

Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften

Michael Beckmann, Martin Pohl und Sokesimbone Ncube

1.	Zusammensetzung von Ersatzbrennstoffen	203
2.	Berechnung des Heizwertes aus der Brennstoffzusammensetzung	212
3.	Zusammenfassung	215
4.	Symbolverzeichnis	216
5.	Literatur	217

1. Zusammensetzung von Ersatzbrennstoffen

In dem hier gesteckten Rahmen werden Ersatzbrennstoffe, die aus mechanischen und mechanisch-biologischen Behandlungsverfahren von Restabfall aus Haushalten und zum Teil Restabfällen aus Industrie und Gewerbe stammen, betrachtet.

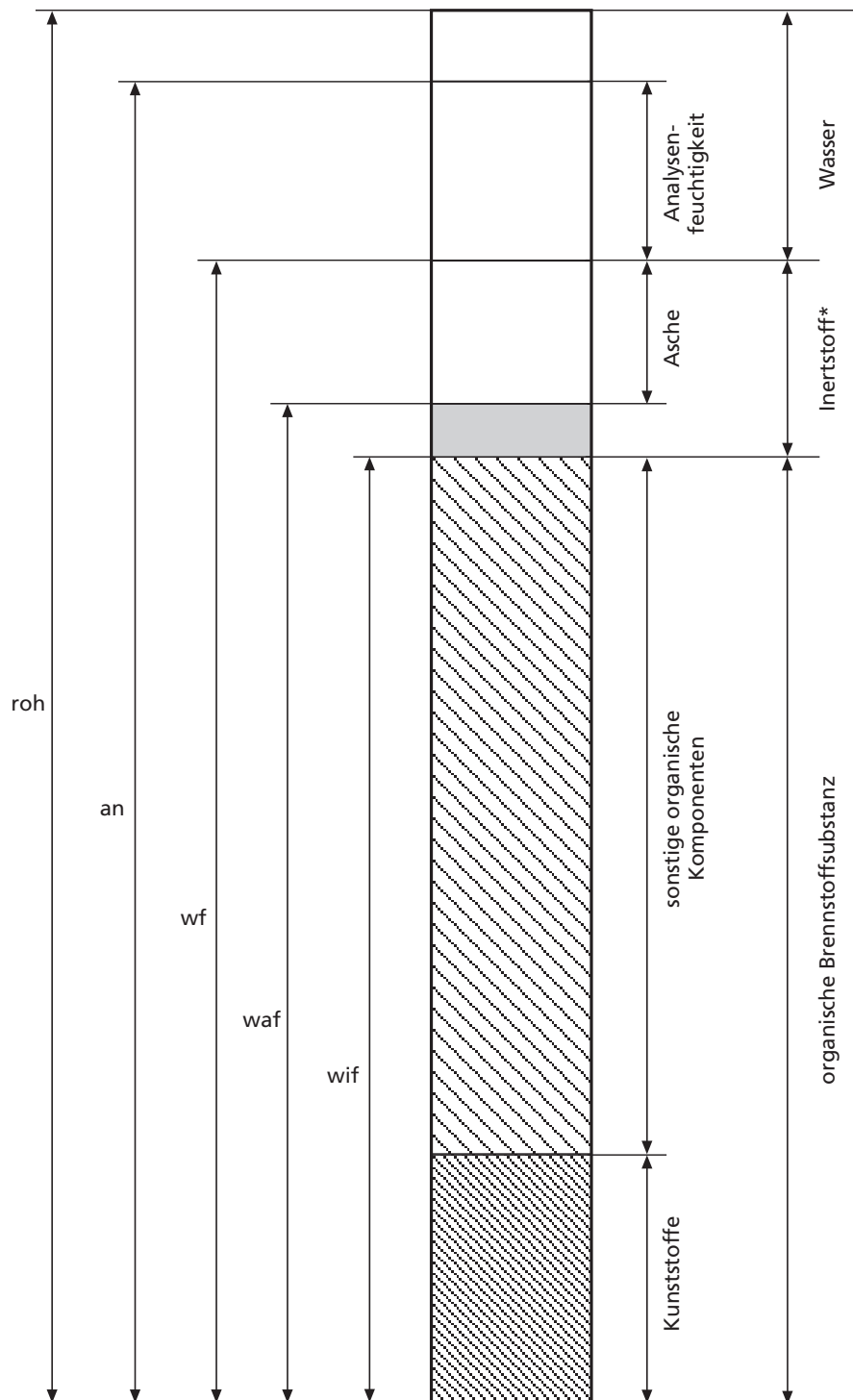
Die stoffliche Zusammensetzung von Abfällen ist regional und saisonbedingt verschieden. Zunächst kann man einen Abfall aus Haushalten hinsichtlich der Stoffgruppen (auch Fraktionen), wie Kunststoff, Feinmüll, Papier/Pappe, Vegetabilien (linke Spalte in Bild 1) unterteilen. Aus brennstofftechnischer Sicht ist in Anlehnung an die Beschreibung von fossilen Brennstoffen 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) (vergleiche 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 (siehe 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.

