

## Übersichtsbeitrag

# Ersatzbrennstoffe in der Kraftwerkstechnik

Hans-Joachim Gehrmann<sup>1,\*</sup>, Helmut Seifert<sup>1</sup>, Michael Beckmann<sup>2</sup> und Thomas Glorius<sup>3</sup>

DOI: 10.1002/cite.201100214

Alternative Brennstoffe können Regelbrennstoffe direkt, z. B. in Kohlekraftwerken, und indirekt, z. B. durch thermochemische Konversion zu gasförmigen, flüssigen und festen Brennstoffen, ersetzen. Die Bandbreite reicht dabei von abfallbasierten Brennstoffen, sog. Ersatzbrennstoffe (EBS), bis hin zu einer Vielzahl biogener Brennstoffe. Vor dem Hintergrund der CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele und der Energiewende leistet die effiziente energetische Nutzung dieser alternativen Brennstoffe einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung des Einsatzes fossiler Energieträger. Ausgehend von der Brennstoffcharakterisierung werden prozesstechnische Anforderungen und die Effizienz verschiedener Verfahrensketten zur energetischen Nutzung der EBS betrachtet sowie ein Überblick über den EBS-Einsatz im Kraftwerksbereich in Deutschland gegeben.

**Schlagwörter:** Brennstoffcharakterisierung, Ersatzbrennstoffe, Mitverbrennung, Monoverbrennung

*Eingegangen:* 28. Oktober 2011; *revidiert:* 17. Februar 2012; *akzeptiert:* 23. Februar 2012

## Usage of Solid Recovered Fuels in Power Plants

Alternative Fuels can substitute standard fuels directly, e.g. in coal-fired power plants, or indirectly, e.g. as gaseous, liquid or solid fuels, produced via thermo-chemical conversion. They range waste based fuels, the so-called solid recovered fuels and many biogenic fuels. The efficient use of these alternative fuels is an important contribution in regard to the CO<sub>2</sub> reduction plan of the German Federal Government and for the reduction of the use of fossil fuels. Based on a detailed fuel characterization the process specific requirements for co-firing in power plants are analyzed and the energetic efficiencies of various process chains are evaluated and the state of the art of the co-firing in Germany is presented.

**Keywords:** Co-firing, Fuel characterization, Incineration, Solid recovered fuels

## 1 Einleitung

Der bislang nicht definierte Begriff *Ersatzbrennstoff* (EBS) leitet sich aus dem Anwendungsbereich dieser Brennstoffe ab: Sie ersetzen in einem thermischen Prozess bisher dort als Standard eingesetzte Brennstoffe, in der Regel sind dies fossile gasförmige, flüssige oder feste Brennstoffe. Der Einsatz von Ersatzbrennstoffen in thermischen Prozessen konzentrierte sich zunächst auf aus produktionsspezifischen Abfällen hergestellte Brennstoffe [1]. Nach positiven Einsatzenerfahrungen mit diesen Brennstoffen war die Grund-

lage gelegt, auch an der Brennstoffentwicklung aus mechanisch-biologischen (MBA) und mechanisch-physikalischen (MPA) Anlagen zu arbeiten. Die MBA-Verfahren wurden vor ca. 20 Jahren mit dem Ziel entwickelt, eine Alternative zur ausschließlichen Verbrennung von Abfällen in klassischen Müllverbrennungsanlagen und zur Deponierung unbehandelter Abfälle zu bieten. Aus den Betriebserfahrungen dieser Anlagen und erkannten notwendigen Neuerungen im gesetzlichen Bereich entstand die 30. BImSchV, die deren Anlagenbetrieb regelt.

Heute werden verschiedenste Ersatzbrennstoffe überwiegend im Zementprozess, in Monoverbrennungsanlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung (sog. Ersatzbrennstoffkraftwerke) und in der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken eingesetzt. In der Zementindustrie werden an einzelnen Standorten bereits Substitutionsraten von bis zu 100% erreicht, im bundesdeutschen Durchschnitt lag die Substitutionsrate 2010 bei 61% [2]. In deutschen Kohlekraftwerken liegt der Anteil an der Feuerungswärmeerzeugung in Einzelfällen bei bis zu 20% [3]. Die Preisentwicklung auf dem Abfallmarkt und auf dem Energiemarkt haben dazu beige-

<sup>1</sup>Dr.-Ing. Hans-Joachim Gehrmann (hans-joachim.gehrmann@kit.edu), Prof. Dr.-Ing. Helmut Seifert, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie, Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland; <sup>2</sup>Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann, Technische Universität Dresden, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung, George-Bähr-Straße 3b, 01069 Dresden, Deutschland; <sup>3</sup>Dr.-Ing. Thomas Glorius, REMONDIS GmbH, Tonstraße 1, 50374 Erftstadt, Deutschland.

tragen, dass die zwischenzeitlich noch hohen Erträge bei der thermischen Verwertung von Ersatzbrennstoffen heute deutlich je nach Qualität zum Teil bis auf 0 € je Tonne Brennstoff zurückgegangen sind [4] bzw. hochwertige, gütegesicherte Sekundärbrennstoffe mittlerweile wieder wie zu Beginn der Marktentwicklung Ende der 90er Jahre vergütet werden. Hierzu tragen u. a. die mit dem Ersatzbrennstoffeinsatz verbundenen Reduzierungen fossiler CO<sub>2</sub>-Emissionen bei, da der biogene Anteil in Ersatzbrennstoffen mit 20 bis 80 Ma.-% sehr hoch sein kann [5] und ab 2013 die CO<sub>2</sub>-Zertifikate für die Stromerzeugung nicht mehr kostenlos zugeteilt werden [6]. Auf der anderen Seite beeinflussen Faktoren wie die Verfügbarkeit der Anlagen, Emissionen und Vermarktungsfähigkeit der Aschen die Wirtschaftlichkeit beim Betrieb mit EBS in thermischen Prozessen. Um auch diesbezüglich Lösungen zu finden, wurden zunächst auf nationaler Ebene RAL-Gütekriterien und später internationale CEN-Standards erarbeitet. So kann für gütegesicherte Sekundärbrennstoffe eine verlässliche Qualität garantiert werden [7–9]. Dies ist insbesondere für Kraftwerksbetreiber erforderlich, da die Standzeit der Kessel maßgeblich vom Chlorgehalt der eingesetzten Brennstoffe sowie den Betriebsbedingungen abhängt. Entsprechende Techniken zur Minimierung des organischen Chlorgehaltes im EBS wurden im Jahr 2001 erstmalig eingeführt [10], weiterentwickelt und haben sich mittlerweile langjährig bewährt [9]. Zur Online-Überwachung des Kesselzustandes gibt es darüber hinaus verschiedene Sonden-Messungen, z. B. zur Ermittlung der Wärmestromdichte [11], der Partikelzusammensetzung im Abgas [12] und zur Ermittlung des Asche/Salz-Verhältnisses am Ende des Dampferzeugers [13].

Bei der Beurteilung sind aus brennstofftechnischer Sicht insbesondere chemische, mechanische, kalorische und reaktionstechnische Eigenschaften insgesamt zu betrachten (z. B. [14–16], (Abb. 1)). Auf Basis der chemischen und kalorischen Merkmale allein kann jedoch ein sicherer und dauerhafter Betrieb der Anlagen nicht abgeschätzt werden, da



Abbildung 1. Einteilung der Brennstoffeigenschaften.

auch die mechanischen und verbrennungstechnischen Eigenschaften der Brennstoffe von wesentlicher Bedeutung sind. Die Methoden zur brennstofftechnischen Analyse von Regelbrennstoffen, wie z. B. Braun- oder Steinkohlen, lassen sich jedoch nur eingeschränkt auf Ersatzbrennstoffe übertragen. Aus diesem Grund werden derzeit Methoden erarbeitet oder die bestehenden Analysemethoden zur Charakterisierung fossiler Brennstoffe auf die verschiedenen Ersatzbrennstoffe angepasst.

Inwieweit der Einsatz eines Ersatzbrennstoffes in einem thermischen Verfahren sinnvoll ist oder nicht, hängt einerseits von wirtschaftlichen Aspekten ab, andererseits von seinen brennstoff- und verbrennungstechnischen Eigenschaften und den damit verbundenen Auswirkungen auf den thermischen Prozess. Fasst man den Rahmen jedoch über den Einzelprozess hinaus weiter und berücksichtigt die Vorprozesse der Ersatzbrennstoffherstellung und die Verwertung der anfallen Reststoffe unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkungsgrade, bedarf es einer energetischen Gesamtbetrachtungsweise, die unter Berücksichtigung entsprechender Randbedingungen den Einsatz des Ersatzbrennstoffs als energetisch sinnvoll abschätzen kann. Je nach getroffenen Annahmen und Randbedingungen kann der EBS-Einsatz aus energetischer Sicht sinnvoll sein, er wird aber aus wirtschaftlichen Gründen nicht umgesetzt.

## 2 Bedeutung von Ersatzbrennstoffen

Ersatzbrennstoffe ersetzen Regelbrennstoffe direkt, z. B. bei dem Einsatz in Kohlekraft- oder Ersatzbrennstoffkraftwerken [6], in der Grundstoffindustrie [17] und indirekt, z. B. über ein aus einer Vergasungsanlage erzeugtes Schwachgas, was in thermischen Folgeprozessen energetisch oder stofflich genutzt werden kann.

### 2.1 Herstellung von Ersatzbrennstoffen

Zunächst soll durch die Aufbereitung der Abfälle die Eignung des Materials in Richtung eines Brennstoffes verbessert werden, der auch in Anlagen mit einem höheren elektrischen Wirkungsgrad als in einer Monoverbrennungsanlage eingesetzt werden kann. Folgende Eigenschaften werden dabei angestrebt (nach [18]):

- Erhöhung des Heizwerts,
- Vergrößerung der Homogenität,
- Verringerung der Brennstofffeuchte,
- Verringerung des Aschegehaltes und des Anteils an Störstoffen (u. a. Eisen- und Nichteisenmetalle, in der Regel auch Chlor, etc.),
- Verringerung der Schadstoffe (insbesondere Schwermetalle),
- Verbesserung der Lagerfähigkeit durch beispielsweise eine Anpelletierung,
- Verbesserung des Zünd-, Reaktions- und Ascheschmelzverhaltens und

- Verkleinerung der Partikelgrößenverteilung.
- Am Beispiel der mechanisch-biologischen Aufbereitung von Restabfällen in [19] wird die Aufbereitung zum Ersatzbrennstoff beschrieben. Die wesentlichen Stufen bestehen aus:
  - Abfallannahme mit einer Eingangskontrolle,
  - mechanische Aufbereitung mit Siebungs- und Sichtungungsverfahren,
  - biologische Stufe (Vergärung) mit Abluft- und Wasserbehandlung,
  - biologische Trocknung und
  - abschließende mechanische Stofftrennung mittels Siebungs- und Sichtungungsverfahren.

