

Übersichtsbeitrag

Nutzung alternativer Brennstoffe in Kraftwerken

Michael Beckmann*, Martin Pohl, Christoph Pieper, René Böhme, Daniel Bernhardt,
Dorith Böhning und Kathrin Gebauer

DOI: 10.1002/cite.201100122

Alternative Brennstoffe können Regelbrennstoffe direkt, z. B. bei dem Einsatz in Kohlekraftwerken, und indirekt, z. B. durch eine thermochemische Konversion zur Erzeugung von gasförmigen und flüssigen Brenn-, Kraft- und Chemierohstoffen, ersetzen. Die Bandbreite alternativer Brennstoffe reicht dabei von unbehandelten biogenen Stoffen über biogene Reststoffe bis hin zu Stoffen, die einen mehr oder weniger großen biogenen Anteil haben. Zu den CO₂-Reduktionszielen und der geplanten Energiewende der deutschen Bundesregierung leistet die effiziente energetische Nutzung dieser alternativen Brennstoffe einen wesentlichen Beitrag. Ausgehend von der Brennstoffcharakterisierung werden prozesstechnische Anforderungen und die Effizienz verschiedener Verfahrensketten zur energetischen Nutzung alternativer Brennstoffe betrachtet.

Schlagwörter: Alternative Brennstoffe, Brennstoffcharakterisierung, Brennkammersysteme, Brennstoffaufbereitung, Energetische Biomassenutzung, Energiebilanz

Eingegangen: 05. Juli 2011; *revidiert:* 13. September 2011; *akzeptiert:* 15. September 2011

Usage of Alternative Fuels in Power Plants

Alternative fuels can substitute standard fuels directly, e.g., in coal-fired power plants, or indirectly, e.g., as gaseous or liquid fuels produced via thermochemical conversion. They range from untreated biomass and biogenic waste to fuels with biogenic components. The efficient use of biogenic alternative fuels is an important pillar in regard to the CO₂ reduction plan of the German Federal Government and its aim for a 100 % renewable electric power supply. 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.

Keywords: Alternative fuels, Combustion systems, Energy balance, Energy from biomass, Fuel characterization, Fuel conditioning

1 Einleitung

Alternative Brennstoffe sind Brennstoffe, die feste, flüssige oder gasförmige fossile Regelbrennstoffe ersetzen. Die Bandbreite alternativer Brennstoffe reicht dabei von unbehandelten (reinen) biogenen Stoffen wie Holz (Restholz, Waldholz, Plantagen), Energiepflanzen, Getreide, Stroh über biogene Reststoffe wie Altholz, Zoomasse, Gülle bis zu Klär- und Deponiegas und Klärschlamm. Aber auch Stoffe, die einen

mehr oder weniger großen biogenen Anteil haben – aufbereitete Abfälle (Ersatzbrennstoffe) aus den heizwertreichen Fraktionen des Hausmülls, des Sperrmülls und des Gewerbeabfalls, Reste aus der Wertstoffsartierung, produktionsspezifische Gewerbe- und auch Industrieabfälle – sind von Bedeutung.

Alternative Brennstoffe ersetzen Regelbrennstoffe direkt, z. B. bei dem Einsatz in Kohlekraftwerken [2] oder in der Grundstoffindustrie [3] und indirekt, z. B. in eigens für Althölzer ausgelegten Altholzkraftwerken und in dezentralen Biomasse-Vergasungsanlagen zur Erzeugung von Strom und Bereitstellung von Wärme/Kälte. Die bei der Vergasung erzeugten Vergasungsgase können aber auch nach einer Synthese gasförmige und flüssige Brenn-, Kraft- und Chemierohstoffe ersetzen. Die thermischen Verfahren zur Biomasse-Nutzung sind in Abb. 1 dargestellt.

Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann (michael.beckmann@tu-dresden.de),
Martin Pohl, Christoph Pieper, René Böhme, Daniel Bernhardt,
Dr.-Ing. Dorith Böhning, Dr. rer. nat. Kathrin Gebauer, Technische
Universität Dresden, Professur Verbrennung, Wärme- und Stoff-
übertragung, George-Bähr-Straße 3b, 01069 Dresden, Germany.

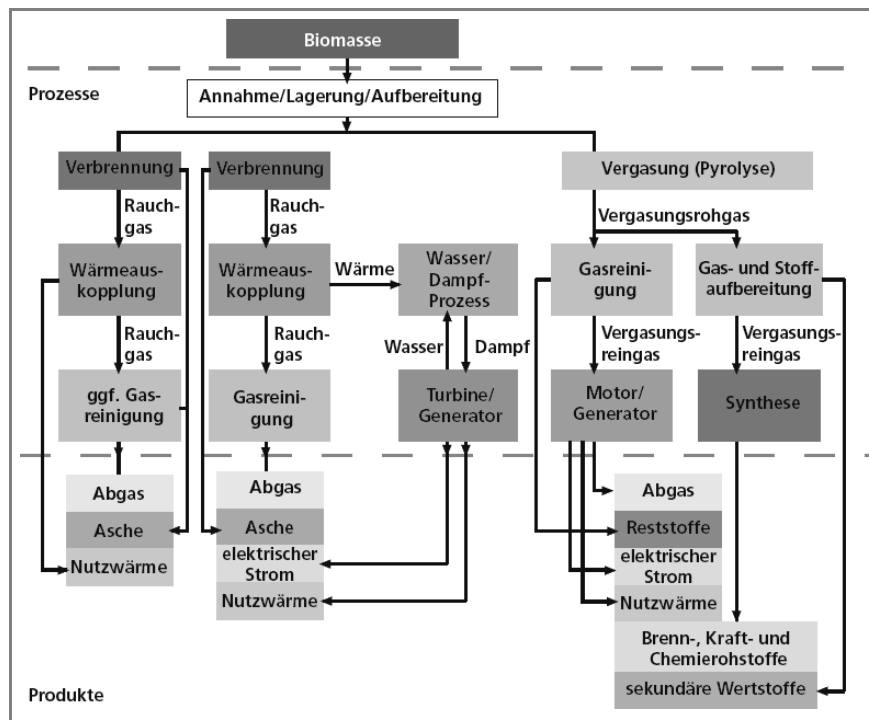


Abbildung 1. Thermische Verfahren zur Biomasse-Nutzung [1].

Biomasse-Brennstoffe sind in der öffentlichen Diskussion häufig mit einem positiven Vorurteil belegt. Mit umgekehrten Vorzeichen verläuft derzeit die Debatte bei der Nutzung konventioneller Energieträger, insbesondere der Kohle. Ein wesentliches Argument ist der Ausstoß an fossilem CO₂ in Verbindung mit der Klimaveränderung. Eine stabile und am Ressourcenschutz orientierte Energiepolitik muss technologieoffen und wettbewerbsorientiert geführt werden. Unbestritten ist dabei, dass durch die Effizienz in der Umwandlung wie auch in der Anwendung von Energie ein ganz wesentliches Einsparpotenzial besteht, das weiter ausgeschöpft werden muss. Dies bedeutet u. a. Wirkungsgradsteigerungen, Reduzierung von Emissionen und damit insgesamt eine weitere Verminderung der energiespezifischen Emissionen.

Die Maxime lautet demnach weiterhin Diversifikation. Vor diesem Hintergrund muss in Verbindung mit dem Grundsatz der Energieeffizienz die Frage beantwortet werden, welcher Energieträger für die jeweils betrachtete Nutzung und mit welchem zugehörigen Verfahren den größten Gewinn und die niedrigsten Emissionen erzeugt. Die oftmals geäußerte Behauptung, die energetische Nutzung von Biomasse sei CO₂-frei, ist jeweils im konkreten Anwendungsfall zu hinterfragen. Dabei sind die Wirkungsgrade mit Prozessketten, die basierend auf anderen Einsatzenergien zu der gewünschten Zielenergie führen, zu vergleichen.

Die energetische Nutzung der Biomasse in der technischen Anwendung hat verglichen mit der Umwandlung fossiler Energieträger eine wesentlich kürzere Entwick-

lungszeit. Wie bei den Verfahren der Veredlung fossiler Energieträger besteht auch bei den Verfahren zur Biomassenutzung die Aufgabe in der Effizienzsteigerung durch wissenschaftlich-technische Entwicklungen.

Alternative Brennstoffe sind schwieriger Brennstoffe, die besondere Anforderungen an die Prozessführung richten. 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 Anlagen-Optimierung ergeben sich oftmals aufgrund fehlender und unzureichender Daten zu den brennstofftechnischen Eigenschaften der alternativen Brennstoffe.

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 (Abb. 2)

- chemische,
- mechanische,
- kalorische und
- reaktionstechnische

Eigenschaften zu betrachten (z. B. [4–6]).



Abbildung 2. Systematik der Brennstoffeigenschaften.

Bei der Beurteilung der Kriterien für den Einsatz von alternativen Brennstoffen ist darauf zu achten, dass diese im Zusammenhang mit dem jeweiligen Einsatzgebiet, dem zugehörigen technischen Prozess und den jeweiligen Apparaten zu betrachten sind.

Die Methoden zur brennstofftechnischen Analyse von Regelbrennstoffen lassen sich nur eingeschränkt auf alternative Brennstoffe übertragen. Aus diesem Grund werden derzeit Methoden erarbeitet oder die bestehenden Analysemethoden zur Charakterisierung fossiler Brennstoffe auf die verschiedenen alternativen Brennstoffe angepasst.

Aus dem Vergleich der Eigenschaften von alternativen Brennstoffen mit denen von Regelbrennstoffen lassen sich Kriterien für den Einsatz aber z. B. auch Rückschlüsse auf eine eventuell notwendige Aufbereitung (Zerkleinerung, Pelletierung, Trocknung usw.) von alternativen Brennstoffen ableiten. Der Einsatz von alternativen Brennstoffen, die Brennstoffcharakterisierung und die Möglichkeit der Bewertung des Einsatzes von Biomasse werden im Folgenden dargestellt.

2 Einsatz von alternativen Brennstoffen

2.1 Verfügbarkeit alternativer Brennstoffe

In dem von der deutschen Bundesregierung formulierten Energiekonzept werden die Leitlinien für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung bis 2050 durch die Nutzung erneuerbarer Energien beschrieben. Neben anderen Maßnahmen wird dabei insbesondere der Biomasse zur Strom- und Wärmebereitstellung eine große Bedeutung beigemessen. Demnach soll der Primärenergiebedarf bis 2050 auf ca. 7000 PJ halbiert werden [7]. Laut der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) können bis 2050 knapp 23 % des Primärenergiebedarfs – Basis sind ebenfalls ca. 7000 PJ – in der Bundesrepublik durch einheimische Biomasse gedeckt werden (Abb. 3). Gegenwärtig stützt sich die energetische Biomassenutzung hauptsächlich auf den Primärenergieträger Holz. Bereits jetzt ist jedoch zu erkennen, dass dies zu einer Verschärfung der Nutzungskonkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung führt.