Stoffgruppen	Aufteilung in Komponenten				Heizwert der Stoffgruppen (MJ/kg AF _{an})
Hausmüll (kg/t AF _{an})	Wasser (kg/t AF _{an})	Inertstoff (kg/t AF _{an})	Kunststoff (kg/t AF _{an})	sonstige organische Komponenten (kg/t AF _{an})	
Kunststoff 40			40		32,50
Feinmüll 200	80	80	20	20	4,29
Steine, Keramik, Metall, Glas 100		100			0
Verbundmaterial 40		10	30		24,38
Papier, Pappe, Windeln, Textilien, Leder, Gummi 210	64	21	10	115	11,96
Vegetabilien, Holz 410	204	62		144	5,83
Gesamt 1.000	348	273	100	279	8,00

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

Quelle: Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Teubner-Reihe UMWELT, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B. G. Teubner GmbH, 2001, S. 1-460



* Je nach Inertstoff kann der Inertstoffgehalt größer oder kleiner als der Aschegehalt sein (z.B. Abspaltung von CO_2 an Karbonaten führt zu entsprechend größerem Inertstoffgehalt im Vergleich zum Aschegehalt).

Bild 2: Bezugzzustände fester Brennstoffe

Das Bild 3 zeigt für die einzelnen Stoffgruppen (s.o.), dass das C/H-Verhältnis im Bereich zwischen 7 und 8 liegt. Eine relative Anreicherung von Kunststoffen (ausgenommen PET) gegenüber biogenen Stoffgruppen, wie 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).

