alexander Ludewig

|    |   |     |
|----|---|-----|
| 1. | Exemplarische Darstellungen der Energienutzung von Abfällen.....              | 761 |
| 2. | Vergleich energetischer Wirkungsgrade .....                                   | 763 |
| 3. | Einfluss der Brennstoffqualität auf die Energieausnutzung.....                | 765 |
| 4. | Ersatzbrennstoffe in Zementwerken.....  | 766 |
| 5. | Energie-Nutzungsvergleich als Funktion<br>von Aufbereitung und Verfahren..... | 767 |
| 6. | Quellen .....   | 768 |

Auf europäischer und deutscher Gesetzgebungsebene nehmen die Bemühungen zur Verstärkung des stofflichen Recyclings zu. Die notwendigen Aufbereitungstechnologien befinden sich bereits auf einem hohen technischen Niveau, was stetig weiter verbessert wird. Allerdings ist beim Eintritt von gemischten Siedlungsabfällen in eine Anlage, zumindest für einen Teil, meist nur ein Downrecycling möglich. Wenn Abnehmer zum stofflichen Recycling fehlen, ist die energetische Verwertung eine ökologisch sinnvolle Alternative. Gemäß den Ansprüchen des jeweiligen Kunden ist eine Aufbereitung zu qualitativ hochwertigen Ersatzbrennstoffen oder nur eine Heizwertanreicherung möglich. Daher unterscheidet die Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recycling e.V. (BGS e.V.) auch die Begriffe Heizwertreiche Fraktionen und Sekundärbrennstoffe [10]. Ein höherer Aufbereitungsaufwand ist gerechtfertigt und sogar wünschenswert, wenn der energetische Nutzen hoch ist. Der folgende Beitrag stellt entsprechende Betrachtungen an.

### 1. Exemplarische Darstellungen der Energienutzung von Abfällen

Die Hygienisierung von Abfällen zum Schutz der Bevölkerung ist ein wesentlicher und unersetzbarer Zweck von Abfallverbrennungsanlagen seit dem 19. Jahrhundert. Mit der mittlerweile vierten Generation an Abfallverbrennungsanlagen (MVA) gewann die energetische Ausbeute signifikant an Bedeutung. Produkte können Strom, Prozess- oder Kraftwerksdampf bzw. Fernwärme sein. Bild 1 stellt Ergebnisse aus [4, 9] vor, nach denen im Durchschnitt deutscher MVA die Summe aus Strom- und Wärmeabgabe mittlerweile einen beachtlichen Wert von 45 Prozent erreicht hat.

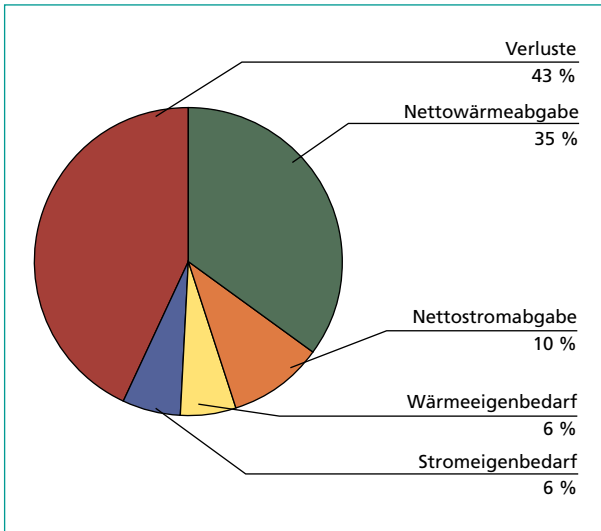


Bild 1:

### Exemplarische energetische Umsetzung der Feuerungs-wärmeleistung deutscher Abfallverbrennungsanlagen

gemäß Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Samel, M.: Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA. UFOPLAN-Nr. 205 33 311, erstellt durch IFEU-Institut, 2006

und VDI-Richtlinie 3925, Blatt 1: Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsanlagen; VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), September 2016

Moderne Anlagen können weit darüber liegen, wenn Wärmekunden mit hohem Bedarf vorhanden sind. *Abfallverbrennungsanlagen* wurden somit in den letzten Jahren mehr und mehr zu *Abfallheizkraftwerken* mit steigender Tendenz. Die im Zuge des Ablagerungsverbot zum 01.06.2005 entstandenen Ersatzbrennstoffkraftwerke (EBS-KW) haben, wie der Name schon sagt, die energetische Verwertung einfach aufbereiteter Abfälle als Geschäftszweck.