Neben dem Einsatz von Energiepflanzen und Holz, d. h. von weitestgehend unbehandelter Biomasse, werden auch biogene Reststoffe wie Klärschlamm, Altholz, Zoomasse, Gülle, Klär- und Deponiegas zur Deckung des Primärenergiebedarfs genutzt. Die energetische Nutzung dieser

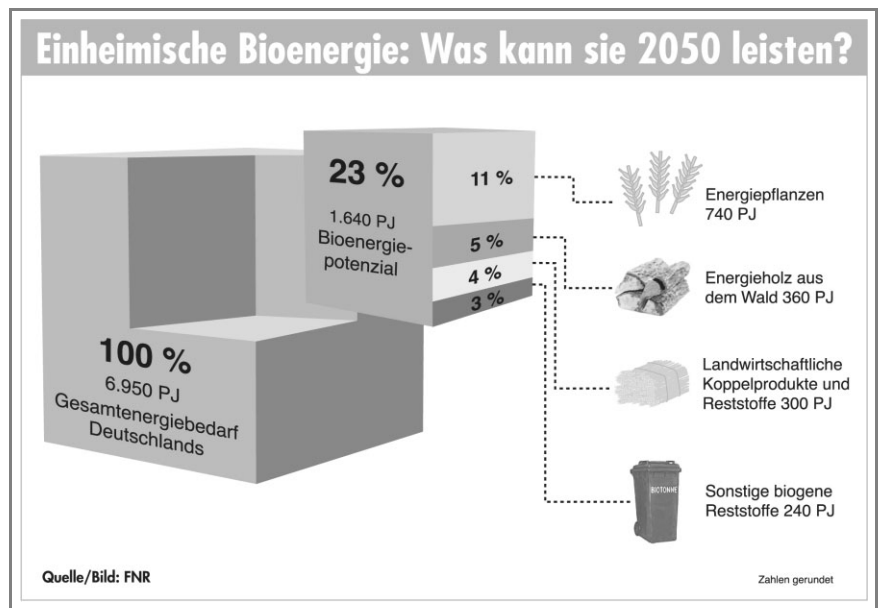


Abbildung 3. Einheimische Bioenergie (bezogen auf Deutschland) – Was kann diese bis 2050 leisten? [8].

Reststoffe ist vor allem im Hinblick auf die Klimarelevanz aber auch im Hinblick auf die Hygienisierung dieser Stoffe als vorteilhaft einzuschätzen, was auch vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussion in Bezug auf verunreinigte Lebensmittel, z. B. durch den Einsatz von Klärschlamm und Gülle als Dünger auf landwirtschaftlichen Flächen, bestätigt wird. 2008 wurde etwa die Hälfte des anfallenden Klärschlammes thermisch entsorgt (Abb. 4), 28,6 % wurden in der Landwirtschaft eingesetzt. Bei der Entwicklung der landwirtschaftlichen Verwertung ist ein Rückgang festzustellen.



Abbildung 4. Entsorgung und Verwertung von Klärschlamm [9].

Der bei der Klärschlammbehandlung erzielbare Nutzen oder der erforderliche Aufwand und somit die Fragestellung des energetischen Potenzials von Klärschlamm lässt sich nicht allein anhand der Eigenschaften des Klärschlammes, wie z. B. Wassergehalt, Aschegehalt und Heizwert der organischen Trockensubstanz, beantworten [10]. Gleiches gilt für die weiter oben genannten alternativen Brennstoffe. Wichtig für die Bewertung ist vielmehr der jeweils am Ende der Behandlungskette entstehende Nutzen oder Aufwand.

2.2 Probleme beim Einsatz alternativer Brennstoffe

Bei bestehenden, für die Kohleverbrennung ausgelegten, Kesselanlagen ist das Verhalten des Brennstoffs bezüglich Zündfähigkeit, Flammbild, Verschlackung, Belagsbildung, Kohlenstoffanteil in der Asche, Ausbrandverhalten, Emissionen (NO_x , SO_x , CO , Staub usw.) weitestgehend bekannt. Bei der Mitverbrennung von alternativen Brennstoffen in Kohlekraftwerken, derzeit bevorzugt Klärschlamm, Holz und Ersatzbrennstoffe aus Abfällen, sind für den Betreiber besondere Aspekte zu beachten.

Die häufig heterogene Zusammensetzung der alternativen Brennstoffe und die durch den Einsatz alternativer Brennstoffe veränderte Verbrennungscharakteristik müssen den Ansprüchen der für die Kohleverbrennung ausgelegten Kesselanlage entsprechen. Einen ganz erheblichen Einfluss auf die Verbrennungscharakteristik haben hierbei z. B. der Gehalt (s. Abb. 5) und die brennstofftechnischen Eigenschaften der flüchtigen Bestandteile und im Hinblick auf das Verschmutzungs-, Verschlackungs- und Korrosionsverhalten die Aschezusammensetzung der alternativen Brennstoffe (meist hoher Alkali und Erdalkalien-Gehalt).

Die Erfahrung hat gezeigt, z. B. [11–14], dass die Verbrennungscharakteristik einer Brennstoffmischung aus

Regelbrennstoffen 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 (z. B. [15, 16]).

Ein weiterer zu untersuchender Sachverhalt basiert auf der Wechselwirkung der unterschiedlichen Aschezusammensetzungen der Brennstoffe. Hier kann es hauptsächlich aufgrund von Elementen mit niedrigen Schmelzpunkten, die in größeren Anteilen in den Aschen der alternativen Brennstoffe zu finden sind, zu erheblicher Belagsbildung auf den Dampferzeugerheizflächen der Verbrennungsanlage kommen.

2.3 Prozesstechnische Anforderungen beim großtechnischen Einsatz

Beim Einsatz von alternativen Brennstoffen in Kraftwerken zur Substitution von Regelbrennstoffen sollte die Verfügbarkeit der Anlagen nicht eingeschränkt werden, d. h. beispielsweise keine Verkürzung der Anlagen-Reisezeiten. 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, z. B. in Bezug auf die Energiedichte, so gewählt werden, dass es zu keiner gravierenden Änderung des Wirkungsgrades der Anlage kommt.

Die Realisierung dieser beispielhaft genannten Forderungen wird hauptsächlich durch den Brennstoff und dessen Eigenschaften, aber auch durch die Prozessführung wie auch durch die jeweils eingesetzten Apparate der jeweiligen Anlage bestimmt. Die Prozessführung, also der Prozess als

solcher und dessen prozesstechnische Regelung hinsichtlich der Vermischung von Reaktionsgas und Brennstoff, der Trennung von Reaktion und Wärmeübertragung, des Temperaturniveaus und der Temperaturverteilung und den Bedingungen zur Schadstoffbegrenzung, ist dabei zu beachten. Hier sind vor allem die reaktionstechnischen Eigenschaften in Abhängigkeit von den chemischen, kalorischen und mechanischen Eigenschaften der Brennstoffe zu betrachten.

Beim Einsatz alternativer Brennstoffe sind die jeweils infrage kommenden bzw. vorhandenen Apparate (Brennkammer, Rost, Wirbelschicht usw.) auf ihre Eignung für den jeweiligen Brennstoff zu prüfen. Brennkammersysteme (Trockenstaubfeue-

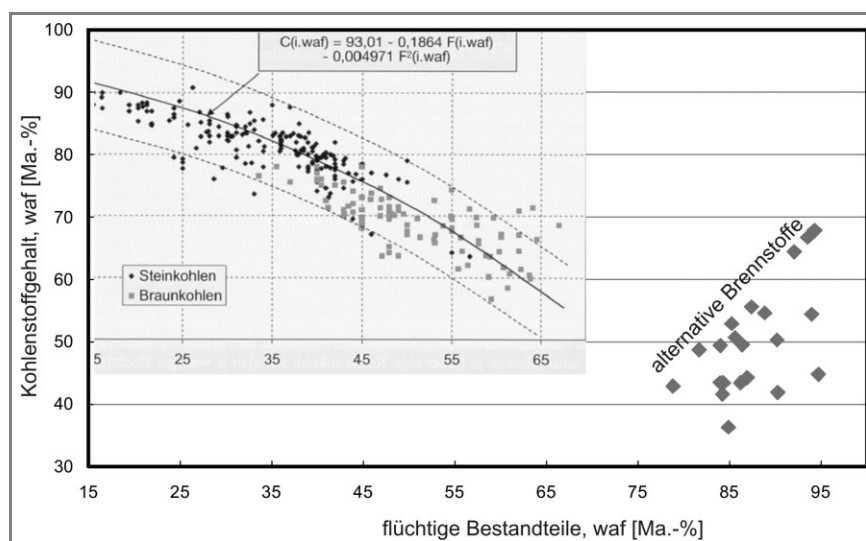


Abbildung 5. Zusammenhang zwischen flüchtigen Bestandteilen und dem Kohlenstoffgehalt für verschiedene Kohlen (nach [6]) und verschiedene alternative Brennstoffe.

rung, Schmelzkammerfeuerung), wie sie bei Staubfeuerungsanlagen in Kohlekraftwerken angewendet werden, eignen sich nur bedingt für den Einsatz von alternativen Brennstoffen, da die Abbrandgeschwindigkeit aufgrund z. B. der größeren Korngröße im Vergleich zum Kohlestaub geringer ist und somit ein vollständiger Ausbrand nicht in jedem Fall gewährleistet werden kann. Aus diesem Grund werden beim Einsatz von alternativen Brennstoffen in Steinkohle-Kraftwerken sehr hohe Anforderungen an die Aufbereitung gestellt. In Braunkohle-Kraftwerken, die mit Nachbrennrosten (s. Abb. 6) ausgestattet sind oder über eine Ascherückführung verfügen, wird das Problem des unvollständigen Ausbrandes apparate- bzw. prozesstechnisch gelöst. Sie sind somit für den Einsatz von alternativen Brennstoffen gut geeignet [17].

In Bezug auf das Feuerungssystem gibt es weniger Probleme beim Einsatz von alternativen Brennstoffen in Rost- und Wirbelschichtanlagen, da die Verweilzeit der Einsatzstoffe im Vergleich zur Staubfeuerung länger ist. Des Weiteren ist eine gute Durchmischung der Brennstoffe mit dem Reaktionsgas, z. B. durch die Schürung und der über die Rostlänge einstellbaren Luftmengen auf dem Rost bzw. dem intensiven Kontakt zum Bettmaterial und der Fluidisierung in der Wirbelschicht, gegeben.

Neben den Feuerungs-Systemen sind beim Einsatz alternativer Brennstoffe außerdem aufgrund der unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften – wie Schüttdichte, Energiedichte, Mahlbarkeit und Korngröße – die Lagerung, Brennstoff-Förderung und die Brennstoffdosierung hinsichtlich ihrer Eignung zu prüfen und gegebenenfalls der Brennstoff oder der jeweilige Apparat anzupassen. Gleiches gilt aufgrund der chemischen Eigenschaften, z. B. Aschege-

halt, Schwermetallgehalt, Schwefelgehalt oder Chlorgehalt, für die Ascheaustragssysteme und die Komponenten der Abgasreinigung.

In Abb. 7 sind die komplexen Zusammenhänge noch einmal zusammenfassend dargestellt. Im Mittelpunkt stehen der Brennstoff und dessen Eigenschaften. Kriterien zur Eignung des Brennstoffs sind nur in Abhängigkeit der jeweiligen Apparate zu beantworten. Die oben genannten Forderungen Verweilzeit, Schadstoffgehalt und Wirkungsgrad werden durch den jeweiligen Prozess und dessen Regelung beeinflusst. Bei der Regelung ist zu beachten, dass beim Einsatz alternativer Brennstoffe größere Schwankungen in der Qualität zu erwarten sind. Diese müssen durch die Regelungstechnik der Anlage ausgeglichen werden. In Bezug auf den Brennstoff ist neben dem Potenzial (s. Abschn. 2.1) auch die Frage der langfristigen, gleichbleibenden Verfügbarkeit und der Qualitäten zu stellen. Diese ist nur durch eine Eingangs-Beprobung der Einsatzstoffe oder durch ein Anlagen-Monitoring sicher zu realisieren, d. h. durch eine Überwachung der Brennstoffqualität während des laufenden Prozesses.