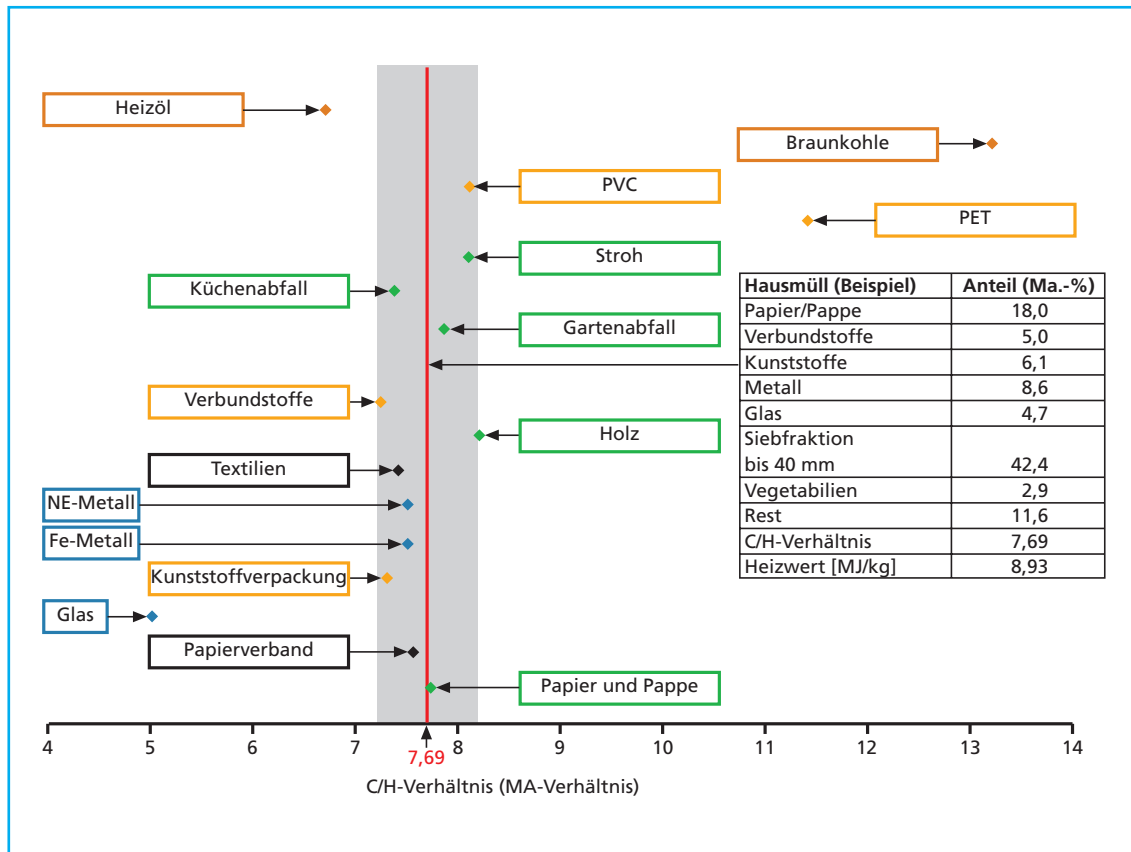


Bild 3: Darstellung des C/H-Verhältnisses verschiedener Stoffgruppen im Vergleich zum C/H-Verhältnis eines beispielhaft gewählten Hausmülls

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 und da insbesondere der Anreicherung der Kunststoffe. Der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen wird somit bei Ersatzbrennstoffen nicht wie bei fossilen Brennstoffen mit zunehmenden C-Gehalt (gleichbedeutend mit zunehmendem Heizwert, vergleiche Bild 4 und Bild 5) abnehmen, sondern näherungsweise konstant bleiben oder leicht ansteigen (Bild 6).

