

Beckmann, M.; Scholz, R.: Biomasse- und Ersatzbrennstoffe als schwierige Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 1. Berlin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 105-137. ISBN 3-935317-24-7. Erschienen auch als: Beckmann, M.; Scholz, R.: Biomasse- und Ersatzbrennstoffe stellen besondere Anforderungen an die Prozessführung und erfordern neue Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. In: Müllmagazin – Thema Biomasse (2006), Nr. 4, S. 8-19. ISSN 0934-3482

Aufgabenstellungen der Verfahrenstechnik

Biomasse- und Ersatzbrennstoffe stellen besondere Anforderungen an die Prozeßführung und erfordern neue Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien

Von Michael Beckmann und Reinhard Scholz

Ersatzbrennstoffe und Biomassebrennstoffe sind schwierig zu handhabende Brennstoffe, die besondere Anforderungen an die Prozeßführung stellen. Aus verfahrenstechnischer Sicht gibt es sehr umfangreiche Möglichkeiten zur Prozeßgestaltung und -führung. Schwierigkeiten bei der Planung von neuen Anlagen und bei der Optimierung, aber auch bei einer beabsichtigten Brennstoffsubstitution ergeben sich aufgrund fehlender und unzureichender Daten zu den brennstofftechnischen Eigenschaften der Ersatz- und Biomassebrennstoffe. Diese Eigenschaften können heute weitestgehend nur auf Grundlage von empirischen Ergebnissen an Großanlagen, das heißt rückwärts gerichtet, beurteilt werden. Dies ist deshalb häufig auch mit erheblichen wirtschaftlichen Verlusten verbunden. Die Methoden, die zur Charakterisierung von Regelbrennstoffen entwickelt wurden, lassen sich nicht ohne weiteres auf die Ersatzbrennstoffe übertragen. Das heißt, für Ersatzbrennstoffe sind im Hinblick auf eine vorwärts gerichtete Bewertung zunächst geeignete Methoden zur Ermittlung brennstofftechnischer Eigenschaften zu entwickeln. Die in diesem Beitrag vorgestellten Methoden der Untersuchung in verschiedenen Labor- und Pilotanlagen, wie Thermo- waagen, Zünd-, Verschlackungs- und Batch-Reaktoren, können hierzu einen Beitrag leisten.

Hersteller und Lieferanten von Ersatzbrennstoffen sind zu einem Großteil kleine und mittlere Unternehmen. Diese treten mit Großunternehmen – Kraftwerksbetreibern, Zementindustrie – in Verhandlung, um den Ersatzbrennstoff zu vermarkten. Methoden zur Untersuchung der Ersatzbrennstoffe, Kriterien für ihren Einsatz sowie die damit mögliche Klassifizierung und deren Bewertung können diese Vermarktung ganz erheblich unterstützen (Markttransparenz).

Biomassebrennstoffe und Ersatzbrennstoffe werden in der Kraftwerksindustrie und der Grundstoffindustrie in Monoverbrennungsanlagen sowie in Co-Verbrennungsanlagen eingesetzt. Biomassebrennstoffe und Ersatzbrennstoffe sind als schwierige Brennstoffe einzustufen, wie die Erfahrungen – insbesondere im Hinblick auf die Energieumsetzungsdichte, das Zünd- und Ausbrandverhalten, das Verschlackungs- und Korrosionspotential – sowie ein Vergleich mit fossilen Regelbrennstoffen zeigen.

Biomassebrennstoffe sind insbesondere im Hinblick auf die Verminderung von fossilen CO₂-Emissionen bei der Energieumwandlung von großem Interesse. Ihr Einsatz wird beispielsweise durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz unterstützt. Aufgrund der steigenden Energiepreise werden auch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen zunehmend interessant, insbesondere für Industriebereiche mit hohem Bedarf an elektrischer Energie und Wärmeenergie, aber auch für Industriezweige, die Prozeßdampf einsetzen, wie zum Beispiel die Grundstoffindustrie und die Nahrungsmittelindustrie.

Bei der Nutzung von Biomassebrennstoffen und Ersatzbrennstoffen in Monoverbrennungsanlagen und Co-Verbrennungsanlagen treten mehrere Probleme auf, wobei insbesondere die Verschlackungs- und Korrosionserscheinungen die Anlagenverfügbarkeit und damit die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen. Zur Minderung dieser Beeinträchtigungen erscheint es notwendig,

- die Erkenntnisse zur Optimierung der Prozeßführung, die bei der Verbrennung von Abfällen (ein ebenfalls schwieriger Brennstoff) gewonnen wurden, auch auf Biomasse- und Ersatzbrennstofffeuerungen zu übertragen.
- geeignete Methoden zur Untersuchung der brennstofftechnischen Eigenschaften sowohl im Labor- und Pilotmaßstab als

auch an Großanlagen zu entwickeln und zu etablieren, wobei insbesondere das Zünd- und Ausbrandverhalten sowie das Verschlackungs- und Korrosionspotential von Interesse sind.

- Klassifizierungssysteme zu entwickeln, die es ermöglichen, brennstofftechnische Eigenschaften schwieriger Brennstoffe auf einfache Weise bestimmten Anforderungen an die Prozeßführung zuzuordnen.
- Einflußgrößen des Brennstoffes auf das Vergasungs- und Verbrennungsverhalten genauer zu untersuchen – beispielsweise indem der Chlorgehalt im Hinblick auf unterschiedliche Spezies differenziert betrachtet und weitere Komponenten wie zum Beispiel Alkaligehalte im Hinblick auf das Korrosionsverhalten einbezogen werden.

In diesem Beitrag wird zunächst auf die brennstofftechnischen Eigenschaften von Biomassebrennstoffen und von Ersatzbrennstoffen eingegangen. Im Anschluß daran wird beispielhaft deren Einfluß auf das Verbrennungsverhalten diskutiert. Einerseits besteht das Ziel, die brennstofftechnischen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen bereits bei der Herstellung an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen. Andererseits gibt es auch im Anwendungsfall selbst eine Reihe von Möglichkeiten, die Prozeßführung an den Brennstoff anzupassen, worauf im vorliegenden Beitrag ebenfalls anhand von Beispielen eingegangen wird. Im Hinblick auf die große Vielfalt von Biomassen und Ersatzbrennstoffen werden abschließend Methoden zur Bestimmung von brennstofftechnischen Eigenschaften dieser Brennstoffe erörtert, wobei alternative Methoden zur Untersuchung des Zünd- und Ausbrandverhaltens und des Verschlackungs- und Korrosionspotentials im Vordergrund stehen.

Brennstofftechnische Eigenschaften

Biomassebrennstoffe und Ersatzbrennstoffe sind im Vergleich zu fossilen Regelbrennstoffen häufig gekennzeichnet durch:

- eine heterogene Zusammensetzung sowohl bezüglich der Inhaltsstoffe als auch hinsichtlich der Stückgröße,
 - einen hohen Anteil inerter Komponenten (Mineralien, Wasser, siehe Tabelle 1) sowie
 - flüchtiger Bestandteile (siehe Tabelle 1),
 - Alkali- und Erdalkaliverbindungen,
 - Chlor (in unterschiedlichen Verbindungen),
 - Schwermetallverbindungen und
 - einen niedrigen Heizwert (siehe Tabelle 1),
 - eine geringe Schüttdichte und damit
 - eine niedrige Energiedichte sowie
 - ein schlechtes Schüttgutverhalten.

Diese Eigenschaften haben insbesondere Einfluß auf das Zünd- und Ausbrandverhalten, auf das Verschlackungs- und Korrosionspotential und letztlich auch auf den Wirkungsgrad der Energieumwandlung. Biomassebrennstoffe und Ersatzbrennstoffe sind im Vergleich zu den fossilen Regelbrennstoffen als *schwierige Brennstoffe* zu bezeichnen.

Für den Einsatz fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas bei industriellen Hochtemperaturverfahren, wie dem Brennen von Zementklinker oder bei der Energieumwandlung in Kraftwerksanlagen, liegen umfangreiche Untersuchungen und Erfahrungen vor. Dabei konnten in Verbindung mit den einzelnen Prozessen entsprechende brennstofftechnische Kriterien abgeleitet werden. Diese Kriterien beschreiben die Eigenschaften eines Brennstoffes aus brennstofftechnischer Sicht. Diese brennstofftechnischen Eigenschaften lassen sich in chemische, mechanische, kalorische und reaktionstechnische Eigenschaften unterteilen (zum Beispiel Beckmann et al.³, Weber³¹).

Bei der Beurteilung der Eigenschaften eines Brennstoffes sind selbstverständlich die jeweiligen prozeßtechnischen Randbedingungen einzubeziehen. Das heißt, bestimmte Kriterien werden immer im Zusammenhang mit dem jeweiligen *Einsatzgebiet*, dem *technischen Prozeß* und den jeweiligen *Apparaten* festgelegt.

Zu den Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe sei an dieser Stelle auf Beckmann/Thomé-Kozmiensky⁹ und die darin zitierten Quellen verwiesen. In dem hier gesteckten Rahmen wird deshalb anhand von Beispielen besonders auf Biomassebrennstoffe eingegangen. Die Meinung, jegliche Biomasse sei problemlos zu vergasen oder zu verbrennen, ist durch praktische Erfahrungen vielfach widerlegt worden. Diese Erfahrungen waren häufig auch mit hohen finanziellen Verlusten verbunden. Daher ist es wichtig, darauf hinzuweisen, daß Wasser-, Aschegehalt und Heizwert eines Brennstoffes allein nicht für eine Verfahrensauswahl oder gar Anlagenauslegung ausreichen. Die folgenden drei Beispiele sollen darauf

Ersatzbrennstoff	Heizwert H _u MJ/kg	Wasser Ma.-%	Asche Ma.-%	Flüchtige Ma.-%	Gruppe
Granulat	40,8	0,01	0,5	99,4	h-I
Kunststoffe, Folien	37,7	3,1	1	98,7	
Mischkunststoffe	34	4,9	6		
Altreifen	33,1	2	2,7		h-II
BPG	24,5	17	8,2	66,8	
Spuckstoffe	19,5	17,8	9,9	62,4	
heizwertreiche MBA-Fractionen	14,4 bis 22,8	3,6 bis 33,7	15,1 bis 17,1		h-III
Tiermehl	18	4,6	22		
Altholz	17	8 bis 50	0,5	81,3	
Trockenstabilat	15 bis 18	~ 15	28,9	70 bis 80*	
Klärschlamm	1 bis 14	3 bis 80	7 bis 58,2		

* bezogen auf den wasser- und aschefreien Zustand

Tabelle 1: Übersicht über Heizwert, Wasser-, Asche- und Flüchtigengehalt von Biomasse- und Ersatzbrennstoffen. Zum Vergleich (Beispiele):

Braunkohle: H_u = 10–15 Megajoule pro Kilogramm (MJ/kg), Flüchtige: 55 Massenprozent, Steinkohle: H_u = 30 MJ/kg, Flüchtige: 25 Massenprozent

aufmerksam machen, daß es ganz verschiedene Kriterien oder Parameter sein können, die in der praktischen Umsetzung zu Schwierigkeiten führen.