Im Weiteren werden die brennstofftechnischen Eigenschaften und deren Untersuchungsmethoden, die Bilanzierung des Einsatzes alternativer Brennstoffe sowie die Möglichkeit des Anlagen-Monitorings im Hinblick auf die kontinuierliche Überwachung der Brennstoffqualität vorgestellt und diskutiert.

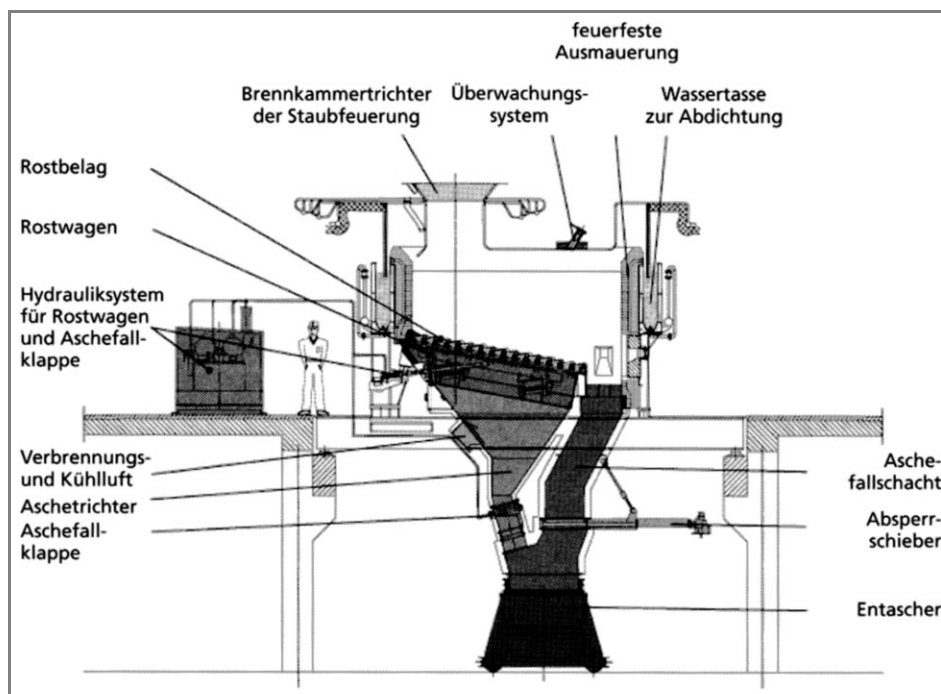


Abbildung 6. Schematische Darstellung eines Ausbrandrostes einer Braunkohle-Staubfeuerung [2].

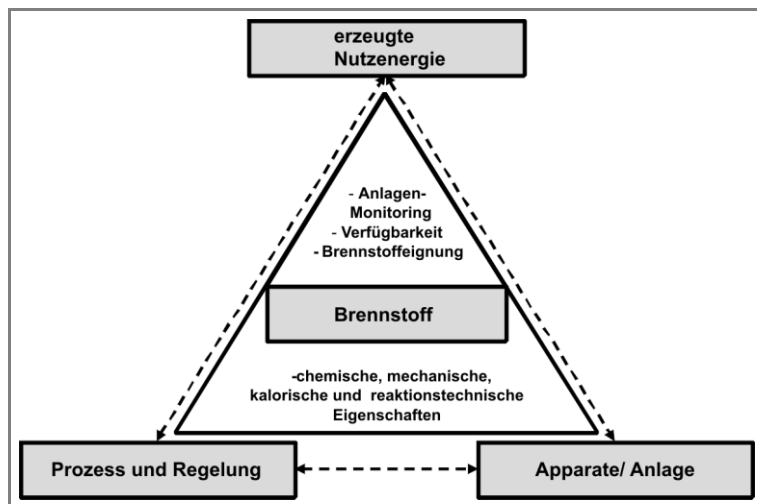


Abbildung 7. Abhängigkeiten beim Einsatz eines Brennstoffs.

3 Brennstoff-Charakterisierung

3.1 Brennstofftechnische Eigenschaften und Untersuchungsmethoden

Die chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionstechnischen Eigenschaften (Abb. 2) verschiedener alternativer Brennstoffe und fossiler Brennstoffe sind z. B. in [4–6, 16, 18, 19] dargestellt. Im vorliegenden Beitrag wird auf spezielle Aspekte – den Zusammenhang zwischen Heizwert und Elementaranalyse, das Zünd- und Abbrandverhalten, das Ascheschmelzverhalten und die Aschezusammensetzung sowie Möglichkeiten das Verschmutzungs-, Verschlackungs- und Korrosionsverhalten von Brennstoffen zu bestimmen – eingegangen.

Standardisierte Untersuchungsmethoden für Biomasse-Brennstoffe orientieren sich an denen von Regelbrennstoffen, z. B. Steinkohle, Koks, Braunkohle, Torf, Holzkohle, Briketts usw., unterscheiden sich jedoch teilweise geringfügig. Beispielhaft wird der Aschegehalt für feste Biobrennstoffe nach DIN EN 14775 bei $(550 \pm 10)^\circ\text{C}$ durchgeführt, für die Regelbrennstoffe wird der Aschegehalt nach ISO 1171 bzw. DIN 51719 bei einer Temperatur von $(815 \pm 10)^\circ\text{C}$ bestimmt. Bei den Brennstoffuntersuchungen sind neben den Ergebnissen somit die jeweils verwendeten Normen mit anzugeben.

3.1.1 Zusammenhänge zwischen dem Heizwert und der Elementaranalyse

Ausgehend von den konventionellen Brennstoffuntersuchungen ist es interessant, Zusammenhänge zwischen diesen zu ermitteln und Vergleiche zu den Regelbrennstoffen Stein- und Braunkohle zu ziehen.

Für Ersatzbrennstoffe wurde 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 Abfallfraktionen und Abfallgemischen dargestellt. Das Heizwertband für reine Biomassen ist nicht so breit wie das für Ersatzbrennstoffe aus Abfall, die Wertepaare der Biomasse ordnen sich jedoch erwartungsgemäß in den Verlauf des in Abb. 8 dargestellten Zusammenhangs ein.

3.1.2 Zünd- und Abbrandverhalten

Neben den standardisierten Brennstoffuntersuchungen existieren weitere Methoden zur Charakterisierung eines Brennstoffs. Diese Methoden dienen unter anderem zur Ermittlung der reaktionstechnischen Eigenschaften, z. B. zur Bestimmung der kinetischen Daten unter Beachtung der Prozessbedingungen. Dafür stehen unterschiedlichste Versuchsanlagen zur Verfügung, wie das Field-Rohr zur Bestimmung kinetischer Daten schneller Umsetzungsprozesse (Prozessbedingungen wie in einer Staubfeuerung) und die thermogravimetrische Analyse (TGA) zur Bestimmung kinetischer Daten langsamer Umsetzungsprozesse (Prozessbedingungen wie in einer Rostfeuerung, im Drehrohr). Die Versuchsdurchführung und die daraus zu ermit-

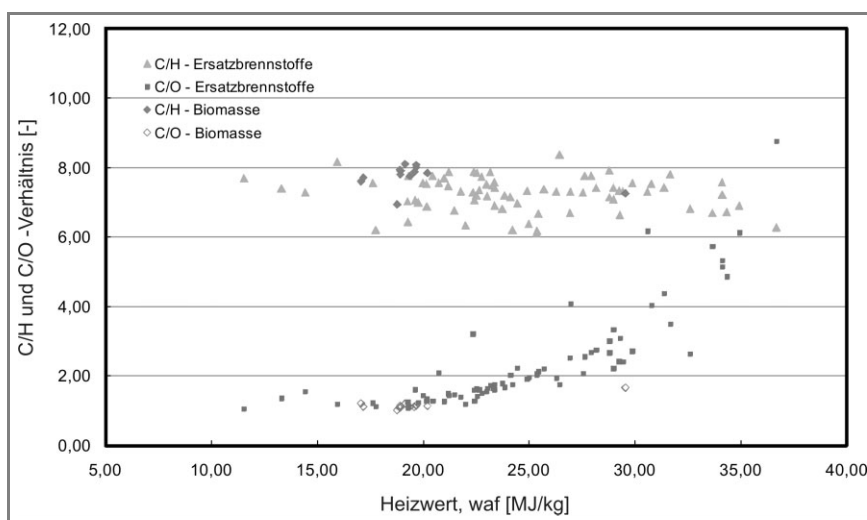


Abbildung 8. C/H- und C/O-Verhältnis verschiedener Abfallfraktionen, Abfallgemische, Ersatzbrennstoffe und Biomassen.

telnden Kinetik-Daten werden z. B. in [20] erläutert und diskutiert.

Darüber hinaus erhält man für staubförmige Brennstoffe in einem sogenannten Zündofen [6] wertvolle Informationen zum Zündverhalten in Abhängigkeit von Temperaturen, Gasatmosphäre, Partikelgrößen usw. In Abb. 9 sind beispielhaft Ergebnisse zum Zündverhalten von Braunkohle, Steinkohle und unbehandelte/behandelte Biomasse dargestellt. Dazu wurde im Zündofen bei unterschiedlichen Temperaturen der Zündzeitpunkt verschiedener Brennstoffe ermittelt und in dem Diagramm aufgetragen. Bei Kohlen steht ein hoher Anteil an flüchtigen Bestandteilen gewöhnlich für eine schnelle Zündung [6]. Der Vergleich von Braun- und Steinkohle untermauert diese These. Die hier untersuchten Biomasse-Brennstoffe gliedern sich zwischen diesen beiden Kurven ein.

Versuchsanlagen, in denen größere Probenmengen mit der jeweiligen Einsatz-Korngröße hinsichtlich ihrer reaktionstechnischen Eigenschaften untersucht werden können, sind z. B. der Batch-Reaktor [21] und die technische TGA [22].

Versuche zur Charakterisierung des Verbrennungsablaufs stückiger Steinkohlen und des Temperaturverlaufs im Brennstoffbett bei der Verbrennung dieser Kohle wurden erstmals in den frühen 30er Jahren in Batch-Reaktoren durchgeführt [23, 24]. Damals wurden Batch-Reaktoren zur Optimierung für den Bau und Betrieb von Rostfeuerungen genutzt. Insbesondere in [24] wurden dabei 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 aufgezungenen Bedingungen?

Aus dieser Fragestellung heraus wurden für Regelbrennstoffe verschiedene Methoden entwickelt, die es ermöglichen, Regelbrennstoffe je nach Anwendung zu klassifizieren, z. B. [6]. Die Möglichkeit der Brennstoffcharakterisierung alternativer Brennstoffe in Technikums-Anlagen wurde

unter anderem mithilfe von Batch-Reaktoren in [21] untersucht. Dabei wurden verschiedene Parameter wie z. B. die Reaktionsfrontgeschwindigkeit (zur Ermittlung dieser s. a. [25, 26]) bei der Untersuchung verschiedener Brennstoffe unter annähernd gleichen Versuchsbedingungen in drei, von ihrer Konstruktion her unterschiedlich aufgebauten, Batch-Reaktoren miteinander verglichen. Die ermittelten Ergebnisse der Untersuchungen ergaben nur geringe Abweichungen. Die Eignung des Batch-Reaktors als Methode zur Charakterisierung von Brennstoffen konnte somit nachgewiesen werden.

