

Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen

Die Bestimmung der brennstofftechnischen Eigenschaften von Brennstoffen ist von grundlegender Bedeutung für die Planung und Bilanzierung von Anlagen

Von Michael Beckmann, Martin Pohl, Sokesimbone Ncube und Kathrin Gebauer

Ersatz- und Biomassebrennstoffe stellen besondere Anforderungen an die Prozessführung. Aus verfahrenstechnischer Sicht gibt es sehr umfangreiche Möglichkeiten zur Prozessgestaltung und -führung. Schwierigkeiten bei der Planung von neuen Anlagen und der Optimierung oder aber auch bei einer beabsichtigten Brennstoffsubstitution ergeben sich aufgrund fehlender und unzureichender Daten zu den brennstofftechnischen Eigenschaften von Ersatz- und Biomassebrennstoffen. Die brennstofftechnischen Eigenschaften dieser Brennstoffe wurden bisher häufig nur auf Grundlage von empirischen Ergebnissen an Großanlagen beurteilt. Diese Beurteilung war rückwärts gerichtet und damit auch mit erheblichen wirtschaftlichen Verlusten verbunden. Die Methoden zur Charakterisierung von Regelbrennstoffen lassen sich nicht ohne weiteres auf die Ersatzbrennstoffe übertragen. Für diese sind mit Blick auf eine vorwärts gerichtete Bewertung zunächst Methoden zu entwickeln, die es ermöglichen, die brennstofftechnischen Eigenschaften zu ermitteln. Die von Beckmann/Ncube² vorgestellten Methoden der Untersuchung in verschiedenen Labor- und Pilotanlagen, wie zum Beispiel Thermowaagen, Zünd-, Verschlackungs- und Batch-Reaktoren, können hierbei einen Beitrag leisten. Im Folgenden werden Zusammenhänge dargestellt, die sich aus den chemischen und kalorischen Eigenschaften verschiedener Ersatzbrennstoffe und Abfallfraktionen ergeben. Auf dieser Basis kann, insbesondere mit Blick auf das Kohlenstoff/Wasserstoff- und das Kohlenstoff/Sauerstoff-Verhältnis des Brennstoffes, eine Heizwertformel speziell für Ersatzbrennstoffe entwickelt werden.

Zusammensetzung von Ersatzbrennstoffen

In diesem Beitrag werden Ersatzbrennstoffe betrachtet, die aus mechanischen und me-

chanisch-biologischen Behandlungsverfahren von Restabfall aus Haushalten und zum Teil aus Restabfällen aus Industrie und Gewerbe stammen.

Stofflich sind Abfälle regional und saisonbedingt unterschiedlich zusammengesetzt. Zunächst kann man einen Abfall aus Haushalten in Stoffgruppen (auch Fraktionen), wie zum Beispiel Kunststoff, Feinmüll, Papier/Pappe und Vegetabilien (linke Spalte in Abbildung 1) einteilen. Aus brennstofftechnischer Sicht ist in Anlehnung an die Beschreibung von fossilen Brennstoffen eine Aufteilung auf die 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 Abbildung 1). Die organische Brennstoffsubstanz ist wasser- und inertstofffrei (wif) (vergleiche Abbildung 2). Ähnlich wie bei fossilen Brennstoffen, bei denen zwischen Asche- und Mineralstoffgehalt zu unterscheiden ist, muss man bei Abfallstoffen zwischen Asche- und Inertstoffgehalt differenzieren (siehe Fußnote in Abbildung 2). Bei den Angaben von elementaren Zusammensetzungen muss entsprechend Abbildung 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 den Heizwert anhebt. Das Abtrennen von Wasser beeinflusst zunächst nicht den Gehalt der flüchtigen Bestandteile, das Verringern des Inertstoffanteils bewirkt, dass die organische Brennstoffsubstanz relativ angereichert wird. Abbildung 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 zum Beispiel 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 (Abbildung 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 (Abbildung 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 somit bei Ersatzbrennstoffen nicht wie bei fossilen Brennstoffen mit zunehmendem C-Gehalt (gleichbedeutend mit zunehmendem Heizwert, vergleiche Abbildung 4 und 5) abnehmen, sondern näherungsweise konstant bleiben oder leicht ansteigen (Abbildung 6).