Die Tabelle 2 zeigt chemische, mechanische und kalorische Eigenschaften von Reisspelzen und von Zuckerrübenschnitzel. Beide weisen in etwa gleiche kalorische Eigen-

Brennstoffeigenschaften	Einheit	Brennstoff	
		Reisspelzen	Zuckerrübenschnitzel
chemische Eigenschaften			
<i>Elementaranalyse</i>			
Kohlenstoff	Ma.-% wf	42,267	44,100
Wasserstoff	Ma.-% wf	5,122	5,840
Stickstoff	Ma.-% wf	1,389	1,500
Sauerstoff	Ma.-% wf	33,222	43,137
Schwefel	Ma.-% wf	0,111	0,080
Chlor	Ma.-% wf	0,111	0,003
S/Cl-Verhältnis	mol/mol	1,106	29,486
Fluor	Ma.-% wf	–	–
Summe einschließlich Asche	Ma.-% wf	100,00	100,00
<i>Kurzanalyse</i>			
Wassergehalt	Ma.-% roh	10,000	13,500
Asche	Ma.-% wf	17,778	5,340
flüchtige Bestandteile	Ma.-% wf	69,800	79,700
gebundener Kohlenstoff	Ma.-% wf	–	–
<i>Spurenanalyse</i>			
Kalium	g/kg wf	0,48	6,60
Calcium	g/kg wf	1,37	4,60
Magnesium	g/kg wf	0,28	1,80
Natrium	g/kg wf		0,24
Silicium	g/kg wf	75,00	0,15
<i>Ascheanalyse</i>			
Erweichungstemperatur	°C	> 950	1.036
Halbkugeltemperatur	°C	1.430	1.125
Fließtemperatur	°C	1.467	1.170
mechanische Eigenschaften			
Schüttdichte	kg/m ³	90 – 110	~ 300
kalorische Eigenschaften			
unterer Heizwert	MJ/kg wf	16,4	16,8
Verbrennungstemperatur (adiabat, Lambda = 1,0)	°C	1.961	1.905
Verbrennungstemperatur (adiabat, Lambda = 1,6)	°C	1.397	1.373
Mindestsauerstoffbedarf	m ³ /kg	0,76	0,74
Mindestluftbedarf	m ³ /kg	3,62	3,50
Mindestabgasvolumen	m ³ /kg	6,39	6,32

Tabelle 2: Chemische und kalorische Eigenschaften von Reisspelzen und Zuckerrübenschnitzel

schaften auf. Große Unterschiede bestehen im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften – Schüttdichte, aber auch Schütt- und Transportverhalten – wohingegen auf den ersten Blick geringe Unterschiede bei den chemischen Eigenschaften vorliegen. Reisspelzen sind über die energetische Nutzung hinaus auch im Hinblick auf die Verwertung der Asche sehr interessant. Die Asche enthält einen sehr hohen Anteil an Silicium und ist daher auch als Wertstoff zum Beispiel für die Metallurgie interessant. Unter den Bedingungen einer Wirbelschicht oder auch eines Drehrohres wird die Asche jedoch mechanisch sehr beansprucht, so daß ein sehr hoher Feinstaubanteil entsteht, der an die Abscheidung wiederum erhöhte Anforderungen stellt. Daher muß für dieses Material eher ein schonender Transport vorgesehen werden, wie er beispielsweise in einem Rostsystem möglich ist. Aufgrund der geringen Schüttdichte der Reisspelzen ist die Energiedichte ebenfalls gering. Das ist bei der Auslegung des Rostsystems im Hinblick auf die Temperatursteuerung sowie beispielsweise in Bezug auf die Isolierung und Wärmeauskopplung zu beachten (siehe unten Maßnahmen zur Steuerung der Haupteinflußgrößen).

Zuckerrübenschnitzel bereiten in Bezug auf die Energieumsetzungsdichte hingegen weniger Schwierigkeiten, Heizwert und Schüttdichte liegen in dem für Biomassebrennstoffe üblichen Bereich. Aus der Sicht der Korrosion fällt beim Schwefel/Chlor-Verhältnis zunächst der niedrige Chlor- und der hohe Schwefelgehalt auf. Die genauere Analyse der Spurenstoffe zeigt weiter, daß der Gehalt an Kalium im Vergleich zu anderen Biomassebrennstoffen überdurchschnittlich hoch ist. Bei der Verbrennung – aber auch bei der Pyrolyse und Vergasung – bilden sich Kaliumoxide (zum Beispiel K_2O) und -salze, wie Kaliumchlorid (KCl) und Kaliumsulfat (K_2SO_4). Insbesondere Kaliumoxid mit einem Schmelzpunkt von etwa 740 Grad Celsius und Kaliumchlorid mit einem Schmelzpunkt von 772 Grad Celsius sind im Hinblick auf Ablagerungen gefährlich. In Abbildung 1 ist unter anderem die Dampfdruckkurve für Kaliumchlorid dargestellt. Demnach können bei üblichen Feuerraumtemperaturen bereits erhebliche Anteile in die Gasphase übergehen. Die gasförmigen Kaliumverbindungen scheiden sich dann an kalten Flächen – beispielsweise Wärmeübertragerflächen – ab, deren Temperatur unterhalb der jeweiligen Schmelztemperaturen liegt, und erstarren. Diese hier sehr verkürzte und einfache Darstellung der Bildung von Ablagerungen ist in der Praxis erheblich komplexer, da sich auch Mischkomponenten mit Eutektika und dergleichen bilden können. Tatsächlich entstanden bei Versuchen mit Zuckerrübenschnitzel bei der Verbrennung in einem Rostsystem im Technikum bereits nach wenigen Stunden krustenartige Beläge aus Mischsalzen an den Wärmeübertragerflächen.

In dem nächsten Beispiel, Olivenkerne (siehe Tabelle 3), ist auch besonderes Augenmerk auf die Spurenanalyse, insbesondere der Asche, zu legen. Der hohe Anteil an Al-

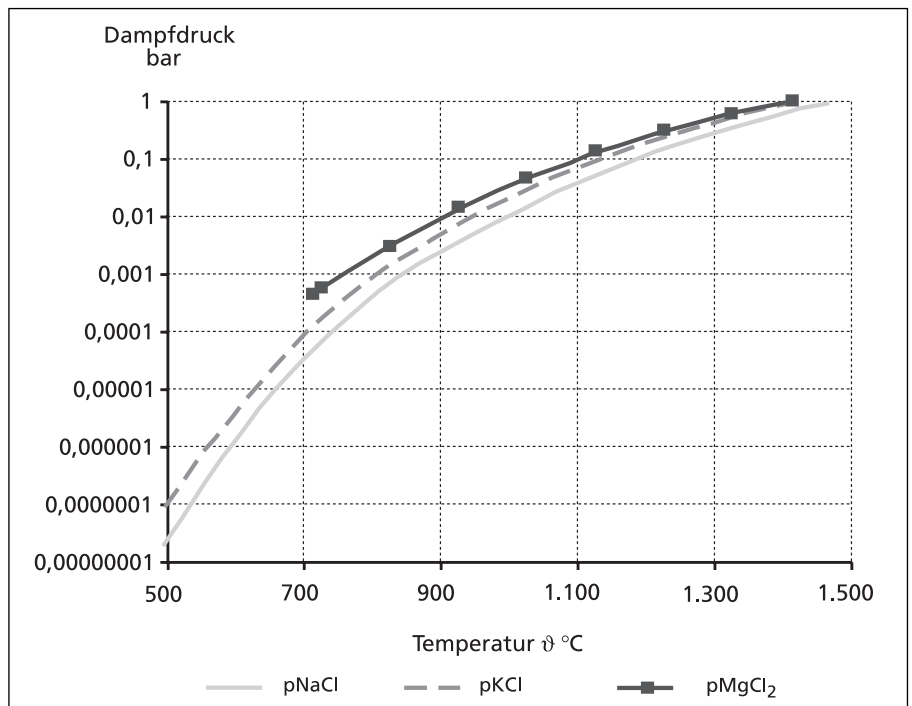


Abbildung 1: Dampfdruckkurven für NaCl, KCl und $MgCl_2$

kali- und Erdalkalikomponenten bewirkt eine Herabsetzung des Ascheerweichungspunktes. Prinzipiell erscheint das Material aufgrund der Korngröße und der gleichmäßigen Korngrößenverteilung sehr gut geeignet für die Vergasung und Verbrennung in einer Wirbelschicht. Wegen des geringen Ascheerweichungspunktes muß jedoch insbesondere auf die Temperatursteuerung oder aber auf die Wahl des Bettmaterials, gegebenenfalls mit einer Additivzugabe (siehe unten: Maßnahmen zur Steuerung der Haupteinflußgrößen), geachtet werden. Bei Überschreiten der Erweichungstemperatur kommt es zu Verbackungen zwischen den Brennstoffteilchen und dem Bettmaterial, so daß der Strömungszustand der Wirbelschicht gestört wird. Bei Versuchen im Technikumsmaßstab brach die Wirbelschicht innerhalb von Sekunden nach Überschreiten der Erweichungstemperatur zusammen. Abbildung 2 zeigt die nach dem Zusammenbruch entnommenen Proben, die Verbackungen sind deutlich zu sehen.

Die drei Beispiele sollen zeigen, daß es in der Regel nicht möglich ist, mit einzelnen wenigen Parametern einen Brennstoff zu charakterisieren. Vielmehr sind labortechnische Untersuchungen in Verbindung mit Untersuchungen im Pilotmaßstab durchzuführen, bei denen die Verhältnisse von Großanlagen simuliert werden können, und diese Ergebnisse sind mit den Ergebnissen aus dem Einsatz der Brennstoffe in der Praxis zu korrelieren. Auf diese Weise lassen sich dann bestimmte Kriterien und Maßstabfaktoren ableiten.

Für Ersatzbrennstoffe müssen im Hinblick auf die oben genannten Eigenschaften die zugehörigen Charakterisierungsmethoden und Bewertungskriterien auf der Basis der vorhandenen Erfahrungen von unterschiedlichen Primärbrennstoffen abgeleitet und zum Teil neu entwickelt werden. Für die che-

mischen, mechanischen und kalorischen Eigenschaften sind insbesondere bei den Bestimmungsmethoden bereits erste Fortschritte zu verzeichnen (siehe Beckmann/Scholz⁵). Schwierig im Vergleich dazu ist es, reaktionstechnische Parameter zu ermitteln und entsprechende Kriterien abzuleiten. Auf die Untersuchungsmöglichkeiten im Labor- und Technikumsmaßstab wird weiter unten eingegangen.

Möglichkeiten der Prozeßführung

Die Wechselwirkungen brennstofftechnischer Eigenschaften von Brennstoffen mit den Reaktionsbedingungen in Pyrolyse-, Vergasungs- und Verbrennungsprozessen sind in der Vergangenheit bereits sehr umfangreich im Hinblick auf unterschiedliche Zielstellungen wie Schadstoffminderung, Energieumsatz und Korrosion untersucht worden. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse zur Gestaltung von Verfahrenskonzepten – unter Einbeziehung der jeweiligen Apparate wie Brennkammer-, Rost-, Wirbelschicht- und Drehrohrsysteme – lassen sich zu einem großen Teil auch auf vergleichsweise neue Brennstoffe übertragen, wie zum Beispiel Ersatzbrennstoffe und feste Biomassebrennstoffe.

Die jeweiligen Reaktionsbedingungen werden zunächst durch die Haupteinflußgrößen maßgeblich bestimmt. Es ergeben sich abhängig von den Eigenschaften der Brennstoffe weiter verschiedene generelle Anforderungen – *Verfahrenskonzepte* – zur Steuerung der Prozeßbedingungen, da einerseits bestimmte Optimierungsziele ganz unterschiedliche Niveaus der Haupteinflußgrößen erfordern, zum Beispiel Minderung von Stickstoffoxid und Ausbrand (zum Beispiel Kolb/Leuckel²⁰, Malek et. al.²³), und andererseits die Haupteinflußgrößen mehr oder weniger miteinander gekoppelt sind,

für stückige Ersatzbrennstoffe und Biomassen Wirbelschicht- und Rostsysteme, jeweils in Verbindung mit Brennkammersystemen für die Nachverbrennung, im Vordergrund stehen. Zu weiteren Beispielen der konkreten Umsetzung dieser Maßnahmen wird hier zum Beispiel auf Scholz et. al.²⁷ und Beckmann/Spiegel⁸ verwiesen.

Haupteinflußgrößen

Ausgangspunkt der Überlegung bei der Betrachtung eines Verfahrens sind die Haupteinflußgrößen (Abbildung 3)²⁷. Zunächst sind selbstverständlich die *Einsatzstoffe* gegeben, die durch physikalische und chemische Eigenschaften charakterisiert werden (siehe oben).

Grundoperationen thermischer Abfallbehandlungsverfahren sind in der Regel die Thermolyse (Pyrolyse), Vergasung und Verbrennung, die im Wesentlichen durch die Haupteinflußgröße *Sauerstoffangebot* unterschieden werden. Wird kein Sauerstoff von außen zugeführt, so liegt Thermolyse vor; eine Wärmezufuhr bewirkt dabei je nach Art des Einsatzstoffes eine Trocknung, Entgasung und Pyrolyse des Abfalls. Für die Vergasung von Abfällen kommen in der Regel nur autotherme Verfahren in Frage, das heißt es erfolgt eine Sauerstoffzufuhr, so daß sich unterstöchiometrische Bedingungen ergeben. Die Verbrennung ist durch stöchiometrische beziehungsweise überstöchiometrische Sauerstoffzufuhr festgelegt.

Durch die *Reaktionsgase* können direkt das absolute Angebot und der Partialdruck der jeweiligen Gaskomponente sowie indirekt die Temperatur beeinflusst werden. Für Verbrennungsprozesse wird üblicherweise Luft oder aber mit Sauerstoff angereicherte Luft (zum Beispiel Glorius¹⁸, Knörr¹⁹) als Reaktionsgas zugeführt. Bei Vergasungsprozessen können darüber hinaus Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf eingesetzt werden. Bei Pyrolyseprozessen, die unter Sauerstoffabschluß von außen verlaufen, wird hingegen auch Stickstoff als inertes Gas zur Abdichtung und zur Spülung verwendet; der Begriff Reaktionsgas ist hier daher nur in einem übergeordneten Kontext zutreffend.