Beispielhaft ist in Abb. 10 das Abbrandverhalten von Kohle bei der Variation der Primärluftmenge und von Holzhackschnitzeln bei Variation der Brennstoff-Feuchte dargestellt. Der Einfluss der geänderten Versuchsbedingungen ist anhand der Reaktionsfrontgeschwindigkeit (mm min^{-1}) ersichtlich. So steigt die Reaktionsfrontgeschwindigkeit bei Kohle mit der Zunahme der hier zugeführten Primärluftmenge bzw. sinkt mit Zunahme des Feuchtegehalts der Holzhackschnitzel, wobei die Zeit bis zum Zündvorgang aufgrund der längeren Trocknungsphase zunimmt.

Mithilfe des Batch-Reaktors ist es im Technikums-Maßstab möglich, z. B. durch die Zugabe unterschiedlicher Luftmengen oder auch durch eine Luftstufung (s. a. [27, 28]) die Teilschritte des Feststoffumsatzes – Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung – zu steuern und so gezielt, die prozesstechnischen Gegebenheiten bei der thermischen Behandlung zu verändern. Das brennstofftechnische Verhalten kann so je nach Brennstoff – der wiederum in seinen Eigenschaften angepasst werden kann, z. B. durch Variation der Brennstoff-Feuchte oder auch der Schüttdichte/Korngröße – und dazugehöriger Prozessführung untersucht werden.

Neben Anlagen im Technikums-Maßstab können zur Charakterisierung von Brennstoffen auch Anlagen im Pilot-Maßstab eingesetzt werden (z. B. [29–31]). Hier ist eine sehr gute Übertragbarkeit auf den realen Prozess gegeben, jedoch ist der Aufwand zur Ermittlung von Ergebnissen entsprechend größer.

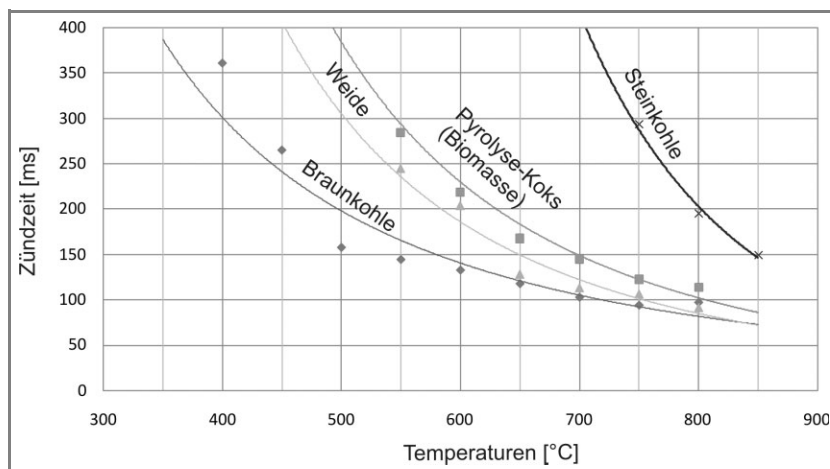


Abbildung 9. Ergebnisse zum Zündverhalten verschiedener Brennstoffe.

3.1.3 Ascheschmelzverhalten und Aschezusammensetzung

In Abb. 11 sind Untersuchungen zum Ascheschmelzverhalten verschiedener Brennstoffe und Materialien dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass sich das Schmelzverhalten der hier gewählten Brennstoffe sehr unterscheidet. Zum einen sind große Unterschiede der Temperaturen bei den jeweiligen charakteristischen Zuständen zu erkennen, zum anderen zeigt sich, dass die Temperaturdifferenz zwischen Sinter- und Fließtemperatur erheblich variieren kann. Bei dem hier untersuchten Ersatzbrennstoff und dem reinen Zellstoff beträgt die Tempe-

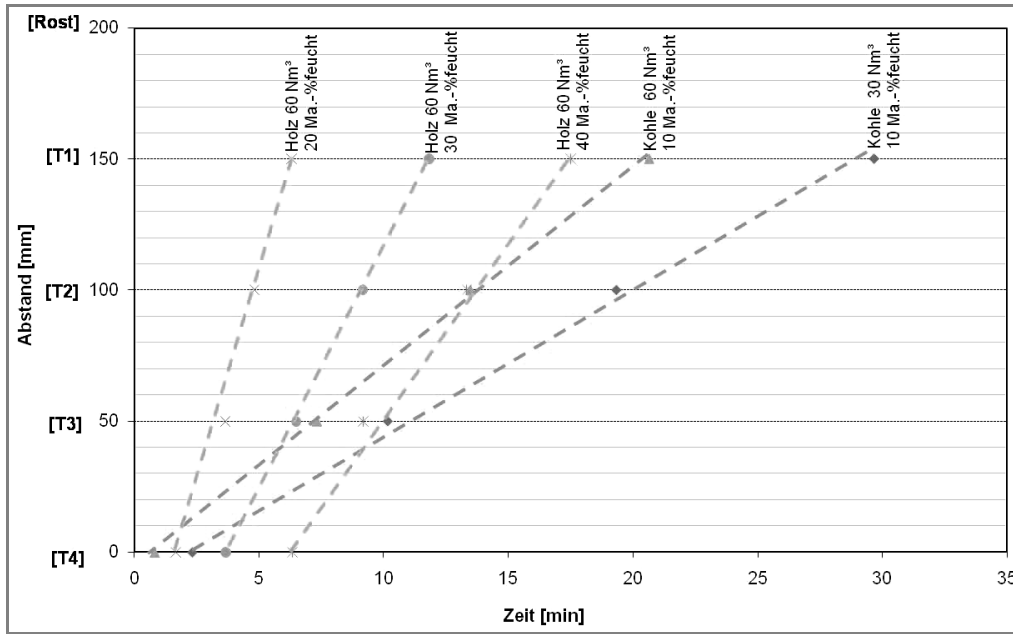


Abbildung 10. Ermittlung des Abbrandverhaltens mithilfe der Reaktionsfrontgeschwindigkeit.

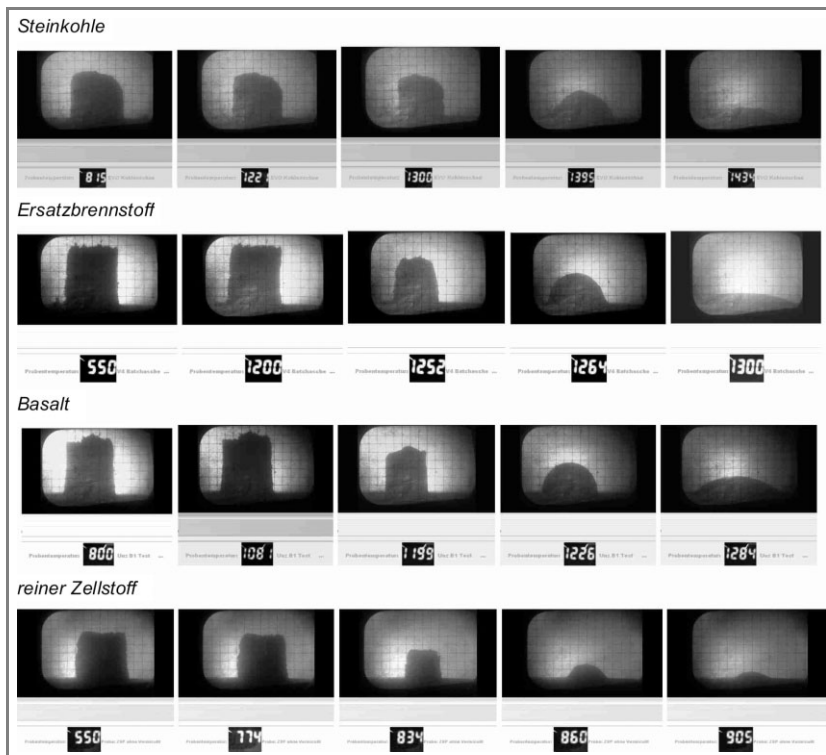


Abbildung 11. Ascheschmelzverhalten unterschiedlicher Brennstoffe (von links nach rechts: Ausgangsbild, Sintertemperatur, Erweichungstemperatur, Halbkugeltemperatur, Fließtemperatur).

raturdifferenz nur ca. 100 K bzw. 131 K (*kurze Schlacke*), wohingegen sie bei der Steinkohle ca. 213 K und bei Basalt ca. 203 K beträgt (*lange Schlacke*) und somit in etwa doppelt so hoch ist.

das Verschlackungs- und Verschmutzungsverhalten. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die jeweilige Aschezusammensetzung abhängig von dem Prozess und damit von den jeweiligen Bedingungen, hinsichtlich z. B. der Temperatur

Die charakteristischen Temperaturen, ermittelt im Ascheschmelzmikroskop, sind ein erster Hinweis auf das Verschlackungs- und Verschmutzungsverhalten der Brennstoffaschen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Asche vor allem bei heterogener Zusammensetzung nur teilweise schmilzt, was jedoch anhand der optischen Untersuchungsmethode nicht bzw. nur in seltenen Fällen nachgewiesen werden kann. Beispielfhaft seien hier Untersuchungen genannt, bei denen das Ascheschmelzverhalten von Zellstoffen durch Additive verändert wurde. Eine Feststellung war, dass einige Additive einen Einfluss auf die Asche-Chemie haben, d. h. eine Veränderung der Bindungen der verschiedenen, in den Aschen vorkommenden, Elemente auftritt. 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 [32].

Die Analyse der elementaren Zusammensetzung der Brennstoff-Asche gibt einen weiteren Hinweis im Hinblick auf

und der Verfügbarkeit von Sauerstoff ist. Ascheuntersuchungen im Labor sind, wie bereits beschrieben, standardisiert, d. h. die Asche wird unter genormten Bedingungen hergestellt (zerkleinert) und analysiert.

Die Anwendung von Kennzahlen aus der Kohleverbrennung zur Charakterisierung des Verschlackungs- und Verschmutzungsverhaltens von Ersatzbrennstoff-Aschen, z. B. das Base zu Säure Verhältnis $R_{B/A}$ (Gl. (1))

$$R_{B/A} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2} \quad (1)$$

und der Schlacke-Viskositäts-Index S_R (Gl. (2))

$$S_R = \frac{\text{SiO}_2}{\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO}} \cdot 100 \quad (2)$$

wurde beispielhaft in [33] und [34] untersucht. Dazu wurden die Kennzahlen aus der Asche-Zusammensetzung für verschiedene Biomasse-Brennstoffe ermittelt und miteinander verglichen. Dabei wurde eine tendenzielle Anwendbarkeit der Kennzahlen nachgewiesen. Eigene Untersuchungen mit alternativen Brennstoffen zeigten jedoch, dass eine kennzahlenbezogene Bewertung des Verschlackungs- und Verschmutzungsverhaltens insbesondere bei Ersatz- und Biomassebrennstoffen kritisch zu betrachten ist [35].

3.1.4 Verschlackungs-, Verschmutzungs- und Korrosionsverhalten

Im Hinblick auf das Verschlackungs-, Verschmutzungs- und Korrosionsverhalten von Brennstoffen wird derzeit in Technikums- und Pilotanlagen und vergleichend in großtechnischen Anlagen die Möglichkeit (Abb. 12) untersucht, korrosionsrelevante Eigenschaften durch eine isokinetische Beprobung der festen bzw. sublimierten Partikel im Abgas zu ermitteln. Die im großtechnischen Maßstab erprobten Verfahren [36] werden weiter entwickelt, um eine Bewertung des Belagsbildungs- und Korrosionspotenzials von Brennstoffen vor dem großtechnischen Einsatz durchzuführen [18].

