

# Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften

Michael Beckmann, Sokesimbone Ncube, Kathrin Gebauer und Martin Pohl

## Abstract

### Characterisation of Refuse Derived Fuels in View of the Fuel Technical Properties

*Biomass fuels and refuse derived fuels (RDF) are used in power plants, material industry, mono combustion facilities and co-firing plants. It is known from operating experience – concerning the energy conversion density, the ignition and burnout behaviour, the slag formation and corrosion potential – and from comparing the combustion behaviour with fossil fuels, that biomass fuels and RDF can be seen as difficult fuels.*

*Biomass fuels are of interest concerning the decrease of CO<sub>2</sub> emissions derived from fossil fuels in energy conversion processes. The use of biomass fuels is supported e. g. by the renewable energy law in Germany. In connection with the increasing prices of energy, refuse derived fuels have of late gained great interest especially in industries not only with a high demand of electrical and heat energy but also process steam e. g. material and food industry.*

*In the design of combustion plants or in the application area e. g. in co-combustion systems, the knowledge about the composition of fuels, calorific value and the ignition behaviour is important. The composition of fuels in relation to the calorific values also plays a vital role in the balancing of plants. Conventional used methods for fuel characterisation of fossil fuels are often not suitable for RDF, due to their heterogeneous composition compared to black coal or lignite.*

*In the proposed paper methods for RDF characterisation are described and results are discussed. Further, with the C/H and C/O-ratios, correlations concerning calorific value could be developed, which will be discussed in the paper.*

### Zusammensetzung von Ersatzbrennstoffen

In dem hier gesteckten Rahmen werden Ersatzbrennstoffe, die aus mechanischen und mechanisch-biologischen Behandlungsver-

fahren von Restabfall aus Haushalten und zum Teil Restabfällen aus Industrie und Gewerbe stammen, betrachtet.

Die stoffliche Zusammensetzung von Abfällen ist regional und saisonbedingt verschieden. Zunächst kann man einen Abfall aus Haushalten hinsichtlich der Stoffgruppen un-

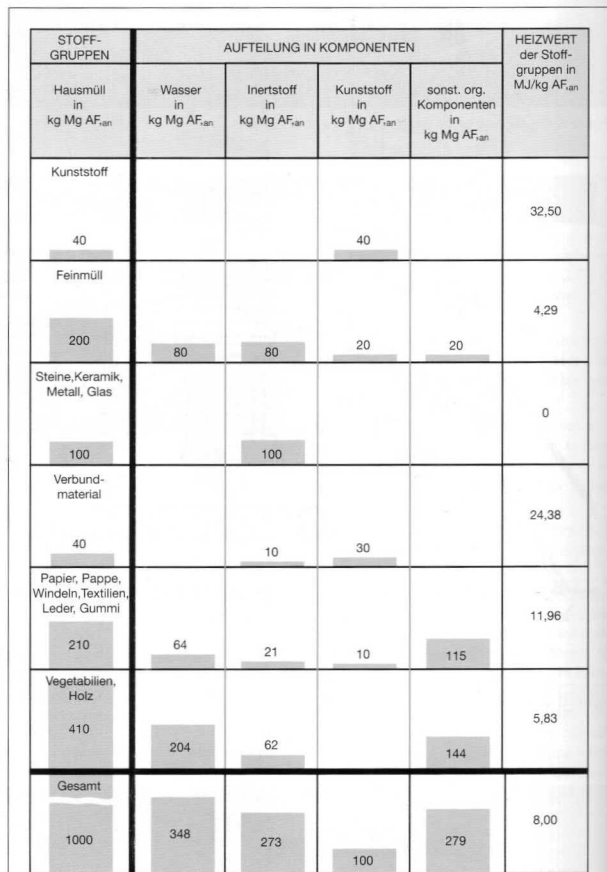


Bild 1. Darstellung eines Hausmülls durch unterschiedliche Stoffgruppen und deren Aufteilung auf die Komponenten Wasser, Inertstoff, Kunststoff und sonstigen organischen Komponenten [1].