Ein völlig anders gelagertes, aber ebenso gutes Beispiel, für den steigenden Bedarf an Ersatzbrennstoffen stellt die Zementindustrie dar. Ziel ist die Verdrängung fossiler Brennstoffe, spez. Stein- und Braunkohle, durch CO<sub>2</sub>-neutralere Materialien wie qualitativ gute Abfälle. Diese fallen entweder produktionsspezifisch mit entsprechender Reinheit an oder müssen qualitativ hochwertig aufbereitet werden. Wie Bild 2 zeigt, stieg der Anteil alternativer Brennstoffe in den letzten Jahren stetig an. Begünstigt wurde die Entwicklung durch einen erhöhten Energieeinsatz pro Tonne produzierten Klinkers.

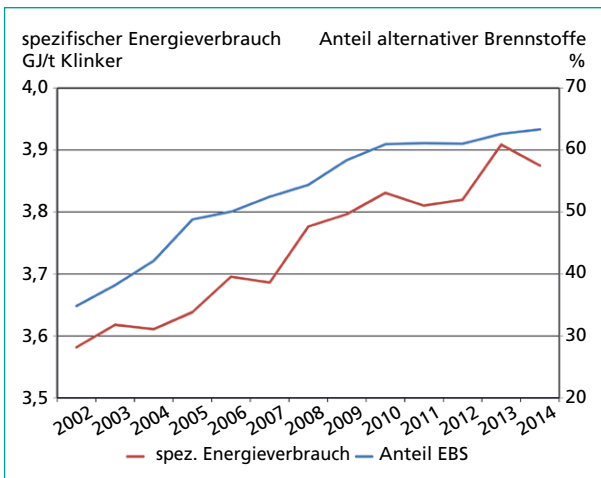


Bild 2:

### Entwicklung von spezifischem Energieverbrauch und Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie

Quelle: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2014, VDZ 09/2015 sowie früher

## 2. Vergleich energetischer Wirkungsgrade

Energetische Netto-Gesamtwirkungsgrade lassen sich durch Addition von Strom- und Wärmeabgaben, bezogen auf den Energieeintrag des Abfalls, einfach ermitteln. Die Betrachtung vernachlässigt allerdings den Umstand, dass beide Energieformen nicht gleichwertig sind. Thermodynamisch gesehen gilt: Energie = Exergie + Anergie. Die Exergie ist der Anteil, der zu hundert Prozent in jede Art von Arbeit umgewandelt werden kann. Da elektrischer Strom vollständig aus Exergie besteht, ist er gegenüber Wärme hochwertiger. Vor Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes schlug sich die physikalische Gesetzmäßigkeit noch in den Marktpreisen nieder.

Bild 3 zeigt für den Fall des Gesamtwirkungsgrades, dass mit einfach aufbereiteten Abfällen in EBS-KW der Gesamtwirkungsgrad gegenüber MVA tendenziell höher liegt. Wie erwähnt relativieren Faktoren wie Baujahr und Wärmeabnehmer die Aussage. Da MVA aber vorrangig zur Entsorgung von Abfällen und EBS-KW zur energetischen Verwertung gebaut wurden, hat das statistische Ergebnis auch eine gewisse logische Basis.

