

Regenerative Festbrennstoffe – Charakterisierung des Brennverhaltens

Dr. rer. nat. Olaf Kock

in: Bilitewski, B. et al. [Hrsg.]: 7. Fachtagung, Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten, Band 20, Technische Universität Dresden (2002), S. 195-209

1. Einführung

Bei allen Unterschieden, die bei der Durchführung von Verbrennungsprozessen bestehen, haben in der Regel alle ein gemeinsames Ziel: Das Optimum hinsichtlich technischer, ökonomischer und ökologischer Gesichtspunkte.

Zur Erreichung dieses Zieles müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein, von denen drei wesentliche im folgenden näher erläutert werden [1-6].

- Kenntnisse über den einzusetzenden Brennstoff

Das Eigenschaftsprofil des Brennstoffes bestimmt die technische Ausführung der Verbrennungsanlage.

- Ein transparenter Brennstoffmarkt ist vorhanden

Ein transparenter Brennstoffmarkt bietet längerfristig Brennstoffe bekannter Spezifikation an. Auf diese Weise besteht Planungssicherheit bei der technischen Auslegung der Anlage sowie beim späteren Betrieb.

- Informationsaustausch muss möglich sein

Ein optimiertes und effizientes Verbrennungsverfahren stellt ein Mindestmaß an Qualitätsanforderungen sowohl an das Eigenschaftsprofil des Brennstoffs als auch an den Brennstoffmarkt. Der Brennstoffmarkt definiert ebenfalls ein Anforderungsprofil an den Brennstoff. Bekannte Qualitätsanforderungen an einen Brennstoff bedeuten eine Zielvorgabe für den Brennstoffproduzenten. Die erzeugte Brennstoffqualität muss nachweisbar sein.

Es ergibt sich ein vernetztes Informationssystem (Abbildung 1). Voraussetzung hierfür ist eine gemeinsame, von allen verstandene Sprache, die sämtliche relevanten Inhalte transportieren kann und somit die Basis für einen erfolgreichen Informationsaustausch bildet.

Die relevanten Inhalte ergeben sich aus den Anforderungsprofilen an einen Brennstoff (siehe Tabelle 1) sowie dem Eigenschaftsprofil eines potentiellen Brennstoffs.

Das Brennverhalten ist Teil des Eigenschaftsprofils eines Brennstoffes. Mithilfe normierter und vereinfachter, auf den spezifischen Brennstoffsektor (z. B. Kohle, Treibstoffe) abgestimmter Analysemethoden ist es aufgrund ähnlicher Eigenschaftsprofile ausreichend charakterisierbar, trotz der meist reduzierte Informationstiefe der vereinfachten Analysemethoden. Die Übertragbarkeit auf einen anderen Brennstoffsektor ist deshalb nicht ohne weiteres möglich (siehe Kapitel 4.1).

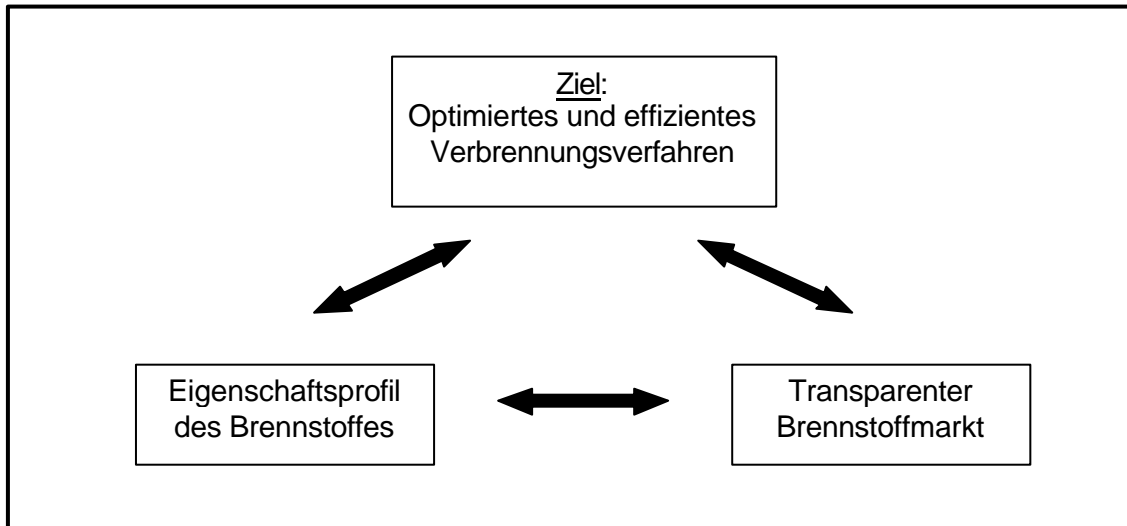


Abbildung 1: Vernetztes Informationssystem bei Verbrennungsverfahren

Tabelle 1: Anforderungen an das Eigenschaftsprofil eines Brennstoffs

Anforderungsprofil seitens des Verbrennungsverfahrens	Anforderungsprofil seitens des Brennstoffmarktes
definierbar	handhabbar über gesamte Handelskette
reproduzierbar zu bestimmen	
gleichförmig (homogen) und stabil bezüglich:	Spezifizierbar in vorhandene Brennstoffklassen
Lagerstabilität	Gutes Preis-/Leistungsverhältnis
Fördercharakteristika	gleichbleibende Qualität
Verbrennungscharakteristika	Ausreichende Menge
Geringem Schadstoffgehalt	Liefersicherheit

Als Beispiel für ein gut funktionierendes Vernetztes Informationssystem bei Verbrennungsverfahren kann der Verbrennungsmotor bezeichnet werden. Dieser Brennstoffmarkt bietet ein Sortiment flüssiger Brennstoffe in verschiedenen Brennstoffklassen mit gleichbleibender Qualität an: Normalbenzin, Superbenzin, Diesel, Kerosin etc.. Sie erfüllen normierte Qualitätsanforderungen, die bei der Brennstoffherstellung als Zielvorgabe dienen. Die normierten Qualitätsanforderungen und Verfahren zur Bestimmung des Eigenschaftsprofils ergeben die gemeinsame Sprache. So wird beispielsweise die Klopfestigkeit eines Kraftstoffes anhand DIN EN 25164 durch die Veränderung des Verdichtungsverhältnisses unter Berücksichtigung der Vergasereinstellung an einem Normmotor bestimmt. Die Bestimmung der Zündwilligkeit von Dieselmotoren erfolgt nach dem Cetan-Verfahren mit einem CFR-Motor gemäß DIN EN ISO 5165. Die Mindestanforderungen an Dieselmotoren aus Pflanzenölmethylester (z. B. Rapsöl) sind in der DIN V 51606 festgehalten. Die Motorenhersteller nutzen das bekannte Eigenschaftsprofil des Brennstoffes zur Entwicklung sparsamer und schadstoffarmer Motoren. Der Motorenbetreiber hat die Sicherheit, ein optimiertes und effizientes Verbrennungssystem betreiben zu können, da der Brennstoffmarkt die benötigten Qualitätsbrennstoffe anbietet.

2. Einteilung der Brennstoffe und ihre Bedeutung

Die Einteilung der Brennstoffe kann in herkömmlicher Weise aufgrund ihrer Herkunft erfolgen, wobei grob in fossile, biogene und antropogene unterschieden wird. Beispielsweise werden in Abbildung 2 einige Brennstoffe entsprechend ihrer Herkunft genannt.