Abb. 2 zeigt die entsprechende Massenbilanz für 120 000 Jahrestonnen. Vom Eingangsmaterial können 38 % als Ersatzbrennstoffe gewonnen werden. 2 % der eingesetzten Menge werden als Metalle zurückgewonnen. Das bei dem biologischen Abbau freiwerdende Biogas wird u. a. zur Deckung des Eigenbedarfes an Gas für die Stützfeuerung in der Abgasbehandlung sowie zur Verstromung genutzt. Wie wichtig die Ausschleusung von metallischen Störstoffen bei der Aufbereitung zum Ersatzbrennstoff ist, zeigt Abb. 3.

Während der Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen in der zirkulierenden Wirbelschicht im Kraftwerk in Flensburg sammelten sich die Metalle am Düsenboden an. Die Störstoffe können die Luftverteilung und die damit verbundene Fluidisation in der Wirbelschicht deutlich verschlechtern.

Neben der Ausschleusung von Metallen, kommt dem Parameter Chlor im Hinblick auf die Korrosion in Kesseln besondere Bedeutung zu. REMONDIS bzw. deren Vorläufergesellschaften führten bereits 2001 ergänzend zu den oben genannten Prozessstufen Nahinfrarottechnik (NIR) der Firma TiTech zur Ausschleusung organischen Chlors, das überwiegend in Form von PVC vorliegt, ein [10]. Damit lassen sich auch für heterogene Inputmaterialien geringere und deutliche konstantere Chlorgehalte, z. B. kleiner



Abbildung 3. Störstoffe in der Wirbelschicht im Steinkohlekraftwerk Flensburg [20].

0,5 Ma.-% erreichen. Im Rahmen des EU-Vorhabens RECOMBIO [8] wird die NIR-Technik zur Online-Analyse seitens TiTech in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und REMONDIS weiterentwickelt.

Der Chlorgehalt im Ersatzbrennstoff wirkt sich dementsprechend auch auf die erzielbaren Preise aus. Abb. 4 zeigt beispielhaft die Auswirkungen steigender Chlorgehalte in Ersatzbrennstoffen unterschiedlicher Heizwerte auf [21]. Bei konstantem Chlorgehalt und einer Zunahme des Heizwertes von  $8 \text{ MJ kg}^{-1}$  auf  $18 \text{ MJ kg}^{-1}$  können bereits etwa  $10 \text{ € t}^{-1}$  zusätzlich beim Aufbereiter verbleiben. In etwa gleicher Größenordnung liegt die Veränderung bei konstanten Heizwert und einer Reduzierung des Chlorgehaltes von 1 Ma.-% auf 0,5 Ma.-%.

Auch der biogene Anteil von Ersatzbrennstoffen hat zunehmend Einfluss auf dessen Marktwert [8]. Je nach Heizwert, Chlorgehalt und biogenem Anteil werden derzeit in Deutschland und anderen EU-Ländern Preise für Sekundärbrennstoffe zur Mitverbrennung von über  $1 \text{ € GJ}^{-1}$  erzielt.

Mittlerweile gibt es eine Reihe von internationalen Standards zur brennstofftechnischen Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen, wie z. B. CEN TC 343. Gemäß

dem Standard CEN EN 15359 können Ersatzbrennstoffe mittels der drei Parameter Heizwert, Chlor- und Quecksilbergehalt jeweils in fünf Klassen dieses Klassifikationssystems für SRF (Solid Recovered Fuel – Ersatzbrennstoff) eingeteilt werden. Bei einem Heizwert von  $\geq 25 \text{ MJ kg}^{-1}$  in der Rohsubstanz gilt die Hu-Klasse 1, bei einem Chlorgehalt von  $\leq 0,2 \text{ Ma.-%}$  in der Rohsubstanz die Cl-Klasse 1 und Quecksilberwerten  $\leq 0,02/0,04 \text{ mg MJ}^{-1}$  (Median bzw. 80. Perzentile) der Rohsubstanz die Hg-Klasse 1 [7]. Es ergibt sich so ein dreistelliger Klassifizierungscode, der es erlaubt, alle in Europa existierenden SRF-Qualitäten einzuordnen.

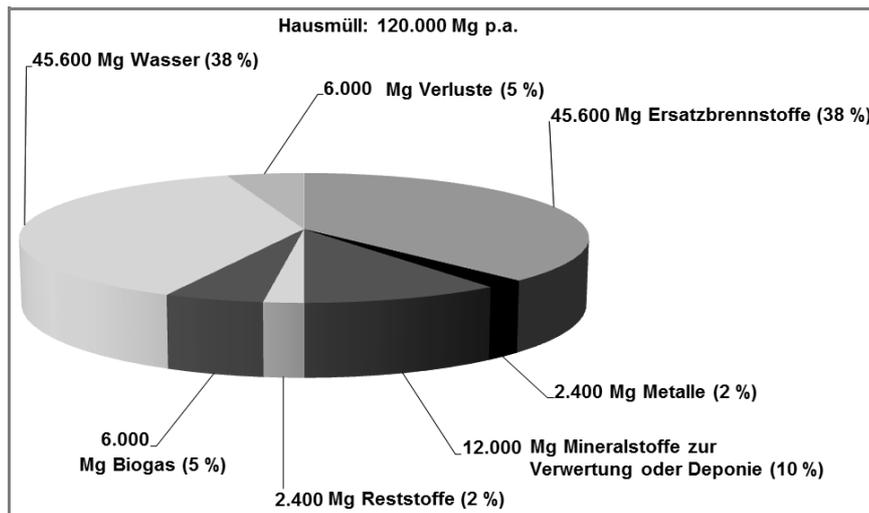
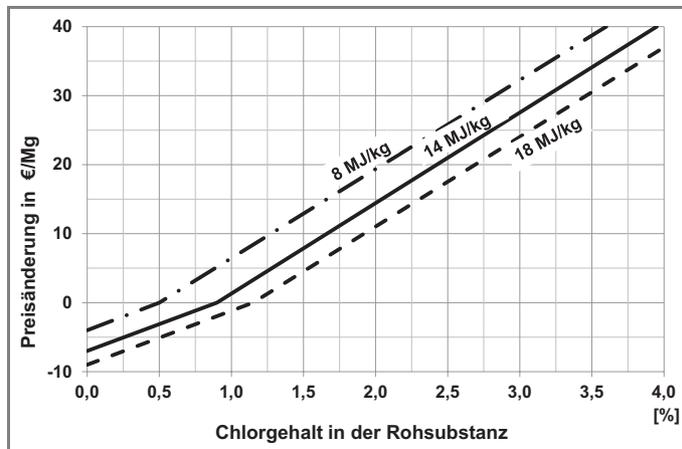


Abbildung 2. Massenbilanz der MBA in Kahlenberg [19].



**Abbildung 4.** Auswirkungen des Chlorgehaltes und des Heizwertes auf den EBS-Preis [21].

Allerdings reichen diese drei Klassifikationsparameter alleine für eine vollständige Charakterisierung nicht aus [22, 23]. Daher listet die CEN EN 15359 eine Vielzahl von Spezifikationsparametern auf, die zum Teil für eine Spezifikation verbindlich sind (z. B. Schwermetalle nach IED), teilweise aber auch unverbindlichen Charakter haben. Zudem müssen die Anforderungen an die Prozessführung in dem jeweiligen Apparat mit berücksichtigt werden. Aus verfahrenstechnischer Sicht gibt es sehr umfangreiche Möglichkeiten zur Prozessgestaltung und -führung. Schwierigkeiten bei der Substitution von Regelbrennstoffen aber auch bei der Planung von neuen Anlagen und der Anlagenoptimierung ergeben sich oftmals aufgrund fehlender und unzureichender Daten zu den brennstofftechnischen Eigenschaften, wie z. B. die verbrennungstechnischen Eigenschaften der Brennstoffe, aber auch aufgrund weiterhin fehlender Standards zur Beschreibung z. B. des fördertechnischen Verhaltens von Ersatzbrennstoffen.

Fossile Brennstoffe, wie Kohle, Erdöl und Erdgas, 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, wie z. B. in der VGB-Richtlinie VGB-R 210 beschrieben [24], abgeleitet werden.

## 2.2 Aufkommen von Ersatzbrennstoffen

2010 wurden in Deutschland gut 6 Mio. Tonnen Ersatzbrennstoffe verschiedener Qualität aus produktionsspezifischen Abfälle sowie aus Siedlungsabfall in ca. 140 Anlagen hergestellt [25]. Diese Anlagen arbeiten im Falle der Verarbeitung von Produktionsabfällen in der Regel rein mechanisch und bei Behandlung von Hausmüll üblicherweise in mechanisch-biologischen Prozessen verschiedener Konzeption [21]. Die mechanisch-biologischen Verfahren haben sich in Deutschland nach

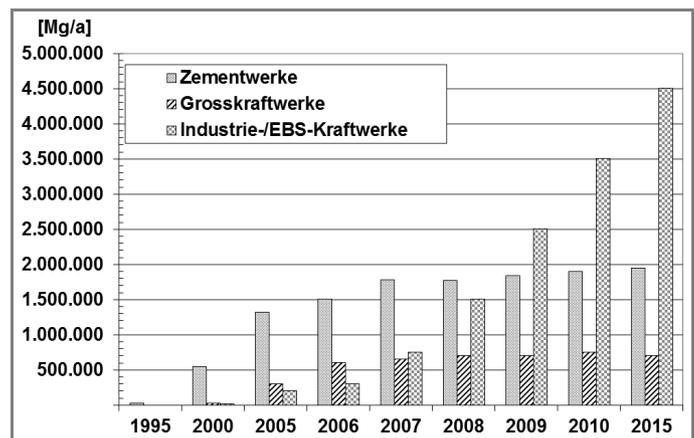
anfänglichen technischen Schwierigkeiten insbesondere mit der Abluft aus der Rotte und der Einhaltung der Ablagerungswerte mittlerweile, bis auf wenige Ausnahmen, etabliert [26]. Zudem mussten sich viele Anlagenbetreiber erst auf das Thema Brennstoffproduktion und die für die Mitverbrennung in Zement- und Kraftwerken oder die Monoverbrennung in EBS-Kraftwerken erforderlichen Qualitäten einstellen [22]. Aufgrund der zunehmenden Überkapazität von Behandlungsanlagen [27] ist zu erwarten [28], dass neben der (Teil-)Stilllegung von Müllverbrennungsanlagen auch MBAs insbesondere Anlagen alter Konzeption zur Erzeugung von Deponiestabilaten außer Betrieb genommen werden. Stattdessen werden MBS-Anlagen mit Splittingfunktion zur maximalen Bereitstellung von Ressourcen/Stoffströmen zur stofflichen und energetischen Verwertung national und international an Bedeutung gewinnen, die flexibel auf Marktentwicklungen reagieren können.