Berechnet man für die in den Abbildungen 4, 5 und 6 beispielhaft betrachteten Ersatzbrennstoffe (EBS a, b, c, d, e, f und g) den Mindestluftbedarf und trägt diesen über dem Heizwert auf, so ordnen sich diese Wertepaare erwartungsgemäß in den Verlauf des in Scholz et al.¹² dargestellten Zusammenhanges ein (Abbildung 7).

Berechnung des Heizwertes aus der Brennstoffzusammensetzung

Bei der Bilanzierung von Verbrennungsanlagen besitzt der Heizwert der eingesetzten Brennstoffe eine grundlegende Bedeutung. Im Schrifttum sind verschiedene sogenannte Heizwertformeln bekannt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Brennstoffzusammensetzung und dem Heizwert entweder

- über die Heizwerte der einzelnen Brennstoffbestandteile gebildet oder aber

STOFFGRUPPEN	AUFTEILUNG IN KOMPONENTEN				HEIZWERT der Stoffgruppen [MJ/kg AF _{an}]
	Wasser [kg/Mg AF _{an}]	Inertstoff [kg/Mg AF _{an}]	Kunststoff [kg/Mg AF _{an}]	sonst. org. Komponenten [kg/Mg AF _{an}]	
Hausmüll [kg/Mg AF _{an}]					
Kunststoff			40		32,50
Feinmüll	80	80	20	20	4,29
Steine, Keramik, Metall, Glas		100			0
Verbundmaterial		10	30		24,38
Papier, Pappe, Windeln, Textilien, Leder, Gummi	64	21	10	115	11,96
Vegetabilien, Holz	204	62		144	5,83
Gesamt	348	273	100	279	8,00

Abbildung 1: Darstellung eines Hausmülls durch unterschiedliche Stoffgruppen und deren Aufteilung auf die Komponenten Wasser, Inertstoff, Kunststoff und sonstigen organischen Komponenten¹²

- durch Koeffizienten, mit denen der betreffende Brennstoffanteil am Gesamtheizwert beteiligt ist. Der Koeffizient k_6 ist die Kondensationsenthalpie des Wasseranteils w . Zur Ableitung der Faktoren sei an dieser Stelle auf Boie⁶ verwiesen. Die Genauigkeit der Heizwertformeln ist insbesondere dann sehr gut, wenn bei der Ermittlung der Koeffizienten auf ganz bestimmte Brennstoffe

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*¹⁶ bekannten *Heizwertformel für feste Brennstoffe* wird der Gesamtheizwert aus den jeweiligen Brennstoffanteilen (Massenanteile) und zugehörigen Einzelheizwerten ermittelt. Dabei bleibt die Brennstoffstruktur (insbesondere unterschiedliche Bindungswärmen) unberücksichtigt. Für die Praxis ist diese Berechnung daher oftmals zu ungenau. Entsprechend sind mehrere Abwandlungen entstanden, die sich vom äußeren Aufbau von der *Verbandsformel* kaum unterscheiden:

$$h_0 = k_1 \cdot c + k_2 \cdot h - k_3 \cdot o + k_4 \cdot s + k_5 \cdot n - k_6 \cdot w \quad (1)$$

Dabei sind c, h, o, n, s, w die Massenanteile von Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel, Wasser, die zusammen mit dem Aschegehalt a die Elementaranalyse des Brennstoffes 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*¹⁶ keine Einzelheizwerte dar, sondern berücksichtigen, mit welchem Anteil der je-

weilige Brennstoffanteil am Gesamtheizwert beteiligt ist. Der Koeffizient k_6 ist die Kondensationsenthalpie des Wasseranteils w . Zur Ableitung der Faktoren sei an dieser Stelle auf Boie⁶ verwiesen. Die Genauigkeit der *Heizwertformeln* ist insbesondere dann sehr gut, wenn bei der Ermittlung der Koeffizienten auf ganz bestimmte Brennstoffe