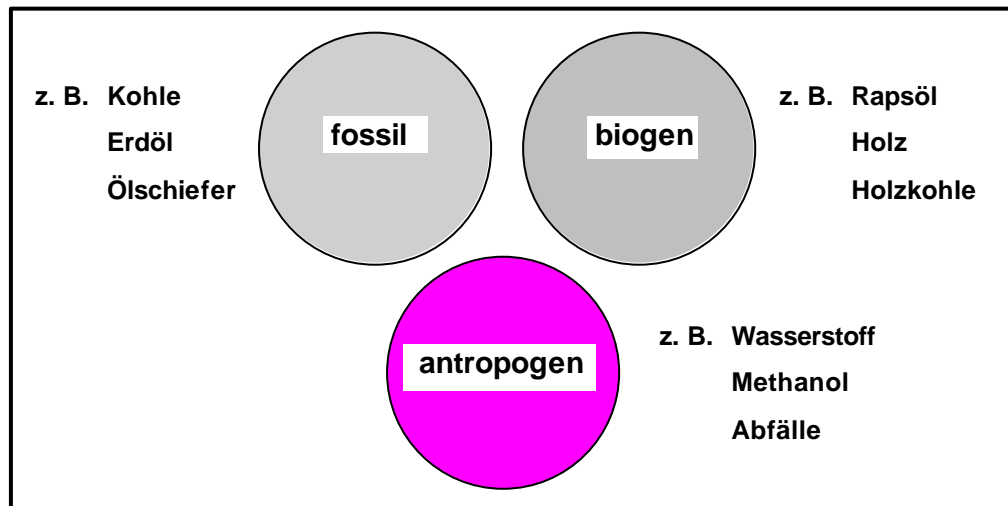


Abbildung 2: Einteilung von Brennstoffen nach ihrer Herkunft

Die Kohle nimmt als fossiler Festbrennstoff bei der Energieerzeugung in Deutschland und weltweit eine herausragende Stellung ein. So wurden alleine im Jahr 2000 in Deutschland 48 Mio. t SKE Steinkohle zur Strom- und Wärmeerzeugung thermisch genutzt. Im gleichen Zeitraum wurden in der Stahlindustrie rund 17 Mio. t SKE für metallurgische Prozesse verbraucht. Weltweit liegt der Verbrauch von metallurgisch verwendeten Kohleprodukten bei jährlich über 300 Mio. t [7, 8]. Entsprechend seiner Bedeutung existiert für diesen Brennstoff seit langem eine etablierte Kommunikationsbasis, die durch ein umfangreiches Normenwerk gebildet wird.

Unter dem Einfluss neuerer umwelt- und energiepolitischer Vorgaben auf nationaler sowie internationaler Ebene wächst die Bedeutung regenerativer Energiequellen. Neben der Wind-, Wasser- und Sonnenenergie werden biogene Stoffe wie beispielsweise Holz als regenerative Energiequellen betrachtet, so dass Holz als biogener Festbrennstoff stark an Bedeutung gewinnen wird [9-11].

Das Kyoto-Protokoll sieht für die EU eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes in den Jahren 2008-2012 um 8 % vor, bezogen auf den Basiswert von 1990 [9]. Zur Erreichung dieses Zieles hat die EU-Kommission in dem Weißbuch zum Einsatz erneuerbarer Energieträger (1997) festgelegt, den Anteil erneuerbarer Energieträger an der Primärenergieproduktion bis 2010 auf 12 % anzuheben. Dieser Prozess wird auf nationaler Ebene durch das Erneuerbare Energie Gesetz (EEG) mittels Subventionierung der Stromeinspeisung aus regenerativen Energiequellen unterstützt. Derzeit liegt in Deutschland der Anteil biogener Festbrennstoffe am Gesamtenergiebedarf von 484,5 Mio. t SKE bei nur 1,4 %, dies entspricht 6,6 Mio. t SKE/a [10]. Zum Vergleich: Der Anteil der Steinkohle betrug im Jahr 2000 in Deutschland 13,5 % [8].

Abbildung 3 erlaubt einen Überblick über die Herkunft und Mengen biogener Abfälle. Es wird deutlich, dass von den insgesamt 80 Mio. t/a biogener Abfallstoffe rund 2/3 in der Land- und Forstwirtschaft, und somit stark dezentral, anfallen. Der Aufwand zur Werbung dieser potentiellen Brennstoffe ist entsprechend hoch, so dass ihr Potential gegenwärtig größtenteils ungenutzt bleibt. Aber auch ohne Nutzung des gesamten Potentials werden jährlich etwa 23,3 Mio. t brennbare Stoffströme aus biogenen Abfällen erzeugt, wovon derzeit in Deutschland etwa 60 % ohne Nutzung des energetischen Inhalts deponiert werden, 35 % werden in MVA's energetisch genutzt [9].

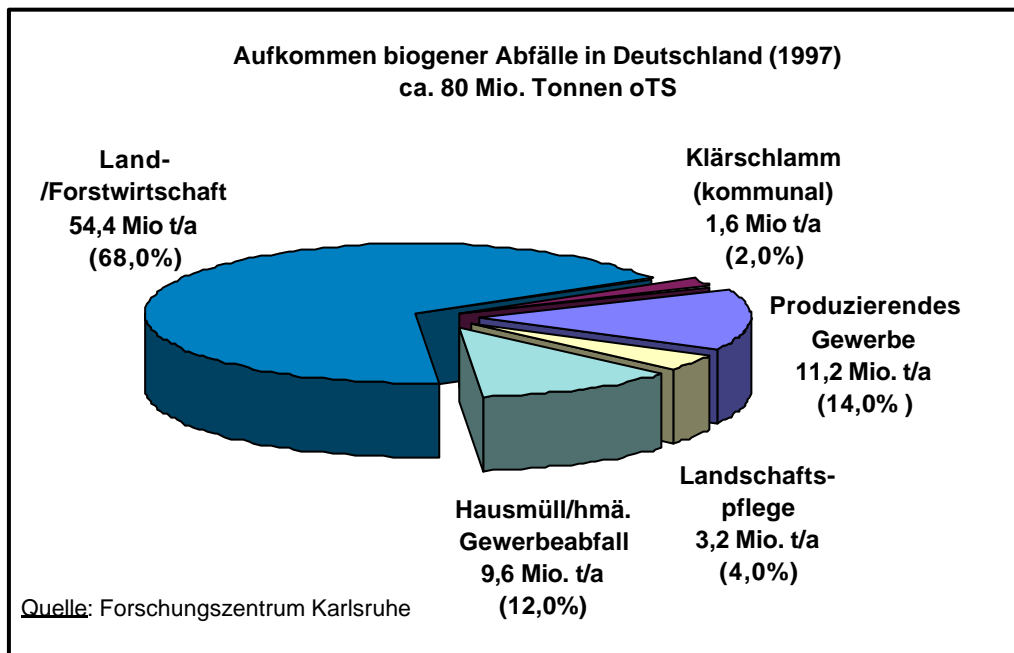


Abbildung 3: Herkunft und Mengen biogener Abfälle in Deutschland [9]

Durch nationale und internationale gesetzliche Vorgaben wie der 30. BImSchV oder der Europäischen Deponierichtlinie werden diese Mengenströme zukünftig einer inertisierenden Vorbehandlung, z. B. durch thermische Behandlung, unterzogen werden müssen. Hierbei stehen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung (sustainable development) die Schadstoffminimierung bzw. -immobilisierung und, bedingt durch die Volumenreduktion, die Ressourcenschonung im Mittelpunkt. Nach Prognosen des Umweltbundesamtes, URBAN, FAULSTICH, BILITEWSKI oder FRIEDEL ist allerdings seit einigen Jahren absehbar, dass ab 2005 ein Defizit an Verbrennungskapazitäten von deutlich größer als 1 Mio. t/a bestehen wird [12-15].