2010 waren die bestehenden MBA-Anlagen nach [29] mit rund 96 % gut ausgelastet.

Im Jahr 2010 erreichte die Substitutionsrate in deutschen Zementwerken durch Ersatzbrennstoffe die neue Rekordmarke von 61 % [2]. Mit einer Einsatzmenge von ca. 1,9 Mio.  $\text{t a}^{-1}$  sind Sekundärbrennstoffe aus Gewerbeabfällen und hochkalorischen Fraktionen zu einer unverzichtbaren Energiequelle für die deutsche Zementindustrie geworden (s. Abb. 5).

Auch für etliche Kraftwerke ist die Mitverbrennung eine Option geworden. In den letzten Jahren gewinnt der Einsatz in industriellen Kraftwerken z. B. der chemischen Industrie bzw. der Papierindustrie an Bedeutung. Diese auch als EBS-Kraftwerke bezeichneten Anlagen werden häufig Kraft-Wärme-gekoppelt betrieben und können so ganzjährig hohe Nutzungsgrade erreichen.

Da sowohl in der Grundstoffindustrie (Zement- und Kalkproduktion) als auch im Kraftwerksbereich deutlich höhere Anforderungen an die Brennstoffqualität gestellt werden, sind die mitverbrannten Mengen im Vergleich zu den in



**Abbildung 5.** Entwicklung der Einsatzmengen von Ersatzbrennstoffen in Deutschland, Angaben für Brennstoffe aus Gewerbeabfällen bzw. hochkalorischen Fraktionen (Stand 2010 [9]).

EBS-Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen eingesetzten Mengen geringer. Durch die Novellierung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) mit der flächendeckenden Einführung der Wertstofftonne ab 2015 und der Getrennterfassung von Bioabfällen bis 2015 wird der Anteil der separat erfassten Bioabfälle steigen und damit die zur thermischen Verwertung in MVAs zur Verfügung stehenden Restabfälle weiter reduziert [29]. Zusammen mit steigenden Energiepreisen wird der Druck auf die Anlagenbetreiber zunehmen, die verbleibenden Abfälle bzw. Ersatzbrennstoffe in möglichst energieeffizienten Anlagen umzusetzen [29].

### 2.3 Einsatzmöglichkeiten

Ersatzbrennstoffe sind keine Regelbrennstoffe, d.h. bei ihrem Einsatz ist die 17. BImSchV je nach eingesetzter Menge mithilfe der Mischungsregel anzuwenden. Die Mischungsregel gilt für Kraftwerke bis maximal 25 % Abfallanteil an der Feuerungswärmeleistung für die in § 5, Abs. 1 genannten Stoffe. Bei einem Anteil größer 25 % gelten die Grenzwerte der 17. BImSchV für die in § 5, Abs. 1 genannten Stoffe unabhängig von der eingesetzten Menge zu 100 %. Bei Anlagen zur Herstellung von Zementklinkern und zum Brennen von Kalk gilt die Mischungsregel bis zu 60 % Ersatzbrennstoffanteil an der Feuerungswärmeleistung, bei mehr als 60 % gilt die 17. BImSchV zu 100 %. Darüber hinaus findet bei der Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen unabhängig vom eingesetzten Ersatzbrennstoffanteil an der Feuerungswärmeleistung für bestimmte Stoffe (Schwermetalle, Benzo(a)pyren, Dioxine/Furane) die 17. BImSchV in vollem Umfang Anwendung.

Bei bestehenden, für die Kohleverbrennung ausgelegten Kesselanlagen, ist das Verhalten des Brennstoffes bezüglich Zündfähigkeit, Flammenbild, Verschlackung, Belagsbildung, Kohlenstoffanteil in der Asche, Ausbrandverhalten,

Emissionen ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , CO, Staub usw.) weitestgehend bekannt. Bei der Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen in Kohlekraftwerken – derzeit bevorzugt Klärschlamm und Ersatzbrennstoffe – sind für den Betreiber besondere Aspekte zu beachten.

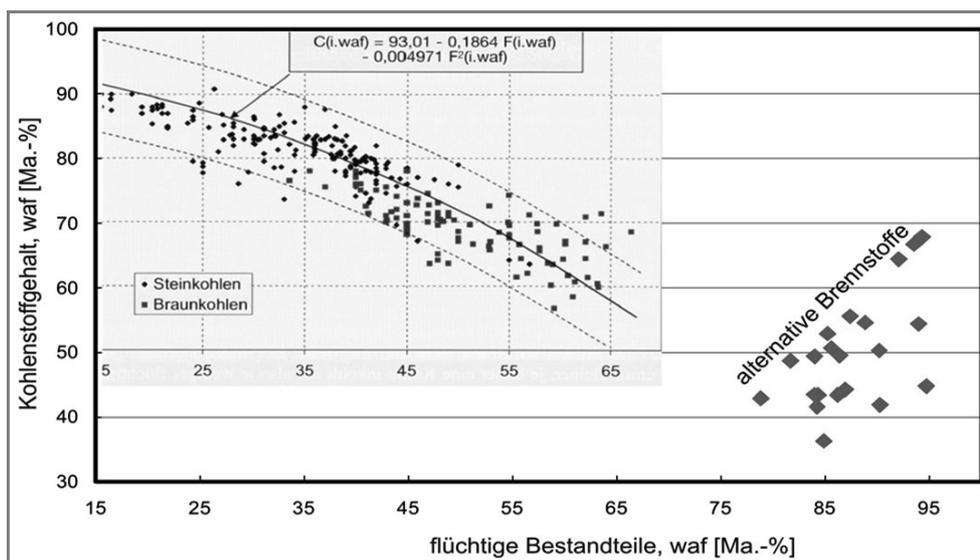
Die häufig heterogene Zusammensetzung der alternativen Brennstoffe, die immer eine veränderte Verbrennungscharakteristik mit sich bringt, muss den Ansprüchen der für die Kohleverbrennung ausgelegten Kesselanlage entsprechen. Einen ganz erheblichen Einfluss auf die Verbrennungscharakteristik haben hierbei z. B. der Gehalt an flüchtigen Bestandteile (s. Abb. 6) sowie die Aschezusammensetzung (Chlor- bzw. Alkali- und Erdalkaliengehalt).

Die Erfahrung hat gezeigt (z. B. [30–33]), dass die Verbrennungscharakteristik einer Brennstoffmischung aus Regelbrennstoff und alternativen Brennstoffen nicht anhand der Massenanteile in der Mischung beurteilt werden kann, da sich u. a. aufgrund der zeitlich unterschiedlichen Freisetzung und der unterschiedlichen Anteile der flüchtigen Bestandteile Wechselwirkungen ergeben [34, 35]. Ähnliches gilt auch für das Aus- und Abbrandverhalten.

Ein weiteres Problem basiert auf der Wechselwirkung der unterschiedlichen Aschezusammensetzungen der Brennstoffe. Hierbei kann es aufgrund von unterschiedlichen Schmelzpunkten der Aschen zur Freisetzung von zunächst gasförmigen Bestandteilen und zu erheblichen Belagsbildungen auf den Dampferzeugerheizflächen in der Verbrennungsanlage kommen.

### 2.4 Prozesstechnische Anforderungen beim großtechnischen Einsatz

Die Vorteile beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen für Kraftwerksbetreiber sind vor allem die Einsparung fossiler Ener-



**Abbildung 6.** Zusammenhang zwischen flüchtigen Bestandteilen und dem Kohlenstoffgehalt für verschiedene Kohlen (nach [16]) und verschiedene alternative Brennstoffe einschließlich Ersatzbrennstoffen.

gieträger und die damit verbundenen Einsparungen für CO<sub>2</sub>-Zertifikate, die Unabhängigkeit von steigenden Primärenergieträgerpreisen und möglicher Qualitätsminderungen der fossilen Brennstoffe sowie Kostenvorteile bei der Beschaffung von Ersatzbrennstoffen im Vergleich zu fossilen Brennstoffen [20].

Demgegenüber stehen folgende Forderungen bzw. Risiken: Beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerken zur Substitution von Regelbrennstoffen sollte die Verfügbarkeit der Anlagen nicht eingeschränkt werden, d. h. beispielsweise keine Verkürzung der Anlagereisezeiten. Des Weiteren sollten keine wesentlichen Veränderungen hinsichtlich der Schadstoff-Freisetzung resultieren, was gegebenenfalls durch eine Nachrüstung von Abgasreinigungsanlagen zu gewährleisten ist. Nicht zuletzt sollte der Brennstoff in Bezug auf die Energiedichte so gewählt werden, dass es zu keiner gravierenden Änderung des Wirkungsgrades der Anlage kommt. Außerdem sollten durch den Ersatzbrennstoff möglicherweise eingebrachte Störstoffe die Entschungseinrichtungen nicht verstopfen. Die Realisierung dieser Forderungen wird hauptsächlich durch den Brennstoff und dessen Eigenschaften, aber auch durch die Prozessführung und die jeweils eingesetzten Apparate der jeweiligen Anlage bestimmt.