## Autoren

**Professor Dr.-Ing. Michael Beckmann**  
Leiter der Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

**M. Sc. Sokesimbone Ncube**  
Gastwissenschaftler

**Dr. rer. nat. Kathrin Gebauer**  
Leiterin des kraftwerkschemischen Labors

**Dipl.-Ing. Martin Pohl**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Technische Universität Dresden,  
Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung,  
Dresden/Deutschland

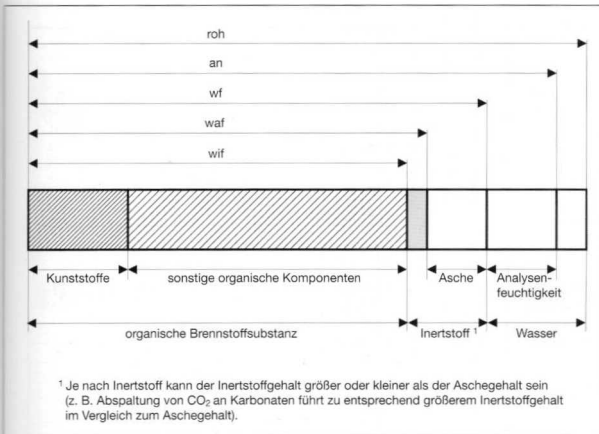


Bild 2. Bezugszustände fester Brennstoffe.

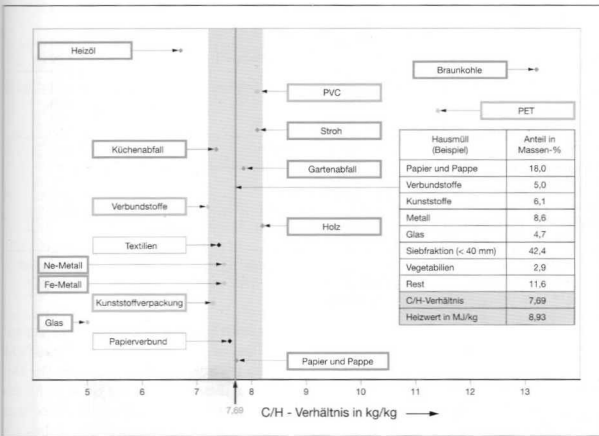


Bild 3. Darstellung des C/H-Verhältnisses verschiedener Stoffgruppen im Vergleich zum C/H-Verhältnis eines beispielhaft gewählten Hausmülls.

teilen (auch Fraktionen), wie z. B. Kunststoff, Feinmüll, Papier/Pappe, Vegetabilien usw. (linke Spalte in Bild 1). Aus brennstofftechnischer Sicht ist in Anlehnung an die Beschreibung fossiler Brennstoffe eine Aufteilung hinsichtlich der Komponenten Wasser, Inertstoff, organische Brennstoffsubstanz zweckmäßig. Die Komponente organische Brennstoffsubstanz lässt sich bei Abfällen weiter in Kunststoffe und sonstige organische Komponenten unterscheiden (mittlere Spalten – Aufteilung in Komponenten in Bild 1). Die organische Brennstoffsubstanz ist wasser- und inertstofffrei (wif), Bild 2. In ähnlicher Weise, wie bei fossilen Brennstoffen zwischen Asche- und Mineralstoffgehalt zu unterscheiden

ist, ist bei Abfallstoffen zwischen Asche- und Inertstoffgehalt zu differenzieren (Fußnote in Bild 2). Bei den Angaben von elementaren Zusammensetzungen muss entsprechend Bild 2 der Bezugszustand wasser- und aschefrei (waf), wasserfrei (wf) oder auch nur aschefrei (af) angegeben werden.