Abbildung 4 verdeutlicht den aktuellen Stand und die Perspektiven zur Stromgewinnung aus biogenen Abfällen in Deutschland. Der derzeitigen Stromproduktion aus biogenen Abfällen von rund 3,8 TWh_{el} (Anteil der Müll-Verbrennung in 1995: 1,75 TWh_{el}; in 2005: 6 TWh_{el}) steht ein Potential von 44 TWh_{el} gegenüber, das überwiegend durch feste brennbare Stoffe gebildet wird (Holz, Klärschlamm, Siedlungsabfälle etc.). Der prognostizierte Rückgang bei der Müllverbrennung von 6 TWh_{el} im Jahr 2005 auf ein geschätztes Potential von 2,8 TWh_{el} beruht auf der Annahme, dass hochwertige brennbare Stoffe vorher aussortiert werden können, um beispielweise in Anlagen zur Verbrennung gering belasteter Abfälle oder in Biomasseverbrennungsanlagen für die Energieerzeugung genutzt zu werden [9].

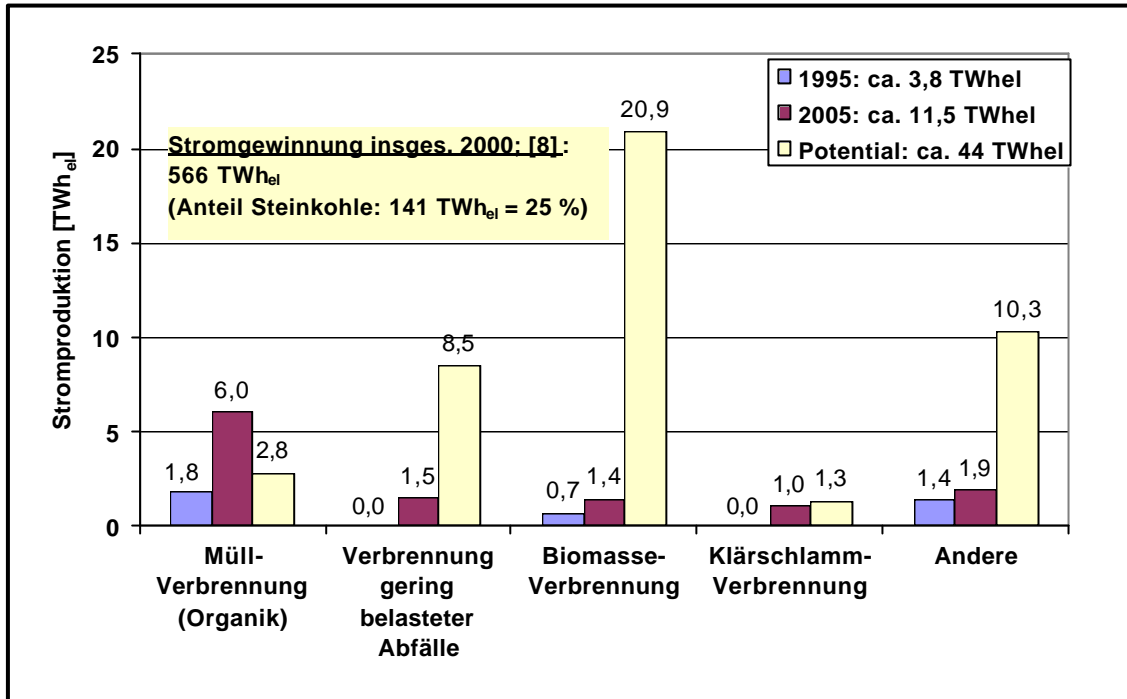


Abbildung 4: Stromgewinnung aus biogenen Abfällen (Deutschland); nach [9]

3. Regenerative Festbrennstoffe

In einer im Auftrag des damaligen Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten durchgeführten Studie des Forschungszentrums Karlsruhe werden auch Siedlungsabfälle, obwohl antropogen, den biogenen Brennstoffquellen zugerechnet, da in der Regel über 2/3 ihrer organischen Trockensubstanz biogener Herkunft (Papier, Pappe, Leder, Holz etc.) sind [9, 16]. Diese Sicht wird durch eine Studie des Umweltbundesamtes gestützt, wonach wegen des hohen Anteils biogener Feststoffe im Abfall bereits bei einer 25-Prozentigen Energienutzung die Energieumwandlung in einer Müllverbrennungsanlage als klimaneutral einzustufen ist [17].

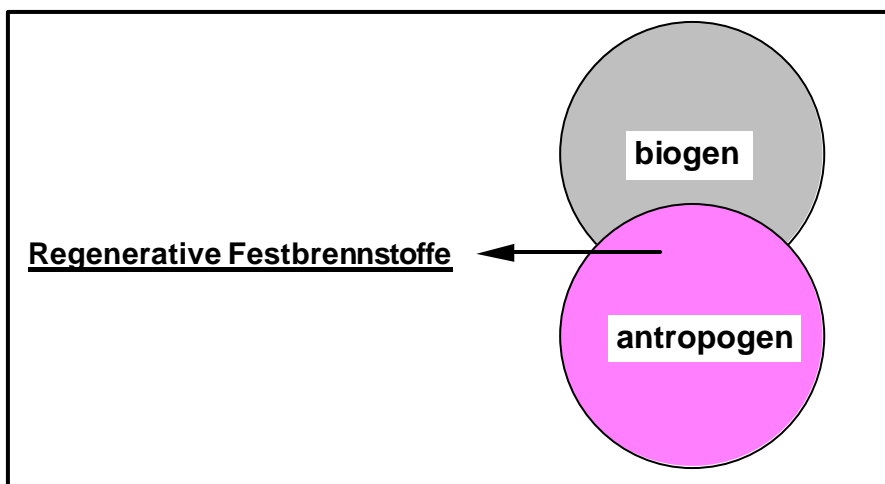


Abbildung 5: Regenerative Festbrennstoffe: Eine Schnittmenge

Bei Wertung aller aufgezeigten Umstände wird deutlich, dass angesichts der Mengen und Potentiale an biogenen Brennstoffen einerseits, und deren teilweiser Eigenschaft als Abfall andererseits, eine grenzüberschreitende Betrachtungsweise zwischen antropogenen sowie biogenen Brennstoffen nötig ist. Bei dieser neuen Betrachtungsweise ergibt sich eine für den Brennstoffmarkt relevante Schnittmenge, die an dieser Stelle als Regenerative Festbrennstoffe bezeichnet werden soll (siehe Abbildung 5).

3.1 Rahmenbedingungen zur Charakterisierung von Regenerativen Festbrennstoffen

Für Regenerative Festbrennstoffe sollen die strengen, als Hauptmerkmale definierten Qualitätsanforderungen an einen Brennstoff gelten (siehe Tabelle 1). Somit ergibt sich die Notwendigkeit, ein Normenwerk analog dem der Kohle als Basis für einen erfolgreichen Informationsaustausch zu entwickeln. Ein stabiler Brennstoffmarkt hängt entscheidend von der gleichbleibenden und definierten Qualität der angebotenen Brennstoffe ab (siehe Kapitel 1).