Im Hinblick auf das *Reaktorverhalten* werden in der Verfahrenstechnik die Grenzfälle idealer Rührkessel (RK) und idealer Kolbenströmer (KS) unterschieden²². Bei einem Rührkessel geht man von einer vollständig durchmischten Gas- und Feststoffphase im Reaktorraum aus, weshalb sich hier über dem gesamten Reaktorvolumen einheitliche Größen wie Konzentrationen oder Temperatur (Abbildung 4) ausbilden. Bei einem Kolbenströmer findet dagegen keine Durchmischung der Komponenten statt (Abbildung 4), weshalb sich über der Reaktorlänge ein Temperatur- und ein Konzentrationsprofil ausbilden.

Unter der *Art der Stoffzufuhr* ist unter anderem die Gestaltung des Eintragsimpulses, die Zerstäubung des Einsatzstoffes und die Dispergierung eines Zusatzmittels zu verstehen. Gestaltungsmöglichkeiten sind unter anderem Freistrahlen (Injektoren)^{26, 28} und

Brennstoffeigenschaften	Einheit	Brennstoff	
		Olivenrückstände, unbehandelt	Olivenrückstände, behandelt
chemische Eigenschaften			
<i>Elementaranalyse</i>			
Kohlenstoff	Ma.-% wf	50,70	54,05
Wasserstoff	Ma.-% wf	5,89	5,80
Stickstoff	Ma.-% wf	1,36	1,90
Sauerstoff	Ma.-% wf	36,97	35,48
Schwefel	Ma.-% wf	0,30	0,30
Chlor	Ma.-% wf	0,18	0,04
S/Cl-Verhältnis	mol/mol	1,84	8,21
Fluor	Ma.-% wf	–	–
<i>Summe einschließlich Asche</i>	<i>Ma.-% wf</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>
<i>Kurzanalyse</i>			
Wassergehalt	Ma.-% roh	5,500	7,830
Asche	Ma.-% wf	4,600	2,430
flüchtige Bestandteile	Ma.-% wf	72,000	78,300
gebundener Kohlenstoff	Ma.-% wf	23,400	–
<i>Ascheanalyse</i>			
K ₂ O	Ma.-%	32,20	6,17
Na ₂ O	Ma.-%	8,90	3,84
CaO	Ma.-%	21,30	21,15
MgO	Ma.-%	7,90	5,47
SiO ₂	Ma.-%	32,60	18,43
Al ₂ O ₃	Ma.-%	6,03	3,97
SO ₂	Ma.-%	4,97	n. analysiert
Cl	Ma.-%	1,43	0,41
Erweichungstemperatur	°C	< 880	–
mechanische Eigenschaften			
Schüttdichte	kg/m ³	830	850
kalorische Eigenschaften			
unterer Heizwert	MJ/kg wf	20,8	19,2
Verbrennungstemperatur (adiabat, Lambda = 1,0)	°C	2.267	2.034
Verbrennungstemperatur (adiabat, Lambda = 1,6)	°C	1.603	1.436
Mindestsauerstoffbedarf	m ³ /kg	0,96	1,00
Mindestluftbedarf	m ³ /kg	4,59	4,77
Mindestabgasvolumen	m ³ /kg	7,98	8,28
Quelle: Arvelakis, S.; Gehrman, H.-J.; Beckmann, M.; Koukios, E. G.: Effect of Leaching on the Ash Behavior of Olive Residue during Fluidised Bed Gasification. Proc. INFUB 2000, 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 11.-14.04.2000			

Tabelle 3: Chemische und kalorische Eigenschaften von Olivenkernen

beispielsweise Sauerstoffangebot und Temperatur in Verbindung mit der Einstellung einer bestimmten Luftzahl. Diese Verfahrenskonzepte sind dann in Verbindung mit den

apparate-technischen Möglichkeiten weiter zu detaillieren. Hierauf wird in den folgenden Abschnitten kurz zusammenfassend eingegangen, wobei im vorliegenden Fall

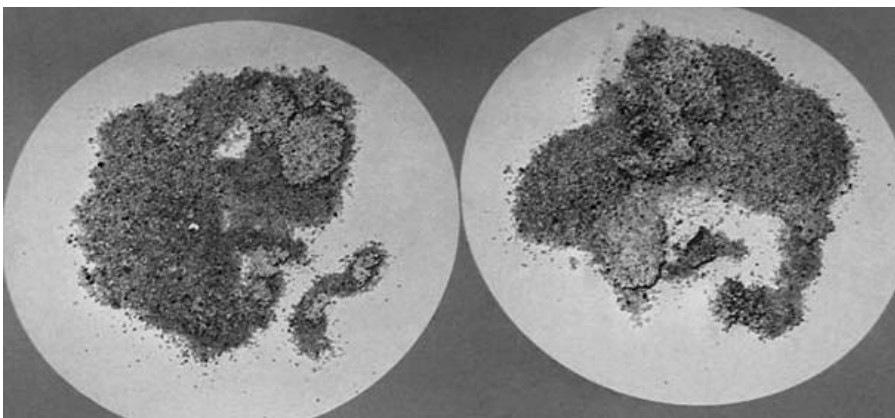


Abbildung 2: Sinterung von Olivenkernen und Bettmaterial bei der Vergasung in der Wirbelschicht

Drallströmungen^{13,21}. Beeinflusst werden dadurch insbesondere der Mischungsvorgang der Reaktionspartner und das Reaktorverhalten (siehe oben). Durch eine intensive Durchmischung zum Beispiel der Gase vom Rost mit der Sekundärluft (Düsen) läßt sich beispielsweise im Feuerraum näherungsweise eine Zone mit einer Rührkessel-Charakteristik erreichen.

Die für bestimmte Prozeßabläufe erforderlichen mittleren *Verweilzeiten* werden hauptsächlich durch die Konstruktion – Geometrie des Apparates, Einbauten – und durch die durchgesetzten Massenströme – Geschwindigkeit – festgelegt. Die Verweilzeit ist eine wichtige Einflußgröße für den Umsatz bei physikalischen Vorgängen der Stoff- und Wärmeübertragung und bei chemischen Reaktionen. Übliche Verweilzeiten in thermischen Anlagen betragen für Gase wenige Sekunden, für stückige Brennstoffe hingegen einige Minuten bis Stunden.

Das *Temperaturniveau* stellt für die Einstellung von Gleichgewichten und die Kinetik von Stoff- und Wärmeübertragungsvorgängen und chemischen Reaktionen ebenfalls eine wichtige Einflußgröße dar. Anhand des Temperaturniveaus kann man grob in Niedertemperatur- (unterhalb etwa 800 Grad Celsius) und Hochtemperaturprozesse (oberhalb etwa 1.000 Grad Celsius) unterscheiden.

Weiter lassen sich Stofftransportvorgänge und chemische Reaktionen durch das *Druckniveau* beeinflussen, was insbesondere bei Vergasungsverfahren unter Prozeßdrücken bis zu zwei Megapascal (MPa) und höher ausgenutzt wird. Bei Pyrolyse- und Verbrennungsprozessen von Ersatzbrennstoffen und Biomassebrennstoffen ist die Anwendung von stark erhöhtem oder stark verringertem Druck gegenüber der Umgebung hingegen nicht üblich.

Eine wichtige Beeinflussung von Reaktionsbedingungen ist durch die Zufuhr von *Zusatzstoffen* gegeben. Hierunter fallen Zusatzbrennstoffe zum Beispiel zur Einhaltung der Mindesttemperatur, ebenso wie Additive zur Schadstoffeinbindung oder Stoffe zur Betterzeugung und -beeinflussung (zum Beispiel Wirbelschicht- und Rostsysteme¹⁸).

Maßnahmen zur Steuerung der Haupteinflußgrößen

Die Wirkung der Haupteinflußgrößen muß vom Niveau her und im Hinblick auf die Verteilung längs des Reaktionsweges betrachtet werden. Eine wesentliche Grundvoraussetzung zur Optimierung verfahrenstechnischer Prozesse, bei denen Teilprozesse mit ganz unterschiedlichen Kombinationen von Einflußgrößen erforderlich sind, ist

- die getrennte Durchführung der Teilprozesse – Entkopplung –, so daß sie auch einzeln, ohne gegenseitige Beeinflussung optimiert werden können. So ermöglicht die Trennung der Prozeßschritte Feststoffumsatz (1. Einheit), Nachverbrennung (2. Einheit) und Wärmeübertragung zum Beispiel bei den hier vorrangig behandelten stückigen Ersatzbrennstoffen und Biomassebrennstoffen

Haupteinflußgrößen	Variationen		
Einsatzstoffe	physikalische Eigenschaften	gasförmig, flüssig, pastös, fest (staubförmig oder stückig)	
	chemische Eigenschaften	Zusammensetzung (<i>Problemstoffe</i>)	
Sauerstoffangebot	Thermolyse $\lambda = 0$	Vergasung $\lambda < 1$	Verbrennung $\lambda \geq 1$
Reaktionsgase	Luft, Sauerstoff, (Stickstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf, rückgeführtes Abgas, usw.)		
Reaktorverhalten	Rührkessel (RK) vollkommene Durchmischung ($Pe = 0$)	Realer Reaktor $0 < Pe < \infty$	Kolbenströmer (KS) keine Durchmischung ($Pe \rightarrow \infty$)
Art der Stoffzufuhr	Eintragsimpuls, Drall, Zerstäubung, Dispergierung, usw. <small>z.B. für Einsatzstoffe, Reaktionsgase, Zusatzstoffe</small>		
Verweilzeit	kurz einige s	lang einige min bis h	sehr lang einige h bis d
Temperatur	Niedertemperatur $\vartheta < 800 \text{ °C}$	bis $\vartheta = 800 \text{ °C} - 1.000 \text{ °C}$	Hochtemperatur $\vartheta > 1.000 \text{ °C}$ (ggf. b. 2.000 °C und höher)
Druck	Niedertemperatur $p \ll 0,1 \text{ MPa}$	Umgebungsdruck $p = 0,1 \text{ MPa}$	Hochdruck $p \gg 0,1 \text{ MPa}$
Zusatzstoffe	Additiv (z.B. zur Schadstoffeinbindung, zur Beeinflussung des Schmelzverhaltens usw.) Zusatzbrennstoff Bettbeeinflussung (z.B. Wirbelbett, Festbett, Umlaufbett, Trägermatrix, Ascherückführung usw.)		

Abbildung 3: Haupteinflußgrößen bei thermischen Verfahren

Quelle: Scholz/Beckmann/Schulenburg²⁷

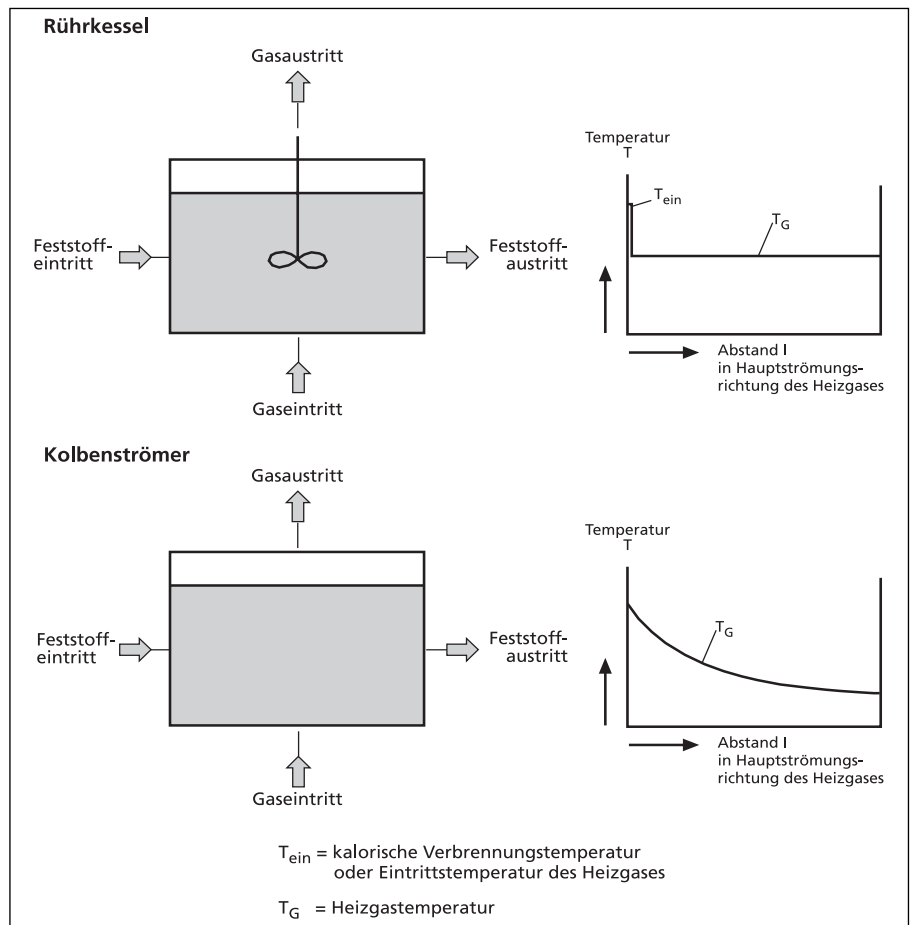


Abbildung 4: Modellvorstellung zum Verhalten eines Rührkessels und eines Kolbenströmers

Quelle: Scholz/Beckmann/Schulenburg²⁷

(Abbildung 5), daß man zunächst den Feststoffausbrand und die Qualität der Asche unabhängig von der Nachverbrennung optimieren kann. Durch die Entkopplung der Wärmeübertragung werden Quencheffekte an kalten Wänden vermieden.