Bei der Aufbereitung von Abfällen zu Ersatzbrennstoffen werden insbesondere die Komponenten Wasser und Inertstoffe abgetrennt und damit die organische Brennstoffsubstanz angereichert, was gleichzeitig zu einer Anhebung des Heizwertes führt. Durch die Abtrennung von Wasser wird der Gehalt der flüchtigen Bestandteile zunächst nicht beeinflusst,

durch die Verringerung des Inertstoffanteils erfolgt eine relative Anreicherung der organischen Brennstoffsubstanz. Bild 3 zeigt für die einzelnen Stoffgruppen (siehe oben), dass das C/H-Verhältnis in einem Bereich zwischen 7 und 8 liegt. Eine relative Anreicherung von Kunststoffen (ausgenommen PET) gegenüber biogenen Stoffgruppen, wie z. B. Küchenabfällen, Papier/Pappe, wird keine wesentliche Änderung des C/H-Verhältnisses, jedoch eine Zunahme des C/O-Verhältnisses mit steigendem C-Gehalt zur Folge haben (Bild 4).

Aus diesen Überlegungen lässt sich ableiten, dass bei Ersatzbrennstoffen mit zunehmendem Heizwert das C/H-Verhältnis näherungsweise konstant bleibt, das C/O-Verhältnis indes ansteigt (Bild 5).

Im Gegensatz zu fossilen Brennstoffen beruht die Heizwertzunahme nicht auf einer Änderung der Brennstoffstruktur (zunehmende Inkohlung), sondern auf der relativen Anreicherung der organischen Brennstoffsubstanz, insbesondere der Anreicherung von Kunststoffen. Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen wird bei Ersatzbrennstoffen nicht wie bei fossilen Brennstoffen mit zunehmendem C-Gehalt (gleichbedeutend mit zunehmendem Heizwert, Bilder 4 und 5) abnehmen, sondern näherungsweise konstant bleiben oder leicht ansteigen (Bild 6).

Berechnet man für die in den Bildern 4 bis 6 beispielhaft betrachteten Ersatzbrennstoffe (EBS a bis g) den Mindestluftbedarf und trägt ihn über dem Heizwert auf, ordnen sich diese Wertepaare erwartungsgemäß in den Verlauf des in [1] dargestellten Zusammenhangs ein (Bild 7).

### Berechnung des Heizwertes aus der Brennstoffzusammensetzung

Bei der Bilanzierung von Verbrennungsanlagen ist der Heizwert der eingesetzten Brennstoffe eine wesentliche Voraussetzung. In der Literatur sind verschiedene so genannte Heizwertformeln bekannt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Brennstoffzusammensetzung und dem Heizwert gebildet entweder – über die Heizwerte der einzelnen Brennstoffbestandteile oder aber – durch Koeffizienten, mit denen der betreffende Brennstoffanteil am Gesamtheizwert beteiligt ist.

Ein exakter Zusammenhang zwischen der Brennstoffzusammensetzung und dem Heizwert lässt sich jedoch nur für Brenngase herstellen. Bei der als Verbandsformel oder als Dulong'sche Formel [2] bekannten Heizwertformel für feste Brennstoffe wird der Gesamtheizwert aus den jeweiligen Brennstoffanteilen (Massenanteile) und zugehörigen Einzel-

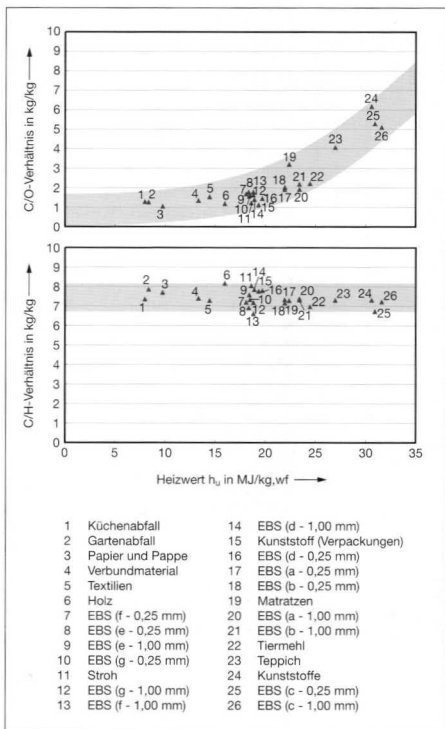


Bild 4. C/H- und C/O-Verhältnis, aufgetragen über dem Heizwert verschiedener Abfallfraktionen und verschiedener Ersatzbrennstoffe.