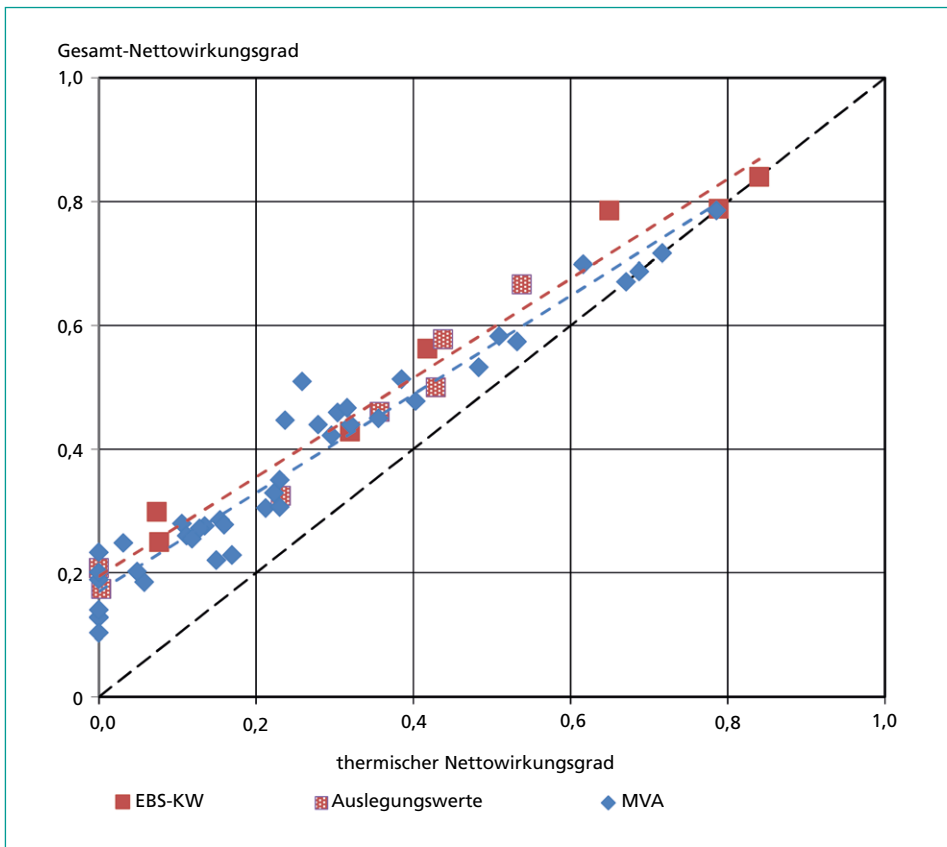


Bild 3: Energetische Gesamtwirkungsgrade unaufbereiteter und niedrig aufbereiteter Abfälle in MVA und EBS-Kraftwerken

Quelle: Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC): Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz. Studie i.A. von bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (Bonn), 09.08.2016

Die unterschiedliche Wertigkeit von Exergie und Anergie berücksichtigt die R1-Formel, welche allerdings thermodynamisch nicht korrekt ist. Den Mangel versucht das VDI-Blatt 3925 [8] zu beheben mit der Definition des fiktiven elektrischen Wirkungsgrades (*Fictive Electrical Efficiency, FEE*). In einer Masterarbeit des CUTEC-Institutes erfolgten ergänzend Betrachtungen, welche den exergetischen Wirkungsgrad für die Aufgabenstellung aus thermodynamischen Grundlagen herleitete [6]. Vergleicht man nun zwei modellhafte MVA unterschiedlicher Kategorien (1. stromgeführt, 2. wärmegeführt) mit öffentlich zugänglichen Daten eines beispielhaften Steinkohlekraftwerks, so lassen sich die Unterschiede gut herausarbeiten (Bild 4). Zu sehen ist, dass das Kraftwerk aufgrund seiner Dampfparameter einen wesentlich besseren elektrischen Wirkungsgrad besitzt; gegenüber einer wärmegeführten MVA beim Gesamtwirkungsgrad aber stark ins Hintertreffen gerät. Beim R1-Kriterium entstehen durch die Korrekturfaktoren Werte, die mit der Physik wenig zu tun haben. Betrachtet man die exergetischen Wirkungsgrade, so ist zu erkennen:

1. Die Berechnungsmethoden nach *Grundlagen Thermodynamik* und *FEE* führen zu sehr ähnlichen Ergebnissen,
2. Strom- und wärmegeführte MVA sind sich bei den gewählten Parametern hinsichtlich der exergetischen Wirkungsgrade sehr ähnlich bei parallel völlig verschiedenen Gesamtwirkungsgraden.

Die Betrachtungen zeigen, dass beim Begriff der energetischen Verwertung sehr genau zu differenzieren ist.

