

# Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen hinsichtlich brennstofftechnischer Eigenschaften

Michael Beckmann, Sokesimbone Ncube<sup>1</sup>

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>BRENNSTOFFTECHNISCHE EIGENSCHAFTEN.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>METHODEN ZUR CHARAKTERISIERUNG DER BRENNSTOFFTECHNISCHEN EIGENSCHAFTEN .....</b>	<b>15</b>
3.1	UNTERSUCHUNG DER ZÜNDGESCHWINDIGKEIT UND DES ABBRANDVERHALTENS .	15
3.2	ENTGASUNGSGESCHWINDIGKEIT UND VERSCHLACKUNGSVERHALTEN/ABLAGERUNGEN .....	27
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>32</b>

---

<sup>1</sup> Bauhaus Universität Weimar, Lehrstuhl Verfahren und Umwelt , Weimar

## 1 Einleitung

Ersatzbrennstoffe und Biomassebrennstoffe werden in den Bereichen der Kraftwerksindustrie und der Grundstoffindustrie in Monoverbrennungsanlagen und in Co-Verbrennungsanlagen eingesetzt. Aus den Erfahrungen mit diesen Brennstoffen – insbesondere im Hinblick auf die Energieumsetzungsdichte, das Zünd- und Ausbrandverhalten, das Verschlackungs- und Korrosionspotenzial - und aus dem Vergleich mit fossilen Regelbrennstoffen sind Biomassebrennstoffe und Ersatzbrennstoffe als schwierige Brennstoffe einzustufen.

In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst kurz auf die brennstofftechnischen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen und von Biomassebrennstoffen und anhand von Beispielen deren Einfluss auf das Verbrennungsverhalten diskutiert. Danach werden verschiedene Methoden zur Bestimmung von brennstofftechnischen Eigenschaften dieser Brennstoffe erläutert.

## 2 Brennstofftechnische Eigenschaften

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

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

- niedrige Energiedichte,
- schlechtes Schüttgutverhalten,
- usw.

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

Ersatzbrennstoff	Heizwert $H_u$ [MJ/kg]	Wasser [Ma.-%]	Asche [Ma.-%]	Flüchtige [Ma.-%]	Gruppe
Granulat	40,8	1	0,5	99,4	h-1
Kunststoffe, Folien	37,7	3,1	1	98,7	
Mischkunststoffe	34	4,9	6		
Altreifen	33,1	2	2,7		
BPG	24,5	17	8,2	66,8	h-2
Spuckstoffe	19,5	17,8	9,9	62,4	
Heizwertreiche MBA-Fraktionen	14,4 - 22,8	3,6 - 33,7	15,1 - 17,1		
Tiermehl	18	4,6	22		h-3
Altholz	17	8 - 50	0,5	81,3	
Trockenstabilat	15 - 18	~ 15	28,9	70 - 80*	
Klärschlamm	1 - 14-	3 - 80	7 - 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:  $h_u = 24$  MJ/kg, Flüchtige: 55 Ma.-%

Steinkohle:  $h_u = 30$  MJ/kg, Flüchtige: 25 Ma.-%

Für den Einsatz fossiler Brennstoffe – Kohle, Erdöl, Erdgas usw. – bei industriellen Hochtemperaturverfahren, wie dem Brennen von Zementklinker oder im Bereich der Energieumwandlung in Kraftwerksanlagen, liegen umfangreiche Untersuchungen und Erfahrungen zur Optimierung der Prozessführung 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, z.B.
  - Elementaranalyse – C , H, O, N, Cl, S,
  - Kurzanalyse - H<sub>2</sub>O, flüchtige Bestandteile,
  - Spurenanalyse z.B. K, Ca, Mg,
  
- mechanische, z.B.
  - Korngröße,
  - Schüttdichte,
  
- kalorische, z.B.
  - Heizwert,
  - Verbrennungstemperatur,
  
- Reaktionstechnische, z.B.
  - Entgasungsgeschwindigkeit,
  - Zündtemperatur,
  - Abbrandgeschwindigkeit,
  - Verschlackungsneigung,

Eigenschaften unterteilen (z.B. [3], [34]).