Abb. 7 zeigt beispielhaft den Zusammenhang zwischen Partikelgröße und erforderlicher Ausbrandzeit sowie den Einfluss eines erhöhten Flüchtigengehaltes für die fossilen Brennstoffe Anthrazit und Bitumenkohle [36]. Da die Partikelgröße einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbrandqualität hat, werden beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen insbesondere in Steinkohlekraftwerken sehr hohe Anforderungen an die Aufbereitung der Brennstoffe gestellt. In Braunkohlekraftwerken, die üblicherweise mit Nachbrennrosten ausgestattet sind oder über eine Ascherückführung verfügen, wird das Problem des unvollständigen Ausbrandes apparate- bzw. prozesstechnisch gelöst – diese sind

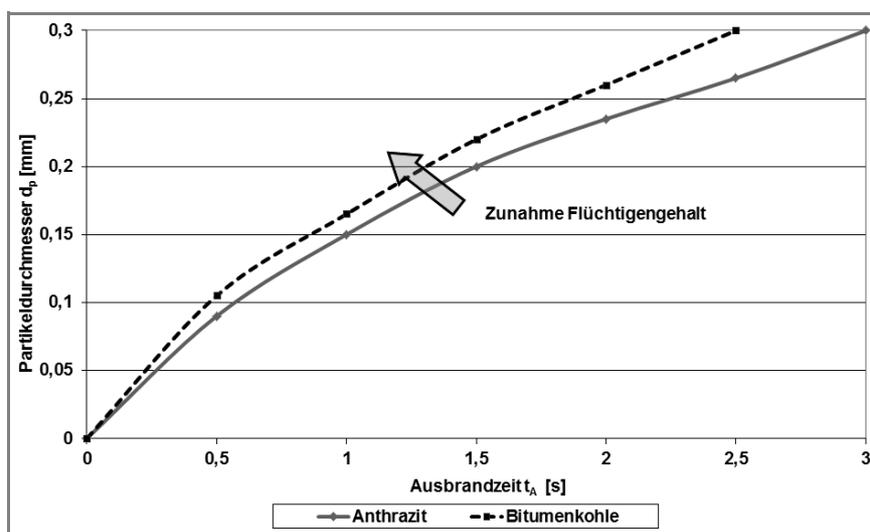


Abbildung 7. Abhängigkeit der Ausbrandzeit vom Flüchtigengehalt und vom Partikeldurchmesser [36].

somit für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen gut geeignet [37].

In Bezug auf das Feuerungssystem gibt es vergleichsweise wenige Schwierigkeiten beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Rost- und Wirbelschichtanlagen, da die Verweilzeit der Einsatzstoffe im Vergleich zur Staubfeuerung recht lang ist. Allerdings sind Wirbelschichtanlagen empfindlicher gegenüber der Chlorkorrosion, insbesondere wenn zur Schwefeleinbindung Kalk zugegeben wird [6]. Dies wirkt sich nachteilig auf das Schwefel/Chlor-Verhältnis aus. Außerdem kann gebildetes Calciumchlorid zu Belägen an den Kesselrohren führen.

Aufgrund der unterschiedlichen mechanischen und chemischen Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe sind bei deren Einsatz die Feuerungssysteme einschließlich der Komponenten der Abgasreinigung hinsichtlich ihrer Eignung zu prüfen und der Ersatzbrennstoff oder der jeweilige Apparat jeweils aufeinander abzustimmen. Von den mechanischen Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe (z. B. Schüttdichte, Energiedichte, Mahlbarkeit und Korngröße) hängen maßgeblich die Lagerung, die Brennstoffförderung und die Brennstoffdosierung ab. Die chemischen Eigenschaften (z. B. Asche-, Schwermetall-, Schwefel- und Chlorgehalt) beeinflussen beispielsweise die Ascheaustragssysteme, die Belagsbildung und Korrosion sowie die Anforderungen an die Komponenten der Abgasreinigung.

### 3 Brennstoffcharakterisierung

#### 3.1 Brennstofftechnische Eigenschaften und Untersuchungsmethoden

Aus Untersuchungen an der TU Dresden wurde für Ersatzbrennstoffe festgestellt, dass mit zunehmendem Heizwert das C/H-Verhältnis näherungsweise konstant bleibt, das C/O-Verhältnis indes ansteigt. In Abb. 8 ist dieser Zusammenhang für verschiedene Analysen von Ersatzbrennstoffen und Biomassen dargestellt.

In Abb. 9 sind Untersuchungen zum Ascheschmelzverhalten einer Steinkohle im Vergleich zu einem Ersatzbrennstoff dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass das Schmelzverhalten beider Brennstoffe sehr unterschiedlich ist. Zum einen sind große Unterschiede der Temperaturen bei den jeweiligen charakteristischen Zuständen zu erkennen, zum anderen zeigt sich, dass bei dem hier untersuchten Ersatzbrennstoff die Temperaturdifferenz zwischen Sinter-temperatur und Fließtemperatur nur ca. 100 K beträgt, wohingegen diese bei der Steinkohle ca. 200 K beträgt.

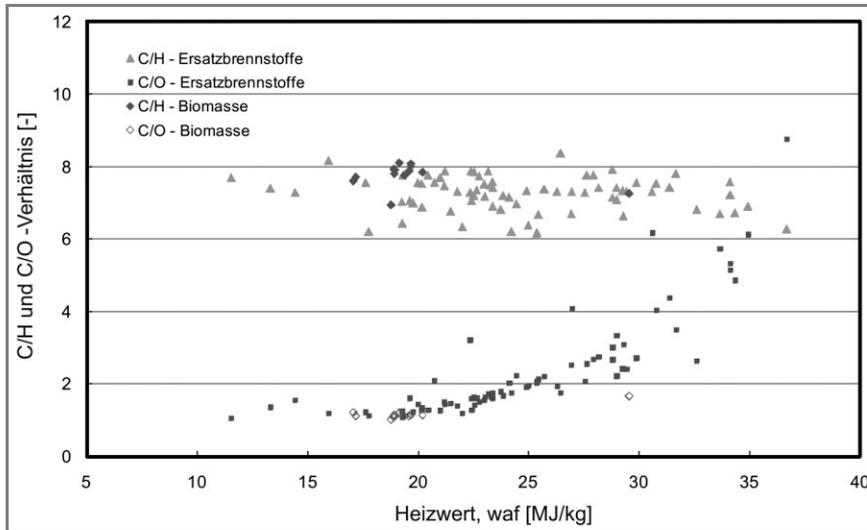


Abbildung 8. C/H- und C/O-Verhältnis verschiedener Ersatzbrennstoffe und Biomassen.

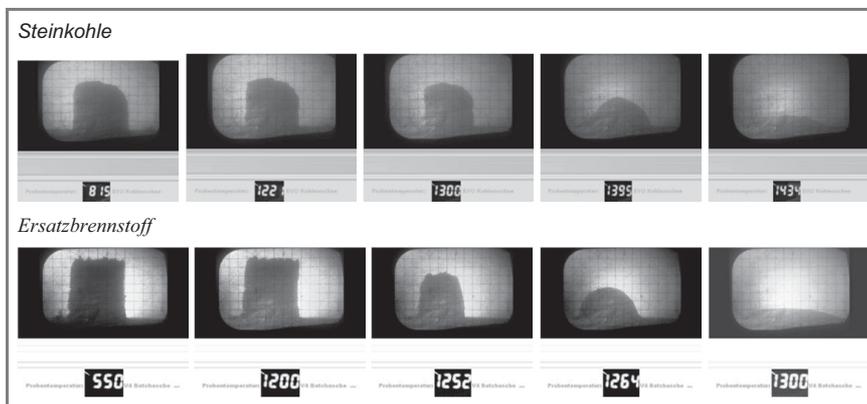


Abbildung 9. Ascheschmelzverhalten einer Steinkohle im Vergleich zu einem Ersatzbrennstoff (von links nach rechts: Ausgangsbild, Sintertemperatur, Erweichungstemperatur, Halbkugeltemperatur, Fließtemperatur).

Die charakteristischen Temperaturen, ermittelt im Ascheschmelzmikroskop, sind ein erster Hinweis auf das Verschlackungs- und Verschmutzungsverhalten der Brennstoffaschen. Beispielhaft seien hier Untersuchungen genannt, bei denen das Ascheschmelzverhalten von Zellstoffen durch Additive verändert wurde. Eine Feststellung war, dass einige Additive einen Einfluss auf die Aschemie haben, d.h. eine Veränderung der Bindungen der verschiedenen, in den Aschen vorkommenden Elemente stattfindet. Andere Additive hingegen zeigten, dass diese nur als Strukturgeber das Ascheschmelzverhalten beeinflussen, d.h. der Presskörper bleibt zwar formbeständig, aber ein Herausfließen von Aschematerial aus dem Presskörper konnte beobachtet werden [38].

Versuche zur Charakterisierung des Verbrennungsablaufs bei Steinkohlen und des Temperaturverlaufs im Brennstoffbett wurden erstmals in den frühen 30iger Jahren in Batch-Reaktoren durchgeführt [39, 40]. Damals wurden Batch-Re-

aktoren zur Optimierung für den Bau und Betrieb von Rostfeuerungen genutzt. Insbesondere in [40] wurden schon die folgenden Fragen gestellt: Kennen wir unsere Brennstoffe genau genug, um ihnen in den Feuerungen die bestmöglichen Bedingungen zu schaffen und wie verhalten sich die Brennstoffe unter den ihnen in den Feuerungen aufgezwungenen Bedingungen? Aus dieser Fragestellung heraus wurden für Regelbrennstoffe verschiedene Methoden entwickelt (z. B. [16]), die es ermöglichten, Regelbrennstoffe je nach Anwendung zu klassifizieren.

Die Möglichkeit der Brennstoffcharakterisierung alternativer Brennstoffe in Technikums-Anlagen wurde unter anderem mithilfe von Batch-Reaktoren in [41] untersucht. Dabei wurden verschiedene Parameter, wie die Reaktionsfrontgeschwindigkeit, die die Reaktivität des Brennstoffes charakterisiert – zur Ermittlung dieses Parameters s. a. [42] und [43] – bei der Untersuchung verschiedener Brennstoffe unter annähernd gleichen Versuchsbedingungen in drei, konstruktiv unterschiedlichen Batch-Reaktoren untersucht. Die an diesem Versuch beteiligten Institute waren das Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technische Chemie (KIT-ITC), die Bauhaus-Universität Weimar, Lehrstuhl Verfahren und Umwelt (BUW-LVU) und die Technische Universität Clausthal, Institut

für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik (TUC-IEVB). Abb.10 zeigt beispielhaft die Reaktionsfrontgeschwindigkeit für vier Ersatzbrennstoffe sowie Holzhackschnitzel im Vergleich zu einer Rohbraunkohle.