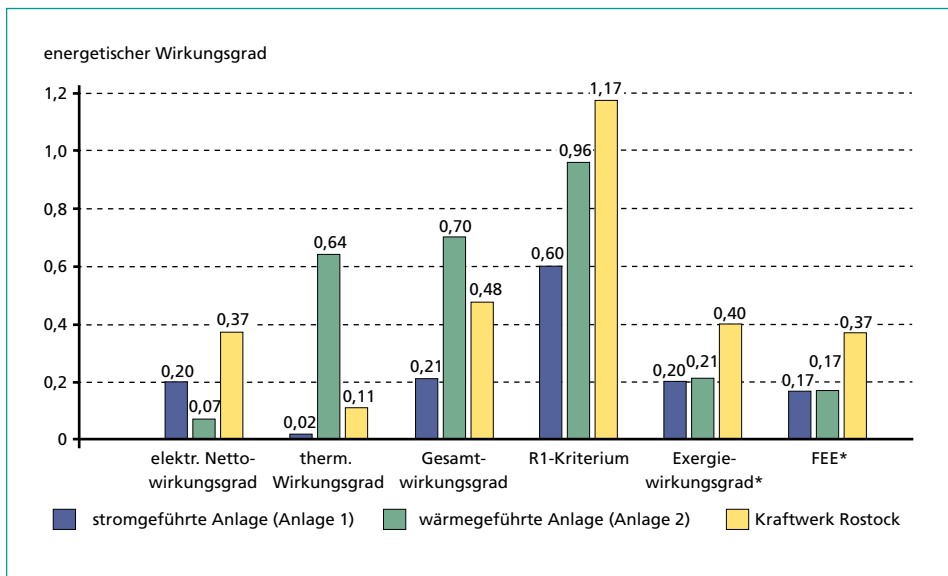


Bild 4: Vergleich energetischer Wirkungsgrade

Quellen:

Kraftwerks- und Netzgesellschaft mbH (KNG); [www.kraftwerk-rostock.de](http://www.kraftwerk-rostock.de); aufgerufen am 25.04.2017

Ludewig, A.: Einbindung von Abfallverbrennungsanlagen in die Energiewende. Masterarbeit, erstellt am CUTEC-Institut GmbH und TU Clausthal, 29.08.2017

### 3. Einfluss der Brennstoffqualität auf die Energieausnutzung

Wie allgemein bekannt ist, beeinflusst die Brennstoffqualität die Energieausbeute. Aufgabe der Masterarbeit war u.a. die Bilanzierung einer modellhaften MVA und der Vergleich mit konventionellen Brennstoffen. Bild 5 zeigt das Grundfließbild, welches dem Modell zugrunde liegt.

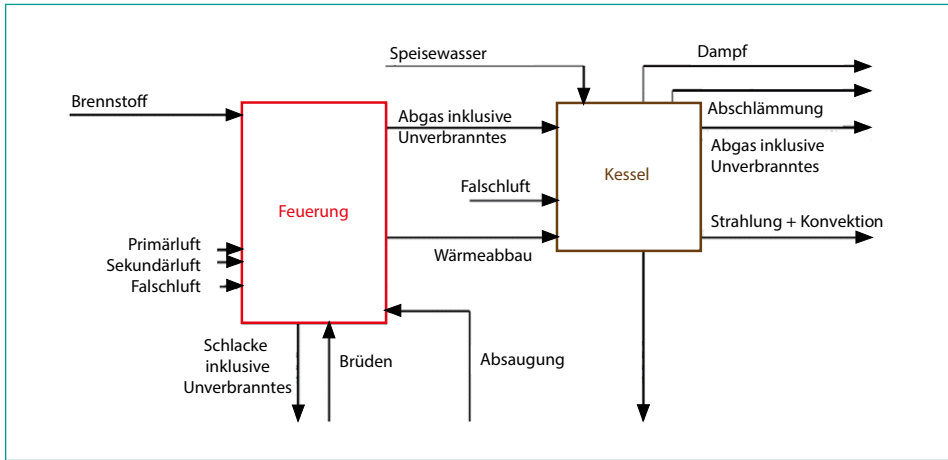


Bild 5: Bilanzraum Feuerung und Kessel (Modell)

Quelle: Ludewig, A.: Einbindung von Abfallverbrennungsanlagen in die Energiewende. Masterarbeit, erstellt an CUTEC-Institut GmbH und TU Clausthal, 29.08.2017