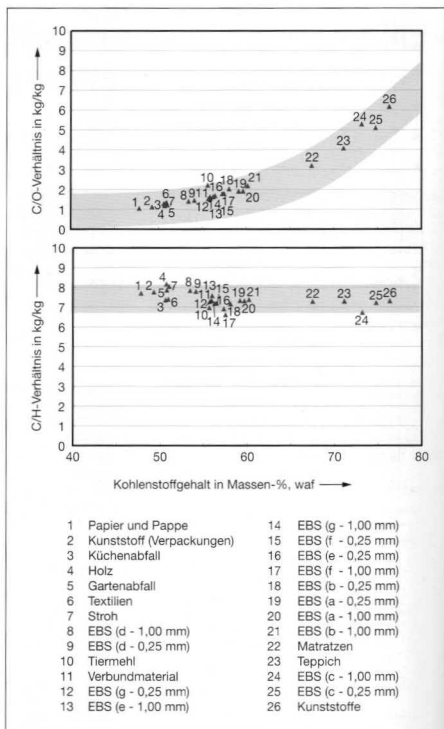


Bild 5. C/H- und C/O-Verhältnis, aufgetragen über dem Kohlenstoffgehalt verschiedener Abfallfraktionen und verschiedener Ersatzbrennstoffe.

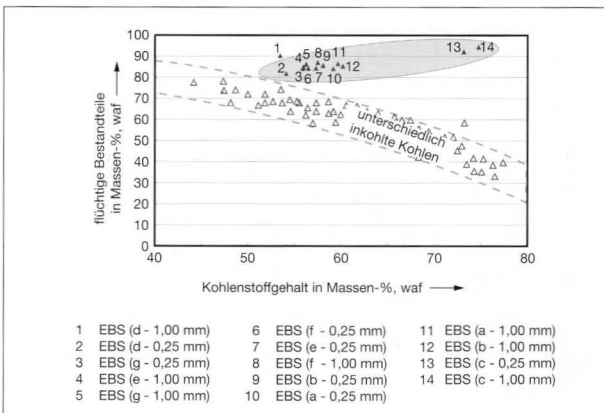


Bild 6. Anteil flüchtiger Bestandteile in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes unterschiedlich inkohlter Kohlen im Vergleich zu Ersatzbrennstoffen.

heizwerten ermittelt, dabei bleibt die Brennstoffstruktur (insbesondere unterschiedliche Bindungswärmen) unberücksichtigt. Die Genauigkeit dieser Berechnung ist daher für die Praxis oftmals unzureichend. Entsprechend ist eine Reihe von Abwandlungen, die sich vom äußeren Aufbau von der Verbandsformel kaum unterscheiden, entstanden:

$$h_u = k_1 \cdot c + k_2 \cdot h - k_3 \cdot o + k_4 \cdot s + k_5 \cdot n - k_6 \cdot w \quad (1)$$

Dabei sind  $c$ ,  $h$ ,  $o$ ,  $n$ ,  $s$ ,  $w$  die Massenanteile von Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Schwefel, Stickstoff und Wasser, die zusammen mit dem Aschegehalt  $a$  die Elementaranalyse des Brennstoffs darstellen:

$$c + h + o + s + n + w + a = 1 \quad (2)$$

Die Koeffizienten  $k_1$  bis  $k_5$  in Gleichung (1) stellen im Unterschied zu der Verbandsformel [2] keine Einzelheizwerte dar, sondern berücksichtigen, mit welchem Anteil der jeweilige Brennstoffanteil am Gesamtheizwert beteiligt ist. Der Koeffizient  $k_6$  ist die Kondensationsenthalpie des Wasseranteils  $w$ . Zur