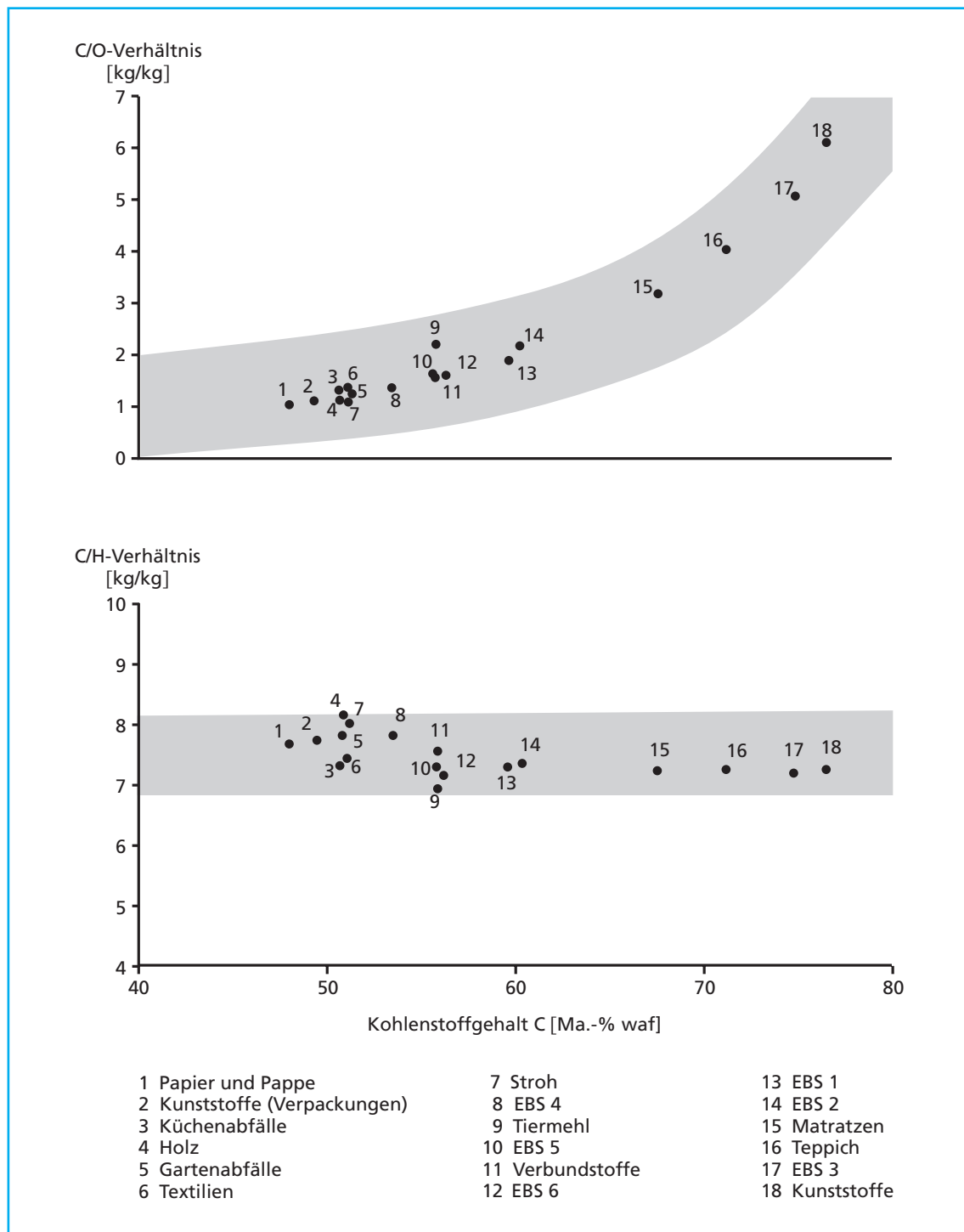


Bild 4: C/H- und C/O-Verhältnis aufgetragen über dem Kohlenstoffgehalt verschiedener Abfallfraktionen und verschiedener Ersatzbrennstoffe

Berechnet man für die in den Bildern 4, 5 und 6 beispielhaft betrachteten Ersatzbrennstoffe (EBS 1, 2, 3, 4, 5 und 6) den Mindestluftbedarf und trägt diesen über dem Heizwert auf, so ordnen sich diese Wertepaare erwartungsgemäß in den Verlauf des in [11] dargestellten Zusammenhanges ein (Bild 7).