Die Reaktivität der Brennstoffe nimmt bei ähnlichem Partikeldurchmesser und vergleichbarer Feuchte mit dem Flüchtigen-Gehalt in erster Näherung linear zu [44], obwohl für die in Abb. 11 dargestellten Brennstoffe diese Voraussetzungen nur eingeschränkt gelten. Dennoch zeigt sich auch hier, dass sich mit steigendem Flüchtigen-Gehalt die Reaktivität erhöht.

Holzhackschnitzel und der Referenzbrennstoff Rohbraunkohle wurden in den drei beteiligten Instituten in den Batch-Reaktoren verbrannt und die Reaktionsfrontgeschwindigkeiten ermittelt. Dieser Parameter ist für zwei unterschiedliche Betriebseinstellungen in Abb.11 mit den Abweichungen vom Mittelwert dargestellt. Variiert wurde die spezifische Primärluftmenge von  $350 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  auf

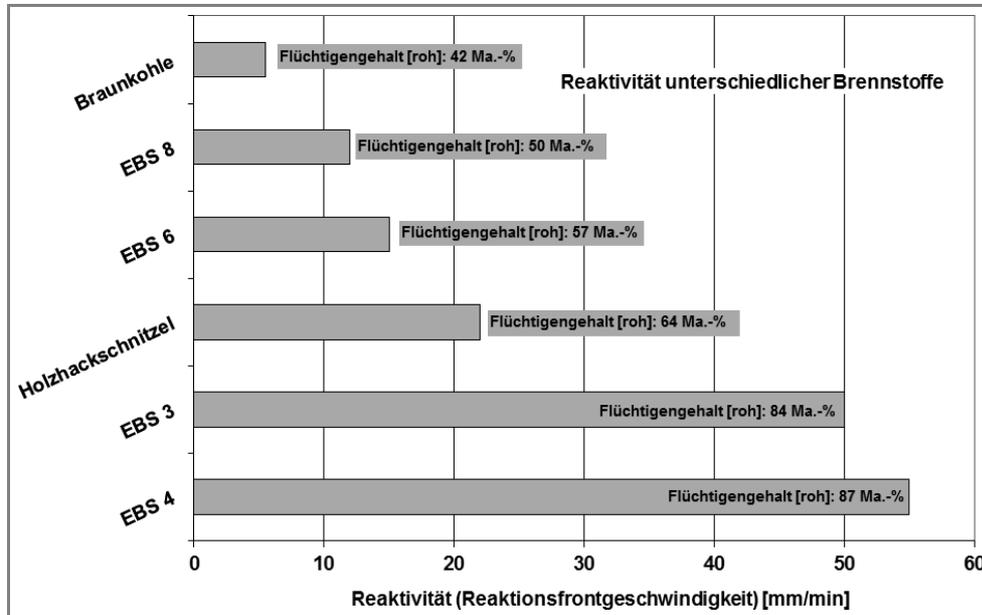


Abbildung 10. Reaktivität unterschiedlicher Brennstoffe im Vergleich [41].

$700 \text{ kg h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ . Die in den jeweiligen Versuchen ermittelte Reaktionsfrontgeschwindigkeit ist in Abhängigkeit der spezifischen Primärluftmenge für die beteiligten Institutionen vergleichend dargestellt. Die maximale Abweichung vom Mittelwert beträgt ca. 14 %.

Ausgehend von diesen guten Ergebnissen wurden drei Ersatzbrennstoffe in zwei der beteiligten Institute mit verschiedenen Schüttdichten als Parameter vergleichend geprüft. Auch hier zeigen die erzielten Ergebnisse gemäß Abb. 12 sehr gute Übereinstimmungen. Die maximale Abweichung vom Mittelwert beträgt ca. 11 %. Damit konnte die Eignung des Batch-Reaktors als Methode zur Charakterisierung auch von Ersatzbrennstoffen nachgewiesen werden.

Neben Anlagen im Technikums-Maßstab können zur Charakterisierung von Brennstoffen auch Anlagen im Pilot-Maßstab eingesetzt werden. Hier ist eine sehr gute Übertragbarkeit auf den realen Prozess gegeben, jedoch ist der Aufwand zur Ermittlung von Ergebnissen sehr hoch. Systematische Untersuchungen zur Beschreibung des Abbrandverhaltens von Kohlen einerseits und Kohlen mit Ersatzbrennstoffen andererseits wurde in Pilotanlagen am IFK in Stuttgart [45], an der TU Dresden [46,47] und am KIT [48,49] durchgeführt.

Im Hinblick auf das Verschlackungs-, Verschmutzungs- und Korrosionsverhalten von Brennstoffen werden derzeit in Technikums- und Pilotanlagen und vergleichend in großtechnischen Anlagen Verfahren untersucht, korrosionsrele-

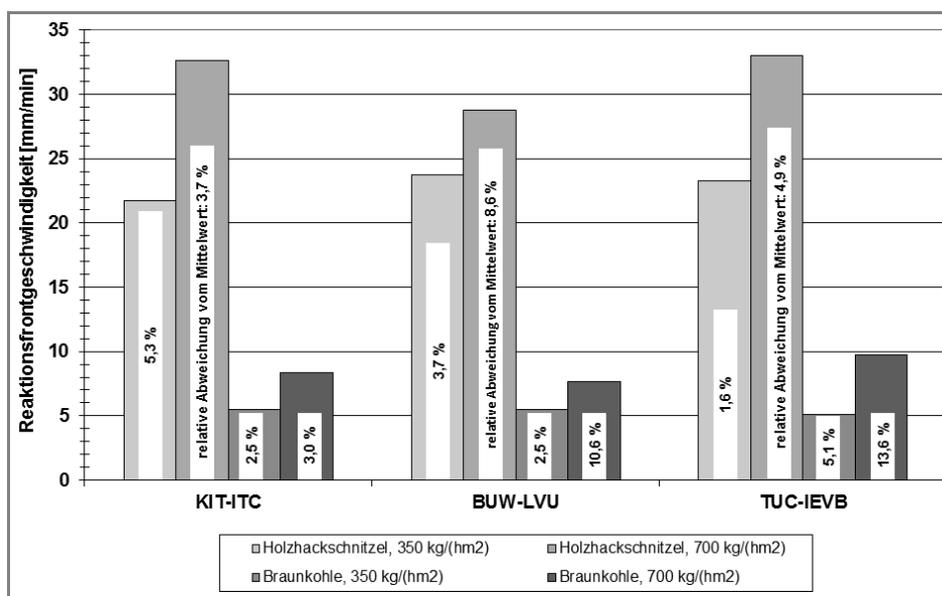


Abbildung 11. Ergebnisse aus dem Ringversuch [41].

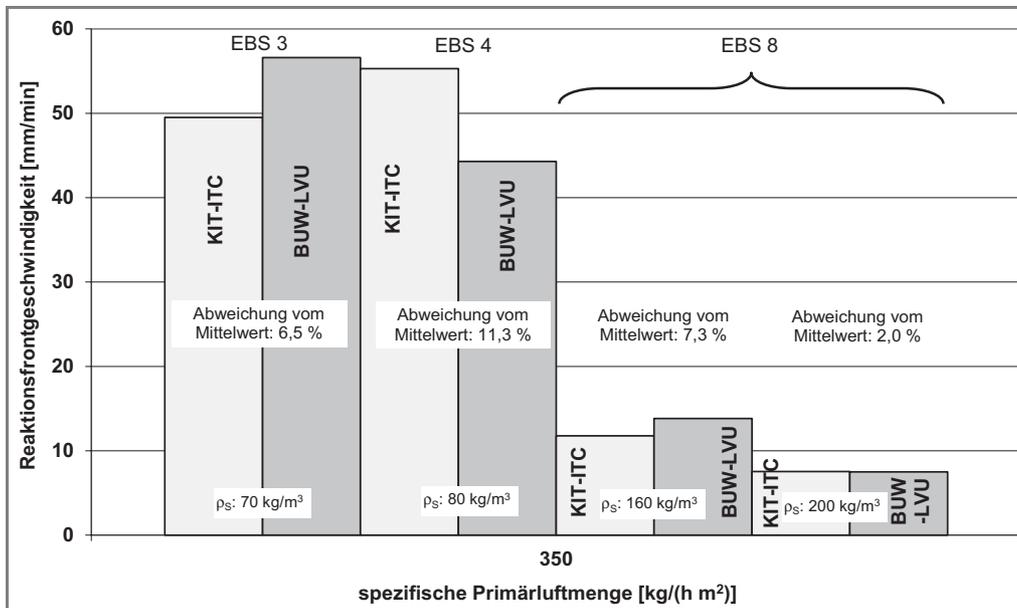


Abbildung 12. Ergebnisse aus dem Ringversuch für Ersatzbrennstoffe [41].

vante Eigenschaften durch eine isokinetische Beprobung der festen bzw. sublimierten Partikel im Abgas zu ermitteln. Ziel ist es, die im großtechnischen Maßstab erprobten Verfahren [45] weiter zu entwickeln, um eine Bewertung des Belagsbildungs- und Korrosionspotenzials von Brennstoffen vor dem großtechnischen Einsatz durchzuführen [11].

Aus stofflicher Sicht ergibt sich insgesamt ein breites Feld von korrosionsrelevanten Elementen, beispielhaft abzulesen an der unterschiedlichen Korrosionswirkung der Chlor- und Schwefelverbindungen, die in Abhängigkeit von der Temperatur auch einem Wechsel des Aggregatzustandes fest/flüssig/gasförmig unterliegen. So ist z. B. der Gesamtchlorgehalt als ein Gütekriterium für alternative Brennstoffe allein nicht ausreichend. Ähnlich wie bei den Kennzahlen zum Verschlackungs- und Verschmutzungsverhalten gibt es auch Kennzahlen zur Korrosionsbewertung eines Brennstoffes, wie z. B. das Schwefel/Chlor-Verhältnis [50].

Erhöhte Frachten an SO<sub>2</sub> und/oder SO<sub>3</sub> werden als positiv gewertet [51]. SO<sub>2</sub> und vor allem SO<sub>3</sub> wird als wirksamer Reaktionspartner gegenüber den gelösten oder auskristallisierten Chloriden angesehen; es führt zur Sulfatisierung der Spezies im Abgas und soll damit die Korrosionsrelevanz mildernd beeinflussen [52]. Dieser Zusammenhang ist für die Praxis bei der Verbrennung schwieriger Brennstoffe nicht gesichert – unter Umständen bedingt durch kinetische Hemmung.