Bei der Beurteilung der Eigenschaften eines Brennstoffes sind selbstverständlich die jeweiligen prozesstechnischen Randbedingungen einzubeziehen. D.h., bestimmte Kriterien werden immer im Zusammenhang mit dem jeweiligen *Einsatzgebiet*, dem *technischen Prozess* und den jeweiligen *Apparaten* festgelegt.

Die folgenden Beispiele von Biomassebrennstoffen sollen darauf aufmerksam machen, dass es wichtig ist, die v.g. brennstofftechnischen Eigenschaften genau zu analysieren. Es können ganz verschiedene Kriterien oder Parameter sein, 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 Eigenschaften auf. Große Unterschiede bestehen hinsichtlich der 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 der Verwertung der Asche sehr interessant. Die Asche enthält einen sehr hohen Anteil an Silizium und ist daher auch als Wertstoff z.B. 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 hinsichtlich der Temperatursteuerung (Isolierung und Wärmeauskopplung usw., s.u. Maßnahmen zur Steuerung der Haupteinflussgrößen) zu beachten.

Brennstoffeigenschaften		Einheit	Brennstoff	
			Reisspelzen	Zuckerrüben- schnitzel
<b>chemische Eigenschaften</b>				
<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	-	-	
<i>Summe einschl. Asche</i>	<i>Ma.-% wf</i>	<i>100,00</i>	<i>100,00</i>	
<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	
Silizium	g/kg wf	75,00	0,15	
<i>Ascheanalyse</i>				
Erweichungstemperatur	°C	> 950	1036	
Halbkugeltemperatur	°C	1430	1125	
Fließtemperatur	°C	1467	1170	
<b>mechanische Eigenschaften</b>				
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	90 - 110	ca. 300	
<b>kalorische Eigenschaften</b>				
unterer Heizwert	MJ/kg wf	16,4	16,8	
Verbrennungstemperatur (adiabat, Lambda = 1,0)	°C	1961	1905	
Verbrennungstemperatur (adiabat, Lambda = 1,6)	°C	1397	1373	
Mindestsauerstoffbedarf	m <sup>3</sup> /kg	0,76	0,74	
Mindestluftbedarf	m <sup>3</sup> /kg	3,62	3,50	
Mindestabgasvolumen	m <sup>3</sup> /kg	6,39	6,32	

Tabelle 2: Chemische und kalorische Eigenschaften von Reisspelzen und Zuckerrübenschnitzel.

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 fallen zunächst der niedrige Chlor- und hohe Schwefelgehalt bzw. das hohe Schwefel- zu Chlorverhältnis 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 (z.B. K<sub>2</sub>O) und -salze, wie Kaliumchlorid (KCl)

und Kaliumsulfat ( $K_2SO_4$ ). Insbesondere Kaliumoxid mit einem Schmelzpunkt von ca. 740 °C und Kaliumchlorid mit einem Schmelzpunkt von 772 °C sind im Hinblick auf Ablagerungen gefährlich. In Bild 1 ist u.a. 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 (z.B. Wärmeübertragerflächen), deren Temperatur unterhalb der jeweiligen Schmelztemperaturen liegt, ab und erstarren. Diese hier sehr verkürzte und einfache Darstellung der Bildung von Ablagerungen ist in der Praxis erheblich komplexer, da auch die Bildung von Mischkomponenten mit Eutektika u.dgl. eintreten können. Tatsächlich ergaben sich bei Versuchen mit Zuckerrübenschnitzel bei der Verbrennung in einem Rostsystem im Technikum bereits nach wenigen Stunden krustenartige Beläge aus Mischsalzen an den Wärmeübertragerflächen.