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 Aggregatzustands fest/flüssig/gasförmig unterliegen. So ist z. B. der Gesamtchlorgehalt als ein Gütekriterium für alternative Brennstoffe nicht ausreichend. Ähnlich wie bei den Kennzahlen zum Verschlackungs- und Verschmutzungsverhalten gibt es auch Kennzahlen zur Korrosionsbewertung eines Brennstoffs, wie das Schwefel/Chlor-Verhältnis (z. B. [37]). Hierzu sei seitens der Autoren auch wieder darauf hingewiesen, dass diese Kennzahlen aufgrund der komplexen Zusammenhänge [38] der Korrosionsmechanismen als Kriterium insbesondere bei Ersatz- und Biomassebrennstoffen kritisch

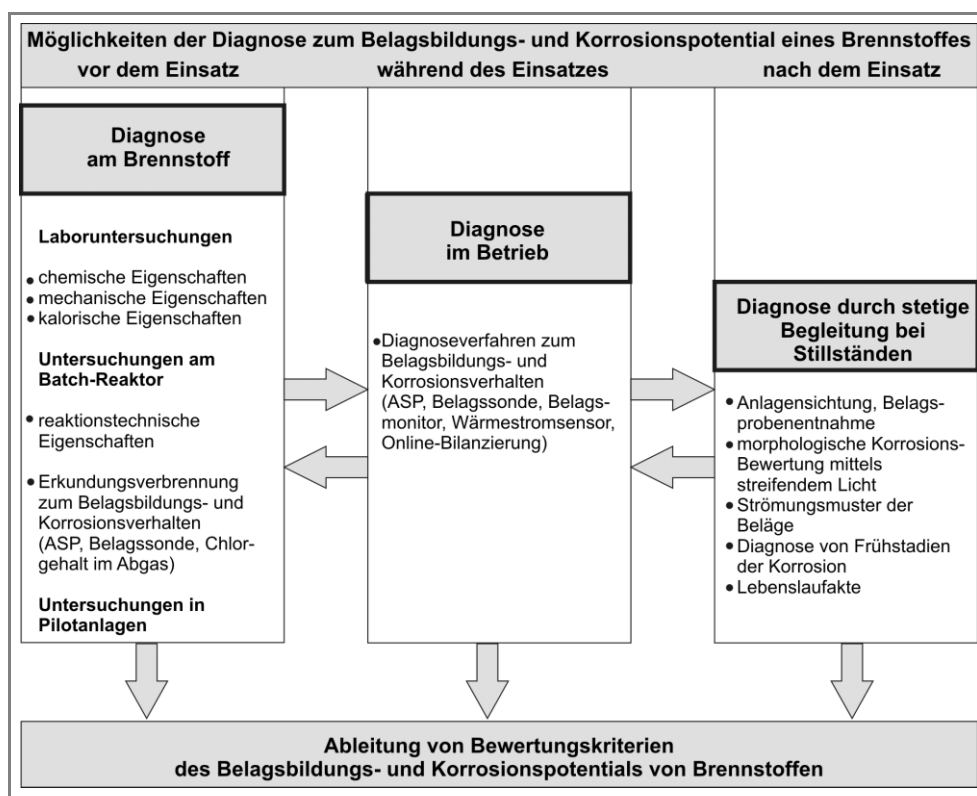


Abbildung 12. Möglichkeiten der Diagnose zum Belagsbildungs- und Korrosionspotenzial.

zu betrachten sind [35]. Vielmehr sind detaillierte Untersuchungen hinsichtlich der korrosionsrelevanten Elemente und deren Verhalten, z. B. hinsichtlich ihrer Freisetzung, notwendig.

Beispielhaft wird im Weiteren die Methode der Belagssondenmessung mithilfe einer Gitternetzsonde vorgestellt. Bei der isokinetischen Beprobung wird in Abhängigkeit von der Entnahmeposition (Messöffnung im Kessel) und der damit gegebenen Abgastemperatur – isokinetisch – die Fracht der physikalisch (fest, flüssig) und stofflich (Silicate, Oxide, Chloride, Sulfate, Hydroxide usw.) unterschiedlichen Partikel des Rohgases abgeschieden. Die verschiedenen Partikeltypen (grobe und feine Partikel, besonders korrosionsrelevante Salzschnmelzen) [36] formen signifikante Gefügestrukturen auf der sogenannten Belagssonde. Die mineralogische Bewertung dieser Sedimentationsgefüge und die chemischen Daten aus Punkt- und Kleinflächenmessungen der abgelagerten Partikel führen zu einer differenzierten Zustandsbewertung der am Belagsaufbau teilnehmenden Partikel des Rohgases an der Beprobungsposition.

Eine im Batch-Reaktor durchgeführte Belagssondenmessung beim Einsatz eines Ersatzbrennstoffs ist in Abb. 13 dargestellt. Das Gitter der Belagssonde wurde dabei mittels eines Rasterelektronenmikroskops (REM) vergrößert, so dass die einzelnen, abgeschiedenen Partikel sichtbar werden. Weitere Ergebnisse von Belagssondenmessungen beim großtechnischen Einsatz in einer kohlegefeuerten Wirbelschichtanlage, in Ersatzbrennstoffkraftwerken und beim

Einsatz im Batch-Reaktor wurden z. B. in [18] und [36] veröffentlicht.

Abb. 13 zeigt beispielhaft eine chemisch-mineralogische Bewertung dieser Sedimentationsgefüge. Die chemische Zusammensetzung der Punkt- und Kleinflächenmessungen der abgelagerten Partikel ist mithilfe von Spinnennetzdiagrammen dargestellt, wobei die Zusammensetzung der Partikel immer zu der Referenz-Zusammensetzung des Brennstoffs dargestellt ist. Im oberen Diagramm sind die Partikel (auf der Sonde rechteckig umrahmt) aufgetragen, die der Brennstoffzusammensetzung der hier ausgewählten Hauptelemente sehr ähnlich sind. Im unteren Diagramm sind Partikel aufgetragen (auf der Sonde sternförmig umrahmt), die zu einem großen Anteil aus Natrium bestehen. Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der ausgewählten Partikel sind in Abb. 13 auch optisch zu erkennen. Zur wissenschaftlichen Absicherung der Rückschlüsse auf das Belagsbildungs- und Korrosionspotenzial sind noch weitere Messungen und Untersuchungen, auch vergleichend in großtechnischen Anlagen, erforderlich. Eine differenzierte Zustandsbewertung der am Belagsaufbau teilnehmenden Partikel ist Voraussetzung für weitere Erkenntnisse zum Thema Verschlackung und Korrosion. Diese ist z. B. mit der hier vorgestellten Methode möglich.

Beispielhaft seien hier weitere Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Verschlackung, Verschmutzung und Korrosion genannt, die sich zum einen mit Sondenmessungen zur Ermittlung der freigesetzten Partikel beschäftigen, z. B. [39, 40], und zum anderen mit der Ableitung von Kor-

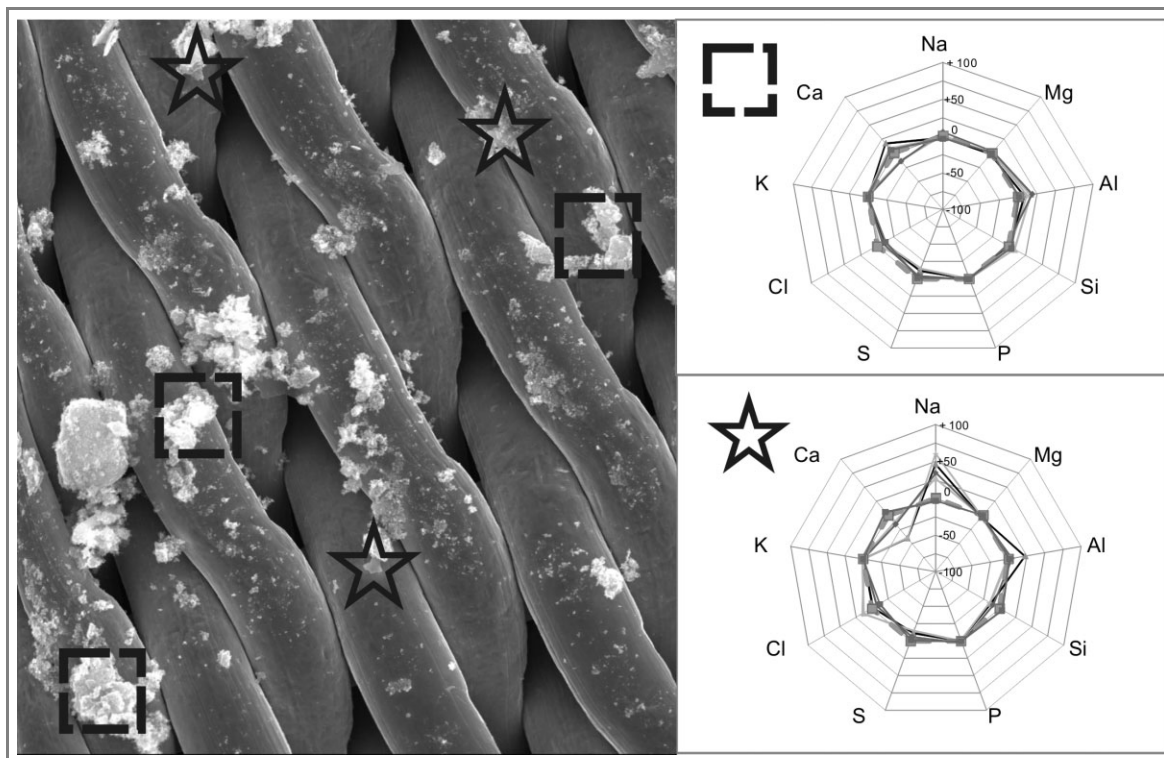


Abbildung 13. Ersatzbrennstoff: Partikel-Probe aus dem Batch-Reaktor.

rosionsmechanismen beim Einsatz von alternativen Brennstoffen, z. B. [41–43].

4 Bilanzierung und Monitoring des Einsatzes alternativer Brennstoffe

Neben der Charakterisierung der Brennstoffe sind die zur Verfügung stehenden Prozesse zur energetischen Verwertung der Biomasse zu evaluieren. Vorzug für eine bestimmte Nutzung sollte die Umwandlungskette haben, die spezifisch auf die Zielenergie, hier elektrische Energie, betrachtet die niedrigsten CO₂-Emissionen oder aber den jeweils höchsten Wirkungsgrad aufweist. Dafür ist es erforderlich, die Nutzungswege zu bilanzieren und zu bewerten. Die Methodik einer energetischen Bilanzierung wird u. a. in [44] 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. Abb. 14 zeigt die prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz einer gesamten Anlage mit den wesentlichen ein- und austretenden Massen-, Stoff- und Energieströmen. Die Ergebnisse der Bilanzierung lassen sich in Kennzahlen, wie dem Wirkungsgrad oder spezifischen CO₂-Emissionen, zusammenfassen und können so mit anderen Verfahren verglichen werden.

Die Erzeugung elektrischer Energie aus Biomasse erfordert derzeit in der Regel größere Anlagen (im Bereich von einigen MW) für einen wirtschaftlichen Betrieb. Kleinere dezentrale Anlagen von einigen 100 kW auf der Basis von Vergasungsprozessen sind im Entwicklungsstadium [45]. Die nachfolgenden Beispiele beziehen sich auf Energieerzeugung im Megawattbereich und sollen die Notwendigkeit einer Bilanzierung verdeutlichen.