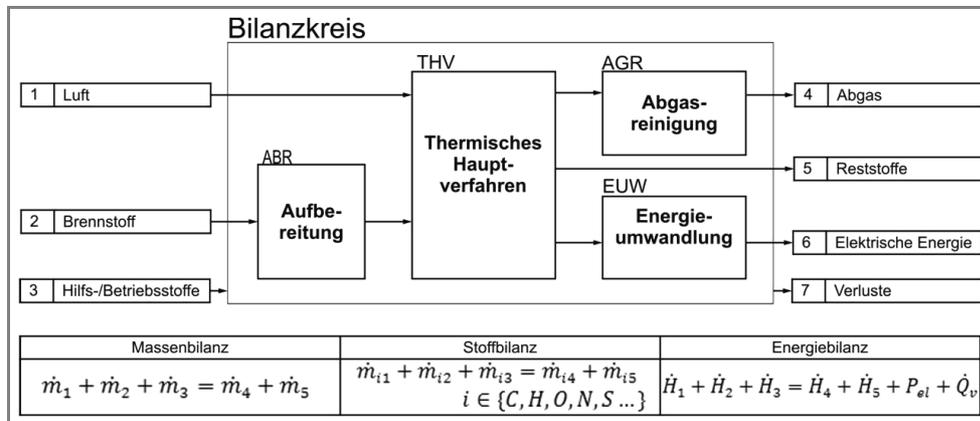
#### 4 Energetische Bewertung des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen

Neben der Charakterisierung der Brennstoffe und der Anpassung der Prozessführung an die sich ändernden Ver-

brennungseigenschaften sind die zur Verfügung stehenden Prozesse zur energetischen Verwertung der Ersatzbrennstoffe z. B. hinsichtlich ihrer Energieeffizienz zu bewerten. Vorzug für eine bestimmte Nutzung sollte die Umwandlungskette haben, die spezifisch auf die Zielenergie, hier elektrische Energie, betrachtet die niedrigsten CO<sub>2</sub>- bzw. Schadstoffemissionen oder aber den jeweils höchsten Wirkungsgrad aufweist. Die Methodik einer energetischen Bilanzierung wird beispielsweise in [53] erläutert. Daher wird hier nur zusammenfassend auf die wesentlichen Schritte eingegangen.

Zunächst erfolgt die Festlegung der Systemgrenzen. Damit wird deutlich, was bewertet werden soll: ein Anlagenteil, eine Anlagengruppe, eine gesamte Anlage, eine Verfahrenskette usw. An den Systemgrenzen werden alle ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströme angetragen. Die Abb. 13 zeigt die prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz einer gesamten Anlage mit den wesentlichen ein- und austretenden Energieströmen.

Wichtig hierbei ist, dass für die Erstellung einer Energiebilanz im ersten Schritt in der Regel eine Massenbilanz und ggf. auch eine Stoffbilanz erforderlich sind. Die Ergebnisse der Bilanzierung lassen sich in Kennzahlen, wie dem Wirkungsgrad oder spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen, zusammenfassen und können so mit anderen Verfahren verglichen werden. Aus dem Vergleich beispielsweise mit einem Referenzfall – bei der Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen kann dies z. B. die reine Kohleverbrennung sein – kann dann die spezifische CO<sub>2</sub>-Einsparung oder auch eine zusätzliche spezifische Emission durch diese vergleichende Bilanzierung ermittelt werden. Entsprechende Studien sind in [54, 55] nachzulesen. Eine detaillierte Bewertung muss



**Abbildung 13.** Prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz.

im Einzelfall je nach vorliegenden Randbedingungen entsprechend geprüft werden. Daher wird hier auf die Angabe eines konkreten Beispiels verzichtet.

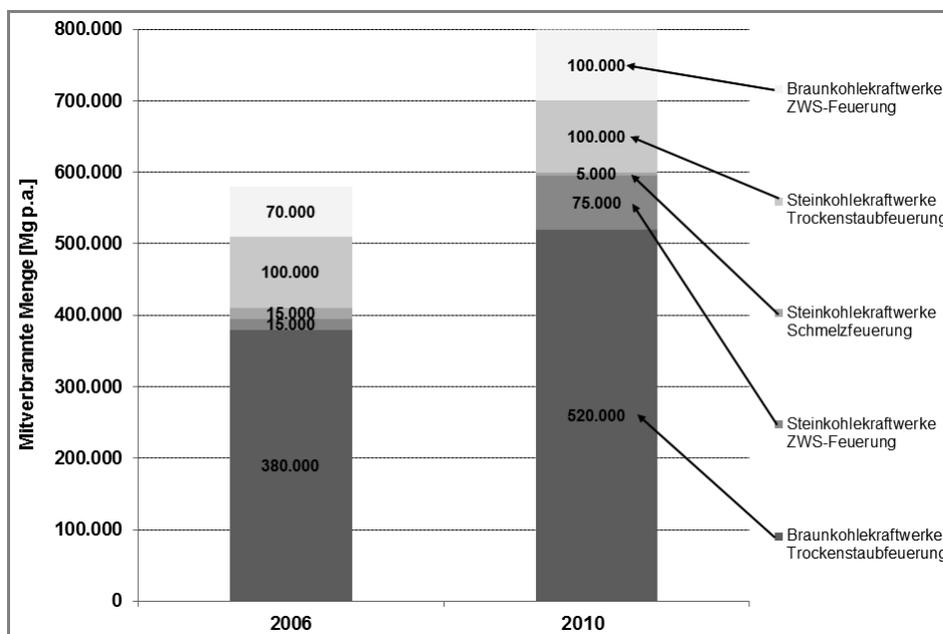
## 5 Beispiele zum Einsatz von Ersatzbrennstoffen im Kraftwerksbereich

Die 2006 und 2010 im Dauerbetrieb mitverbrannten Ersatzbrennstoffmengen zeigt Abb. 14 [6]. Insgesamt wurden 2010 etwa 800 000 t a<sup>-1</sup> in zehn deutschen Kohlekraftwerken mitverbrannt. Diese Menge ist im Vergleich zu 2006 um etwa 200 000 t gestiegen. Der Großteil mit 520 000 t entfällt dabei auf Braunkohlekraftwerke mit Trockenstaubfeuerungen. Dabei verbrennen die Kraftwerke Jänschwalde, Werne, Berrenrath, Flensburg und Schwarze Pumpe im Dauerbetrieb rund 90 % der in 2010 mitverbrannten Gesamtmengen an Ersatzbrennstoffen.

Ein Beispiel für den eingesetzten Brennstoffmix in einem Kraftwerk der RWE zeigt die nachfolgende Abb. 15. In dem Kraftwerk substituieren 415 000 t alternative Brennstoffe ca. 300 000 t Braunkohle pro Jahr.

In drei Steinkohlekraftwerken in Deutschland ruht derzeit der Dauerbetrieb. Aufgrund von Verschmutzungen im Kesselbereich wurde im Kraftwerk Werdohl-Elverlingsen die eingesetzte Ersatzbrennstoffmenge auf 12 % der Feuerungswärmeleistung reduziert und seit 2006 ganz eingestellt. In zwei Schmelzkammerfeuerungen in Westfalen/Hamm und in Ensdorf wurde die Mitverbrennung aus technischen bzw. wirtschaftlichen Gründen eingestellt [6].

Bei der Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen wurden insbesondere bei Staubfeuerungen mit Steinkohlen Probleme mit unvollständigem Ausbrand festgestellt [6]. Dieser kann über einen Nachbrennrost vermieden werden, der in vielen Braunkohlenfeuerungen für die Verbrennung nicht inkohlter Holzbestandteile installiert wurde.



**Abbildung 14.** Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen in Kohlekraftwerken im Dauerbetrieb (Stand 2010) [6].

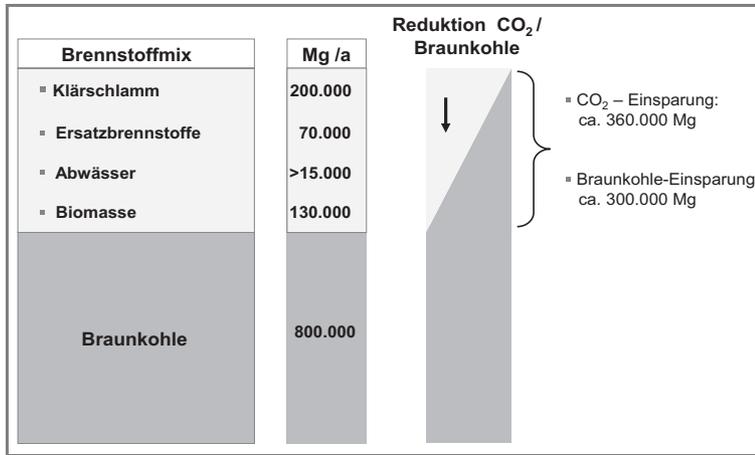


Abbildung 15. Beispiel für Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen bei RWE Power [56].

Chlorkorrosion spielt insbesondere bei der zirkulierenden Wirbelschicht (ZWS) eine besondere Rolle, da sich aufgrund der Primärentschwefelung im fluidisierten Brennbett durch eine Kalkzugabe das Schwefel/Chlor-Verhältnis anschließend im Abgas verschlechtert, so dass mit erhöhter Chlorkorrosion im Kessel zu rechnen ist. Gebildetes Calciumchlorid kann darüber hinaus zu Belägen an den Kesselrohren führen. Betroffen sind insbesondere schwefelarme Braunkohlen aus dem Rheinland. Daher spielt hier die Minimierung des Chlorgehaltes z. B. durch die NIR-Technik in der Brennstoffaufbereitung eine bedeutende Rolle.

In vier Kraftwerken wurden Mitverbrennungsversuche erfolgreich durchgeführt, ohne dass anschließend ein Dauerbetrieb aufgenommen wurde. Die Gründe, weshalb Anlagen nicht vom Versuchs- in den Dauerbetrieb gehen, sind entweder Auflagen der Genehmigungsbehörde oder insbesondere hohe Qualitätsanforderungen an die zu verbrennenden Ersatzbrennstoffe, die bisher nicht realisiert wurden [6].