Es erfolgt eine klare Abgrenzung zum Begriff „*Sekundärbrennstoff*“, da seine augenblickliche Bedeutung unbestimmt, beliebig verwendbar und bislang ohne umfassende Qualitätsmerkmale ist. Lediglich hinsichtlich des Schadstoffgehalts gibt es seit kurzem das RAL-Gütezeichen 724 der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e. V. [18]. Zukünftig könnte sich die Situation jedoch ändern, wenn das Normierungsverfahren „Solid Recovered Fuels“ (CEN-TF 118) durchgeführt worden ist. Die EU-Kommission prüft zur Zeit, ob ein entsprechender Auftrag an das CEN erteilt wird.

Für unbehandeltes Holz, einem speziellen Teilstrom der Regenerativen Festbrennstoffe, werden derzeit Normen auf europäischer Ebene entwickelt [19]. Im Auftrag der EU-Kommission wurde im Mai 2000 das Technische Komitee „Solid Biofuels“ (CEN-TC 335) gegründet. In 5 Arbeitsgruppen werden die jeweiligen zur Brennstoffcharakterisierung benötigten Normen erarbeitet:

- 1. Arbeitsgruppe: „Terminologie, Definition und Beschreibung“ (1 Norm)
- 2. Arbeitsgruppe: „Brennstoffspezifikation, -klassen und -qualitätssicherung“ (2 Normen)
- 3. Arbeitsgruppe: „Probenahme und Probenreduktion“ (2 Normen)
- 4. Arbeitsgruppe: „Physikalisch-mechanische Tests“ (10 Normen)
- 5. Arbeitsgruppe: „Chemische Tests“ (10 Normen)

Der Verband der Großkraftwerksbetreiber (VGB) richtet neue Forschungsschwerpunkte ein, die die Mitverbrennung von Biomasse und Abfällen [Substitutionsbrennstoffe] in für fossile Regelbrennstoffe konzipierten Kraftwerken wissenschaftlich untersuchen soll. Diese zukünftige Betrachtungsweise unterteilt die Brennstoffe dann nicht mehr scharf hinsichtlich ihrer Herkunft sondern hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit in einem speziellen Verbrennungssystem. Ein wesentlicher Punkt hierbei ist das Energieaustauschverhältnis zwischen Regel- und Substitutionsbrennstoff [20, 21].

Das derzeit bestehende Normenwerk zur Charakterisierung der Kohle sowie die zur Zeit entwickelten Normen zur Charakterisierung von unbehandelter Biomasse sind für diese Fragestellungen jedoch wenig geeignet, da sie auf den jeweiligen Brennstoffsektor beschränkt sind, für den sie entwickelt werden. Bei einer brennstoffsektor-überschreitenden Charakterisierung des Brennverhaltens müssen jedoch Analysemethoden mit einer größeren Informationstiefe zum Einsatz kommen, als Basis für einen funktionierenden Informationsaustausch (siehe Kapitel 1 und 4.1).

Da solche Analysemethoden derzeit nicht definiert sind, müssen in der Praxis deshalb bei Änderungen im Brennstoffmix teure Versuche an den Verbrennungsanlagen durchgeführt werden, um einen möglichst optimalen Betriebspunkt zu ermitteln. In Zukunft werden jedoch Brennstoffwechsel/-mischungen häufiger vorkommen, da ein weltweiter Preiswettbewerb auf dem Markt für Festbrennstoffe existiert, auf den zunehmend auch Regenerative Festbrennstoffe drängen. Laborverfahren könnten einen deutlichen Beitrag zur Kostenreduktion beisteuern [4, 8, 22].

Es sollte durch die neuen Bestimmungsverfahren eine Vergleichbarkeit des Brennverhaltens ermöglicht werden, unabhängig vom Ursprung des Brennstoffes. Diese Zielrichtung kann bei der Entwicklung eines Normenwerkes für Regenerative Festbrennstoffe integriert werden.

3.2 Regenerative Festbrennstoffe im Spannungsfeld rechtlicher Rahmenbedingungen

Aufgrund ihres sowohl biogenen als auch antropogenen Ursprungs befinden sich die Regenerativen Festbrennstoffe in einem Spannungsfeld sich gegenseitig ausschließender Rechtsnormen. Auf der einen Seite steht das EEG mit seinen Klimaschutzziele zur Energiegewinnung aus regenerativen Energiequellen und den zur Erreichung dieser Ziele gewährten Subventionen. Auf der anderen Seite steht das KrW-/AbfG mit einem Abfallbegriff, der, unabhängig vom Ursprung, stattdessen an Entledigungstatbestände geknüpft und in der Regel mit Kosten verbunden ist.

Allerdings beinhaltet das KrW-/AbfG unter gewissen Voraussetzungen die Verwertungspflicht, so dass hochwertige und vorzugsweise schadstoffarme Brennstoffe, wie es die Regenerativen Festbrennstoffe darstellen, die Abfalleigenschaft wieder verlieren müssten. Ihr Einsatz beispielsweise in optimierten Biomassekraftwerken würde somit die Ziele beider Gesetzesnormen erfüllen. Die 30. BImSchV wird diese Entwicklung vermutlich unterstützen, da sie zukünftig die Deponierung inertisierter Abfälle vorschreibt. Aufgrund der zu erwartenden Kapazitätsengpässe bei Abfallbehandlungsanlagen wird der Druck steigen, geeignete Fraktionen außerhalb der Abfallbehandlung zu verwerten.

4. Das Brennverhalten Regenerativer Festbrennstoffe

Im folgenden werden die Eigenschaften eines Festbrennstoffes betrachtet, die das Brennverhalten beeinflussen. Die Beschreibung der Einzelprozesse sowie die der darauf einflussnehmenden Parameter erfolgt am Beispiel eines einzelnen Brennstoffkornes (EK-Verbrennung) [1-6, 23-29]. Das die Brennstoffanlieferung,

-einlagerung, -förderung und -dosierung betreffende Eigenschaftsprofil (z. B. mechanische Festigkeit, Verklumpungsneigung etc.) sowie das Verhalten der Asche bzw. Schadstoffe soll hier nicht weiter behandelt werden.

4.1 Einzelprozesse bei der Feststoffverbrennung

Nachdem der Brennstoff in den heißen Brennraum gelangt ist, laufen verschiedene Vorgänge ab (siehe auch Abbildung 6):

- Aufheizen des Feststoffes
- Verdampfung des Wassers
- Zersetzung der organischen makromolekularen Strukturen
- Verdampfung der organischen Bruchstücke
- Verbrennung der organischen Bruchstücke (Flüchtigenverbrennung)
⇒ Energiefreisetzung
- Verbrennung des Restkokes
⇒ Energiefreisetzung
- Abkühlung/Austrag der Brennstoffasche

Zur Beschreibung dieser Vorgänge existieren eine Reihe von Modellvorstellungen, die ursprünglich zur Beschreibung der Kohleverbrennung entwickelt wurden. Aufgrund der hochkomplexen Vorgänge, die während der Verbrennung eines Feststoffes ablaufen, ist allen Modellen gemein, dass sie teilweise erhebliche Vereinfachungen vornehmen müssen, um eine handhabbare mathematische Beschreibung liefern zu können. Mit Modellen werden unter vereinfachten Randbedingungen reale Vorgänge beschrieben. Durch experimentelle Daten erfolgt eine Validierung der Modelle. Trotz der Vereinfachungen lassen sich anhand der existierenden Modelle die Eigenschaften eines Festbrennstoffes ableiten, die den Verbrennungsprozess maßgeblich beeinflussen.