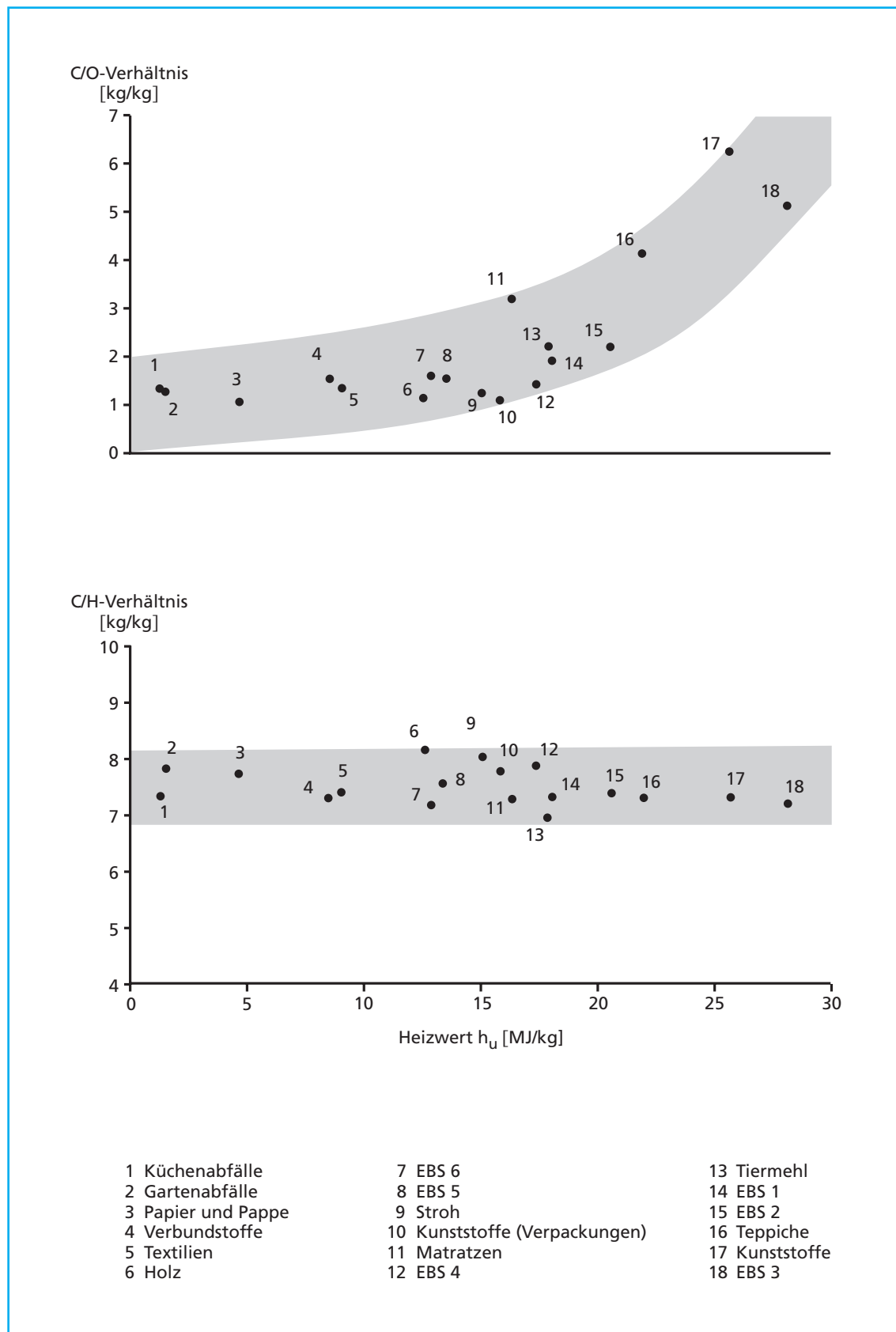


Bild 5: C/H- und C/O-Verhältnis aufgetragen über dem Heizwert verschiedener Abfallfraktionen und verschiedener Ersatzbrennstoffe