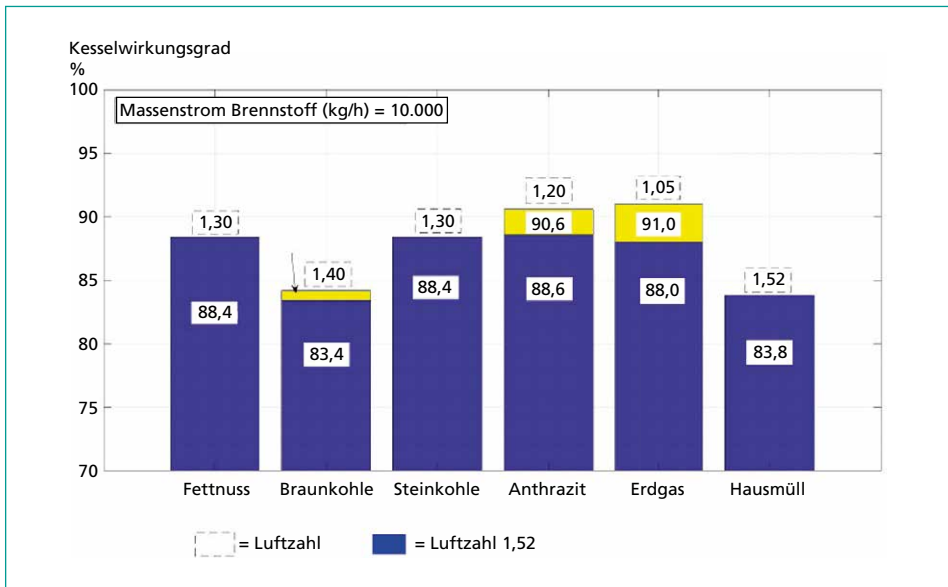


Bild 6: Kesselwirkungsgrade im Bilanzmodell bei verschiedenen Brennstoffen

Quelle: Ludewig, A.: Einbindung von Abfallverbrennungsanlagen in die Energiewende. Masterarbeit, erstellt an CUTEC-Institut GmbH und TU Clausthal, 29.08.2017

Wie zu erwarten ist, ergeben Brennstoffe mit hohen Asche- und/oder Wassergehalten wie Braunkohle und unaufbereiteter Hausmüll bei gleichen verfahrenstechnischen Parametern die niedrigsten theoretischen Kesselwirkungsgrade (Bild 6, blaue Balken) schon allein aufgrund der Brennstoffeigenschaften. Bei an die Brennstoffe angepasster Verfahrenstechnik wie z.B. der optimalen Luftzahl vergrößert sich der Abstand sogar noch.

#### 4. Ersatzbrennstoffe in Zementwerken

In Zementwerken gibt es seit Jahren umfangreiche Entwicklungsarbeiten zum Ersatz der fossilen Primärbrennstoffe. Wie in [1] dargestellt, sind mittlerweile die Eintragsorte Hauptbrenner, Calcinator und Ofeneinlauf mit unterschiedlichsten flüssigen und festen Ersatzbrennstoffen möglich. Bei der Diskussion der energetischen Verwertung ist nun die Besonderheit zu berücksichtigen, dass Zementwerke naturgemäß keine Strom- und Wärmeabgabe besitzen. Geschäftszweck ist die Produktion von Klinker.