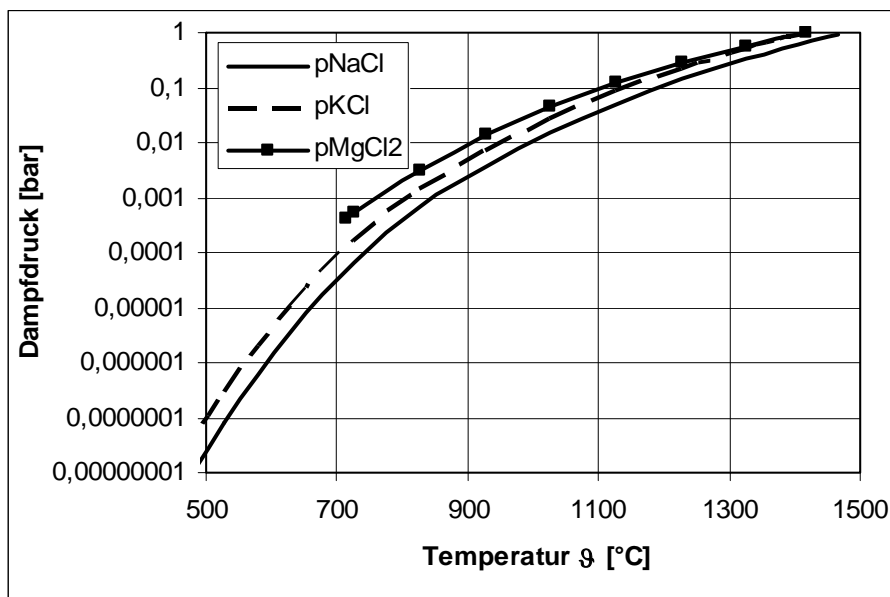


Bild 1: Dampfdruckkurven für NaCl, KCl und MgCl<sub>2</sub>.

In dem nächsten Beispiel, Olivenkerne (Tabelle 3), ist auch besonderes Augenmerk auf die Spurenanalyse, insbesondere der Asche, zu legen. Der hohe Anteil an Alkali- 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, ggf. mit einer Additivzugabe (s.u.)

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. Das Bild 2 zeigt die nach dem Zusammenbruch entnommenen Proben, die Verbackungen sind deutlich zu sehen.

Brennstoffeigenschaften		Einheit	Brennstoff	
			Oliven- rückstände, unbehandelt	Oliven- rückstände, behandelt
<b>chemische Eigenschaften</b>				
<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 einschl. 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 <sub>2</sub> O	Ma.-%	32,20	6,17	
Na <sub>2</sub> O	Ma.-%	8,90	3,84	
CaO	Ma.-%	21,30	21,15	
MgO	Ma.-%	7,90	5,47	
SiO <sub>2</sub>	Ma.-%	32,60	18,43	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ma.-%	6,03	3,97	
SO <sub>3</sub>	Ma.-%	4,97	n. analysiert	
Cl	Ma.-%	1,43	0,41	
Erweichungstemperatur	°C	< 880 °C	-	
<b>mechanische Eigenschaften</b>				
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>	830	850	
<b>kalorische Eigenschaften</b>				
unterer Heizwert	MJ/kg wf	20,8	19,2	
Verbrennungstemperatur (adiabat, Lambda = 1,0)	°C	2267	2034	
Verbrennungstemperatur (adiabat, Lambda = 1,6)	°C	1603	1436	
Mindestsauerstoffbedarf	m <sup>3</sup> /kg	0,96	1,00	
Mindestluftbedarf	m <sup>3</sup> /kg	4,59	4,77	
Mindestabgasvolumen	m <sup>3</sup> /kg	7,98	8,28	

Tabelle 3: Chemische und kalorische Eigenschaften von Olivenkernen [2].