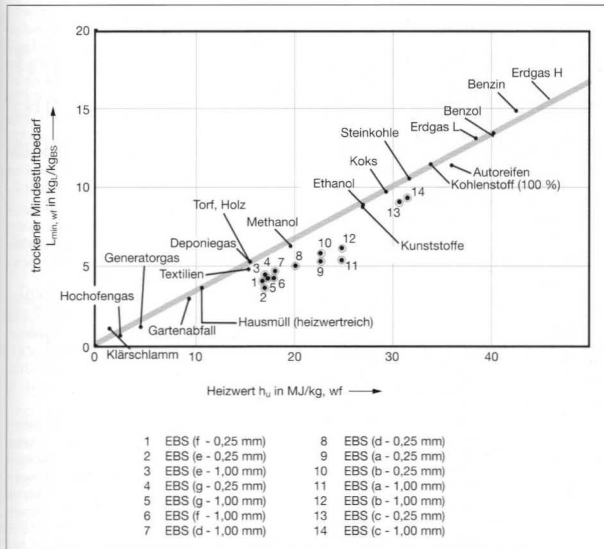


Bild 7. Trockener Mindestluftbedarf in Abhängigkeit vom Heizwert für verschiedene Brenn- und Abfallstoffe.

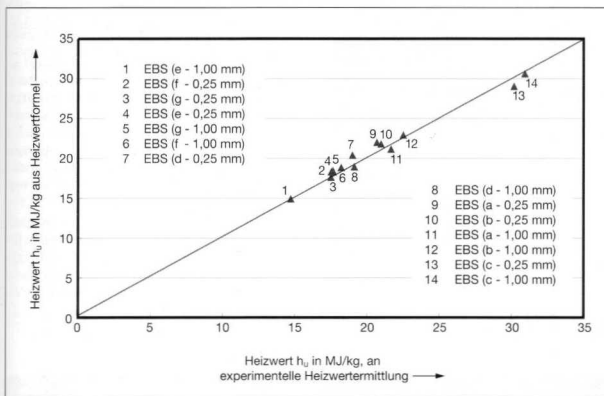


Bild 8. Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Heizwerte mit den über die Heizwertformel ermittelten Heizwerten.

Ableitung der Faktoren sei an dieser Stelle auf [3] verwiesen. Die Genauigkeit der Heizwertformeln ist insbesondere dann sehr gut, wenn bei der Ermittlung der Koeffizienten auf ganz bestimmte Brennstoffe (z. B. Braunkohle, Steinkohle) aus einer Lagerstätte Bezug genommen wird.

Die zuvor erörterten Zusammenhänge zwischen C/H- und C/O-Verhältnis, dem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen und dem Heizwert weisen darauf hin, dass es auch für Ersatz-

brennstoffe möglich sein sollte, Heizwertformeln, basierend auf der Brennstoffzusammensetzung, ableiten zu können.

Wird zunächst der Einfluss von Schwefel und Stickstoff im Brennstoff vernachlässigt, ergibt sich in Anlehnung an Gl. (1) ( $k_4 = k_5 = 0$ ):

$$h_u = k_1 \cdot c + k_2 \cdot h + k_3 \cdot o - k_6 \cdot w \quad (3)$$

Gleichung (3) enthält mit  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  drei Unbekannte. Mit dem festen C/H-Verhältnis (siehe oben) – hier vereinfacht:

$$C/H = 7 \quad (4)$$

und Gleichung (2) stehen insgesamt drei Gleichungen zur Verfügung, sodass  $k_1$ ,  $k_2$ , und  $k_3$  ermittelt werden können.

Die Gegenüberstellung der entsprechend Gleichung (3) ermittelten Heizwerten ist in Bild 8 dargestellt. Die gute Übereinstimmung zeigt, dass es lohnenswert erscheint, diese Überlegungen weiter zu verfolgen. An dieser Stelle wird bewusst auf eine Angabe der Koeffizienten  $k_1$ ,  $k_2$  und  $k_3$  verzichtet, weil hierzu ein größerer Probenumfang zur Absicherung erforderlich ist.