Betrachtet man zunächst die direkte thermische Umwandlung von Holz in elektrische Energie in eigens dafür gebauten Biomasseheizkraftwerken, so werden geringere Wir-

kungsgrade [46,47] im Vergleich zu Kohle- oder GuD-Kraftwerken erreicht.

Als Alternative kann Holz jedoch auch in großen Kohlekraftwerken mit verbrannt werden. Dort sind durch höhere Dampftemperaturen, -drücke und Zwischenüberhitzung auch höhere Wirkungsgrade in der Umwandlung möglich. Damit kann mittels Substitution der fossilen Brennstoffe durch biogene Energieträger außerdem der Ausstoß von Kohlendioxid reduziert werden. Vorher muss das Holz jedoch aufbereitet, also an die prozesstechnischen Randbedingungen angepasst werden. Dazu stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, die zu bewerten sind.

Zieht man als Ausgangsstoff waldfreuchtes Holz heran, so ist eine vorhergehende Aufbereitung notwendig (vgl. Abschn. 2.3). Für die Mitverbrennung bietet sich zunächst eine rein mechanische Aufbereitung wie z. B. die Zerkleinerung in einem Häcksler an, deren Verfahrenskette in Abb. 15 beispielhaft als vereinfachtes Bilanzschema mit den Hauptstoffströmen dargestellt ist.

Eine weitere Möglichkeit findet sich in der thermischen Aufbereitung der Biomasse. Dazu werden die Holzhackschnitzel mittels Pyrolyse thermisch zersetzt. Ähnliche Verfahren wie die Verkohlung oder die Torrefizierung sind auch pyrolytische Prozesse, die der Aufbereitung der Biomasse dienen [46]. Die thermische Aufbereitung erhöht jedoch die Komplexität der Anlage und führt zu einem erhöhten elektrischen Eigenbedarf der Verfahrenskette. In den Abbn. 16 und 17 sind Wirkungsgrade und spezifische CO₂-Emissionen dieser zwei Verfahrensvarianten im Vergleich mit einem konventionellen Braunkohlekraftwerk (856 MW_{el, brutto}, Substitution von 5 % der Feuerungswärmeleistung) dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass sich durch die Vorschaltung einer mechanischen oder thermischen Aufbereitung von Holzhackschnitzeln vor ein Großkraftwerk der Nettowirkungsgrad nur unwesentlich verschlechtert, jedoch die fossile CO₂-Bilanz verbessert werden kann. Zudem wird die Biomasse auf sehr hohem Niveau in elektrische Energie umgewandelt.

Neben den zuvor aufgezeigten Optionen ist es auch möglich Biomasse in einen gasförmigen Brennstoff umzuwandeln. Dabei wird aus den Holzhackschnitzeln durch unter-

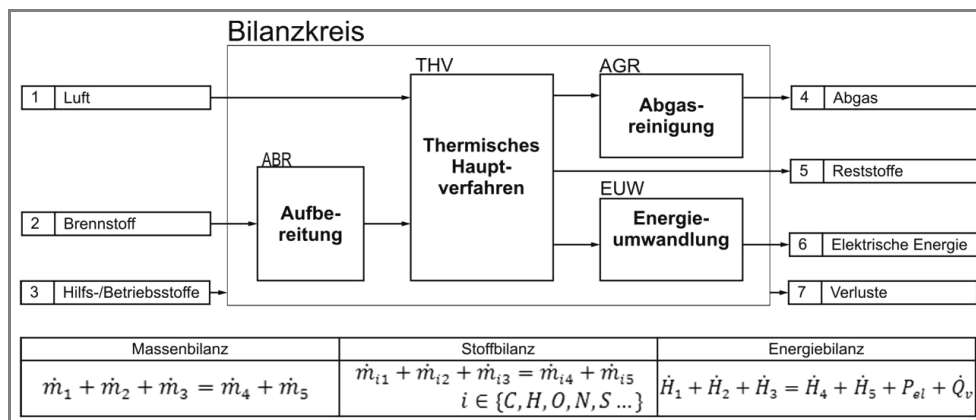


Abbildung 14. Prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz. Bilanzgrenzen: ABR = Aufbereitung, AGR = Abgasreinigung, EUW = Energieumwandlung, THV = thermisches Hauptverfahren.

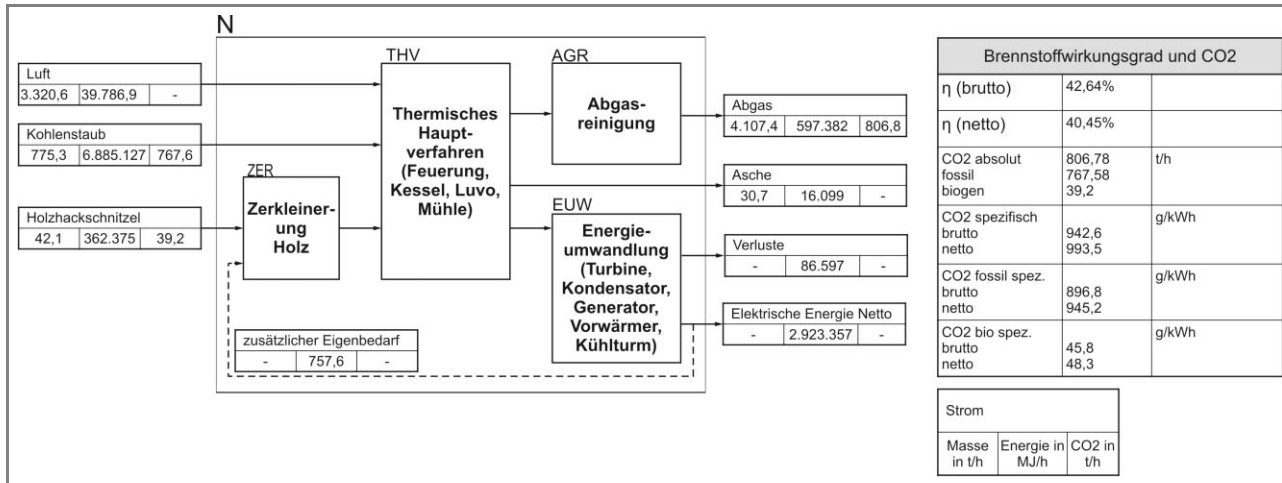


Abbildung 15. Prinzipielle Darstellung eines Bilanzschemas für die Energiebilanz. Bilanzgrenzen: AGR = Abgasreinigung, EUW = Energieumwandlung, THV = thermisches Hauptverfahren, N = Nettobilanzkreis, ZER = Zerkleinerung.

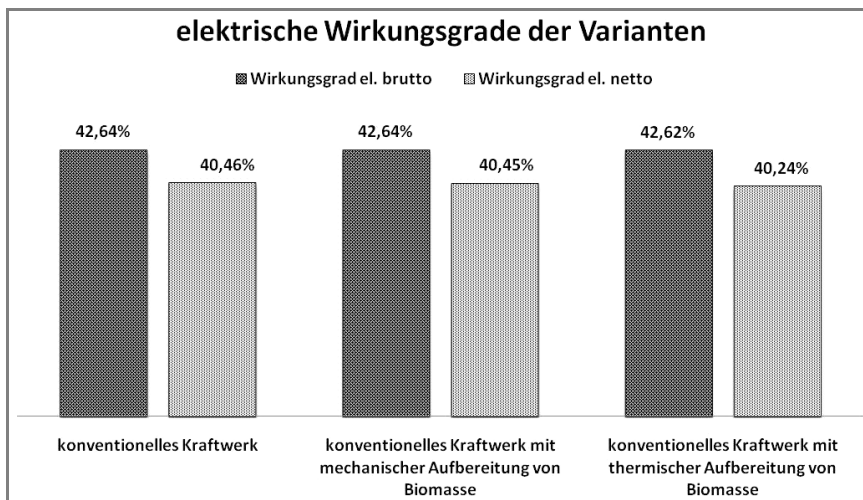


Abbildung 16. Elektrische Wirkungsgrade der Szenarien.

stöchiometrische thermische Zersetzung ein Produktgas erzeugt. Durch Gasreinigung wird dieses weiter aufbereitet und nachfolgend in einer katalytisch gestützten Synthese in ein methanreiches Gas umgewandelt. Gegebenenfalls muss anschließend eine Gastrocknung und CO₂-Entfernung erfolgen, bevor eine Einspeisung als synthetisches Erdgas (Substitute Natural Gas oder kurz SNG) ins Erdgasnetz möglich wird. Das Verfahren wurde u. a. in einer österreichischen Demonstrationsanlage einer Wirbelschichtwasserdampfvergasung in Güssing umgesetzt. Der Synthesewirkungsgrad dieser Umwandlungskette wird mit ca. 60 % beziffert [48]. Bei der Verstromung des Gases in hocheffizienten GuD-Kraftwerken (elektrischer Nettowirkungsgrad ca. 60 % [49]) kann auch auf diesem Weg ein elektrischer Wirkungsgrad für die Gesamtkette von etwa 36 % erzielt werden. Alternativ kann das Produktgas mit weniger Aufbereitungsschritten auch in Gasmotoren verstromt werden. Diese sind im Allgemeinen für kleinere

Anlagengrößen interessant und weisen etwas geringere Wirkungsgrade auf.

Die Ergebnisse einer solchen Bilanzierung und des darauf aufbauenden Vergleichs zeigen die Richtung für weitere technische Entwicklungen an. Ein Beispiel für die Weiterentwicklung ist der Bau eines Holzgas-Heizkraftwerks nach Vorbild der Güssing-Anlage in Senden bei Ulm. Das Kraftwerk soll planmäßig Ende 2011 ans Netz gehen und zeichnet sich durch einen hohen elektrischen Wirkungsgrad von ca. 36 % aus [47], obwohl keine Gasturbinen, sondern zwei Gasmotoren zur Stromerzeugung dienen. Dies ist durch Koppelung mit einem ORC-Prozess (Organic Rankine Cycle) möglich, der durch die Nutzung von Abwärme etwa 15 % der elektrischen Leistung ausmacht.