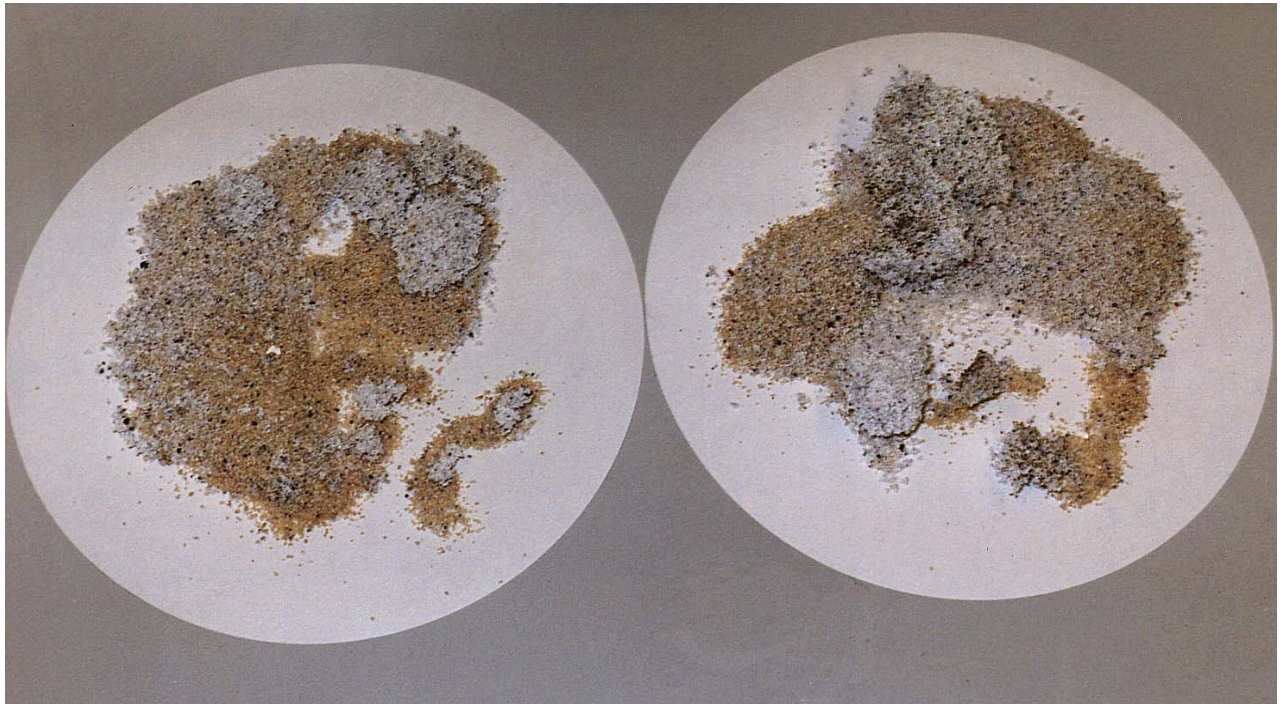


Bild 2: Sinterung von Olivenkernen und Bettmaterial bei der Vergasung in der Wirbelschicht.

In Tabelle 4 sind Brennstoffeigenschaften von Biomassebriketts [7] und Altholz zusammengefasst. Auffällig bei den Biomassebriketts ist zunächst der hohe Gesamtchlorgehalt. Im Zusammenhang mit dem Beispiel Zuckerrübenschnitzel (Tabelle 2) zeigte sich, dass ein niedriger Chlorgehalt nicht zwangsläufig ein geringes Korrosionspotenzial bedeutet. Zur Einschätzung des Korrosionspotenzials eines Brennstoffes genügt es nicht, den Chlorgehalt allein zu wissen. Entscheidend sind die Bindungsform (organisch oder anorganisch), d.h. die Bindung selbst (z.B. PVC, KCl, NaCl) und das komplexe Zusammenwirken der weiteren Bestandteile wie z.B. Alkalien, Schwefel, Schwermetallen usw. Organisch gebundenes Chlor findet sich zumeist in Brennstoffen mit hohem Kunststoffgehalt (hauptsächlich PVC) wie z.B. BRAM oder EBS. Der anorganisch gebundene Chloranteil beträgt bei diesen Brennstoffen maximal 2 % [36]. Aus Untersuchungen zur thermischen Zersetzung von PVC unter Heliumatmosphäre und einer Aufheizrate von 20 K/min ist bekannt, dass bei ca. 300 °C die Abspaltung von Chlor nahezu quantitativ erfolgt und sich HCl bildet [37]. Im Gegensatz zu EBS liegen ca. 95 % des Gesamtchlorgehaltes von Biomassebriketts (hergestellt aus Fraktionen von Kompostanlagen) in Form von Alkali- und Erdalkalichloriden (anorganisch gebundenes Chlor) vor, die abhängig vom Temperaturniveau und  $\text{SO}_2$ -Konzentration als Chloride (Bild 1) oder über