(zum Beispiel 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 Ersatzbrennstoffe möglich erscheinen sollte Heizwertformeln basierend auf der Brenn-

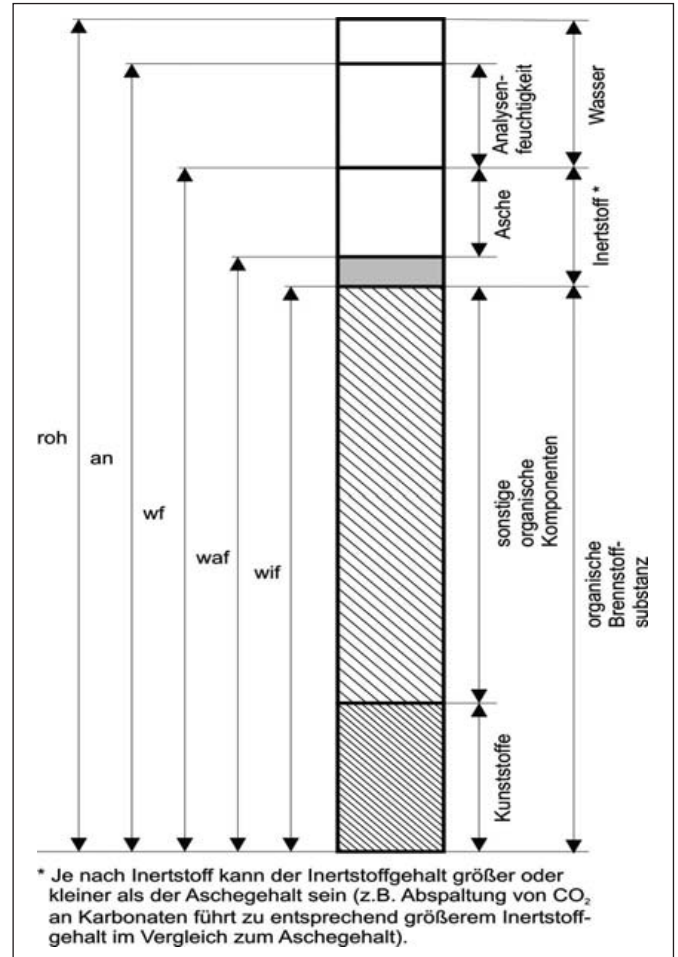


Abbildung 2: Bezugszustände fester Brennstoffe

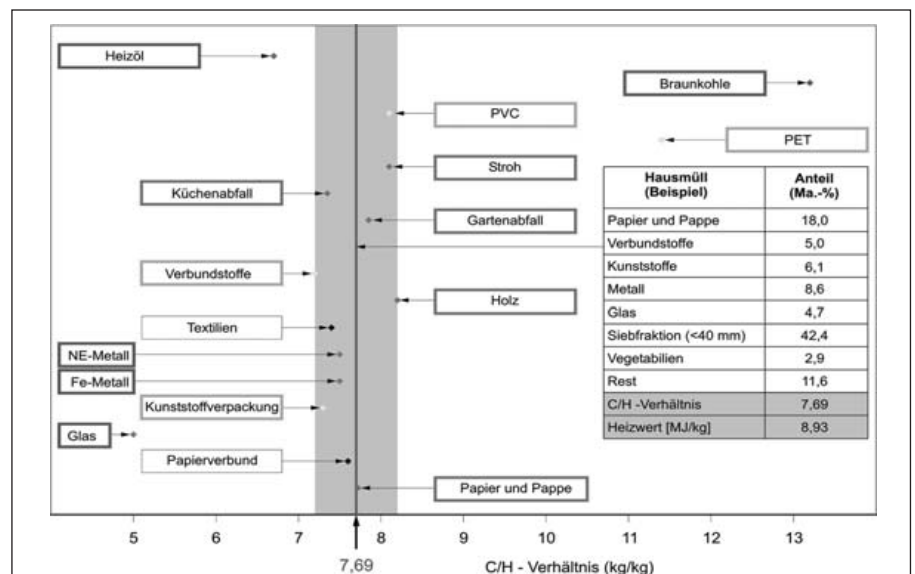


Abbildung 3: Darstellung des C/H-Verhältnisses verschiedener Stoffgruppen im Vergleich zum C/H-Verhältnis eines beispielhaft gewählten Hausmülls.