### Zusammenfassung

Fossile Brennstoffe, wie Kohle, Erdöl, Erdgas usw., sind vor dem Hintergrund des Einsatzes in Anlagen zur Energieumwandlung sowie der Grundstoffindustrie umfangreich untersucht worden. Dabei konnten in Verbindung mit den jeweiligen Prozessen entsprechende brennstofftechnische Kriterien abgeleitet werden. Bei der Beurteilung sind aus brennstofftechnischer Sicht insbesondere

- chemische,
- mechanische,
- kalorische und
- reaktionstechnische

Eigenschaften zu betrachten [2 bis 4]. Hierüber wurde auch mit Bezug auf Ersatzbrennstoffe in [5, 7, 9 bis 11] berichtet.

Im Zusammenhang mit Ersatzbrennstoffen sind bisher hauptsächlich die Spurenanalyse – chemische Eigenschaften – im Hinblick auf die Freisetzung von Schadstoffen oder das Korrosionspotential untersucht und diskutiert worden (unter anderem in [9, 12 bis 15]). Darüber hinaus konnten insbesondere im Hinblick auf die Anwendung von Ersatzbrennstoffen in der Grundstoffindustrie aufgrund vereinfachter prinzipieller Überlegungen Aussagen zur energetischen Wertigkeit (kalorische Eigenschaften, Energieaustauschverhältnis) abgeleitet werden [12]. Interessant erscheinen jedoch auch Zusammenhänge zwischen der elementaren Zusammensetzung (chemische Eigenschaften) und dem Heizwert (kalorische Eigenschaften) sowie dem Zündverhalten (reaktionstechnische Eigenschaften).

Kenntnisse zur Zusammensetzung von Brennstoffen, dem Heizwert und zum Zündverhalten sind einerseits im Hinblick auf die Auslegung von Feuerungsanlagen oder auf den Einsatz – z. B. bei der Mitverbrennung – in bestehenden Anlagen von Bedeutung. Andererseits spielt die Zusammensetzung in Verbindung mit dem Heizwert auch für die Bilanzierung von Anlagen eine Rolle. Mit der Annahme

eines bestimmten C/H-Verhältnisses lassen sich bei der Bilanzierung allgemein über eine Rückwärtsrechnung auch Aussagen zur Zusammensetzung des Brennstoffes ableiten. In [16] wurde über diese Möglichkeit im Zusammenhang mit der Online-Bilanzierung von Biomasse- und Abfallverbrennungsanlagen berichtet. Interessant erscheint nun, wie sich C/H- und C/O-Verhältnisse bei Ersatzbrennstoffen – im Vergleich zu fossilen Brennstoffen und normalem Hausmüll – verhalten und inwieweit sich daraus Abhängigkeiten zum Heizwert oder zum Mindestluftbedarf ergeben, worauf in dem vorliegenden Beitrag eingegangen wird.

### Symbolverzeichnis

#### Symbole und Abkürzungen

AF	Abfall
an	Analysezustand
BS	Brennstoff
C	Kohlenstoff
EBS	Ersatzbrennstoff
H	Wasserstoff
$h_u$	unterer Heizwert
L	Luft
$L_{\min}$	Mindestluftbedarf
O	Sauerstoff
roh	Anlieferungszustand (roh)
waf	wasser- und aschefrei
waf	wasserfrei
wif	wasser- und inertstofffrei
c	Massenanteil Kohlenstoff
h	Massenanteil Wasserstoff
o	Massenanteil Sauerstoff
n	Massenanteil Stickstoff
a	Massenanteil Asche
w	Massenanteil Wasser
$k_1$	Koeffizient Kohlenstoff
$k_2$	Koeffizient Wasserstoff
$k_3$	Koeffizient Sauerstoff
$k_4$	Koeffizient Schwefel
$k_5$	Koeffizient Stickstoff
$k_6$	Koeffizient Wasser