Das größte in Deutschland bereits intensiv genutzte Potenzial hinsichtlich der großtechnischen energetischen Konversion von Reststoffen findet man bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm. Gerade die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken mit den entsprechend vorgelagerten Aufbereitungs- und Trocknungsprozessen bietet gegenüber der Klärschlammmineralisierung in Monoverbrennungsanlagen einen energetischen Vorteil. Bei der Mitverbrennung in Braun- oder Steinkohlekraftwerken werden bevorzugt Wirbelschicht- und Staubfeuerungen eingesetzt. Ein erheblicher Vorteil des Klärschlammeneinsatzes in Kohlekraftwerken ist die in Größenordnungen vorhandene Prozesswärme, die direkt zur Vortrocknung und somit zur Heizwertanhebung des biogenen Reststoffes genutzt wird. Außerdem verringert der Klärschlamm durch seine Schwefelfracht die Einbindung von Chlor in die Flugaschen und Beläge und reduziert so das Korrosionspotenzial [3, 57]. Als stellvertretendes Beispiel für die Klärschlammmitverbren-

nung in Großkraftwerken in Deutschland sei das Braunkohlekraftwerk Boxberg genannt. Der Betreiber Vattenfall setzt mit diesem Kraftwerk ca. 500–600 t Klärschlamm pro Tag energetisch um [58]. Eine umfassende Gesamtübersicht zur thermischen Klärschlammnutzung und den bestehenden Anlagen bieten [3, 59].

Hinsichtlich der Emissionen ergeben sich durch die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken Probleme, die durch zusätzliche Prozessschritte oder -modifikationen gelöst werden müssen. Insbesondere die hohen, über die Klärschlämme eingetragenen, Quecksilberfrachten können zu erheblichen Zusatzmaßnahmen im Bereich der Rauchgasreinigung führen [60, 61].

Im Rahmen des RECOMBIO-Projektes [8] werden im Kraftwerk Wachtberg der RWE in

Ergänzung zum dauergenehmigten Klärschlamm Mitverbrennungsversuche von Sekundärbrennstoffen mit hohem biogenem Anteil (ca. 80 %), sogenanntem BIOBS, durchgeführt. Ziel ist es, einschließlich des Klärschlammes eine Substitutionsquote von bis zu 25 % der Feuerungswärmeleistung zu erzielen. Im Rahmen des Projektes wurde auch eine neue Beschickungslinie für den BioBS errichtet. Die Sekundärbrennstoffe werden von REMONDIS zur Verfügung gestellt.

Hinsichtlich der Kosten wird der Emissionshandel weiter die Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen und Biomassen vorantreiben, da ab 2013 keine kostenlose Zuteilung der Zertifikate für die Stromerzeugung mehr erfolgt. Insbesondere für Steinkohlekraftwerke stellt der Brennstoffpreis der Importkohle einen wesentlichen Kostenfaktor dar. Vor der Energiewende wurden insbesondere durch den stetig ansteigenden Anteil an fluktuierenden regenerativen Energien immer häufiger auch Steinkohleblöcke in Teillast gefahren, was zum einen die wirtschaftliche Gesamtbetrachtung der Anlagen verschärfte, zum anderen aber auch die in diesen Anlagen mitverbrannten Ersatzbrennstoffmengen reduzierte. Bedingt durch den schrittweisen Ausstieg aus der Atomenergie nehmen nun die Volllaststunden der Kraftwerksblöcke wieder zu. Der Preis für Ersatzbrennstoffe wird sich angesichts der Entwicklungen im Abfall- und Energiesektor weiter zugunsten der Brennstoffhersteller verschieben. In Abhängigkeit von Heizwert, Chlorgehalt und biogenem Anteil beträgt der derzeitige Brennstoffpreis in Deutschland und anderen EU-Ländern bis zu 1 €GJ<sup>-1</sup>. Dies liegt zum einen an den Überkapazitäten im Bereich der thermischen Behandlungsanlagen [27], zum anderen an steigenden Brennstoffpreisen für fossile und alternative Brennstoffe weltweit sowie den Kosten für CO<sub>2</sub>-Zertifikate.

Es ist zu erwarten, dass neben den klassischen Ersatzbrennstoffen und Klärschlamm auch, soweit verfügbar, Reststoffe biogenen Ursprungs mitverbrannt werden, wie dies bereits in dem Kraftwerk in Bremen mit Dinkelspelzen und Kaffeegrund, in Flensburg und Offenbach mit Holz

geschieht [6]. In den Niederlanden wird dies bereits im großen Stil aufgrund der Förderpolitik vielerorts betrieben. So werden beispielweise im Kraftwerk Amer 9 ca. 600 000 t an importiertem Holz mitverbrannt, was einer Mitverbrennungsquote von 35 % der Feuerungswärmeleistung entspricht. Eine Steigerung auf 50 % ist geplant [62].

## 6 Zusammenfassung

Die energieeffiziente Nutzung von Ersatzbrennstoffen ist ein wichtiger Baustein der zukünftigen, stabilen, kostengünstigen und emissionsarmen Energieversorgung. Beim Einsatz dieser Brennstoffe in Kraftwerken werden hohe elektrische Nettowirkungsgrade von Stein- und Braunkohlenkraftwerke je nach Kraftwerkstyp von ca. 40 % und im Fall der Kraft-Wärme-Kopplung auch mehr für diese Brennstoffe verfügbar. Damit wird die Energieeffizienz im Vergleich zu klassischen Abfallverbrennungsanlagen deutlich erhöht. Für einen Einsatz dieser Brennstoffe bzw. für die Optimierung des Einsatzes ist es jedoch zwingend erforderlich, die brennstofftechnischen Eigenschaften, d. h. die chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionstechnischen Eigenschaften zu bestimmen und durch Gütesicherung zu gewährleisten. Vor dem Hintergrund des Einsatzes, vor allem in Anlagen zur Energieumwandlung, sind begleitende Untersuchungen vom Labor- bis hin zum Pilotmaßstab notwendig.

Tieferegehende Brennstoffkenntnisse einerseits aber auch weiterentwickelte Rechenmodelle andererseits erlauben mittlerweile, den Einfluss insbesondere homogener gütegesicherter Sekundärbrennstoffe zunehmend rechnerisch/numerisch zu simulieren [63, 64] und damit deren Einsetzbarkeit schneller zu bewerten bzw. zu optimieren [7].

Die Einsatzkriterien dieser Brennstoffe sind, ausgehend von den brennstofftechnischen Untersuchungen, im Hinblick auf die Anlagenverfügbarkeit, die Freisetzung von Emissionen und den Wirkungsgrad festzulegen. Besondere Anforderungen gelten dabei für die Qualität gütegesicherter Sekundärbrennstoffe, die hinsichtlich chemischer und kalorischer Eigenschaften nach CEN und RAL-Standards festgelegt sind. Daraus ergeben sich bestimmte Anforderungen an die Anlagen- und Aufbereitungstechnik. Um die Chlor-korrosion am Kessel zu minimieren, werden zur Reduzierung des Chlorgehaltes im Rahmen der Brennstoffproduktion NIR-Systeme zur Begrenzung des organischen Chlors eingesetzt. Damit kann es gelingen, den Chlorgehalt verlässlich zu limitieren, z. B. auf < 0,7 Ma.-% in der Trockensubstanz.

Bei der großtechnischen Energieerzeugung in der Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen sind sowohl Wirbelschichtsysteme (ZWS) als auch Staubfeuerungen mit Nachbrennrosten, wie sie üblicherweise in Braunkohlekesseln eingesetzt werden, am ehesten geeignet, da sie auch den Ausbrand größerer Partikel gewährleisten. Derzeit werden in zehn deutschen Kraftwerken mit ZWS- und Staubfeue-

rungssystemen 800 000 t an Ersatzbrennstoffen im Dauerbetrieb mitverbrannt. Die Zunahme des Anteils der regenerativen Energie und der Ausstieg aus der Kernenergie haben maßgeblichen Einfluss auf die zukünftige Nutzung von Stein- und Braunkohle zur Verstromung und die Fahrweise der entsprechenden Kraftwerke. Vor dem Hintergrund des Ausbaus der fluktuierenden erneuerbaren Energien, wie Windkraft und Solar, ist wie bei den Steinkohlenkraftwerken auch eine zunehmende Flexibilisierung von Grundlastkraftwerken (Braunkohlekraftwerken) erforderlich und realistisch.



**Hans-Joachim Gehrman** studierte Maschinenwesen an der TU Stuttgart und Verfahrenstechnik an der TU Clausthal mit Schwerpunkt Energieverfahrenstechnik und elektrische Energietechnik. 2005 promovierte er an der Bauhausuniversität Weimar über die Pyrolyse von Abfällen in Drehrohrsystemen.

Von 1995 bis 2006 war er als Verfahrenssingenieur bei der CUTEC-Institut GmbH tätig. Zu seinen Aufgaben zählten der Aufbau von Pilotanlagen und Projekte im Bereich Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung von Biomassen und Abfällen. Seit Anfang 2006 ist Dr. Gehrman wissenschaftlicher Leiter der Gruppe Verbrennungstechnologie am Karlsruher Institut für Technologie mit den Forschungsschwerpunkten Einsatz alternativer Brennstoffe in Staub- und Rostfeuerungen.

### Formelzeichen

$d$	[mm]	Durchmesser
$H$	[kJ kg <sup>-1</sup> ]	Enthalpie
$m$	[kg]	Masse
$P$	[kW]	Leistung
$\dot{Q}$	[kW]	Wärmestrom
$t$	[s]	Zeit

### Abkürzungen

BGS	Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V.
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BioBS	Biobrennstoff (Sekundärbrennstoff mit hohem biogenem Anteil (> 80 %))
CEN	Standard, Norm
EBS	Ersatzbrennstoff (ohne weitere Definition)

F	Flüchtige
FS	Feststoff
IED	Industrial Emission Directive (2010/75/EU)
KrWVG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
MBA	mechanisch biologische Aufbereitung
MBS	mechanisch biologische Stabilisierung
MPA	mechanisch physikalische Aufbereitung
MPS	mechanisch physikalische Stabilisierung
MVA	Müllverbrennungsanlage
RAL	RAL-Gütekennzeichnung
SBS	Sekundärbrennstoff
SRF	Solid Recovered Fuels (Definition s. CEN EN 15359)
ZWS	zirkulierende Wirbelschicht

### Bezeichnung von Bilanzgrenzen

ABR	Aufbereitung
AGR	Abgasreinigung
EUW	Energieumwandlung
THV	thermisches Hauptverfahren

### Indizes

A	Ausbrand
el	elektrisch
P	Partikel
roh	bezogen auf den Rohzustand
V	Verlust
waf	wasser- und aschefrei