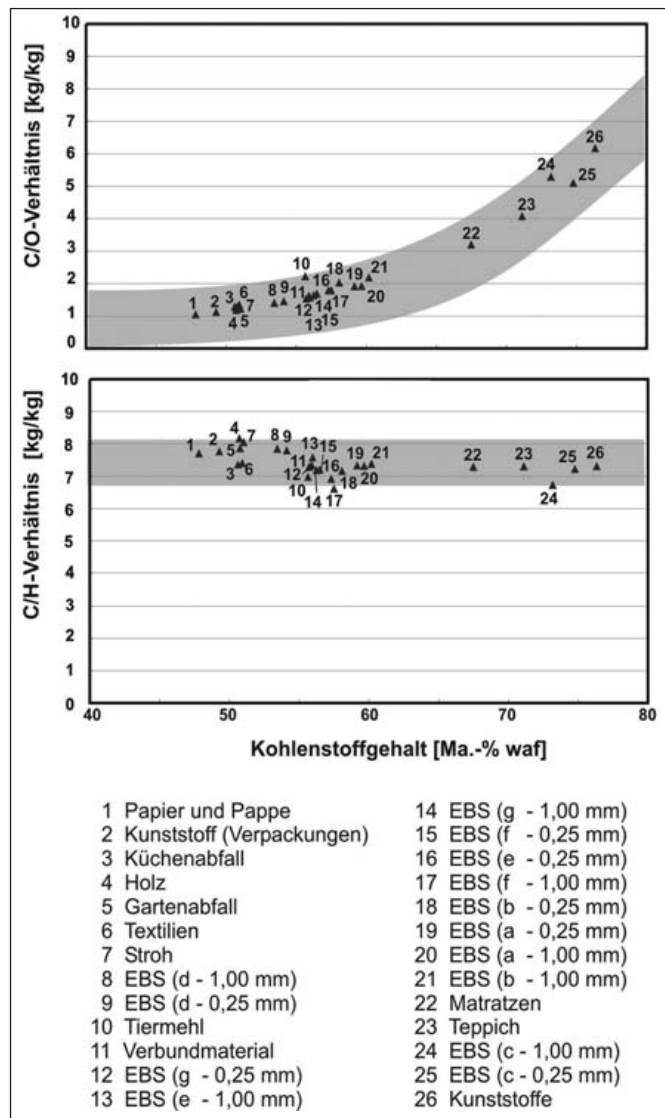


Abbildung 4: C/H- und C/O-Verhältnis aufgetragen über dem Kohlenstoffgehalt verschiedener Abfallfraktionen und verschiedener Ersatzbrennstoffe