Bei der getrennten Optimierung können nun die Haupteinflußgrößen durch vielfältige Maßnahmen variiert werden, wie zum Beispiel

- die Sauerstoffkonzentration
 - durch Luft- und Brennstoffstufung,
 - Sauerstoff- und

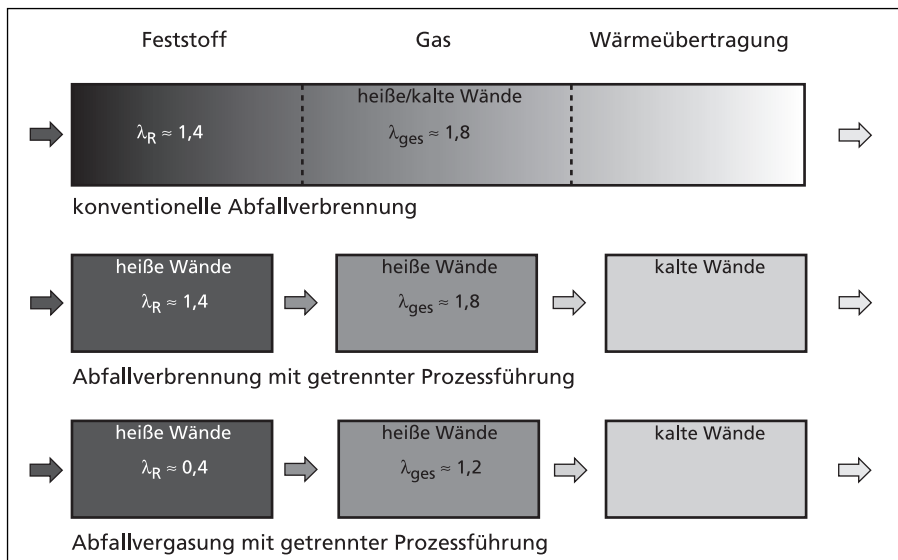


Abbildung 5: Entkopplung von Prozessschritten zur getrennten Prozessführung

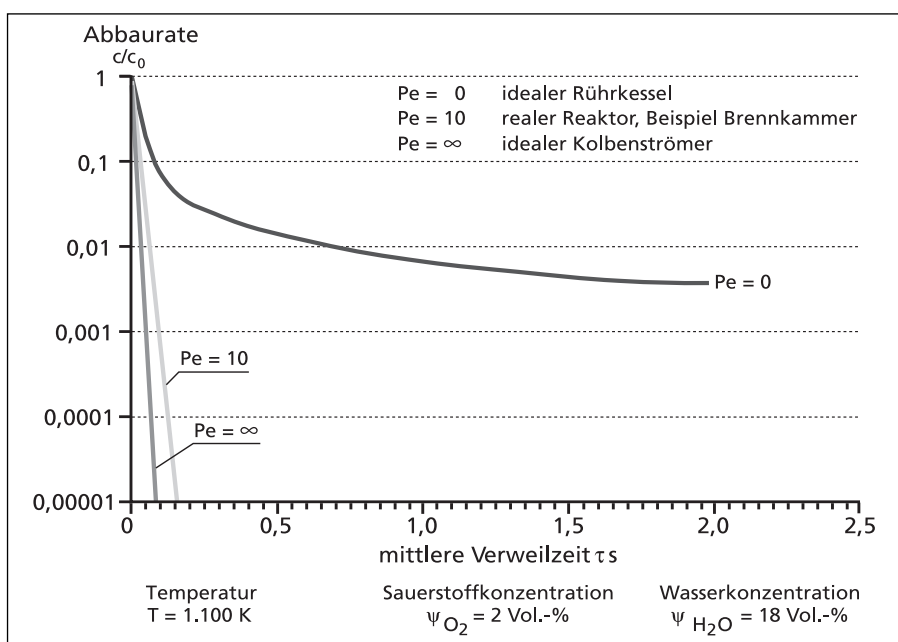


Abbildung 6: Abhängigkeit des CO-Abbaus von der mittleren Verweilzeit und dem Mischungsverhalten des Reaktors
Quelle: Dryer/Glasman¹⁴

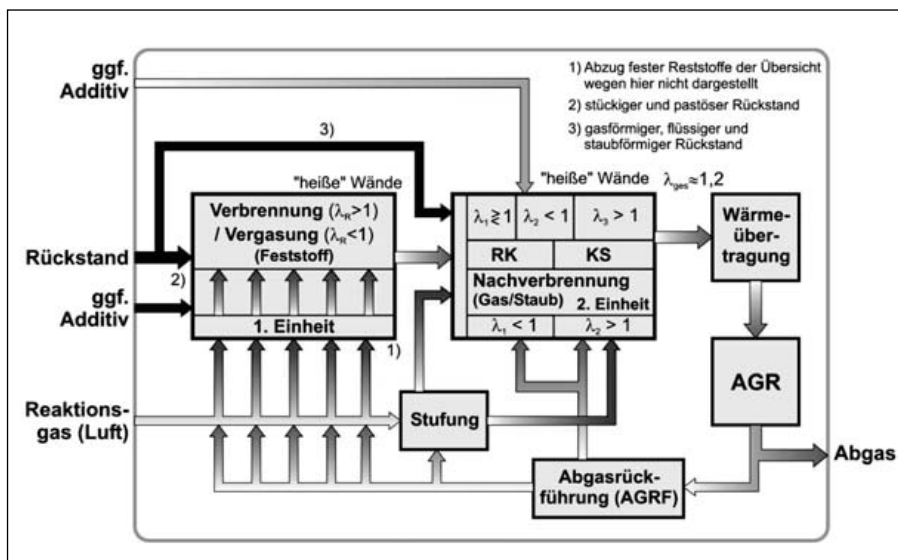


Abbildung 7: Schematische Darstellung der getrennten Prozessführung – Verbrennungs-/Vergasungs-Nachverbrennungsprozess mit Rost und Brennkammersystem

- Inertgaszufuhr,
- Abgasrückführung und
- Lastzustand.

In Frage kommen ähnliche Maßnahmen auch zur

- Steuerung der Temperatur längs des Reaktionsweges, zum Beispiel durch
 - Vorwärmung des Reaktionsgases (zum Beispiel Luftvorwärmung),
 - Vorwärmung des Einsatzstoffes (Brennstoffvorwärmung),
 - Einstellung der Stöchiometrie,
 - Zufuhr von Inertgasen,
 - Abgasrückführung,
 - Zufuhr von Bettmaterial zur Kühlung oder Aufheizung,
 - Wassereindüsung und
 - gezielte Wärmeein- oder -auskopplung.

Weitere Möglichkeiten zur Beeinflussung der Prozessführung sind

- die Aufteilung in unterschiedliche Reaktortypen (Rührkessel-, Kolbenstrom-Charakteristik),
- unabhängige Verweilzeitsteuerung längs des Reaktionsweges, zum Beispiel in einzelnen Rostzonen durch getrennt einstellbare Rostbewegung,
- Rückführung von Asche(fractionen) zur weiteren Schadstoffeinbindung oder -freisetzung (vgl. Zusatzstoff, Bettmaterial),
- Brennstoffstufung (vgl. Zusatzstoffe) zur Einstellung der Stöchiometrie und der Temperatur.

An dieser Stelle wird beispielhaft auf den Einfluß des Reaktortyps auf Abbaureaktionen (Abbildung 6) hingewiesen, die in Kolbenstrom-Reaktoren deutlich schneller als in Rührkessel-Reaktoren verlaufen. Dennoch ist zu beachten, daß häufig zunächst eine homogene Vermischung vorliegen muß, wofür die Rührkessel-Charakteristik wiederum erforderlich ist, so daß häufig eine Reihenschaltung von Rührkessel- und Kolbenstrom-Elementen zu finden ist.

Somit wird deutlich, daß je Zielstellung und Art des Einsatzstoffes (Abfall) eine Vielzahl von Maßnahmen miteinander kombiniert werden müssen. Dabei ist anzustreben, daß die unterschiedlichen Aufgaben der Reihe nach in hintereinander geschalteten Reaktoren *abgearbeitet* werden.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine schematische Darstellung einer getrennten Prozessführung mit den wesentlichen der vorgenannten Maßnahmen zur Steuerung der Haupteinflußgrößen. Als Apparat ist in dieser Darstellung in der ersten Einheit ein Rostsystem, mit den Möglichkeiten der Luftstufung – Reaktionsgas – entlang des Reaktionsweges zugrunde gelegt. Das Verweilzeitverhalten des Feststoffes in Rostsystemen kann entlang des Reaktionsweges mit einer Kolbenströmer-Charakteristik, einzelne Abschnitte des Rostes können hingegen je nach Rosttyp mehr oder weniger auch als Rührkessel-Charakteristik (zum Beispiel Rückschubrost)⁴ angenähert werden. Als erste Einheit in Abbildung 7 kann jedoch prinzipiell auch eine Wirbelschicht treten, wobei dann die Steuerung des Reaktionsgases

wegen der bei Wirbelschichtsystemen näherungsweise vorliegenden Rührkessel-Charakteristik eher schwierig ist. Auf die Besonderheiten der Prozeßführung mit beiden Apparaten für den Feststoffumsatz – 1. Einheit: Wirbelschicht- und Rostsystem – wird im Folgenden näher anhand von Beispielen eingegangen.

Methoden zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens

Für fossile Regelbrennstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas bestehen umfangreiche Erfahrungen zur Charakterisierung und zur Ableitung von Kriterien für den Einsatz in industriellen Hochtemperaturverfahren (wie zum Beispiel dem Brennen von Zementklinker) oder im Bereich der Energieumwandlung in Kraftwerksanlagen.

Die Methoden zur Analyse von Regelbrennstoffen lassen sich nur eingeschränkt auf Ersatzbrennstoffe und Biomassebrennstoffe übertragen. Mehrere Arbeitsgruppen auf nationaler Ebene und in der Europäischen Kommission beschäftigen sich deshalb derzeit mit der Entwicklung, Erprobung und Normung von Methoden zur Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen.

In Deutschland sind hier die Arbeiten der Gütegemeinschaft für Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V. (zum Beispiel Flamme/Gallenkemper¹⁵, Glorius¹⁷) zur Erarbeitung einheitlicher Methoden der Probenahme, der Analytik und der Festlegung von Richtwerten für umweltrelevante Parameter zu nennen.

Auf europäischer Ebene richten sich die Bemühungen im Rahmen der Arbeitsgruppe CEN/TC 343 *Solid Recovered Fuels* auf Festlegungen zu den Schwerpunkten

- Terminologie,
- Klassifizierung, Spezifizierung,
- Beschreibung von Probenahmeverfahren,
- physikalische und mechanische Tests sowie
- chemische Tests.

Die Arbeiten werden entsprechend der vorgenannten Stichpunkte in fünf Arbeitsgruppen („working groups“, WG) durchgeführt und sind bereits weit fortgeschritten. Mit der Fertigstellung der Technischen Spezifikationen und der Abstimmung mit den nationalen Normungseinrichtungen wird Mitte bis Ende 2006 gerechnet²⁵.

Die eigentlichen Untersuchungsmethoden werden in den zwei Arbeitsgruppen *Physikalische und mechanische Tests* und *Chemische Tests* erarbeitet und festgelegt.