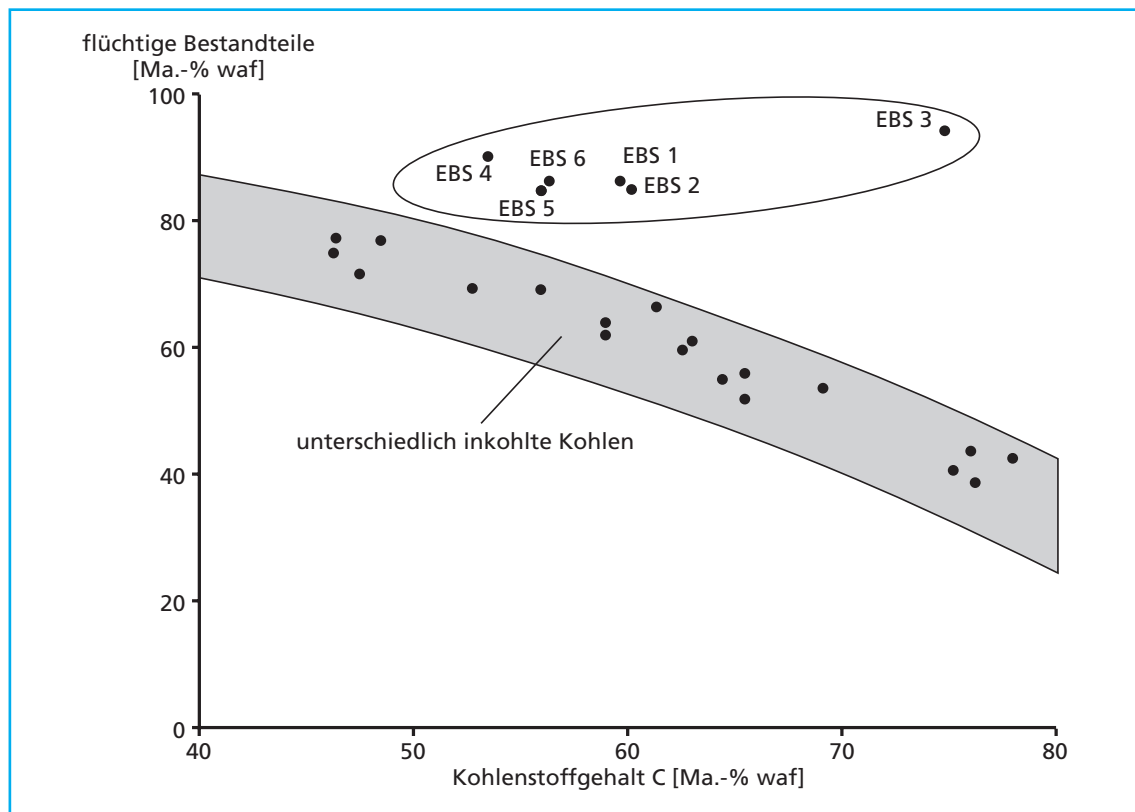


Bild 6: Anteil flüchtiger Bestandteile in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehaltes unterschiedlich inkohlter Kohlen im Vergleich zu Ersatzbrennstoffen