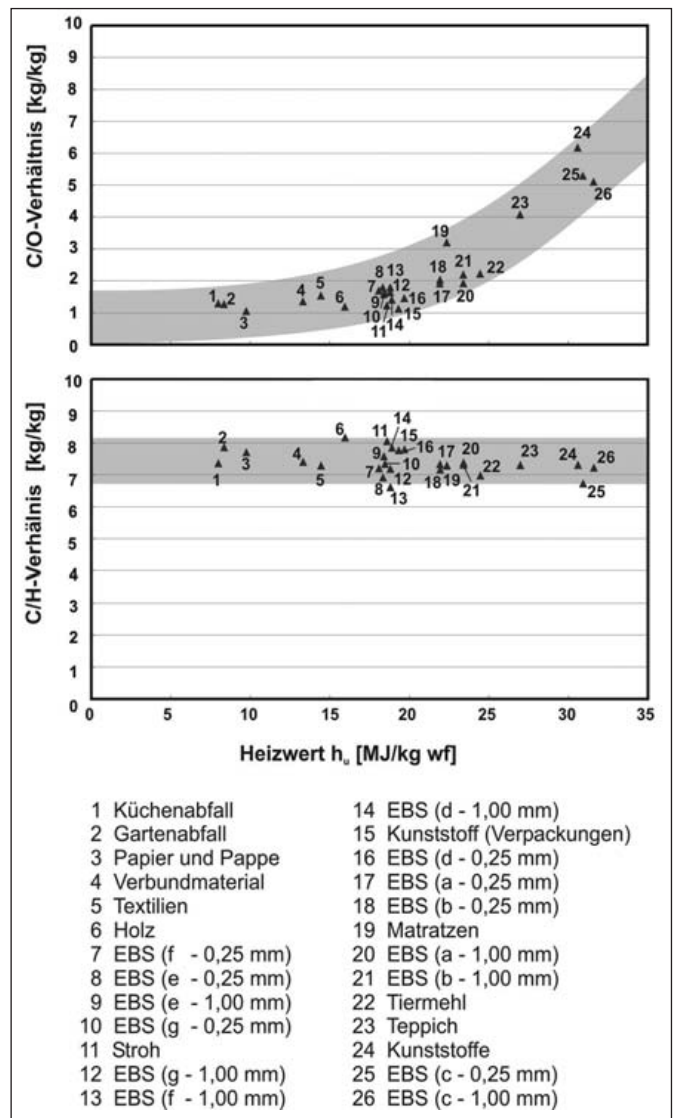


Abbildung 5: C/H- und C/O-Verhältnis aufgetragen über dem Heizwert verschiedener Abfallfraktionen und verschiedener Ersatzbrennstoffe.

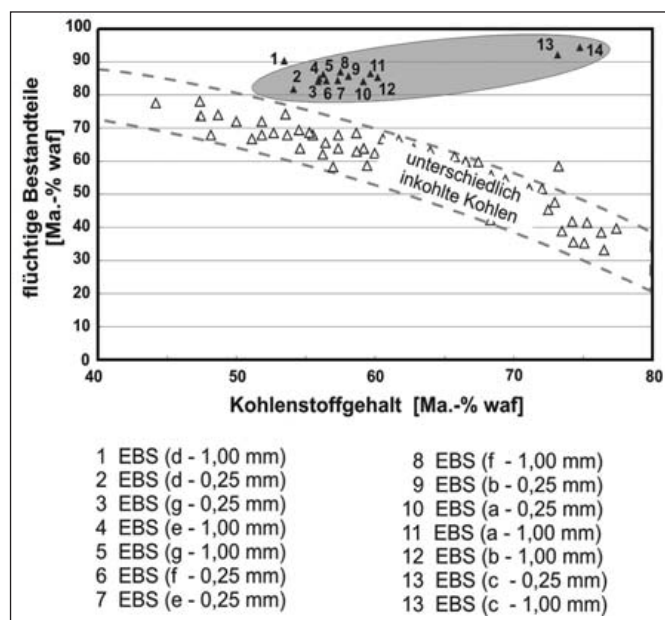


Abbildung 6: Anteil flüchtiger Bestandteile in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes unterschiedlich inkohlter Kohlen im Vergleich zu Ersatzbrennstoffen