Die Methoden zur Bestimmung *physikalischer und mechanischer Parameter* beinhalten im Einzelnen:

- Heizwert,
- flüchtige Bestandteile,
- Aschegehalt,
- Wassergehalt,
- Ascheschmelzverhalten,
- Korngröße und Korngrößenverteilung,
- Schüttdichte sowie
- Dichte und Festigkeit von Pellets und Briquets.

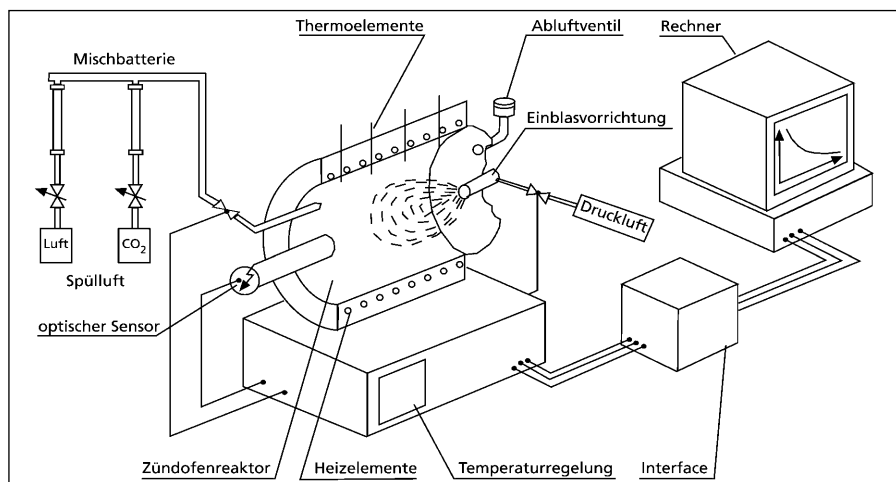


Abbildung 8: Schema des Zündreaktors

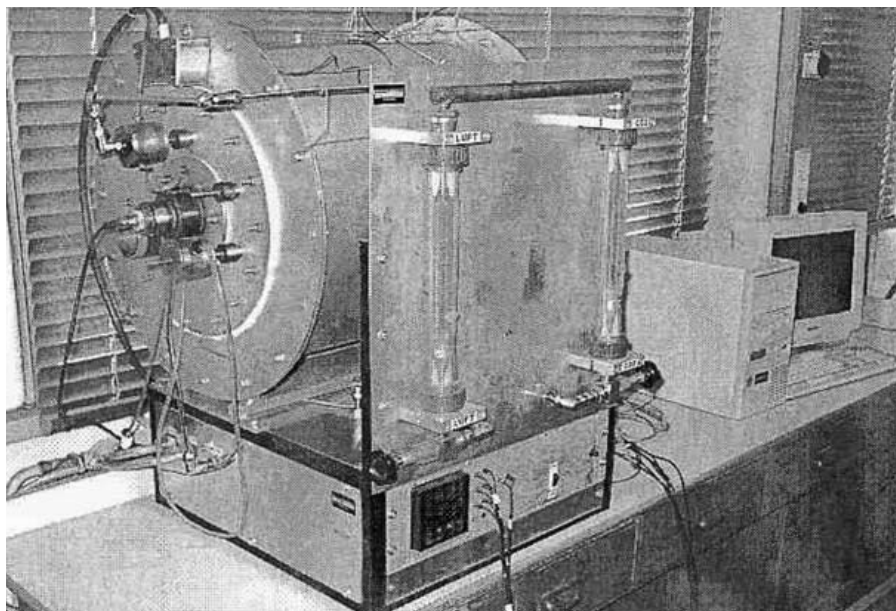


Abbildung 9: Foto des Zündreaktors

Die Methoden zur Bestimmung *chemischer Parameter* beinhalten im Einzelnen:

- metallisches Aluminium,
- Spurenanalyse,
- Schwefel-, Chlor-, Fluor-, Bromgehalt,
- Elementaranalyse und
- Probenaufbereitung (Analyseneinheit).

Mit diesen Parametern werden die vorgenannten Eigenschaften von Brennstoffen zu einem großen Teil beschrieben. Anzumerken ist jedoch, daß dies allein für eine umfassende brennstofftechnische Charakterisierung nicht ausreicht. Über die genannten Parameter hinaus müssen jedoch auch weitere *kalorische und reaktionstechnische Eigenschaften* berücksichtigt werden. Darüber hinaus sind die Wechselwirkungen zwischen definierten brennstofftechnischen Parametern und dem Verhalten der Brennstoffe in verschiedenen Feuerungen zu beschreiben.

Zu den *kalorischen Eigenschaften* zählen neben dem Brennwert und Heizwert unter anderem insbesondere der spezifische Mindestluftbedarf, die spezifische Mindestabgasmenge, die adiabate Verbrennungstemperatur, die Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und die Temperaturleitfähigkeit. In

Verbindung mit der jeweiligen Prozeßführung lassen sich daraus auch weitere Kennwerte ableiten wie das Energieaustauschverhältnis bei der Brennstoffsubstitution (beispielsweise wenn Regelbrennstoffe durch Ersatzbrennstoffe ersetzt werden). Hierüber wurde bereits ausführlicher in Beckmann/Scholz⁵ berichtet. Im Folgenden wird daher näher auf die Bestimmung von *reaktionstechnischen Eigenschaften* eingegangen.

Reaktionstechnische Eigenschaften von Brennstoffen sind im engeren Sinne kinetische Daten zum Beispiel zur Freisetzung von flüchtigen Bestandteilen, oder Gleichgewichts- und Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten. Im weiteren Sinne lassen sich auch das Zünd- und Ausbrandverhalten, die Verschlackungsneigung und das Korrosionspotential den reaktionstechnischen Eigenschaften zuordnen. Das Zünd- und Ausbrandverhalten hängt neben den eigentlichen kinetischen Daten von einer Reihe von Parametern ab wie zum Beispiel Anteil der flüchtigen Bestandteile, Korngrößenverteilung und Wärmeleitfähigkeit. Ebenso läßt sich das Korrosionspotential nicht durch eine Größe allein ausdrücken, zum Beispiel durch den Chlorgehalt. Vielmehr ist das

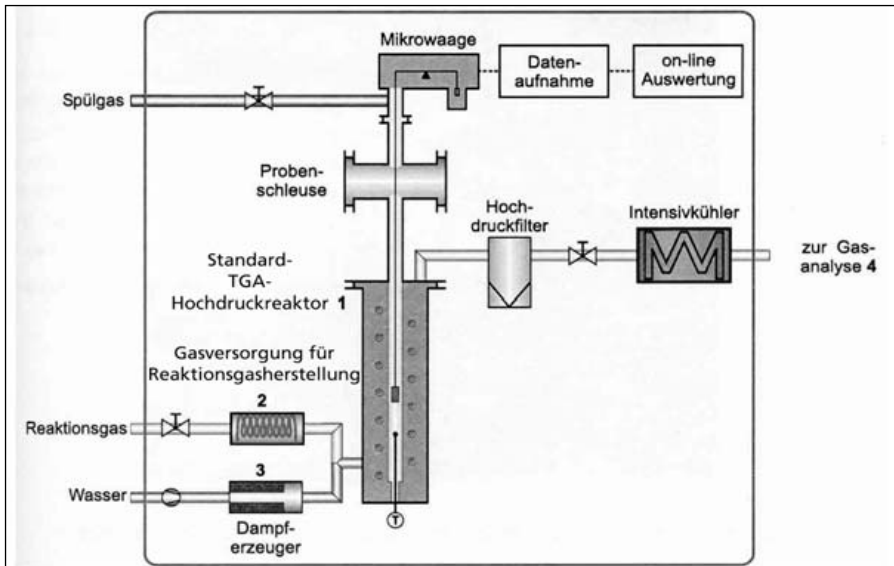


Abbildung 10: Schema der Labor-Thermowaage

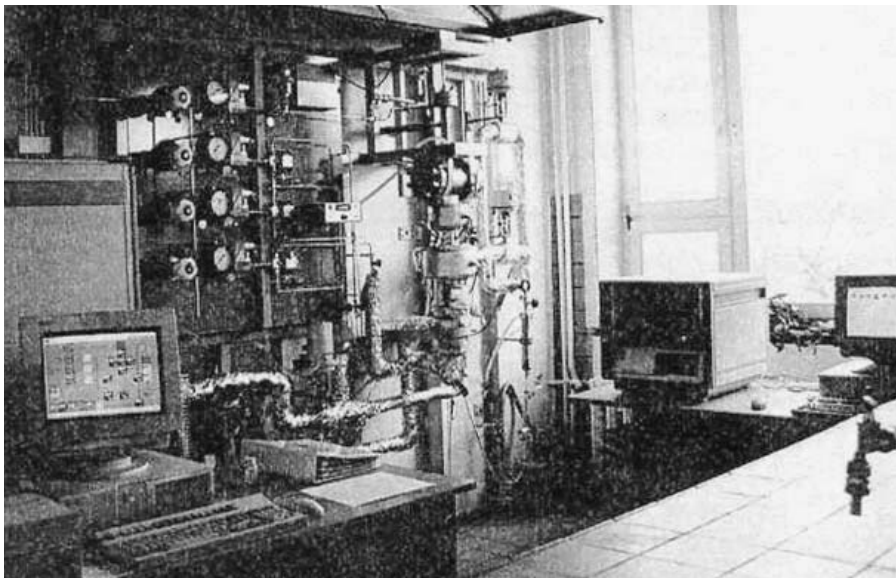


Abbildung 11: Foto der Labor-Thermowaage

Korrosionspotential eines Brennstoffes als Summenparameter zu verstehen, der über die brennstofftechnischen Eigenschaften hinaus durch die prozeßtechnischen Gegebenheiten – Prozeßführung, betriebliche und konstruktive Parameter – beeinflusst wird (zum Beispiel Beckmann et. al. 7).

Untersuchung der Zündgeschwindigkeit und des Abbrandverhaltens

Allgemein kann zum Zündverhalten gesagt werden, daß eine erste Beurteilung mit Hilfe der spezifischen Zündwärme vorgenommen werden kann. Die spezifische Zündwärme ist die auf die Masseneinheit des Brennstoffes bezogene Wärme, die erforderlich ist, um den Brennstoff und die Verbrennungsluft von Umgebungstemperatur auf Zündtemperatur zu erwärmen. Die Zündung selbst muß jedoch als ein Anlaufvorgang betrachtet werden und hängt nicht nur von einer bestimmten Zündtemperatur, sondern auch maßgeblich von der Geschwindigkeit der

Wärmeaufnahme, dem Verbrennungsluftmassenstrom, der Verbrennungslufttemperatur, der Strömungsgeschwindigkeit im Bett beziehungsweise der Relativgeschwindigkeit zwischen Korn und Verbrennungsluft sowie von der Korngröße ab. Deshalb sind für genauere Aussagen in der Regel experimentelle Untersuchungen zum Zündverhalten verschiedener Brennstoffe erforderlich. Für diese Untersuchungen kommen unter anderem folgende Methoden in Frage:

- Zündreaktor,
- Labor-Thermowaage,
- technische Thermowaage,
- Batch-Reaktor.

Zündreaktor

In dieser Versuchsapparatur wird eine pulverförmige Probenmasse von etwa 300 Milligramm in einen bis auf 1.100 Grad Celsius vorgewärmten, horizontal positionierten Reaktor eingebracht.

Mittels eines optischen Sensors und der installierten Thermoelemente (Abbildung 8 und 9) kann die Temperaturverteilung über dem Strömungsweg ermittelt werden.

Eckdaten des Zündreaktors:

- Probenmasse: 300 Milligramm
- Innendurchmesser: 300 Millimeter
- Heizleistung: 6 Kilowatt
- Dauer des Eindüsvorgangs: 20 Millisekunden
- Austrittsgeschwindigkeit: 20 Meter pro Sekunde (entspricht in etwa den Bedingungen wie sie bei industriellen Staubbrennern vorherrschen)
- Ofenatmosphäre: oxidierend, kohlendioxidangereichert zur Minderung des Sauerstoffpartialdrucks
- Variationsmöglichkeiten: Änderung der Ofen- beziehungsweise Eindüsparame-ter und/oder der Probenparameter.