Die Bilanzierung dient außerdem der Beurteilung von aktuellen Betriebszuständen in Anlagen, die alternative Brennstoffe einsetzen. Hier sind vor allem die Kenntnisse des jeweiligen Massenstroms und Heizwertes sowie die chemische Zusammensetzung des Brennstoffs von großer Bedeutung. Diese stehen während des Betriebs der Anlage nicht hinreichend genau bzw. gar nicht zur Verfügung. Mit Hilfe von Bilanzen ist es auch möglich, über sogenannte Rückwärtsrechnungen diese wichtigen Größen während des Einsatzes zu bestimmen [50]. Die Praxistauglichkeit, z. B. der Methode der Online-Bilanzierung, wurde [51] und wird derzeit in mehreren Anlagen, z. B. im Rahmen von Forschungsarbeiten zum Verschmutzungs-, Verschlackungs- und Korrosionspotenzial von Brennstoffen [18, 52] oder im Rahmen der Anlagen-Optimierung [53], im Zusammenspiel mit unterschiedlichen Regelmechanismen und weite-

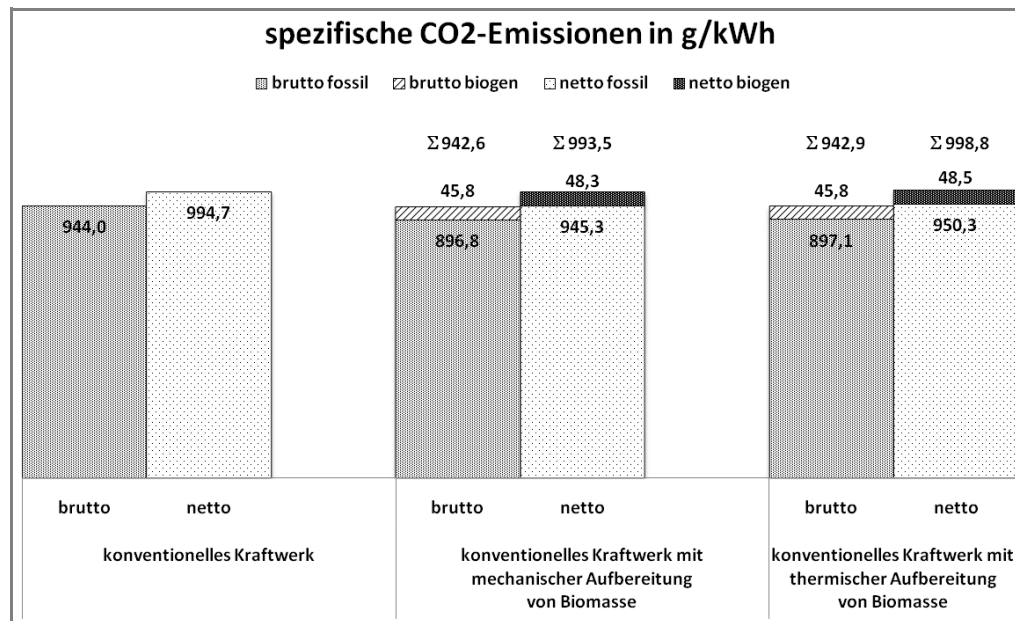


Abbildung 17. Spezifische CO₂-Emissionen in g kWh⁻¹.

ren Untersuchungsmethoden (Wärmestromdichte-Messung, s. a. [54], Sonden-Messungen/Asche zu Salz-Proportionen s. a. [36]), geprüft.

5 Beispiele zum Einsatz im Kraftwerksbereich

Nach den vorangegangenen Betrachtungen soll nun anhand existierender Anlagen ein Einblick in den Einsatz von biogenen Brennstoffen im Kraftwerksbereich gegeben und die damit verbundenen Technologien vorgestellt werden.

Ein bekanntes Beispiel für die Realisierung einer thermochemischen Biomassekonversion ist die bereits erwähnte Wirbelschichtdampfvergasungsanlage in Güssing, Österreich [55]. Bei der Entwicklung, Umsetzung und Optimierung dieser Anlage wurde hinsichtlich der einzusetzenden Brennstoffe und erzeugbaren Produkte eine höchstmögliche Flexibilität realisiert. Die damit umgesetzte Fähigkeit der Polygeneration, d. h. die aufeinander abgestimmte Produktion von Strom, Wärme, flüssigen und gasförmigen Energieträgern, ermöglicht eine optimale Anpassung an zukünftige Entwicklungen. Neben dem in Güssing angewandten Verfahrenskonzept existiert im Bereich der thermochemischen Biomassekonversion in Abhängigkeit von Leistungsgröße, eingesetzter Biomasse usw. eine Vielzahl weiterer Verfahren. Für eine zusammenfassende Übersicht sei hierzu auf [56] verwiesen.

Auf dem Gebiet der thermischen Biomassenutzung gab es im Laufe der letzten Jahre einen stetigen Ausbau der installierten elektrischen Leistung. Einen umfassenden Überblick bietet dazu [57]. Insgesamt betrug der im Jahr 2009 aus fester Biomasse erzeugte, stromseitige Anteil am

Endenergieverbrauch in Deutschland bereits 2,1 % [58]. Als Beispiel für eine Biomassenutzung im größeren Leistungsbereich sei hier auf die Kraftwerksanlage der Zellstoff Stendal GmbH in Arneburg, Sachsen-Anhalt, verwiesen. Als Besonderheit der Anlage, mit einer elektrischen Leistung von 100 MW, ist die optimale Ausnutzung der eingesetzten Biomasse Holz zu erwähnen. Durch die vorgeschaltete stoffliche Nutzung der Biomasse innerhalb der Zellstoffproduktion und die anschließende energetische Verwertung der Restrohstoffe ergibt sich eine Kaskadennutzung mit einem hohen Gesamtnutzungsgrad der eingesetzten Biomasse.

Als Beispiel für die Biomasse-Mitverbrennung in einer steinkohlebefeuerten Wirbelschichtanlage kann das Heizkraftwerk Offenbach herangezogen werden. In dieser Anlage wurde in der Heizperiode 2010/11 ein Teil der eingesetzten Steinkohle durch Biomasse in Form von Holzhackschnitzeln und -pellets substituiert [59]. Weitere Beispiele für die Mitverbrennung von Holz sind die Berliner Vattenfall-Kraftwerke Klingenberg, Reuter und Moabit [60].

Das größte, bereits genutzte Potenzial hinsichtlich der großtechnischen energetischen Konversion von biogenen Reststoffen, findet man bei der thermischen Verwertung von Klärschlamm. Gerade die Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen, Zement- oder Kohlekraftwerken mit den entsprechend vorgelagerten Aufbereitungs- und Trocknungsprozessen, bietet gegenüber der Klärschlamm-Mineralisierung in Monoverbrennungsanlagen einen energetischen Vorteil. Bei der Mitverbrennung in Braun- oder Steinkohlekraftwerken werden bevorzugt Wirbelschicht- und Staubfeuerungen verwendet. Ein erheblicher Vorteil des Klärschlammmeinsatzes in Kohlekraftwerken ist vorhandene Prozesswärme, die direkt zur Vortrocknung und somit

zur Heizwertanhebung des biogenen Reststoffs genutzt wird. Als stellvertretendes Beispiel für die Klärschlamm-Mitverbrennung in deutschen Großkraftwerken sei an dieser Stelle das Braunkohlekraftwerk Boxberg genannt. Der Betreiber Vattenfall setzt mit diesem Kraftwerk ca. 500 bis 600 Tonnen Klärschlamm pro Tag energetisch um [61]. Eine umfassende Gesamtübersicht zur thermischen Klärschlammnutzung und den bestehenden Anlagen bietet [62].

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 [63, 64].

6 Zusammenfassung

Für einen Einsatz alternativer Brennstoffe bzw. für die Optimierung des Einsatzes ist es unerlässlich, die brennstofftechnischen Eigenschaften, d. h. die chemischen, mechanischen, kalorischen und reaktionstechnischen Eigenschaften zu bestimmen. Vor dem Hintergrund des Einsatzes, vor allem in Anlagen zur Energieumwandlung, sind Untersuchungen vom Labor- bis hin zum Pilotmaßstab notwendig. Die Einsatzkriterien dieser Brennstoffe sind, ausgehend von den brennstofftechnischen Untersuchungen, im Hinblick auf die Anlagenverfügbarkeit, die Freisetzung von Emissionen und den Wirkungsgrad festzulegen.

Daraus ergeben sich auch bestimmte Anforderungen an die Anlagentechnik. Bei der großtechnischen Energieerzeugung sind Wirbelschichtsysteme und Staubfeuerungen mit Nachbrennrosten am ehesten geeignet. So bietet, neben den ausschließlich mit Biomasse gefeuerten Anlagen, die Mitverbrennung der biogenen Roh- und Reststoffe in konventionellen Kraftwerken ein großes Potenzial. Gerade im Bezug auf die höheren Wirkungsgrade bei der Stromerzeugung und den damit verbundenen, geringeren spezifischen Energieerzeugungskosten liegt bei diesen Anlagen ein erheblicher Vorteil. Desweiteren werden bei Problembrennstoffen wie z. B. Stroh emissionsarme Feuerungs- und Rauchgasanlagen notwendig.

Das Potenzial und die Verfügbarkeit alternativer Brennstoffe sind zu prüfen, da aus derzeitiger Sicht der wirtschaftlich sinnvolle Einsatz erst im größeren Leistungsbereich gegeben ist. Um einen ökologisch und ökonomisch sinnvollen Einsatz der biogenen Roh- und Reststoffe zu gewährleisten sind exakte Bilanzierungen und Vergleiche der zu realisierenden Prozesse notwendig.

Im Zuge dieser Betrachtungen sollte auch nicht außer Acht gelassen werden, dass im Rahmen der aktuellen Energiepolitik die Kosten für fossile CO₂-Emissionen in Zukunft von wachsender Bedeutung für die Betreiber von Großfeuerungsanlagen sein werden. Holzhackschnitzel haben zur Rohbraunkohle ein Energieaustauschverhältnis von etwa

1 und lassen sich auch anlagentechnisch gut in Braunkohlekraftwerken integrieren. Somit wird die Anzahl benötigter Emissionszertifikate in Höhe der Substitutionsrate gesenkt.

Auf der anderen Seite ist der vorgestellte elektrische Nettowirkungsgrad von etwa 40% bei Nennlast in Großkraftwerken eher als Benchmark für die alternativen Prozesse anzusehen. Vor dem Hintergrund des Ausbaus der fluktuierenden erneuerbaren Energien, wie Wind- und Solarkraft, ist auch eine zunehmende Flexibilisierung von Grundlastkraftwerken erforderlich. Sobald ein Braunkohlekraftwerk jedoch nicht mehr im Auslegungspunkt, sondern im Teillastbereich arbeitet, sinkt der Wirkungsgrad der Anlage. Somit nähert sich dieser dem Wirkungsgrad der vorgestellten alternativen Anlagenkonzepte an. Gleichzeitig bietet die thermochemische Konversion von Biomasse in SNG aber einen signifikanten Vorteil. Das produzierte Methan ist ein chemischer Speicher, der im Vergleich zur Braunkohle sehr flexibel einsetzbar ist.

Ein weiterer Nachteil der Mitverbrennung von Biomasse in zentralen Großfeuerungsanlagen ist die benötigte Brennstoffmenge. Durch die entsprechende Aufbereitung und die benötigte Transportlogistik im Einzugsgebiet wird der Vorteil der CO₂-Reduzierung wieder geschmälert.

Um hocheffiziente Prozesse anbieten zu können, sollten somit alle am Markt verfügbaren Technologien für die thermische und thermochemische Biomassekonversion konsequent in den Ausbauprozess einbezogen bzw. weiterentwickelt werden.



Michael Beckmann studierte Grundstoffverfahrenstechnik an der TU Bergakademie Freiberg. 1990–1995 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der CUTEC-Institut GmbH in Clausthal-Zellerfeld tätig. Nach seiner Promotion 1995 am Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik der Technischen

Universität Clausthal war Prof. Beckmann bis 2000 Abteilungsleiter der Thermische Reststoffbehandlung und Energieverfahrenstechnik. Im Anschluss hatte er bis 2007 die Professur für Verfahren und Umwelt an der Bauhaus-Universität Weimar inne. Seit Ende 2007 ist Prof. Beckmann am Institut für Energietechnik der TU Dresden tätig.