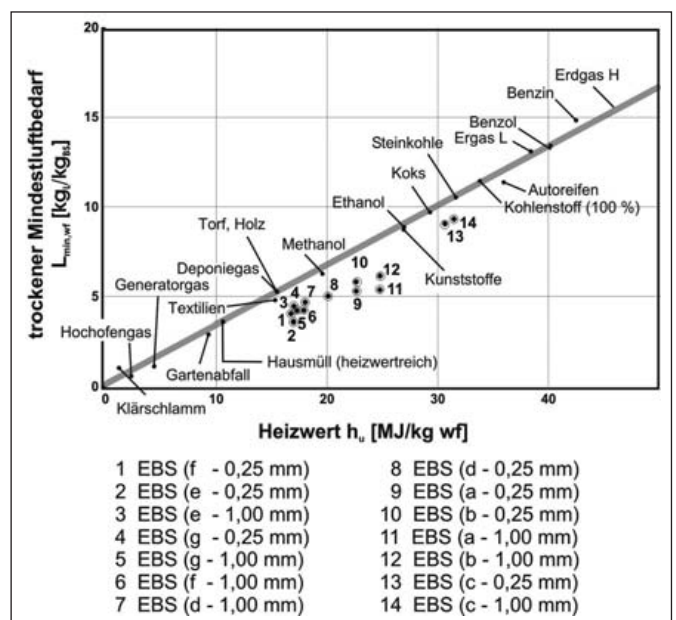


Abbildung 7: Trockener Mindestluftbedarf in Abhängigkeit vom Heizwert für verschiedene Brenn- und Abfallstoffe

stoffzusammensetzung ableiten zu können. Vernachlässigt man zunächst den Einfluss von Schwefel und Stickstoff im Brennstoff, so ergibt sich in Anlehnung an Gleichung (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, 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, so dass k_1, k_2, k_3 ermittelt werden können.

Die Gegenüberstellung der entsprechend Gleichung (3) ermittelten Heizwerte mit den experimentell ermittelten Heizwerten ist in Abbildung 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, da hierzu ein größerer Probenumfang zur Absicherung erforderlich ist.

Zusammenfassung

Für den Einsatz in Anlagen zur Energieumwandlung sowie in der Grundstoffindustrie sind fossile Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas 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 (siehe unter anderem Beckmann/Scholz⁶, Gumz⁹ und Zolkowski¹⁶). Hierüber wurde auch mit Bezug auf Ersatzbrennstoffe berichtet^{1, 3, 7, 14, 15}. Im Zusammenhang mit Ersatzbrennstoffen wurden bisher hauptsächlich die chemischen Eigenschaften bei der Freisetzung von Schadstoffen (Spurenanalyse), oder das Korrosionspotenzial untersucht und diskutiert^{4, 7, 8, 11, 13}. Darüber hinaus konnten insbesondere für die Grundstoffindustrie, ausgehend von vereinfachten prinzipiellen

Überlegungen, Aussagen zur energetischen Wertigkeit (kalorische Eigenschaften, Energieaustauschverhältnis) von Ersatzbrennstoffen abgeleitet werden⁴. 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 – zum Beispiel 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. Horeni^[10] berichtet über diese Möglichkeit im Zusammenhang mit der *Online-Bilanzierung* von Biomasse- und Abfallverbrennungsanlagen. Interessant erscheint, 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. ♦

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; wf = wasserfrei; wif = wasser- und inertstofffrei; c = Massenanteile Kohlenstoff; h = Massenanteile Wasserstoff; o = Massenanteile 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 Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Rüppel, F.: Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3- Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung, Logistik und Verwertung, Deponierung der Schwerfraktion. TK-Verlag Thomé-Kozmiensky, Dez. 2003. ISBN 3-935317-15-8, S.213-230.