Labor-Thermowaage

Mit einer Labor-Thermowaage (Abbildung 10 und 11) können Zünd- und Abbrandverhalten unter unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Bedingungen und beispielsweise unterschiedlichen Gasatmosphären und reaktionskinetischen Konstanten für eine Probe im Gramm-Maßstab untersucht werden. Die geringe Probenmenge erfordert eine entsprechende Homogenisierung der Probe, was gerade bei Ersatzbrennstoffen nicht immer einfach ist. Wie aus den unten angegebenen Eckdaten zu erkennen ist, lassen sich in einer solchen Apparatur Bedingungen simulieren, wie sie bei industriellen Prozessen – Drehrohrofen, Brennkammer – vorherrschen¹⁰.

Eckdaten der Labor-Thermowaage:

- Standard-TGA-Hochdruckreaktor (1.100 Grad Celsius, 100 bar), (Nr. 1 in Abbildung 10)
- Gasversorgung für Reaktionsgasherstellung aus drei oder mehr (bis zu etwa zehn) Gaskomponenten mit und ohne Wasserdampf (Nr. 2)
- Wasserdampferzeuger (100 bar) (Nr. 3)
- Gasanalysator (Massenspektrometer Balzers, $m/Z = 1$ bis 200)
- Probenmasse bis 1 Gramm
- Reaktionsgasatmosphäre: inert, oxidierend, reduzierend, korrosiv
- Temperaturbedingungen: isotherm, nicht-isotherm mit $dT/dt = 20$ K/min bis 100 K/min

Untersuchungsmöglichkeiten:

- Thermogravimetrische Analyse (TGA), Differenzierte TG-Kurve (Reaktionsverlauf, Massenverlust, Reaktionsgasgeschwindigkeit)
- Massenspektrogramme mit Zuordnung der m/Z -Werte, Identifizierung der freigesetzten gasförmigen Verbindungen

Technische Thermowaage

Für heterogene, stückige Brennstoffe ist die Herstellung einer sehr kleinen Probe im Gramm-Maßstab oftmals schwierig. Außerdem gehen dabei auch die Eigenschaften der Struktur und Korngröße der Brennstoffe verloren, die im Hinblick auf die Stoff- und Wärmeübertragungsvorgänge jedoch sehr wichtig sind. Daher ist es zweckmäßig, die Untersuchungen in Labor-Thermowaagen durch solche in *technischen Thermowaagen* (Abbildung 12 und 13) zu ergänzen.

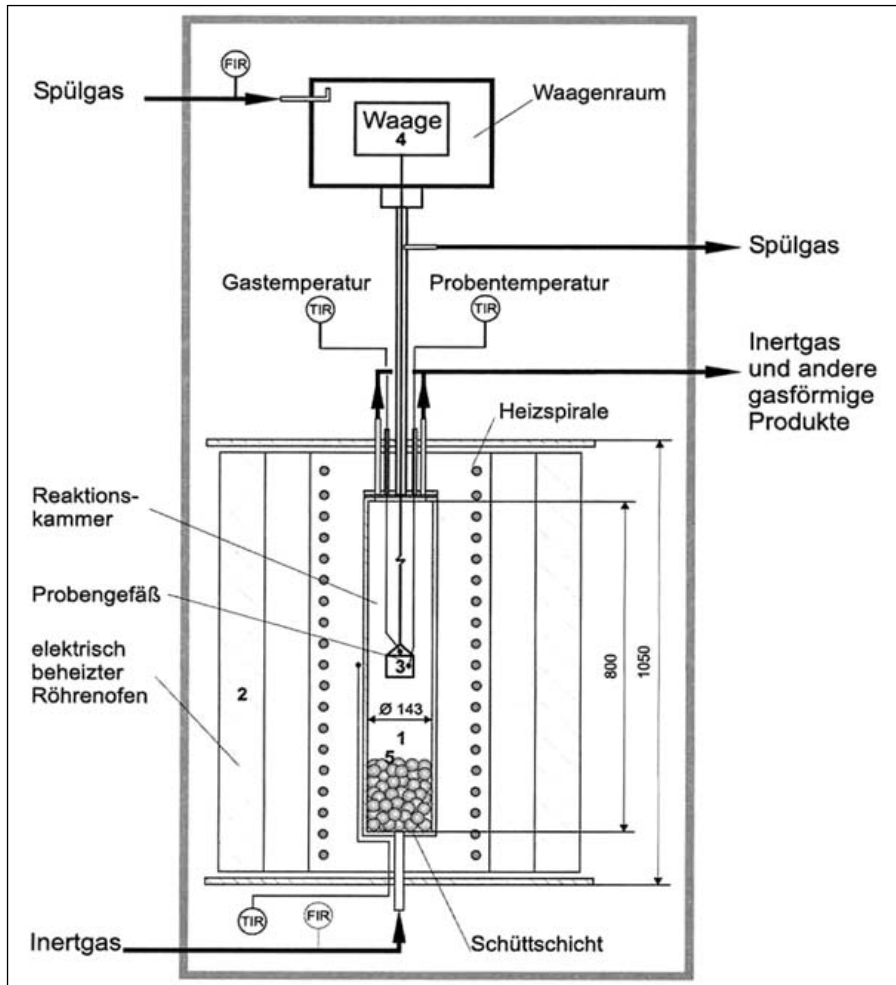


Abbildung 12: Schema der technischen Thermowaage

Eckdaten der technischen Thermowaage:

- hitzebeständiger Stahl als Reaktionskammer (Nr. 1 in Abbildung 12), Länge 0,8 Meter, Durchmesser 0,143 Meter,
- beheizter Röhrenofen (Nr. 2) für Aufheizraten bis zu 20 K/min bis auf 1.200 Grad Celsius,
- Wägebereich 0 bis 3 Kilogramm, Auflösung 0,1 Gramm,
- Atmosphäre: Stickstoff als Spül- und Kühlgas im Waagenraum, Reaktionsgas in Reaktionskammer aus Gasflaschen (zum Beispiel Stickstoff, Luft oder mit Sauerstoff angereicherte Luft), Keramikugeln (Nr. 5) dienen der Vergleichmäßigung des Strömungsprofils.

Zur Ermittlung kinetischer Daten zum Beispiel im Hinblick auf Fragestellungen des *Scaleup* liefert der Vergleich der Versuchsergebnisse der beiden unterschiedlichen Thermowaagen geeignete Anhaltspunkte (zum Beispiel Gehrman¹⁶). In Abbildung 14 zeigen die Kurven die Massenabnahme über der Zeit für Kohle gleicher Körnung in inerter Atmosphäre für verschiedene Aufheizgeschwindigkeiten in einer Labor-Thermowaage und in einer technischen Thermowaage. Aus den Kurvenverläufen ersichtlich ist der Einfluß der unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeit – einerseits durch das Aufheizprogramm vorgegeben, andererseits aufgrund der unterschiedlichen Probenmasse in den beiden Thermowaagen.

Batch-Reaktor

Für die Ermittlung von kinetischen Daten für den Feststoffumsatz im Festbett oder in der Wirbelschicht (Zündverhalten und Abbrandgeschwindigkeit) können weiter *Batch-Reaktoren* eingesetzt werden^{6, 11, 12}. Abbildung 15 und 16 zeigen eine schematische Darstellung und ein Foto eines Batch-Reaktors. Der zu untersuchende Brennstoff wird in einem Batch-Reaktor in einer Schüttung oder aber auch im fluidisierten Zustand untersucht. Dabei können verschiedene Parametervariationen (siehe unten) im Hinblick auf die Simulation von Bedingungen, wie sie in Rostsystemen oder in Wirbelschichtreaktoren vorliegen, durchgeführt werden.

Eckdaten des Batch-Reaktors:

Brennkammer:

- thermische Leistung des Brennersystems: etwa 40 Kilowatt
- Feuerraumwandtemperatur: 850 bis 950 Grad Celsius
- maximales Brennstoffvolumen: etwa 32 Liter (400 mm x 265 mm x 300 mm)
- Rostfläche: etwa 11 Quadratdezimeter (dm²)

Parametervariationen:

- Primärluftvolumenstrom
 - über Blenden-Meßstrecke 1: 20 bis 200 Kubikmeter pro Stunde in Betrieb (m³/h i.B.)

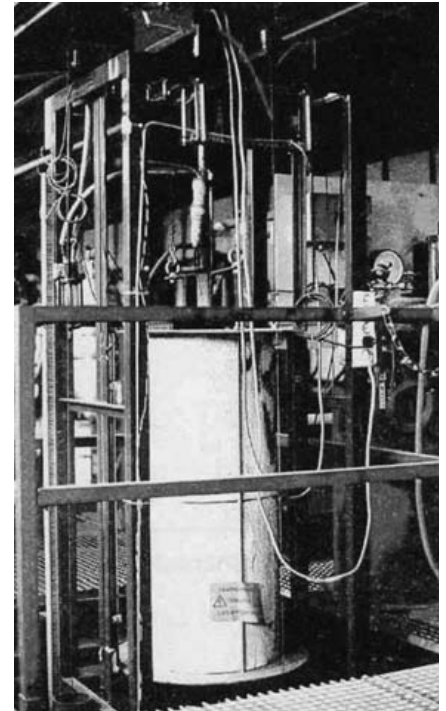


Abbildung 13: Foto der technischen Thermowaage

- über Blenden-Meßstrecke 2: 5 bis 50 m³/h i.B.
- Sekundärluftvolumenstrom
 - über Blenden-Meßstrecke: 3 bis 30 m³/h i.B.
- Verhältnis Primärluft/Sekundärluft: etwa 8:1
- Zufuhr weiterer Reaktionsgase (siehe Haupteinflußgrößen), auch vorgewärmt, möglich,
- Einsatz von Bettmaterial (ebenfalls vorgewärmt, zum Beispiel im Hinblick auf die Simulation von Bedingungen einer Wirbelschicht)

Während des Versuches werden unter anderem verschiedene Temperaturen im Bett und im Feuerraum, die Gaskonzentrationen unmittelbar oberhalb des Bettes und im Feuerraum sowie der Druckverlust der Schüttung ermittelt. Beispielhaft zeigt Abbildung 17 die Verläufe der Bett-Temperaturen für eine Schüttung von zwei verschiedenen Brennstoffen (Biomassebriketts³² und Altholz). Beide Brennstoffe weisen den gleichen Heizwert von etwa 12 Megajoule pro Kilogramm (MJ/kg) auf. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich im Hinblick auf Wassergehalt und Aschegehalt.

- Biomassebrikett:
 - Wasser: 18 Massenprozent
 - Asche: 35 Massenprozent
- Altholz:
 - Wasser: 45 Massenprozent,
 - Asche: 1 Massenprozent

Aus den Temperaturverläufen ist zu erkennen, daß die Biomassebriketts unter anderem aufgrund des geringeren Wassergehaltes eine schnellere Zündung im Vergleich zum Altholz aufweisen. Die maximale Temperatur bei den Biomassebriketts ist höher, die Hauptverbrennungszeit kürzer als bei

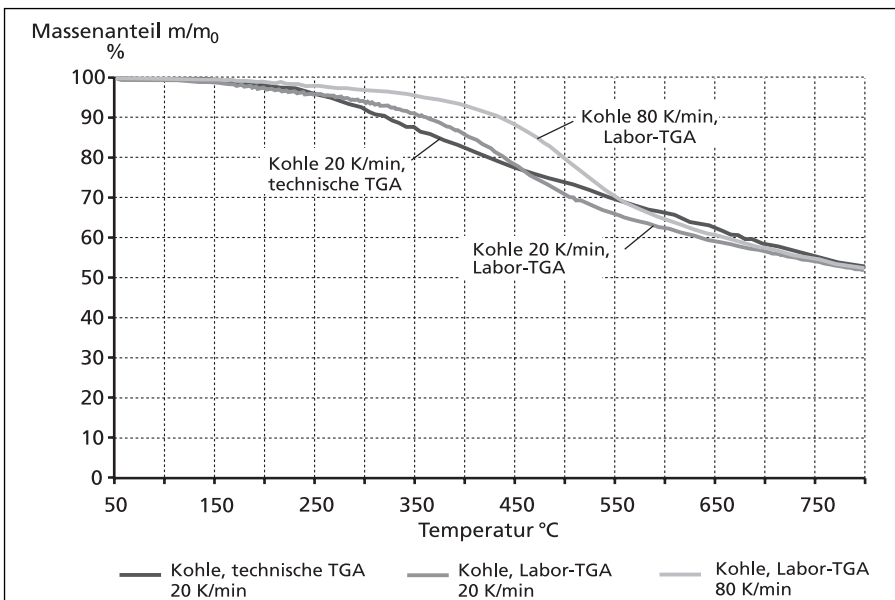


Abbildung 14: Vergleich der Untersuchungsergebnisse zum Umsatz von Kohle in inerte Atmosphäre in einer Labor- und einer technischen Thermowaage