### Literatur

- [1] Scholz, R., Beckmann, M., und Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Teubner-Reihe Umwelt. B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden (2001). S. 1–460.
- [2] Zelkowski, J.: Kohleverbrennung – Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. 1. Auflage 1986, Bd. 8 der Fachbuchreihe „Kraftwerkstechnik“. VGB PowerTech Service GmbH, Essen.
- [3] Boie, W.: Vom Brennstoff zum Rauchgas. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig (1957).
- [4] Gunz, W.: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik. 3. Auflage, Springer-Verlag (1962).
- [5] Beckmann, M., Horen, M., Scholz, R., und Rippel, F.: Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3 – Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung, Logistik und Verwertung. Deponierung der Schwerkfraktion. TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Dezember 2003. S. 213–230.
- [6] Beckmann, M., und Ncube, S.: Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften. Erschienen in: Wiemer, K., und Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung II – stofflich – energetisch. Witzhausen. Tagungsband zum 19. Kasseler Abfallforum „Bio- und Sekundärrohstoffherstellung“. Kassel, 24. bis 26. April 2007. S. 232–263.
- [7] Beckmann, M., und Scholz, R.: Biomasse- und Ersatzbrennstoffe als schwierige Brennstoffe. Erschienen in Thomé-Kozmiensky, K.-J., und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Bd. 1, S. 105–137. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2007). Tagung in Berlin, 8./9. November 2006.
- [8] Beckmann, M., Scholz, R., und Horen, M.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. Erschienen in: Wiemer, K., und Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich – energetisch. Witzhausen. Tagungsband zum 18. Kasseler Abfallwirtschaftskonferenz, 25. bis 27. April 2006. S. 180–205.
- [9] Eckardt, S.: Anforderungen an die Aufbereitung von Siedlungs- und Produktionsabfällen zu Ersatzbrennstoffen für die thermische Nutzung in Kraftwerken und industriellen Feuerungsanlagen. Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten der Technischen Universität Dresden. Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Bd. 41 (2005).
- [10] Thiel, S.: Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Kohlekraftwerken. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky. Dissertation (2007).
- [11] Weber, R.: Characterization of alternative fuels. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J., und Beckmann, M.: Optimierung der Abfallverbrennung 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2005). S. 699–708.
- [12] Beckmann, M., und Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1: ZKG International 52(1999), H. 6, S. 287–303. Teil 2: ZKG International 52(1999), H. 8, S. 411–419.
- [13] Flamme, S.: Qualitätssicherung in Aufbereitungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. Erschienen in Thomé-Kozmiensky, K.-J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Bd. 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2007). S. 431–438. Tagung, Berlin, 31. Januar/1. Februar 2007.
- [14] Schirmer, M., Bilitewski, B., and Rotter, S.: Characteristics of Chlorine in MSW and RDF – Species, Sampling and Analytical Methods. 24<sup>th</sup> International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies. IT 3 Conference, May 9 to 13, 2005, Galveston, Texas, USA.
- [15] Spiegel, W., Herzog, T., Jordan, R., Magel, G., Müller, W., und Schmid, W.: Korrosion durch Einsatz von Biomasse-Ersatzbrennstoffen: Bedarf für belagsgestützte Korrosionskennrößen. Erschienen in Thomé-Kozmiensky, K.-J., und Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Bd. 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky (2007). S. 585–602. Tagung, Berlin, 31. Januar/1. Februar 2007.
- [16] Horen, M.: Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen – Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms. Papierfliegerverlag Clausthal-Zellerfeld. Dissertation 2007. □

Drehzahl erfassen  
und zuverlässig  
überwachen



Vom Geber bis zu  
jeder Auswertung:  
Lösungen aus einer Hand!

**BR** BRAUN GMBH  
FREQUENZ UND DREHZAHL

D 71301 Waiblingen · Tel.: 07151/9562-30  
Fax 07151/9562-30 · E-mail: info@braun-tacho.de  
Internet: www.braun-tacho.de

VGB-Kongress

**KRAFTWERKE 2009**

23.-25. September 2009 in Lyon, Frankreich  
– mit Fachausstellung –

Nähere Auskünfte und Informationen erhalten Sie von der

**VGB PowerTech e.V.**

Postfach 10 39 32 · 45039 Essen

Tel.: +49 201 8128-211

Fax: +49 201 8128-350

E-mail: marthe.molz@vgb.org