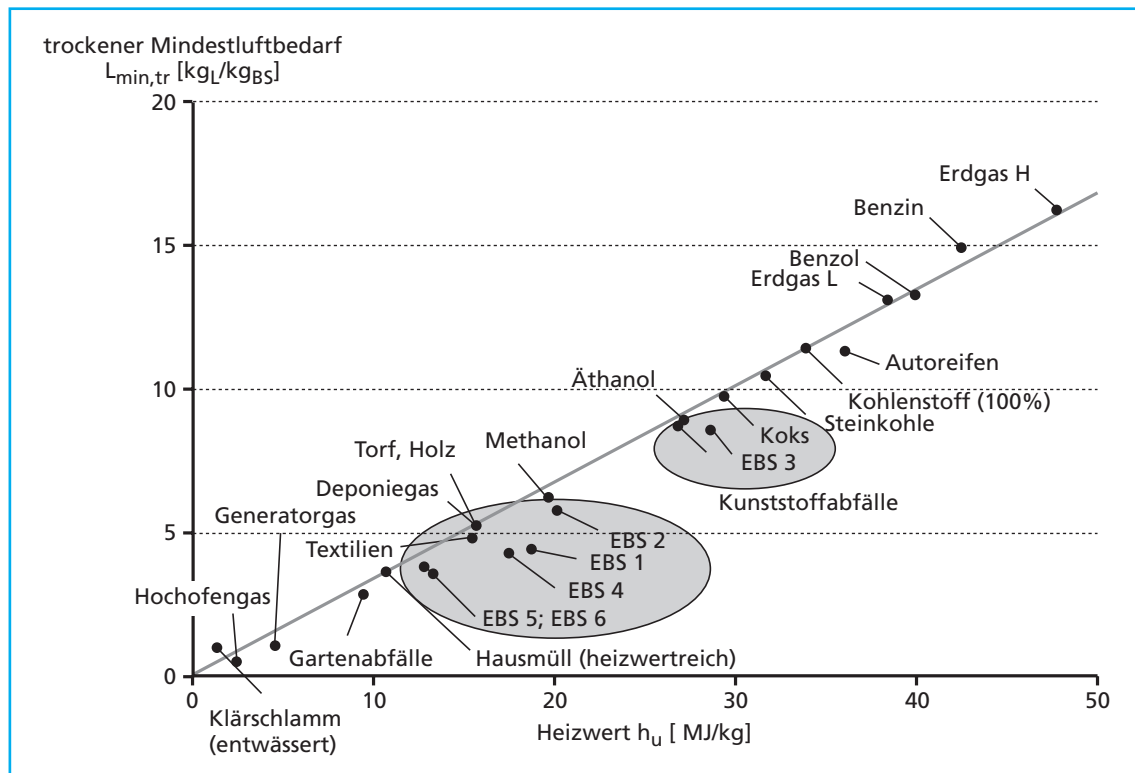


Bild 7: Trockener Mindestluftbedarf in Abhängigkeit vom Heizwert für verschiedene Brenn- und Abfallstoffe

2. Berechnung des Heizwertes aus der Brennstoffzusammensetzung

Bei der Bilanzierung von Verbrennungsanlagen stellt der Heizwert der eingesetzten Brennstoffe eine wesentliche Voraussetzung dar. Im Schrifttum sind verschiedene so genannte *Heizwertformeln* bekannt. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Brennstoffzusammensetzung und dem Heizwert entweder

- über die Heizwerte der einzelnen Brennstoffbestandteile oder aber
- durch Koeffizienten, mit denen der betreffende Brennstoffanteil am Gesamtheizwert beteiligt ist,

gebildet. 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* [15] 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. 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, 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 [15] 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 Ableitung der Faktoren sei an dieser Stelle auf [5] 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 Ersatzbrennstoffe möglich erscheinen sollte Heizwertformeln basierend auf der Brennstoffzusammensetzung 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 (s.o.) – 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 zeigt Bild 8. 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 , k_3 verzichtet, da hierzu ein größerer Probenumfang zur Absicherung erforderlich ist.

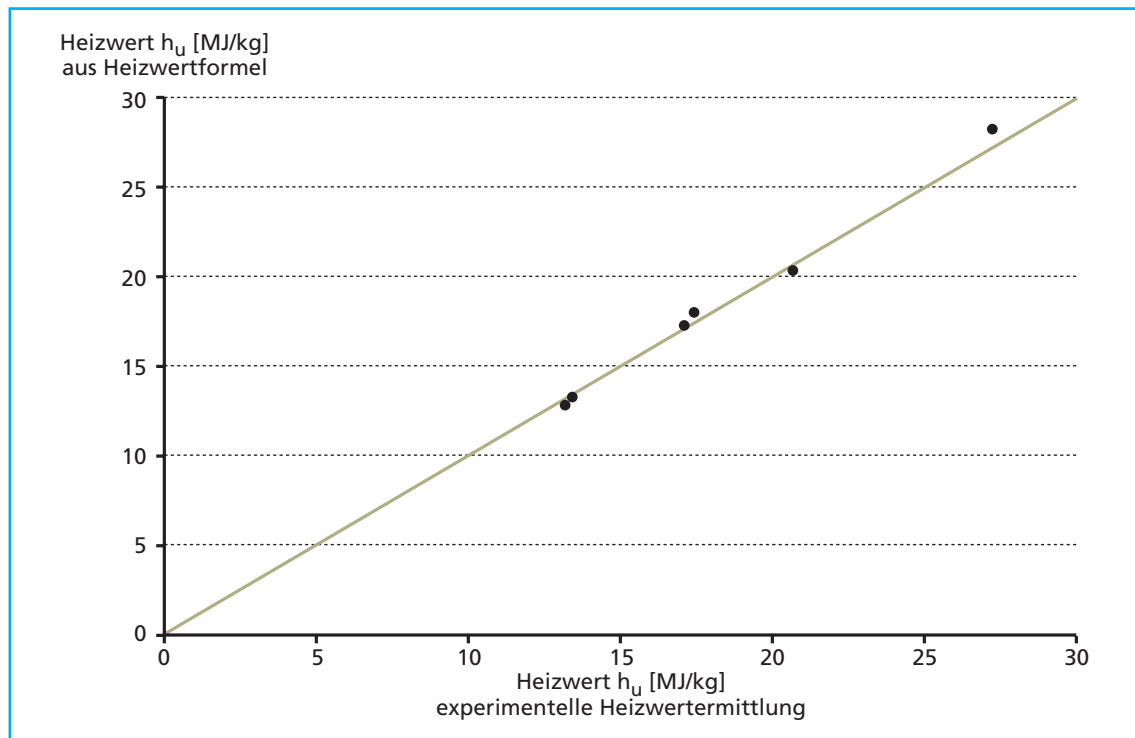


Bild 8: Gegenüberstellung der experimentell ermittelten Heizwerte mit den über die Heizwertformel ermittelten Heizwerten