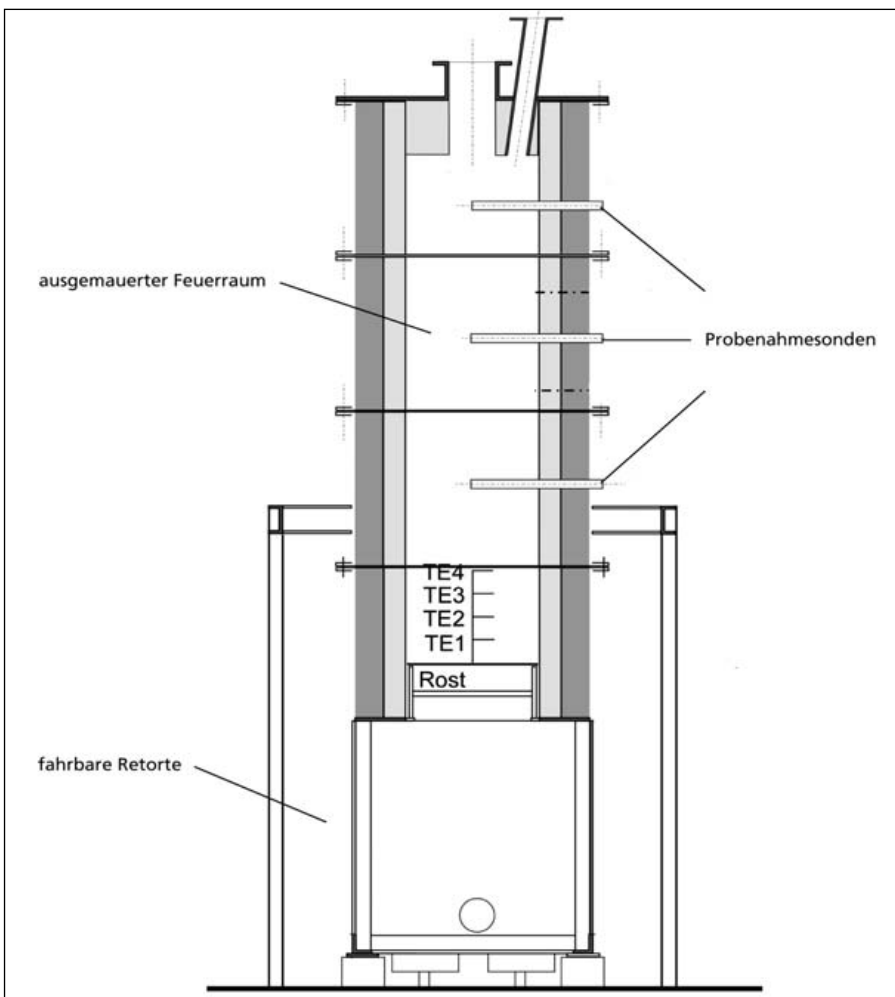


Abbildung 15: schematische Darstellung eines Batch-Reaktors

dem Altholz, was ebenfalls eine Folge des unterschiedlichen Wassergehaltes ist. Dabei ist zu beachten, daß die Temperaturabnahme bei den Biomassebriketts durch den hohen Aschegehalt – Speichereffekt – eher gemindert wird. Über die vorgenannten Meßwerte hinaus schließen sich auch Untersuchungen der

verbleibenden Asche und des Bettmaterials an. Weiter können auch Belagssonden (siehe unten) eingesetzt werden. In einem derzeit laufenden Forschungsvorhabens¹ werden Proben in drei verschiedenen Batch-Reaktoren in einer Art Ringtest untersucht. Der Vergleich der Ergebnisse soll die Festlegung von geeigneten Versuchsbedin-

gungen, die Ergebnisvalidierung und die Ergebnisinterpretation in Hinsicht auf das Scale-up und die Klassifizierung unterstützen.

Entgasungsgeschwindigkeit und Verschlackungsverhalten/ Ablagerungen

Verschlackungen erhöhen den Gesamtwiderstand der Wärmeübertragung und führen so zu einer geringeren Effizienz. Die verringerte Wärmeauskopplung hat erhöhte Gastemperaturen im Feuerungsraum zur Folge, die wiederum die Ablagerungsgeschwindigkeit erhöhen können und somit zu außerplanmäßigen Stillstandszeiten führen. Darüber hinaus sind Ablagerungen maßgeblich für Korrosionen an Kesselbauteilen verantwortlich. Somit gilt es, gerade beim Einsatz von Ersatz- und Biomassebrennstoffen in Kraftwerken und dergleichen, im Vorfeld abzuschätzen, in welchem Umfang die Brennstoffe dazu neigen, Ablagerungen auszubilden. In den Standard-Laborversuchen unter Zuhilfenahme des Ascheschmelz-



Abbildung 16: Foto eines Batch-Reaktors

punktmikroskops läßt sich zunächst mit Aschemischungen das Schmelzverhalten der Asche bestimmen. Zur Untersuchung des Verschlackungsverhaltens und der Neigung zur Bildung von Ablagerungen in technischen Feuerungen ist es darüber hinaus sehr hilfreich, Proben der Ablagerungen von Kohlen, Kohlemischungen, Biomasse-Kohle-Mischungen und Ersatzbrennstoffen unter definierten Bedingungen zu untersuchen. Hierfür steht ein spezieller Verschlackungsreaktor zur Verfügung (Abbildung 18 und 19).

- Eckdaten des Verschlackungsreaktors:
- thermische Leistung: 50 Kilowatt,
 - Reaktortemperatur: maximal 1.400 Grad Celsius,
 - Versuchsdauer: 4 bis 6 Stunden,
 - Durchsatz: 2 bis 7 Kilogramm pro Stunde,
 - Heizleistung: 38 Kilowatt.

Die Probenahme wird entweder im laufenden Betrieb durch *Belagssonden* oder anschließend im Stillstand der Anlage vorgenommen. Bei Einsatz einer *Belagssonde* im Gasstrom scheidet sich – isokinetisch – die Fracht der physikalisch (fest, flüssig) und stofflich (zum Beispiel Silikate, Oxide, Chloride, Sulfate oder Hydroxide) unterschiedlichen Partikel des Rohgases ab. Die verschiedenen Partikeltypen formen signifikante Gefügestrukturen auf der Sonde. Die mineralogische Bewertung dieser *Sedimentationsgefüge* und die chemischen Daten aus Punkt- und Kleinflächenmessungen der abgelagerten Partikel führen zu einer differenzierten Zustandsbewertung der Partikelfracht des Rohgases. Durch Vergleich mehrerer Meßpositionen entlang des Gasweges – das heißt Messungen bei unterschiedlichen Gastemperaturen – und/oder durch Vergleich von gezielt unterschiedlichen Betriebsituationen an der gleichen Meßposition lassen sich Aussagen zum Verschlackungs- und Korrosionspotential ableiten. Die Untersuchungen an dem Verschlackungsreaktor müssen dann im Zusammenhang mit Untersuchungen an realen Anlagen – zum Beispiel Abfallverbrennungsanlagen – ausgewertet werden, um letztendlich geeignete Kriterien für die Bewertung eines Brennstoffes zu erhalten. In Abbildung 20 sind Ergebnisse aus Untersuchungen an Abfallverbrennungsanlagen dargestellt. Das linke REM-Bild – Länge des Maßstabes am unteren Bildrand ist 20 Mikrometer (μm) – zeigt beispielhaft einen Betriebszustand mit hoher Asche- und geringer Salzfracht (geringes Korrosionspotential). Beim rechten REM-Bild ist der gegenteilige Zustand gegeben.

Ergänzend dazu zeigt das linke Variationsdiagramm einen chemischen Datensatz von Punktmessungen auf der *Belagssonde* – hier Chloridanteil und Sulfatanteil. Die Symbole bezeichnen verschiedene Entnahmepositionen – Abgastemperaturen – an zwei Linien einer Abfallverbrennungsanlage. Es zeigen sich diskrete Lagefelder der verschiedenen Symboltypen. Vorgaben für eine Bewertung der Lagefelder ergeben sich aus den für Abfallverbrennungsanlagen typischen Korrosionsprozessen – Hochtemperatur-Chlorkorrosion –, das heißt Betriebsituationen mit einer Dominanz von Sulfaten gegenüber Chloriden sind zu bevorzugen.

Das rechte Variationsdiagramm symbolisiert das ASP-Diagramm. Die Meßpunkte repräsentieren die Proportion an Aschekomponenten zu Salzkomponenten im Rohgas; die Meßzeit betrug etwa 30 Minuten, die Meßposition lag am Kesselende. Die hier exemplarisch gezeigten blauen und grünen Punkte beziehen sich auf zwei unterschiedliche Betriebsweisen eines Kessels einer Abfallverbrennungsanlage (blau: höhere Dampfleistung, grün: geringere Dampfleistung). Entsprechend den Lagefeldern des ASP-Diagramms^{24, 29, 30} ist für den Betriebszustand der blauen Punkte ein geringeres Korrosionspotential gegeben als für den der grünen Punkte.

Die an den vorgenannten Versuchsanlagen gewonnenen Daten müssen mit Ergebnissen

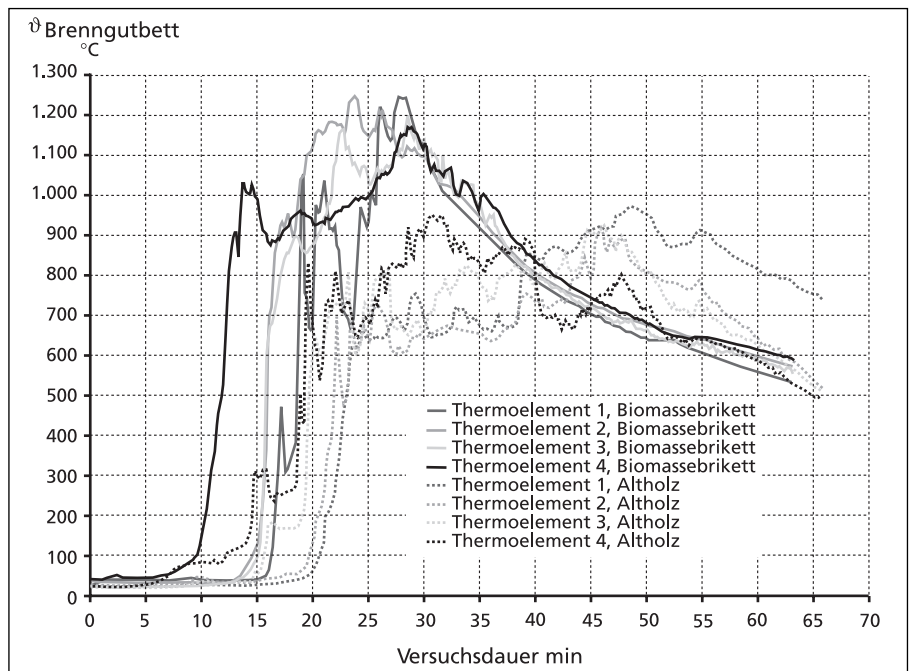


Abbildung 17: Betttemperaturen (Thermoelement 1 bis 4 über der Betthöhe) über der Versuchsdauer für zwei verschiedene Versuchseinstellungen

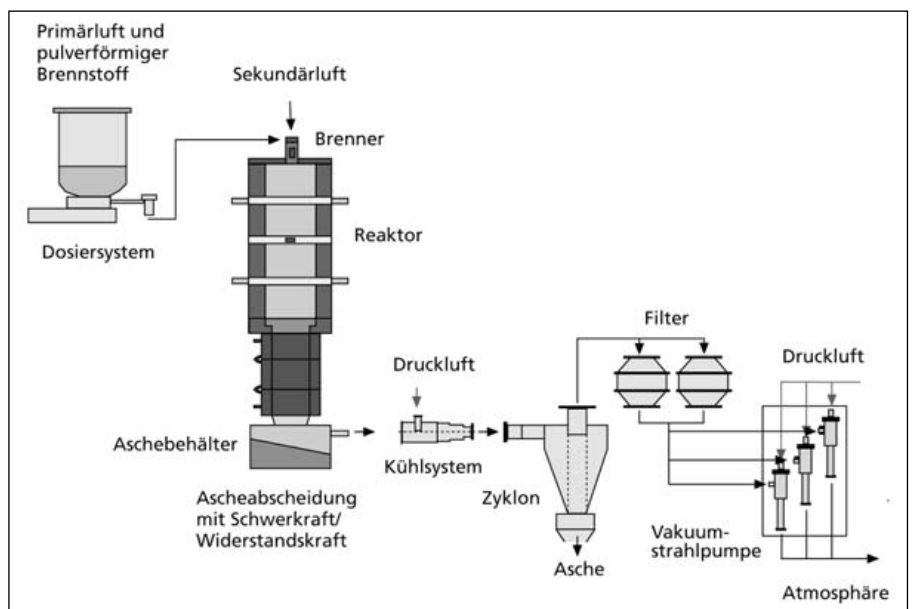


Abbildung 18: Reaktor zur Untersuchung des Verschlackungsverhaltens von festen Brennstoffen und Mischungen mit Biomassebrennstoffen