### Literatur

- [1] T. Glorius, *Erfahrung mit Produktion und Einsatz qualitätsgesicherter, anpelletierter Sekundärbrennstoffe auf Basis produktions-spezifischer Gewerbeabfälle*, UTECH, Berlin, Februar 1998.
- [2] *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2010*, Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf, August 2010.
- [3] A. Gerhardt, J. Maier, T. Glorius, *International Waste Working Group (IWWG)*, Venice, November 2008.
- [4] H. Alwast, 19. *Kasseler Abfallforum und Bioenergieforum*, Kassel, Mai 2007.
- [5] T. Glorius, 37. *TOTeM-Workshop*, Wroclaw, Polen, September 2011.
- [6] S. Thiel, *ReSource* 2011, 24 (2), 45.
- [7] J. Maier, A. Fuller, E. Miller, G. Dunnu, 37. *TOTeM-Workshop*, Wroclaw, Polen, September 2011.
- [8] <http://recombio.eu-projects.de/>
- [9] T. Glorius, in *Energie aus Abfall* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 9, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2012.
- [10] T. Glorius, J. Hüskens, 10. *Fachtagung Thermische Abfallbehandlung*, Berlin, Februar 2005.
- [11] S. Grahl, M. Beckmann, in *Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung* (Eds: M. Beckmann, A. Hurtado), Vol. 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2010, 727–742.
- [12] M. Pohl, D. Bernhardt, S. Ncube, M. Beckmann, W. Spiegel, W. Müller, in *Proc. of the Conference on Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment*, Publikation auf CD, Saariselkä, Finland, August 2010.
- [13] W. Spiegel, in *Energie aus Abfall* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 1, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2006.
- [14] W. Boie, *Vom Brennstoff zum Rauchgas*, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1957.
- [15] W. Gumz, *Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik*, 3rd ed., Springer-Verlag, Heidelberg 1962.
- [16] J. Zerkowski, *Kohleverbrennung – Brennstoff, Physik und Theorie, Technik*, Vol. 8, 2nd ed, VGB PowerTech e.V., Essen 2004.
- [17] P. Scur, in *Bio- und Restabfallbehandlung III, biologisch – mechanisch – thermisch* (Eds: K. Wiemer, M. Kern), Baeza-Verlag, Witzhausen 1999.
- [18] T. Kost, *Dissertation*, TU Dresden 2001.
- [19] *MYT – Maximum Yield Technologie*, Informationsblatt, Zweckverband Abfallbehandlung Kahlenberg, Ringsheim. [www.zak-ringsheim.de/](http://www.zak-ringsheim.de/)
- [20] M. Faulstich et. al., *CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale und Anwendung der Klimaschutzinstrumente in EFRE-Ziel-2-Gebieten*, Endbericht, TU München 2007.
- [21] R. Schu, *EcoEnergy: EBS-Beschaffung, Anlagenauslegung und Qualitätssicherung*, VDI-Seminar Ersatzbrennstoffe für Industrieanlagen, Berlin 2006.
- [22] T. Glorius, *EUROFORUM-Konferenz Waste to Energy*, Düsseldorf, Januar 2007.
- [23] S. Flamme, J. Geiping, *13th Int. Waste Management and Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Sardinia, Oktober 2011.
- [24] *Richtlinie zur Charakterisierung von Kraftwerkskohlen*, VGB PowerTech, Essen 2003.
- [25] *Grundlagenpapier*, Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V., Münster 2011. <http://bgs-ev.de>
- [26] K. Ketelsen, in *Energie aus Abfall* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 5, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2008.
- [27] L. Rehtmann, *Berliner Abfallwirtschafts- und Energiekonferenz*, Berlin, Januar 2008.
- [28] H. Alwast, *Wasser Abfall* 2011, 10, 6.
- [29] H. Alwast, 23. *Kasseler Abfall- und Bioenergieforum*, Kassel, April 2011.
- [30] H. J. Sander, *Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Siedlungsabfällen*, VDI Bildungswerk, Düsseldorf, März 2000.
- [31] H.-J. Gehrman, T. Kolb, H. Seifert, F. E. Mark, M. S. M. Frankenhäuser, A. Schanssema, K. Wittstock, J. J. Kolb, *Environ. Eng. Sci.* 2010, 27 (7), 557–567.
- [32] J. P. Hannes, M. Wachenhausen, in *Verbrennung und Feuerungen 19. Deutscher Flammentag*, VDI-Berichte 1492, VDI Verlag, Düsseldorf 1999, 381–386.
- [33] W. Scheurer, U. Richers, J. Maier, K. R. G. Hein, H. Seifert, in *Wege des Abfalls*, VDI-Bericht 1540, VDI Verlag, Düsseldorf 2000, 233–248.
- [34] J. Haas, M. Tamura, R. Weber, *Fuel* 2001, 80, 1317–1323.
- [35] M. Tamura, R. Weber, W. van de Kamp, *13th IFRF Members Conference*, Noordwijerhout, The Netherlands, Mai 2001.
- [36] T. Schmidt, *SSB-D burner for pulverized fuels*, Saacke GmbH, Bremen.

- [37] S. Thiel, in *Erneuerbare Energien* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 6, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2011, 315–328.
- [38] DIN CEN/TS 14961-Vornorm, *Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen*, Deutsche Institut für Normung e.V., Pforzheim 2005.
- [39] E. Tanner, *Dissertation*, TU Darmstadt 1933.
- [40] H. Werkmeister, *Dissertation*, TH Hannover 1932.
- [41] M. Beckmann, R. Scholz, S. Flamme, H. Seifert, *Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe*, AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14894, Endbericht, 2009.
- [42] S. Bleckwehl, T. Kolb, H. Seifert, H. Herden, in *Ersatzbrennstoffe* (Ed: K. J. Thomé-Kozmiensky), Vol. 4, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2004.
- [43] J. Porteiro, D. Patiño, J. Collazo, E. Granada, J. Moran, J. L. Miguez, *Fuel* 2010, 89, 26–35.
- [44] S. Bleckwehl, *Dissertation*, Karlsruher Institut für Technologie/Universität Stuttgart 2009.
- [45] *Kohlestaubverbrennungsanlage*, Universität Stuttgart. [www.ifk.uni-stuttgart.de/forschung/exp\\_ein/halbtechnisch/ksva.html](http://www.ifk.uni-stuttgart.de/forschung/exp_ein/halbtechnisch/ksva.html) (Stand 15.06.2011)
- [46] R. Wilhelm, M. Beckmann, in *Proc. of the 35th Int. Technical Conference on Clean Coal and Fuel Systems*, Coal Technologies Associates, North Potomac, MD 2010.
- [47] R. Wilhelm, S. Weigl, M. Beckmann, in *Proc. 40. Kraftwerkstechnisches Kolloquium – Künftiges Brennstoff- und Technologieportfolio in der Kraftwerkstechnik*, Vol. 1., TU Dresden, 2008, 220–231.
- [48] *Multi-Fuel-Brenner für den Einsatz von Biomasse und Ersatzbrennstoffen in einer Kraftwerks-Brennkammer mit Dampfkessel*, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe. [www.itc-tab.kit.edu/downloads/BRENDA.pdf](http://www.itc-tab.kit.edu/downloads/BRENDA.pdf) (Stand 15.06.2011)
- [49] H.-J. Gehrman, T. Kolb, H. Seifert, P. Waibel, J. Matthes, H. Keller, 25. *Deutscher Flammentag*, Karlsruhe, September 2011.
- [50] M. Bachhiesl, J. Tauschitz et al., *Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen*, Schriftenreihe der Forschung im Verbund, Vol. 73, Österreichische Elektrizitätswirtschafts-AG, Wien 2001.
- [51] K. Kautz, R. Warnecke, *Der Einsatz rauchgasseitiger Additive vor dem Hintergrund der verschieden starken Korrosions- und Verschmutzungsgefährdungen unterschiedlich ausgelegter Müllheizkraftwerke*. in *Dampferzeugerkorrosion* (Ed: M. Born), Verlag SAXONIA, Freiberg 2003, 279–289.
- [52] A. Hjörnhede, in *Dampferzeugerkorrosion* (Ed: M. Born), Verlag SAXONIA, Freiberg 2009.
- [53] R. Scholz, M. Beckmann, F. Schulenburg, *Abfallbehandlung in thermischen Verfahren*, Teubner Verlag, Leipzig, 2001.
- [54] R. Scholz, T. Harnaut, in *Proc. 13. DVV-Kolloquium Thermische Verfahren der Abfallbehandlung – Entwicklungen, Optimierung, Bewertung*, Bauhausuniversität Weimar 2002.
- [55] a) M. Beckmann, R. Scholz, *ZKG Int.* 1999, 52 (6), 287–303; b) M. Beckmann, R. Scholz, *ZKG Int.* 1999, 52 (8), 411–419.
- [56] U. Peters, persönliche Mitteilung 2010.
- [57] A. Gerhardt, B. Röper, J. Maier, S. Parakenings, R. Kull, G. Scheffknecht, T. Glorius, *9th Int. Conf. on Circulating Fluidized Beds*, Hamburg, Mai 2008.
- [58] M. Kuba, *KA Betriebsinfo* 2007, 37 (3), 1482–1483.
- [59] T. Hermann, K. Goldau, *Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland*. Umweltbundesamt, Berlin 2004.
- [60] *Bromgestützte Quecksilberabscheidung aus Verbrennungsabgasen*, Vosteen Consulting GmbH, Köln. [www.vosteen-consulting.de/sites/Vosteen-Consulting/de\\_1940.asp](http://www.vosteen-consulting.de/sites/Vosteen-Consulting/de_1940.asp) (Stand 21.06.2011)
- [61] Bayer AG, *EP 1386655*, 2004.
- [62] L. den Ouden, 25. *Deutscher Flammentag*, Karlsruhe, September 2011.
- [63] G. Dunnu, J. Maier, T. Hilber, G. Scheffknecht, *Fuel* 2009, 88 (12), 2403.
- [64] G. Dunnu, J. Maier, G. Scheffknecht, 25. *Deutscher Flammentag*, Karlsruhe, September 2011.

DOI: 10.1002/cite.201200214

## Ersatzbrennstoffe in der Kraftwerkstechnik

*H.-J. Gehrman\*, H. Seifert, M. Beckmann, T. Glorius*

Vor dem Hintergrund der CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele und der Energiewende leistet die effiziente energetische Nutzung alternativer Brennstoffe einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung des Einsatzes fossiler Energieträger. Der Beitrag gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Mono- und Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen in Kraftwerken. .... ■