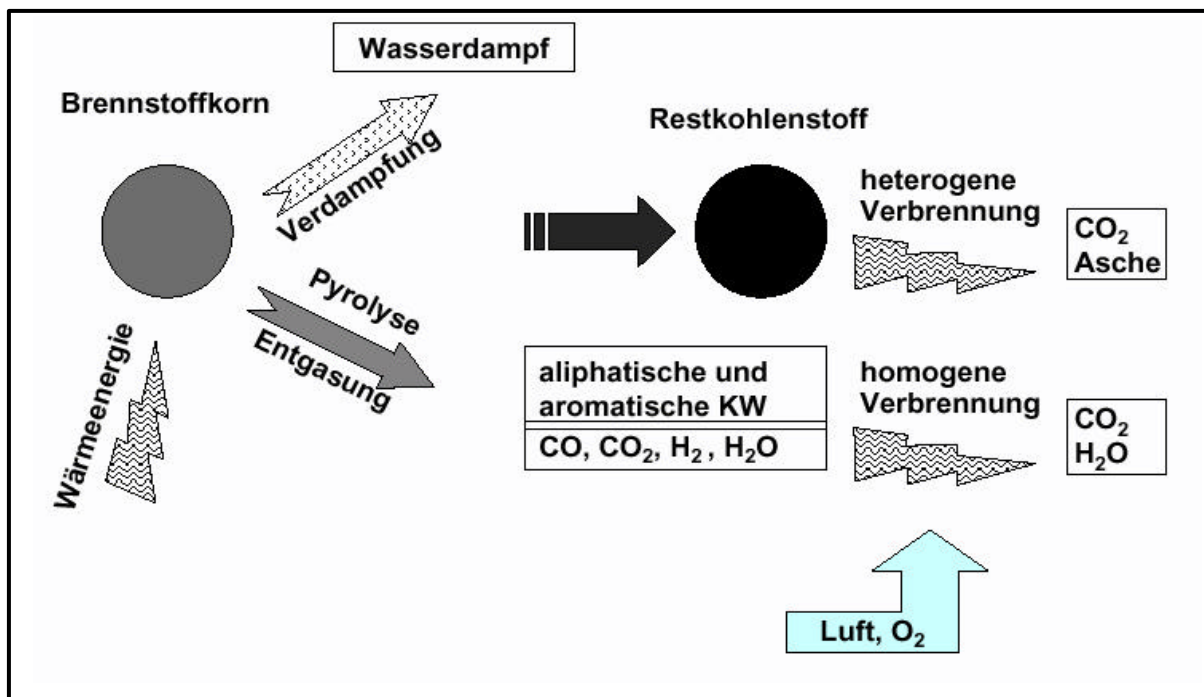


Abbildung 6: Zersetzungsprozesse an einem Brennstoffkorn (Modell)

4.2 Einflussgrößen bei der Feststoffverbrennung

Folgende Einflussgrößen beeinflussen den Verbrennungsprozess maßgeblich:

- Korngröße und -oberfläche (sämtliche Energie- und Stofftransportvorgänge wirken über die Oberfläche auf den Brennstoff ein),

Endogene Einflüsse wie:

- Wärmekapazität und -leitfähigkeit,
- Brenn- und Heizwert,
- Aschegehalt und -schmelzpunkt,
- Stoffliche Zusammensetzung der Organik (C_{fix} , Flüchtigen-Gehalt)
- Verteilung der Organik im Brennstoffkorn
- Reaktivität und deren Temperaturabhängigkeit (kinetisch kontrolliert: $f(\exp.T)$; diffusionskontrolliert: $f(T^{-2})$)

Die endogenen Einflussgrößen sowie das Korngrößenspektrum ergeben das Eigenschaftsprofil eines Brennstoffes.

Ebenso lassen sich wesentliche Einflussgrößen kennzeichnen, die durch die bestehende Anlagenkonfiguration bzw. Betriebsweise auf den Verbrennungsprozess einwirken:

Exogene Einflüsse wie:

- Temperaturverlauf im Brennraum,
- Wärmeübergangsverlauf im Brennraum ($f(\text{Nu}, \text{Re}, \text{Pr}, \text{Emissionsgrad}, \text{etc.})$)
- Sauerstoffkonzentrationsverlauf ($f(\text{Re}, \text{Sh}, \text{O}_2\text{-Gehalt des Oxidationsmittels}, \text{etc.})$)

Die Unterschiede zwischen Regenerativen Festbrennstoffen und Kohlen in ihrem Verbrennungsverhalten resultieren im wesentlichen aus den Unterschieden in den endogenen Einflussgrößen (Verhältnis Flüchtigen-/ C_{fix} -Gehalt; Brenn-/Heizwert; Reaktivität etc.).

5. Möglichkeiten zur Charakterisierung des Brennverhaltens Regenerativer Festbrennstoffe

In der Praxis werden zur Charakterisierung des Brennverhaltens von Festbrennstoffen wie der Kohle folgende Parameter anhand normierter Bestimmungsverfahren (Immediatanalyse) bestimmt:

- Brenn-/Heizwert (DIN 51900)
- Flüchtigengehalt (DIN 51720)
- Aschegehalt (DIN 51719)
- Wassergehalt (DIN 51718)

Die Korngrößenverteilung wird innerbetrieblich durch die Betriebsweise der Kohlemühlen festgelegt.

Aus Abbildung 6 wird deutlich, dass die Freisetzung von Energie durch die Flüchtigverbrennung sowie die Restkohlenstoffverbrennung bestimmt wird. Die Summe beider Energiebeiträge ergibt den Brennwert, unter Berücksichtigung des Wassers erhält man den Heizwert.

Die Energiefreisetzung pro Zeit, die das Brennverhalten eines Brennstoffes widerspiegelt, ergibt sich aus der zeitlichen Abfolge von Flüchtigverbrennung und Restkohlenstoffverbrennung sowie aus dem Heizwert der freigesetzten Flüchtigen Bestandteile (siehe Abbildung 7). Letzteres ist der Hauptgrund, weshalb die Bestimmung des Flüchtigengehalts nur eine reduzierte Informationstiefe aufweist, da über den Heizwert der Flüchtigen Bestandteile und deren Entstehungsgeschwindigkeit keine Aussage getroffen wird. Ein Vergleich des Brennverhaltens zwischen Brennstoffen mit sehr unterschiedlichen organischen Matrices ist deshalb kaum möglich (siehe Kapitel 1 bzw. 2.1.1).

5.1 Experimentelle Ergebnisse der Vorversuche

Die in Abbildung 7 dargestellten Temperaturverläufe wurden bei Vorversuchen an der Technikums-Verbrennungsstrecke (TVS) des Fachgebietes Abfalltechnik im Rauchgas vor dem Wärmetauscher nach Zugabe von verschiedenen Brennstoffproben ermittelt (Abbildung 8; Beschreibung in [3, 14]). Die Brennraumtemperatur betrug zu Versuchsbeginn jeweils 810 °C. Die Verbrennungsluftmenge betrug 65 Nm³/h.