3. Zusammenfassung

Fossile Brennstoffe – 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 (z.B. [5, 8 und 15]). Hierüber wurde auch mit Bezug auf Ersatzbrennstoffe in [1, 2, 6, 13 und 14] berichtet.

Im Zusammenhang mit Ersatzbrennstoffen sind bisher hauptsächlich die Spurenanalyse – chemische Eigenschaften – im Hinblick auf die Freisetzung von Schadstoffen oder das Korrosionspotenzial untersucht und diskutiert worden (u.a. in [4, 6, 7, 10 und 12]). 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 [3]. 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 [9] 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.

4. Symbolverzeichnis

Symbole und Abkürzungen

AF	Abfall	roh	Anlieferungszustand (roh)
an	Analysezustand	waf	wasser- und aschefrei
BS	Brennstoff	wf	wasserfrei
C	Kohlenstoff	wif	wasser- und interstofffrei
EBS	Ersatzbrennstoff	<i>c</i>	Massenanteil Kohlenstoff
H	Wasserstoff	<i>h</i>	Massenanteil Wasserstoff
h_u	unterer Heizwert	<i>o</i>	Massenanteil Sauerstoff
L	Luft	<i>n</i>	Massenanteil Stickstoff
$L_{\min, \text{tr}}$	Mindestluftbedarf	<i>s</i>	Massenanteil Schwefel
O	Sauerstoff	<i>a</i>	Massenanteil Asche
		<i>w</i>	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

5. Literatur

- [1] Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Rüppel, F.: Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3 – Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung, Logistik und Verwertung, Deponierung der Schwerfraktion. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003, S. 213-230
- [2] Beckmann, M.; Scholz, R.: Biomasse- und Ersatzbrennstoffe als schwierige Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 105-137
- [3] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. In: ZKG International 52 (1999), Teil 1, Nr. 6, S. 287-303; ZKG International 52 (1999), Teil 2, Nr. 8, S. 411-419
- [4] Beckmann, M.; Scholz, R.; Horeni, M.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich – energetisch. Witzenhausen. XVIII. Kassler Abfallwirtschaftskonferenz, 25.-27. April 2006, S. 180-205
- [5] Boie, W.: Vom Brennstoff zum Rauchgas. Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1957
- [6] 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, Band 41, 2005
- [7] Flamme, S.: Qualitätssicherung in Aufbereitungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 431-438
- [8] Gumz, W.: Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik. 3. Auflage, Springer-Verlag, 1962
- [9] Horeni, M.: Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen – Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms. Clausthal-Zellerfeld: Papierfliegerverlag, Dissertation, 2007
- [10] Schirmer, M.; Bilitewski, B.; Rotter, 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
- [11] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse, Verfahrens- und Anlagenkonzepte. Teubner-Reihe UMWELT, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden: B. G. Teubner GmbH, 2001, S. 1-460

- [12] Spiegel, W.; Herzog, T.; Jordan, R.; Magel, G; Müller, W.; Schmidl, W.: Korrosion durch Einsatz von Biomasse- Ersatzbrennstoffen: Bedarf für belagsgestützte Korrosionskenngrößen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2007, S. 585-60
- [13] Thiel, S.: Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Kohlekraftwerken. Dissertation, 2007, Veröffentlichung demnächst
- [14] Weber, R.: Characterization of alternative fuels. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M.: Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 699-708
- [15] Zelkowski, J.: Kohleverbrennung – Brennstoff, Physik und Theorie, Technik. 1. Auflage 1986, Band 8 der Fachbuchreihe *Kraftwerkstechnik*, VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.