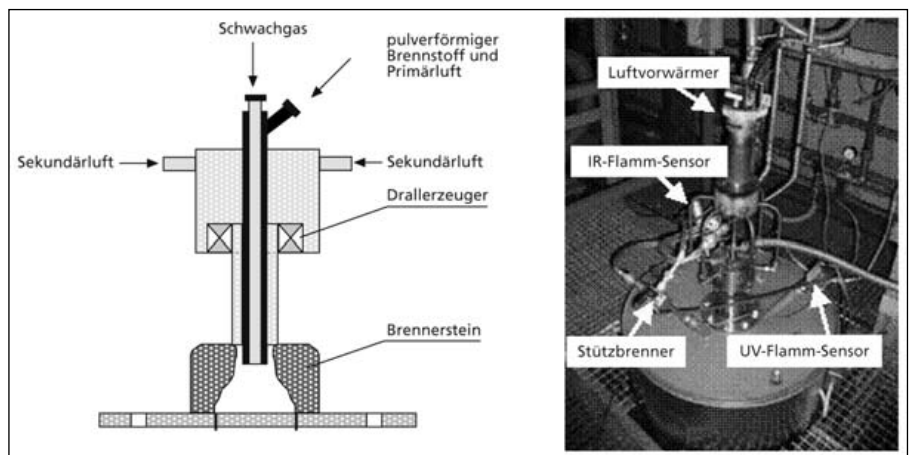


Abbildung 19: Brenner-Konstruktion des Verschlackungsreaktors

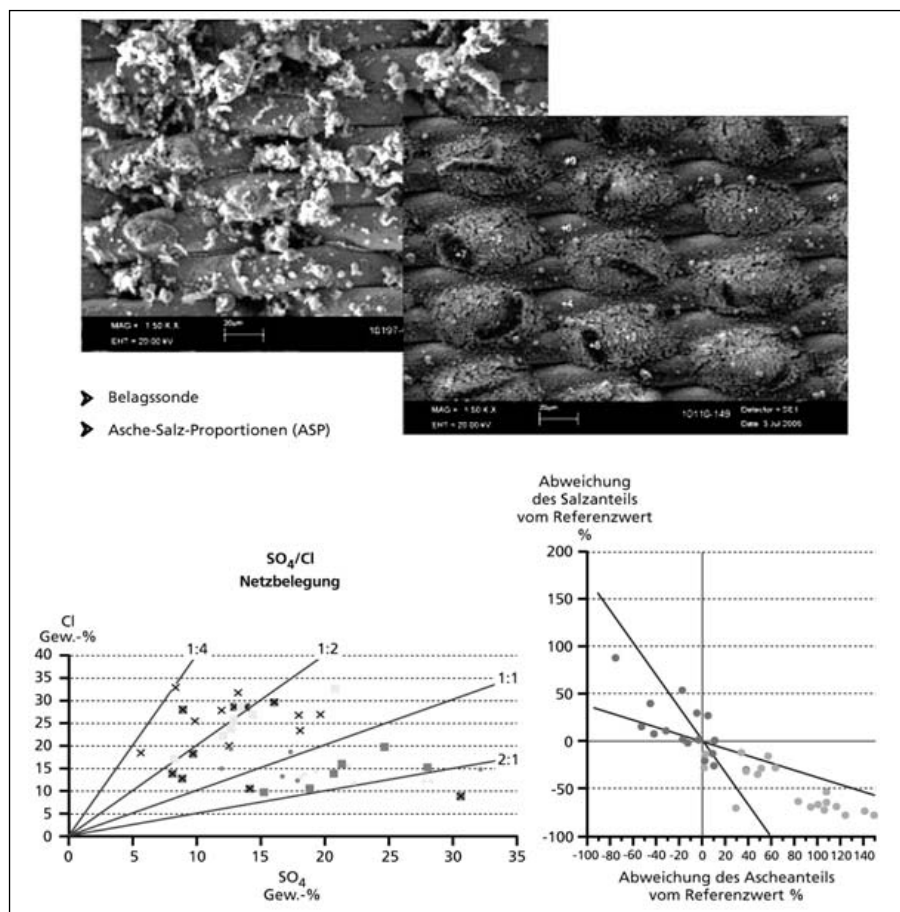


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Betriebsweise und Belagsentwicklung

Quelle: Beckmann/Spiegel⁶

und Erfahrungen an realen Praxisanlagen im Zusammenhang betrachtet werden, um letztendlich geeignete Kriterien für die brennstofftechnischen Eigenschaften im Hinblick auf ein Klassifikationssystem abzuleiten. Hier besteht noch ein erheblicher Untersuchungsbedarf, dem sich unter anderem ein laufendes Forschungsvorhaben¹ widmet. ♦

Literatur

- AiF-Forschungsvorhaben:** Substitution von Regelbrennstoffen durch Ersatzbrennstoffe. AiF-Nr. 14894 BG. Beckmann, M., Bauhaus-Universität Weimar; Scholz, R., Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik; Flamme, S., Institut für Abfall, Abwasser, Site und Facility Management e. V., Ahlen; Seifert, H., Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Technische Chemie, Eggenstein-Leopoldshafen
- Arvelakis, S.; Gehrman, H.-J.; Beckmann, M.; Koukios, E. G.:** Effect of Leaching on the Ash Behavior of Olive Residue during Fluidized Bed Gasification. Proc. INFUB 2000, 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 11.-14.04.2000
- Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Rüppel, F.:** Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3 – Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung, Logistik und Verwertung, Deposition der Schwerfraktion. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003, S. 213-230
- Beckmann, M.; Scholz, R.:** Residence Time Behaviour of Solid Material at Grate Systems. Proc. INFUB 2000, 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 11.-14.04.2000
- Beckmann, M.; Scholz, R.:** Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung. Teil 1 und Teil 2. In: ZKG International 52 (1999), Nr. 6, S. 287-303 und Nr. 8, S. 411-419
- Beckmann, M.; Scholz, R.:** Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr. 5, S. 218-229
- Beckmann, M.; Scholz, R.; Horeni, M.:** Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich – energetisch. Witzhausen. XVIII. Kasseler Abfallwirtschaftskonferenz, 25.-27. April 2006, S. 180-205
- Beckmann, M.; Spiegel, W.:** Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 209-264
- Beckmann, M.; Thomé-Kozmiensky, K. J.:** Das Ersatzbrennstoffproblem – Aufkommen, Charakterisierung und Einsatz. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 5 – Herstellung und Verwertung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 3-32
- Beckmann, M.; Volke, K.; Hohmann, H.:** Burn-out behaviour of organic matter in ceramic mass of honeycomb brick depending on the firing conditions. In: Stark, J. (Hrsg.): Internationale Baustofftagung Ibausil am 24. bis 27. September 2003, Tagungsbericht Band 1. F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland
- Bleckwehl, S.; Kolb, T.; Seifert, H.; Herden, H.:** Verbrennungsverhalten von MBA-Fractionen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, S. 417-426
- Bleckwehl, S.; Leibold, H.; Walter, R.; Seifert, H.; Rückert, F. U.; Schnell, U.; Hein, K. R. G.:** Einfluss der zeitlichen und örtlichen Luftstufung auf das Abbrandverhalten von stückigem Brennstoff in einem Batch-Prozess. GVC-Jahrestagung, Wiesbaden, 2002
- Carlowitz, O.; Jeschar, R.:** Entwicklung eines variablen Dralrbrennkammersystems zur Erzeugung hoher Energieumsetzungsleistungen. In: Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 32 (1980)
- Dryer, F. L.; Glasman, I.:** 14th International Symposium On Combustion. Combustion Institute Pittsburgh, 1973
- Flamme, S.; Gallenkemper, B.:** Inhaltsstoffe von Sekundärbrennstoffen. Ableitung der Qualitätssicherung der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V. In: Müll und Abfall (2001), Nr. 12, S. 699-704
- Gehrman, H.-J.:** Mathematische Modellierung und experimentelle Untersuchungen zur Pyrolyse von Abfällen in Drehrohrsystemen. Dissertation eingereicht im Sommer 2005, an der Bauhaus-Universität Weimar
- Glorius, T.:** Stand der Gütesicherung von Sekundärbrennstoffen und Bedeutung für die klassische MVA. VDI-Seminar 430407, Neuss, 09./10.12.2002 oder In: Grundmann, J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe. Aufbereitung, Mitverbrennung und Monoverbrennung von festen Siedlungsabfällen. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG, 2002, S. 83-107
- Gohlke, O.; Busch, M.; Horn, J.; Martin, J.:** Nachhaltige Abfallbehandlung mit dem SyncomPlus-Verfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Optimierungspotential der Abfallverbrennung. Neuruppin: TK Verlag, 2003, S. 211-223
- Knörr, A.:** Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Berichte 1192, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1995
- Kolb, T.; Leuckel, W.:** NO_x-Minderung durch 3-stufige Verbrennung – Einfluss von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM-Seminar, Stuttgart, 1988
- Leuckel, W.:** Swirl Intensities, Swirl Types and Energy Losses of Different Swirl Generating Devices. IFRF Ijuiden, November 1967, G 02/a/16
- Levenspiel, O.:** Chemical Reaction Engineering. John Wiley and Sons. New York, 1972
- Malek, C.; Scholz, R.; Jeschar, R.:** Vereinfachte Modellierung der Stickstoffoxidbildung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Ausbrandes bei einer Staubfeuerung. VDI-Berichte Nr. 1090, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1993
- Metschke, J.; Spiegel, W.:** Systematisierung und Bewertung von verfügbaren Maßnahmen zur Korrosionsminderung in der betrieblichen Praxis von MVA mittels partikelförmiger Rauchgasbestandteile. Endbericht EU 22, 12/2004, im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz unter Beteiligung des Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), verfügbar unter www.chemin.de
- Prochaska, M.:** EBS-Charakterisierung in der EU. Erschienen in: SIDAF, Schriftenreihe 18/ 2005, S. 79-86
- Scholz, R.; Beckmann, M.:** Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI-Berichte Nr. 895, Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1991
- Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.:** Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner, 2001
- Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.:** Zur Thermodynamik von Freistrahlern. In: Gas-Wärme-International 33 (1984), Nr. 1
- Spiegel, W.; Herzog, T.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.:** Belagsgeschichten. Vortrag am 2. Diskussionsforum „Rauchgasseitige Dampferzeugerkorrosion“ in Freiberg, 2005, verfügbar unter www.chemin.de
- Spiegel, W.; Herzog, T.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.:** Dynamische chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen aufgrund spezieller Belagsentwicklungen: Häufiger Befund in Abfall- und Biomasse-gefeuerten Dampferzeugern. In: VGB PowerTech (2005), Nr. 1/2, S. 89-97
- Weber, R.:** Characterization of alternative fuels. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, S. 699-708
- Winkler, G.; Krüger, S.; Beckmann, M.:** Herstellung von Biomassebriketts aus Fraktionen einer Kompostanlage. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006

Dieser Beitrag basiert auf der Veröffentlichung: Beckmann, M.; Scholz, R.: Biomasse und Ersatzbrennstoffe als schwierige Brennstoffe. In: Thomé-Kozmiensky, Karl J.; Beckmann, Michael (Hrsg.): Energie aus Abfall. Band 1. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, S. 105 – 137. ISBN: 3-935317-24-7. Wir danken den Autoren sowie den Herausgebern für die Nachdruckerlaubnis.

Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann, Bauhaus-Universität Weimar, Lehrstuhl Verfahren und Umwelt, Coudraystraße 11C, D-99423 Weimar, Tel. 03643-584675, Fax 03643-584803, eMail: michael.beckmann@uni-weimar.de, Internet: www.uni-weimar.de/luv/.

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Scholz, Professor für Technische Thermodynamik, Abteilung für Technische Thermodynamik und Energiesystemtechnik. Adresse: Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik, Agricolastraße 4, D-38678 Clausthal-Zellerfeld, Tel. 05323.72-2032, Fax: -72-4862, eMail: scholz@ievb.tu-clausthal.de, Internet: www.ievb.tu-clausthal.de/index.de.html.