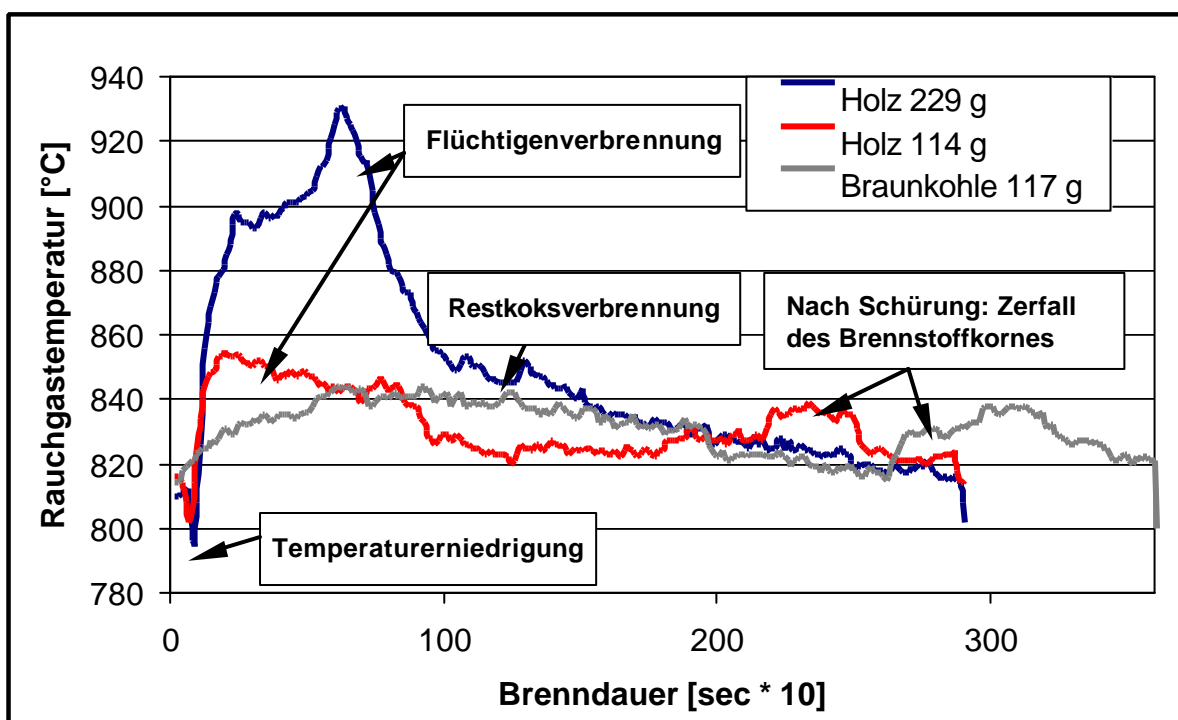


Abbildung 7: Temperaturverlauf im Rauchgas nach Zugabe von Brennstoffproben

Grundlage zur Erfassung des zeitabhängigen Brennverhaltens ist dabei der in Gleichung 1 beschriebene Zusammenhang.

Gleichung 1: Energie = Wärmekapazität (Gas) * Masse (Gas) * Temperaturerhöhung (Gas)

Die durch den Verbrennungsvorgang erzeugte Energie führt zu einer Temperaturerhöhung des Rauchgases. Im Idealfall lässt sich somit durch eine kontinuierliche Temperaturmessung der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzung während der Verbrennung quantitativ ermitteln.

Die zu Beginn einer Messung beobachtete Temperaturerniedrigung des Rauchgases von ca. 15 °C ist hauptsächlich auf den bei der Probenbeschickung bedingten Falschlufteintritt zurückzuführen. Zu dessen Verhinderung sind konstruktive Änderungen an der Brennstoffbeschickung notwendig.

Bedingt durch den höheren Flüchtigengehalt bei ähnlichem Heizwert von Holz (17592 kJ/kg) im Vergleich zur Braunkohle (20370 kJ/kg) erfolgt der Temperaturanstieg im Rauchgas nach Zugabe der Holzproben sehr viel schneller und höher. Dadurch brennt Holz schneller aus, was sich in der kürzeren Gesamtbrenndauer widerspiegelt. Die Brenndauer für die Holzproben liegt bei ca. 2900 Sekunden und für die Braunkohleprobe bei ca. 3600 Sekunden. Das Ende der Flüchtigenverbrennung ist am schnellen Temperaturabfall nach Erreichung eines Maximums erkennbar. Der Flüchtigenverbrennung schließt sich die langsamere Restkoksverbrennung an, was an einem langsamen, aber stetigem Temperaturabfall zu beobachten ist.

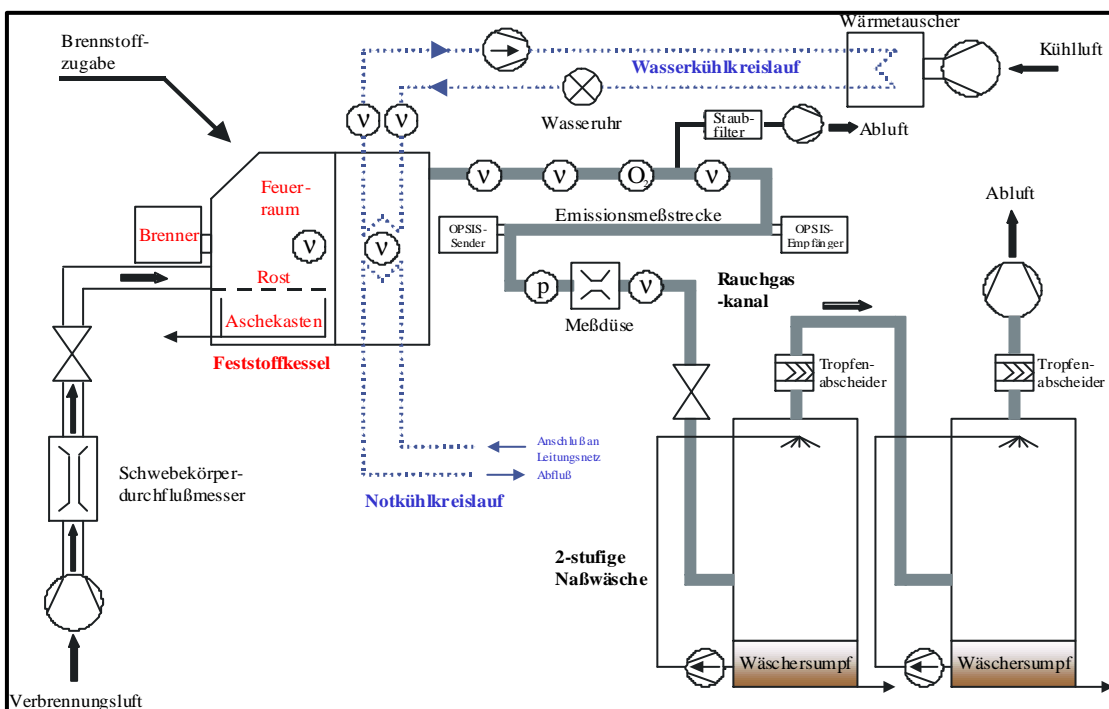


Abbildung 8: Technikums-Verbrennungsstrecke (TVS) [3, 14]

Durch Schürung am Ende der Probenverbrennung fragmentiert das Brennstoffkorn. Die dadurch verursachte Vergrößerung der reaktiven Oberfläche bedingt eine beschleunigte Reaktion des Restkokes, was zu einer erhöhten Energiefreisetzung, und somit zu einer Temperaturerhöhung des Rauchgases, führt. Dieser Effekt am großen Brennstoffkorn (Kantenlänge 10 cm und größer) tritt auch bei einigen groß-technischen Anwendungsfällen auf, beispielsweise verursacht durch die Festbett-

wanderung auf einer Rostfeuerung. An kleinen Brennstoffkörnern (Kantenlänge wenige mm und darunter) lässt sich dieser Effekt schwer beobachten und kaum quantifizieren. Die Größe dieses Effektes hat unmittelbare Auswirkungen auf die Ausbrandzeit und auf die Energiefreisetzungsrates am Ende der Restkoksverbrennung. Inwieweit sich aus diesem Effekt eine normierbare Kennzahl zur Beschreibung des Abbrandverhaltens von Festbrennstoffen entwickeln lässt, muss geprüft werden.