Formelzeichen

H	[J]	Enthalpie
m	[kg]	Masse
P	[W]	Leistung
Q	[J]	Wärme
$R_{B/A}$	[-]	Base zu Säure Verhältnis
S_R	[-]	Schlacke-Viskositätsindex
η	[-]	Wirkungsgrad

Indizes

el	elektrisch
V	Verlust
waf	wasser- und aschefrei

Literatur

- O. Carlowitz, S. Vodegel, A. Wollmann, in *Erneuerbare Energien* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2009.
- S. Thiel, *Ersatzbrennstoffe in Kohlekraftwerken – Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung in Kraftwerken*, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2007.
- P. Scur, *Potentiale und Grenzen des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in der Zementindustrie in Bio- und Restabfallbehandlung III, biologisch – mechanisch – thermisch* (Eds: K. Wiemer, M. Kern), Baeza-Verlag, Witzenhausen 1999.
- W. Boie, *Vom Brennstoff zum Rauchgas*, B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1957.
- W. Gumz, *Kurzes Handbuch der Brennstoff- und Feuerungstechnik*, 3rd ed., Springer-Verlag, Berlin 1962.
- J. Zerkowski, *Kohlecharakterisierung und Kohleverbrennung*, 2nd ed., Vol. 8, Fachbuchreihe Kraftwerktechnik, VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V., Essen 2004.
- M. Schlesinger et al., *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*, Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin 2010. www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energieszenarien_2010.pdf (03.04.2011)
- Einheimische Bioenergie – Was kann diese bis 2050 leisten?*, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow-Prützen. www.nachwachsenderohstoffe.de/uploads/media/Wuerfel_2011_gross.jpg (15.06.2011)
- Entsorgung und Verwertung von Klärschlämmen*, Bundesumweltministerium, Berlin. www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/klaerschlamm_landwirtschaft_2008.pdf (15.06.2011)
- M. Beckmann, *Stoff- und Energiebilanzen bei der Verbrennung von Klärschlamm*, VDI Wissensforum, Tagungsunterlagen Fachkonferenz Klärschlammbehandlung, Offenbach, Oktober 2010.
- H. J. Sander, *Mitverbrennung von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Siedlungsabfällen*, VDI, Düsseldorf 2000.
- F. E. Mark, J. Rodriguez Molina, *Energy recovery of greenhouse PE film: Co-combustion in a coal fired power plant*, Technical Paper No. 8031, Association of Plastics Manufacturers in Europe, Brussels 1999.
- J.P. Hannes, M. Wachenhausen, *Mitverbrennung von „Refuse Derived Fuel“ in kohlegefeuerten Kraftwerkskesseln*, VDI-Berichte 1492, VDI-Verlag, Düsseldorf 1999.
- W. Scheurer, U. Richers, J. Maier, K. R. G. Hein, H. Seifert, *Gegenwärtiger Stand und Perspektiven der Mitverbrennung in deutschen Kraftwerken*, VDI-Berichte 1540, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2000.
- J. Haas, M. Tamura, R. Weber, *Fuel* 2001, 80 (9), 1317. DOI: 10.1016/S0016-2361(00)00216-7
- M. Tamura, R. Weber, W. van de Kamp, *13th IFRF Members Conference*, Noordwijerhout, The Netherlands, May 2001.
- S. Thiel, in *Erneuerbare Energien* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 6, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2011.
- M. Pohl, D. Bernhardt, S. Ncube, M. Beckmann, W. Spiegel, W. Müller, *Conference on Impacts of Fuel Quality on Power Production and Environment*, Saariselkä, Finland, August 2010.
- DIN EN 14961-1, *Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikation und -klassen*, Beuth, Berlin 2010.
- S. Unz, T. Wen, M. Beckmann, in *Proc. of the 35th Int. Technical Conf. on Clean Coal & Fuel Systems*, Curran Associates Inc., Red Hook, NY 2010.
- M. Beckmann, R. Scholz, S. Flamme, H. Seifert, *Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe*, AiF Forschungsvorhaben, Forschungszentrum Karlsruhe, Eggenstein-Leopoldshafen 2009.
- Spezielle Methoden zur Brennstoffcharakterisierung*, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik der TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld. www.ievb.tu-clausthal.de/de/ausstattung/spezielle-methoden-zur-brennstoffcharakterisierung/ (15.06.2011)
- E. Tanner, *Dissertation*, TU Darmstadt 1933.
- H. Werkmeister, *Dissertation*, TH Hannover 1932.
- S. Bleckwehl, T. Kolb, H. Seifert, H. Herden, in *Ersatzbrennstoffe 4* (Ed: K. J. Thomé-Kozmiensky), TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2004.
- J. Porteiro, D. Patiño, J. Collazo, E. Granada, J. Moran, J. L. Miguez, *Fuel* 2010, 89 (1), 26. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.01.024
- S. Bleckwehl, H. Leibold, R. Walter, H. Seifert, F. U. Rückert, U. Schnell, K. R. Hein, *GVC/DECHEMA-Jahrestagung*, Wiesbaden, Juni 2002.
- S. Ludewig, *Prozessmodellgesteuerte Optimierung von Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung in Rostfeuerungen bei Einsatzstoffen mit unbekannter, zeitlich veränderlicher Zusammensetzung*, Papierfliegerverlag, Clausthal-Zellerfeld 2011.
- Kohlenstaubverbrennungsanlage*, Institut für Feuerungs- und Kraftwerktechnik der Universität Stuttgart, Stuttgart. www.ifk.uni-stuttgart.de/forschung/exp_ein/halbtechnisch/kva.html (15.06.2011)
- CO₂ – *Versuchsfeld*, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. www.est.tu-darmstadt.de/index.php/de/co2-versuchsfeld (15.06.2011)
- Multi-Fuel-Brenner für den Einsatz von Biomasse und Ersatzbrennstoffen in einer Kraftwerksbrennkammer mit Dampfkessel*, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe. www.itc-tab.kit.edu/downloads/BRENDA.pdf (15.06.2011)
- D. Bernhardt, M. Pohl, K. Gebauer, S. Unz, M. Beckmann, in *Proc. of the Int. Conf. on Thermal Treatment Technologies & Hazardous Waste Combustors – IT3*, Curran Associates, Inc., Red Hook, NY 2011.

- [33] M. Seggiani, *Fuel* **1999**, 78 (9), 1121. DOI: 10.1016/S0016-2361(99)00031-9
- [34] T. Kupka, *Dissertation*, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld **2009**.
- [35] M. Pohl, D. Bernhardt, M. Beckmann, W. Spiegel, in *Dampf-erzeugerkorrosion* (Ed: M. Born), Verlag SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH, Freiberg **2011**.
- [36] W. Spiegel, in *Energie aus Abfall* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 1, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin **2006**.
- [37] M. Bachhiesl et al., *Untersuchung zur thermischen Verwertung von Biomasse und heizwertreichen Abfallfraktionen als Sekundärbrennstoffe in Wärmekraftwerken*, Schriftenreihe der Forschung im Verbund, Vol. 73, Österreichische Elektrizitätswirtschafts-AG, Wien **2001**.
- [38] M. Beckmann, S. Krüger, K. Gebauer, M. Pohl, W. Spiegel, W. Müller, in *Energie aus Abfall* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 6, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin **2009**.
- [39] P. Mikkonen, *Thesis*, VTT Publications 421, Helsinki University of Technology, **2000**.
- [40] J. H. Zeuthen, A. J. Pedersen, C. Riber, T. Astrup, J. Hansen, H. Livbjerg, *Combust. Sci. Technol.* **2007**, 179 (10), 2171. DOI: 10.1080/00102200701386180
- [41] R. W. Bryers, *Prog. Combust. Sci. Technol.* **1996**, 22 (1), 29. DOI: 10.1016/0360-1285(95)00012-7
- [42] F. J. Frandsen, *Doctoral Thesis*, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby **2011**.
- [43] W. Spiegel, T. Herzog, R. Jordan, G. Magel, W. Müller, W. Schmidl, in *Energie aus Abfall* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 7, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin **2010**.
- [44] R. Scholz, M. Beckmann, F. Schulenburg, *Abfallbehandlung in thermischen Verfahren*, Teubner-Verlag, Stuttgart **2001**.
- [45] D. Böhning, M. Beckmann, in *Erneuerbare Energien* (Hrsg. K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin **2009**.
- [46] M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer, *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*, 2nd ed., Springer Verlag, Berlin **2009**.
- [47] C. Reinlein, *get – green energy technology* **2011**, 1, 38.
- [48] S. Fürnsinn, H. Hofbauer, *Chem. Ing. Tech.* **2007**, 79 (5), 579. DOI: 10.1002/cite.200700017
- [49] G. Schaumann, K. W. Schmitz, *Systemübersicht und Vorteile der KWK in Kraft-Wärme-Kopplung* (Eds: G. Schaumann, K. W. Schmitz), 4th ed., Springer Verlag, Berlin **2010**.
- [50] M. Horeni, *Möglichkeiten für die energetische Optimierung von Müllverbrennungsanlagen – Entwicklung, Erprobung und Validierung eines Online-Bilanzierungsprogramms*, Papierfliegerverlag, Clausthal-Zellerfeld **2007**.
- [51] M. Horeni, M. Beckmann, H. Fleischmann, E. Barth, *Ermittlung von Betriebsparametern in Abfallverbrennungsanlagen als Voraussetzung für die weitere Optimierung in Energie aus Abfall* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Berlin **2007**.
- [52] M. Beckmann, M. Pohl, K. Gebauer, S. Ncube, W. Spiegel, W. Müller, in *Proc. of the Int. Conf. on Incineration and Thermal Treatment Technologies – IT3*, Curran Associates, Inc., Red Hook, NY **2009**.
- [53] M. Busch, J. J. E. Martin, S. Bardi, A. Bossart, *Betriebsartenkonzepte für die Abfallverbrennung in Energie aus Abfall* (Eds: K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann), Vol. 8, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin **2011**.
- [54] S. Grahl, M. Beckmann, *Wärmestromdichtemessung zur Belagsbestimmung in Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung* (Eds: M. Beckmann, A. Hurtado), Vol. 2, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin **2010**.
- [55] H. Hofbauer, *Wirbelschichtvergasung auf Dampfbasis – Das Beispiel Güssing – Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen*, VDI-Bericht 1891, Düsseldorf **2005**.
- [56] F. Müller-Langer, S. Rönsch, M. Weithäuser, K. Oehmichen, M. Seiffert, S. Majer, F. Scholwin, D. Thrän, *Erdgassubstitute aus Biomasse für die mobile Anwendung im zukünftigen Energiesystem*, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow **2009**.
- [57] J. Witt, C. Hennig, N. Rensberg, A. Schwenker, M. Scheffelowitz, A. Krautz, K. Schaubach, D. Thrän, F. Scholwin, T. Kutne, A. Hilse, A. Vetter, T. Graf, G. Reinhold, *Monitoring zur Wirkung des Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse*, Zwischenbericht, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin **2009**.
- [58] D. Böhme, W. Dürrschmidt, M. van Mark, *Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und Internationale Entwicklung*, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin **2010**.
- [59] M. Kranz, *Sachstandsbericht Heizkraftwerk Offenbach*, 30. VGB Arbeitskreis Wirbelschichtfeuerung, Energieversorgung Offenbach AG, Offenbach **2011**.
- [60] *Biomasse – ein Brennstoffklassiker wird neu entdeckt*, Vattenfall Europe AG, Berlin. www.vattenfall.de/de/energiekonzept-berlin/ausbau-biomasse.htm (18.05.2011).
- [61] M. Kuba, *KA-Betriebsinfo* **2007**, 37 (3), 1482.
- [62] T. Hermann, K. Goldau, *Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlammbehandlung in der Bundesrepublik Deutschland*, 3rd ed., Umweltbundesamt, Berlin **2004**.
- [63] *Bromgestützte Quecksilberabscheidung aus Verbrennungsabgasen*, Vosteen Consulting GmbH, Köln. www.vosteen-consulting.de/sites/Vosteen-Consulting/de_1940.aspx (21.06.2011).
- [64] Bayer AG, *EP 1386655*, **2004**.