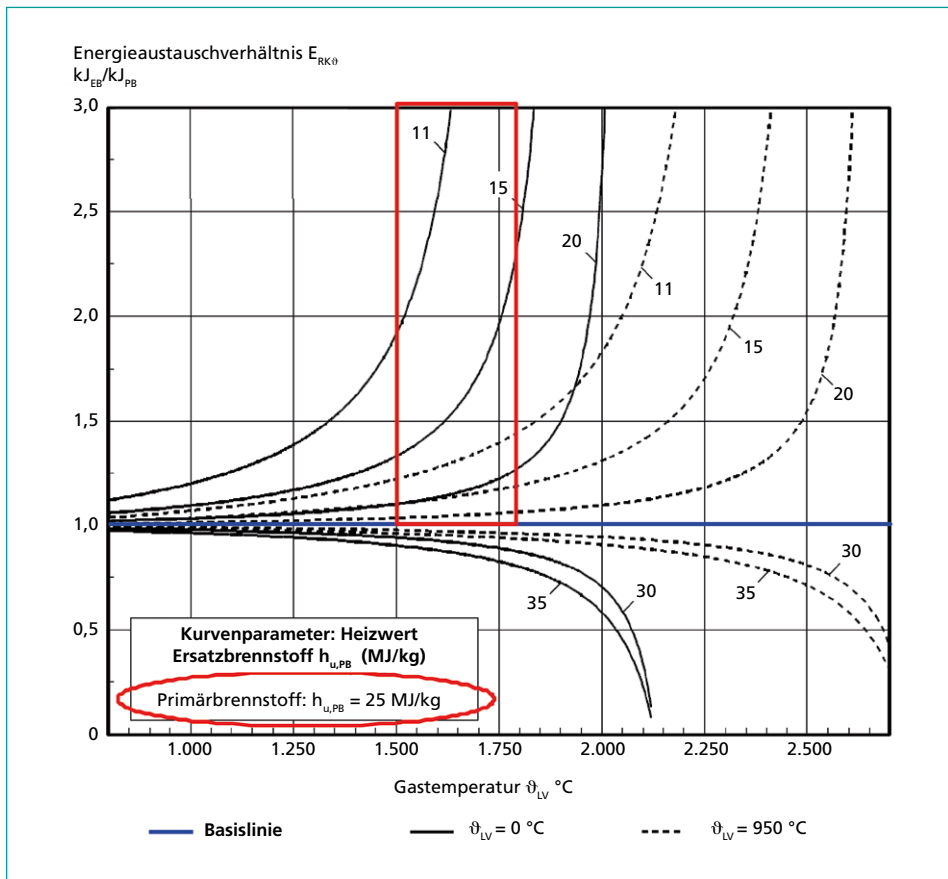


Bild 7: Energieaustauschverhältnis im Zementwerk bei Brennstoffen unterschiedlicher Qualität

Quelle: Beckmann, M. et al: Einfluss der Prozessführung auf den spez. Energieverbrauch in Verfahren der Grundstoffindustrie beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen. VDI Berichte 1708, Düsseldorf, 2002

Der Begriff der energetischen Verwertung zielt auf den Ersatz von fossilen Energieträgern. Zusatz-Nutzeffekt beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen ist die stoffliche Nutzung des Ascheanteils durch seine Einbindung in den Klinker.

Beckmann leitete in [2] bereits vor einigen Jahren her, dass das Energieaustauschverhältnis vom Heizwert des Ersatzbrennstoffs abhängt. Bild 7 zeigt dies für einen exemplarischen Primärbrennstoff eines Unteren Heizwertes ( $H_U$ ) von 25 MJ/kg. Eingetragen sind Kurven für zwei Temperaturen der Luftvorwärmung, nämlich 0 und 950 °C. Zu erkennen ist, dass für den Klinkerprozess notwendige Gastemperaturen von 1.500 bis 1.800 °C ein Heizwert wie beim Primärbrennstoff oder höher ratsam ist. Liegt der Heizwert niedriger, steigt das Energieaustauschverhältnis exponentiell an. Damit verbunden ist dann ein entsprechend hoher Masseneintrag an Ersatzbrennstoffen.

## 5. Energie-Nutzungsvergleich als Funktion von Aufbereitung und Verfahren

In den vorherigen Kapiteln wurde hergeleitet, dass

- beim Begriff der energetischen Verwertung sehr auf die Definition geachtet werden muss und
- unterschiedliche Brennstoffe mit einer angepassten Verfahrenstechnik zu optimalen Energieausnutzungsgraden führen.