5.2 Bewertung der Ergebnisse der Vorversuche

Prinzipiell lässt sich mit der beschriebenen Analyseverfahren eine wesentlich höhere Informationsdichte bezüglich des Brennverhaltens erzielen, als dies mit den in Kapitel 4 dargestellten Normparametern der Kohle möglich ist. Durch die Wahl relativ großer Brennstoffkörnern (95 mm x 60 mm x 27 mm) lassen sich auch energetische Effekte erfassen, die auf der Fragmentation des Brennstoffkornes beruhen. Aufgrund ihrer Herkunft neigen Regenerative Festbrennstoffe eher zu einer im Vergleich zur Kohle heterogeneren Zusammensetzung, so dass die Untersuchung einer größeren Probenmenge zu einer besseren statistischen Absicherung der Brennstoffqualität führt [3, 16]. Die Verwendung größerer Probenmengen hat jedoch als Nachteil, dass auch größere Energiemengen freigesetzt werden, die schwieriger zu kontrollieren sind. Weitere Untersuchungen sind nötig, um den notwendigen Entwicklungsbedarf aufzuzeigen. Einige in der Literatur beschriebenen Bestimmungsmethoden arbeiten nach ähnlichem Muster (siehe Abbildung 9; Probengröße max. 20 mm; [30]), die Probenabmessungen bzw. -einwaagen sind jedoch nahezu ausschließlich deutlich kleiner [1, 5, 27, 31].

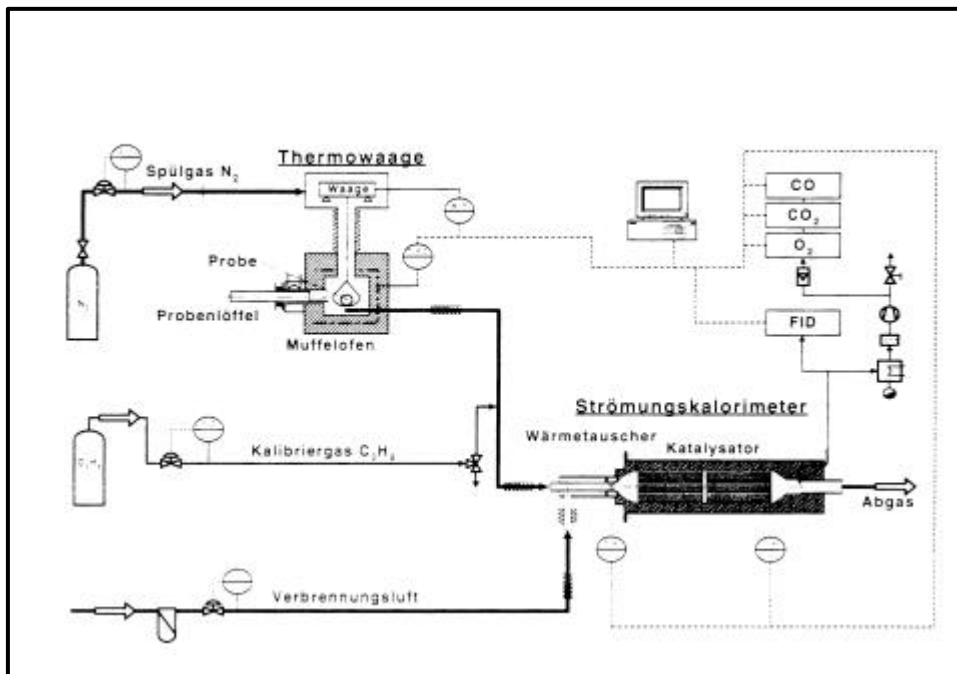


Abbildung 9: Thermowaage mit Strömungskalorimeter [30]

Für eine Anwendung in der Praxis sind die ermittelten Temperatur/(Leistungs)-Verläufe schwer auf der gesamten Länge kommunizierbar. Durch die Definition einiger Kennzahlen an markanten Punkten des Kurvenverlaufes kann jedoch ein Groß-

teil der Informationstiefe zur Beschreibung des Brennverhaltens erhalten bleiben. Folgende Punkte könnten für die Kennzahlen als Berechnungsgrundlage dienen:

- Beginn der ersten Leistungsentwicklung nach Probenzuführung
- Zeitpunkt und Höhe des/der Leistungsmaxima
- Beginn der Restkoksverbrennung
- Zeitpunkte von durch Fragmentationen bedingte Leistungsmaxima
- Ende der Restkoksverbrennung

Neben dem Brennverhaltens eines Festbrennstoffes lässt sich mit dem beschriebenen Bestimmungsprinzip zusätzlich der Brennwert der Probe sowie der Aschegehalt bestimmen. Anhand der Energiefreisetzung lässt sich zudem der jeweilige Sauerstoffbedarf ableiten [32].

6. Zusammenfassung

Bei allen Unterschieden, die bei der Durchführung von Verbrennungsprozessen bestehen, haben in der Regel alle ein gemeinsames Ziel: Das Optimum hinsichtlich technischer, ökonomischer und ökologischer Gesichtspunkte.

Ein optimiertes und effizientes Verbrennungsverfahren stellt ein Mindestmaß an Qualitätsanforderungen sowohl an das Eigenschaftsprofil des Brennstoffs als auch an den Brennstoffmarkt. Der Brennstoffmarkt definiert ebenfalls ein Anforderungsprofil an den Brennstoff. Bekannte Qualitätsanforderungen an einen Brennstoff bedeuten eine Zielvorgabe für den Brennstoffproduzenten. Die erzeugte Brennstoffqualität muss nachweisbar sein. Es ergibt sich ein vernetztes Informationssystem (Abbildung 1). Voraussetzung hierfür ist eine gemeinsame, von allen verstandene Sprache, die sämtliche relevanten Inhalte transportieren kann und somit die Basis für einen erfolgreichen Informationsaustausch bildet.

Das Brennverhalten ist Teil des Eigenschaftsprofils eines Brennstoffes. Mithilfe normierter und vereinfachter, auf den spezifischen Brennstoffsektor abgestimmter Analysemethoden ist es aufgrund ähnlicher Eigenschaftsprofile ausreichend charakterisierbar, trotz der meist reduzierten Informationstiefe der vereinfachten Analysemethoden. Die Übertragbarkeit auf einen anderen Brennstoffsektor ist deshalb nicht ohne weiteres möglich.