- 2 Beckmann, M.; Ncube, S.: Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften. Erschienen in: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung II – stofflich – energetisch. Witztenhausen. Tagung: 19. Kasseler Abfallforum „Bio- und Sekundärrohstoffverwertung“ 24. – 26.04.2007 in Kassel. ISBN 3-928673-50-5, S. 232 – 263.
- 3 Beckmann, M.; Scholz, R.: Biomasse- und Ersatzbrennstoffe als schwierige Brennstoffe. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 1. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 3-935317-24-7. S.105 – 137. Tagung Berlin 8. – 9.11.2006.
- 4 Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1: ZKG International 52 (1999) Heft 6, S. 287 – 303. Teil 2: ZKG International 52 (1999) Heft 8, S. 411 – 419.
- 5 Beckmann, M.; Scholz, R.; Horeni, M.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. Erschienen in: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich – energetisch. Witztenhausen. XVIII. Kasseler Abfallwirtschaftskonferenz, 25.–27. April 2006. ISBN 3-928673-46-7. S. 180 – 205.
- 6 Boie, W.: Vom Brennstoff zum Rauchgas. B.G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig, 1957.
- 7 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. ISBN 3-934253-34-2.
- 8 Flamme, S.: Qualitätssicherung in Aufbereitungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 978-3-935317-26-9. S.431 – 438. Tagung Berlin 31.01. – 01.02.2007.
- 9 Gumz, W.: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik. 3. Auflage, Springer-Verlag 1962.
- 10 Horeni, M.: Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen – Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms. Papierfliegerverlag, Clausthal-Zellerfeld, Dissertation 2007. ISBN: 3-89720-889-X.
- 11 Schirmer, M.; Bilitewski, B.; Rötter, S.: Characteristics of Chlorine in MSW and RDF – Species, Sampling and Analytical Methods. 24th International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies. IT 3 Conference 9 – 13.05.2005, Galveston, Texas, USA.
- 12 Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Teubner-Reihe UMWELT, B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden 2001. ISBN 3-519-00402-X, S.1-460.
- 13 Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G.; Müller, W.; Schmid, W.: Korrosion durch Einsatz von Biomasse-Ersatzbrennstoffen: Bedarf für belagsgestützte Korrosionskenngrößen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, ISBN 978-3-935317-26-9. S.585 – 602. Tagung Berlin 31.01. – 01.02.2007.
- 14 Thiel, S.: Ersatzbrennstoffe in Kohlekraftwerken – Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Kohlekraftwerken. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Dissertation, 2007
- 15 Weber, R.: Characterization of alternative fuels. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: Optimierung der Abfallverbrennung 2. TK Verlag Karl-Thomé-Kozmiensky, 2005. ISBN 3-935317-19-0, S. 699-708.
- 16 Zolkowski, J.: Kohleverbrennung – Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. 1.Auflage 1986, Band 8 der Fachbuchreihe „Kraftwerkstechnik“, VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.

Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann leitet die Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung an der Technischen Universität Dresden. Dipl.-Ing. Martin Pohl, M.Sc. Sokesimbone Ncube und Dr. rer. nat. Kathrin Gebauer sind dort wissenschaftliche Mitarbeiter.

Adresse: TU Dresden, Institut für Energietechnik, Professur VWS, George-Bähr-Str. 3b, D-01062 Dresden, Tel. 0351 463-34493, Fax: -463-37753, eMail: michael.beckmann@tu-dresden.de, Internet: http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_maschinenwesen/iet/kwt

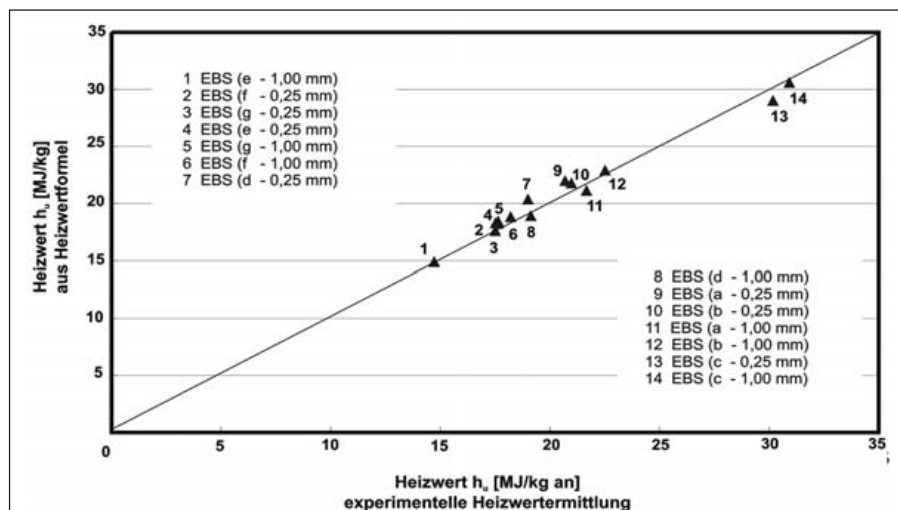


Abbildung 8: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Heizwerte mit den über die Heizwertformel ermittelten Heizwerten.