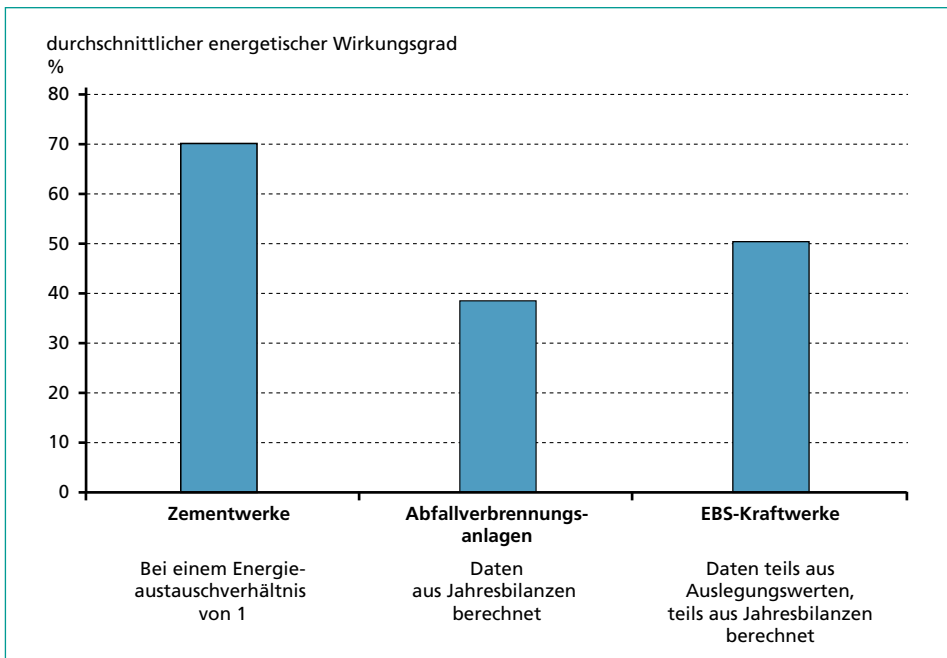


Bild 8: Energie-Nutzungsvergleich unterschiedlich aufbereiteter Abfälle

Quelle: Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC): Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz. Studie i.A. von bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (Bonn), 09.08.2016

Abschließend sollen noch die energetischen Wirkungsgrade bei unterschiedlich aufbereiteten Abfällen betrachtet werden. Wie aus den bisherigen Betrachtungen zu erwarten ist, besitzen die Zementwerke für qualitativ entsprechend den Anforderungen aufbereiteten Abfall den höchsten energetischen Wirkungsgrad, gemessen als Ersatz von Primärbrennstoffen. Bei einer energetisch gewichteten Betrachtung, die auf den Energieeintrag als Mengenstrom mal Heizwert basiert, und aus öffentlich zugänglichen Quellen aus Jahresbilanzen errechnet wurde, ergibt sich für MVA ein durchschnittlicher energetischer Wirkungsgrad von 40 Prozent. Mit niedrig aufbereiteten Abfällen, die in EBS-KW verbrannt werden, resultiert ein Wert von 50 Prozent, also eine Steigerung um 25 Prozent gegenüber MVA.

### Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf der Masterarbeit von Alexander Ludewig sowie der Studie *Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz*; beauftragt durch den *bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.* (Bonn). Die Autoren danken dem bvse für die interessante Aufgabenstellung, die finanzielle Unterstützung und die projektbegleitenden Diskussionen.

## 6. Quellen

- [1] Baier, H.: Wie würde ein Zementhersteller reagieren? Vortrag VDI/ITAD-Spezialtag, Würzburg, 20.09.2016
- [2] Beckmann, M. et al: Einfluss der Prozessführung auf den spez. Energieverbrauch in Verfahren der Grundstoffindustrie beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen. VDI Berichte 1708, Düsseldorf, 2002
- [3] Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH (CUTEC): Differenzierung der energetischen Verwertung am Kriterium der Energieeffizienz. Studie i.A. von bvse-Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (Bonn), 09.08.2016
- [4] Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Sameh, M.: Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA. UFOPLAN-Nr. 205 33 311, erstellt durch IFEU-Institut, 2006
- [5] Kraftwerks- und Netzgesellschaft mbH (KNG); [www.kraftwerk-rostock.de](http://www.kraftwerk-rostock.de); aufgerufen am 25.04.2017
- [6] Ludewig, A.: Einbindung von Abfallverbrennungsanlagen in die Energiewende. Masterarbeit, erstellt an CUTEC-Institut GmbH und TU Clausthal, 29.08.2017
- [7] Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2014, VDZ 09/2015 sowie früher
- [8] VDI 3925, Blatt 1: Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsverfahren, Hrsg.: VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU), September 2016
- [9] VDI-Richtlinie 3925, Blatt 1: Methoden zur Bewertung von Abfallbehandlungsanlagen; VDI-Gesellschaft Energie u. Umwelt (GEU), September 2016
- [10] [www.bgs-ev.de/unser-brennstoff](http://www.bgs-ev.de/unser-brennstoff); aufgerufen am 16.10.2017