Zukünftig werden neben der Kohle andere Festbrennstoffe an Bedeutung gewinnen, wozu die regenerativen Festbrennstoffe gehören, für die ebenso die strengen, als Hauptmerkmale definierten Qualitätsanforderungen an einen Brennstoff gelten. Dabei werden die Brennstoffmärkte zunehmend überlappen. Um das Brennverhalten von Brennstoffen verschiedener Herkunft vergleichen zu können, werden Analysemethoden mit größerer Informationstiefe als Kommunikationsbasis benötigt.

Die vorgestellte Analysemethode erfüllt die Anforderungen an eine größere Informationstiefe. Wesentlicher Bestandteil ist die große Probenmenge bzw. Einzelkornabmessung, die neben einer besseren statistischen Absicherung des Brennverhaltens Aussagen zum Fragmentierungsverhalten großer Brennstoffkörner ermöglicht.

Die Definition von Kennzahlen würde einen praktikablen Umgang mit den Ergebnissen erlauben, die die Analyseverfahren zum Brennverhalten liefert. Die genaue Anzahl an nötigen bzw. möglichen Kennzahlen bedarf weiterer Untersuchungen.

Parallel zum Brennverhalten lassen sich der Heizwert sowie der Aschegehalt bestimmen. Daraus ergibt sich eine Verringerung des bisher üblichen Aufwandes mit drei Einzelparameterbestimmungen. Der momentane Sauerstoffbedarf ist ebenfalls bestimmbar.

A1 Literaturverzeichnis

- [1] Zelkowski, J.: *Kohleverbrennung*, Fachbuchreihe Kraftwerkstechnik Band 8, 1. Auflage, VGB- Verlag, Essen (1986)
- [2] Wiktorsson, L.-P.; Wanzl, W.: *Kinetic parameters for coal pyrolysis at low and high heating rates-a comparison of data from different laboratory equipment*, Fuel 79 (2000), S. 701-716
- [3] Seeger, H.; Urban, A.: *Qualitätssicherung für Ersatzbrennstoffe durch Verbrennungsversuche*, in: Urban, A. et al. [Hrsg.]: 5. Fachtagung, Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel (2000), S. 301-308
- [4] Kochenburger, A.: *Einsatz unterschiedlicher Kohlequalitäten in der Verbrennung*, BWK 53 (2001), S. 55-58
- [5] Zelkowski, J. et al.: *Kohlecharakterisierung im Hinblick auf die Verbrennung- Mahlbarkeit, Zündwilligkeit, Reaktivität, Verschlackung*, VGB-TB 240, Essen (1992)
- [6] Brandt, F.: *Brennstoffe und Verbrennungsrechnung*, FDBR [Hrsg.], 2. Auflage, Vulkan-Verlag, Essen (1991)
- [7] Colling, G.: *Zur Geschichte des technischen Kohlenstoffs (1)*, Erdöl Erdgas Kohle 116 (2000), S. 198-204
- [8] Gutberlet, A.; Hilligweg, G.: *Steinkohle*, BWK 53 (2001), S. 38-42
- [9] Leible, L. et al.: *Energetische Nutzung biogener Abfälle*, TA- Datenbank-Nachrichtern 9 (2000), S. 53-65
- [10] Kaltschmitt, M.: *Regenerative Energien*, BWK 53 (2001), S. 69-78
- [11] Marutzky, R.; Seeger, K.: *Energie aus Holz und anderer Biomasse*, DRW Verlag, Leinfelden-Echterdingen (1999)
- [12] Umweltbundesamt: *Thermische, mechanisch-biologische Behandlungsanlagen und Deponien für Rest-Siedlungsabfälle in der Bundesrepublik Deutschland*, 5. Auflage, Erich Schmidt Verlag, Berlin (2001)
- [13] Urban, A., Faulstich, M., Bilitewski, B.: *Energetische Abfallverwertung in einer MVA aus Sicht der Wissenschaft*, in: Urban, A. et al. [Hrsg.]: 5. Fachtagung, Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Universität Kassel (2000), 361-388
- [14] Friedel, M.: *Konsequenzen für die thermische Restabfallbehandlung, verursacht durch die TAsi und das KrW-/AbfG*, Universität Kassel, Dissertation, 2001

- [15] N. N.: *Teilreport A: Siedlungsabfälle*, Prognos, Köln, Basel, Berlin (2000)
- [16] Bünsow, W.: *Auswertung von Feuerungsversuchen mit Brennstoff aus Müll (BraM)*, TU Berlin, Dissertation, 1986
- [17] Zwahr, H.; Schröder, W.: *Planung, Bau und Betrieb der Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm in Hamburg*, Müll und Abfall, (2001), S. 128-142
- [18] Flamme, S.; Gallenkemper, B.: *Inhaltsstoffe von Sekundärbrennstoffen, Ableitung der Qualitätssicherung der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e. V.*, Müll und Abfall, (2001), S. 699-704
- [19] Thrän, D.; Rösch, C.; Kaltschmitt, M.: *Normen für biogene Festbrennstoffe, Notwendigkeiten und Ansätze*, BWK 52 (2000), S. 49-52
- [20] Theis, K.A.: *Kurzbericht über die Tätigkeit der VGB PowerTech e. V. 2000/2001*, VGB PowerTech 81 (2001), 10, S. 63
- [21] Beckmann, M.; Scholz, R.: *Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung, Teil 2*, ZKG International 52 (1999), S. 411-419
- [22] Prenzel, H.; Dahmen, G.: *Brennstoffqualitäten: Die Bedeutung der fossilen Energieträger unter heutigen Brennstoffversorgungsaspekten*, VGB PowerTech 81 (2001), 10, S. 103-107
- [23] Fitzer, E.; Fritz, W.: *Technische Chemie, Einführung in die Chemische Reaktionstechnik*, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin (1984)
- [24] N. N.: *Ruhrkohlen Handbuch*, 6. Auflage, Verlag Glückauf, Essen (1984)
- [25] Baerns, M. et al.: *Chemische Reaktionstechnik*, Band 1, 2. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1992)
- [26] Meza-Renken, Z.: *Katalytische Effekte bei heterogenen Verbrennungs- und Vergasungsreaktionen von Kohlenstoffen im Hinblick auf die thermische Abfallbehandlung*, FZKA Bericht 6077, Forschungszentrum Karlsruhe (1998)
- [27] Specht, E.: *Kinetik der Abbaureaktion*, TU Clausthal, Habilitationsschrift, 1993
- [28] Peters, B.; Bruch, C.: *A flexible and stable numerical method for simulating the thermal decomposition of wood particles*, Chemosphere 42 (2001), S. 481-490
- [29] Borghardt, R.: *Ermittlung von stoff- und verfahrensbezogenen Brennstoffcharakteristika in Wirbelschichtfeuerungen als Eingangsparameter für ein Simulationsmodell*, Universität Magdeburg, Dissertation, 1996
- [30] Steiner, G.; Staudinger, G.: *Wärmeleistung und Sauerstoffbedarf der Flüchtigen aus Brennstoffpartikeln als Funktion der Zeit*, Chem. Ing. Tech. 73 (2001), S. 1327-1330
- [31] Lorenz, H.; Rau, H.: *A new method for investigating the combustion behavior of solid fuels in FBC*, Fuel 77 (1998), S. 127-134
- [32] Mazumdar, B. K.: *Theoretical oxygen requirement for coal combustion: relationship with its calorific value*, Fuel 79 (2000), S. 1413-1419