Sulfatisierungsreaktionen als Sulfate mit der Folge der Bildung von Chlor ( $\text{HCl}$  und  $\text{Cl}_2$ ) freigesetzt werden können.

Mit dem Verbrennungsabgas werden diese flüchtigen Chloride zu den konvektiven Wärmetauscherflächen transportiert. Da die verschiedenen Salzspezies (Alkali- und Erdalkalichloride) bei unterschiedlichen Temperaturen in Sättigung treten, kommt es zu einer fraktionierten Ablagerung der Salze in den Belägen auf den Wärmetauscherflächen [38].

Im Zusammenhang mit diesem Sachverhalt wurden Verbrennungsversuche in einem Batch-Reaktor mit den Biomassebriketts durchgeführt. Zur qualitativen Bestimmung von Bestandteilen des Verbrennungsgases, die an *kalten* Dampferzeugerwänden und Rohren Beläge bilden können, wurde eine mit Druckluft gekühlte Sonde eingesetzt. Bei Feuerraumtemperaturen von ca. 900 bis 1000 °C wurde die Oberflächentemperatur der Sonde auf ca. 300 °C abgekühlt. An dieser *Kühlfalle* kam es zur Ausbildung von Belägen, die dann im Labor auf ihren Chlorgehalt untersucht wurden. Bei den durchgeführten Versuchen wurden nur geringe Ablagerungen an der Sonde festgestellt, der Chlorgehalt der Beläge betrug 5 bis 7 Ma.-%, was üblichen Werten von Chlorgehalten in Ablagerungen von Biomasseanlagen entspricht. In Belägen von Abfallverbrennungsanlagen sind – je nach untersuchtem Bereich - zwischen 5 und 15 Ma.-% enthalten.

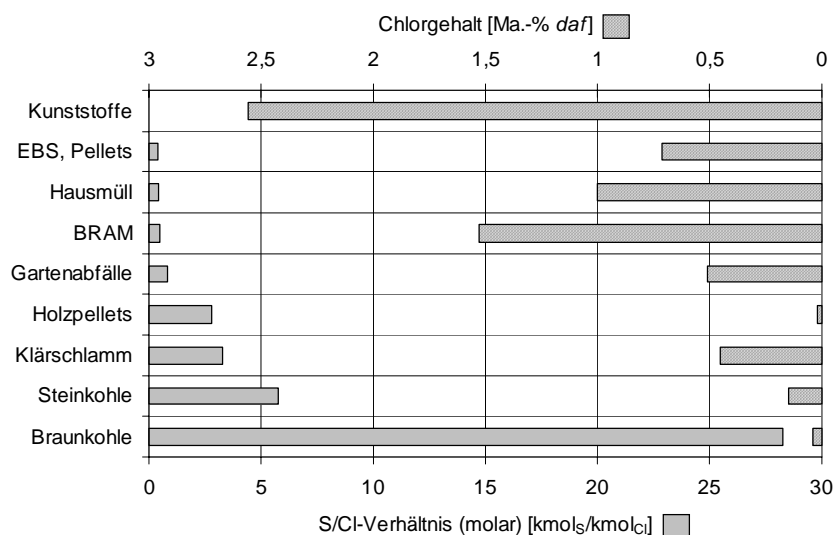


Bild 3: Chlorgehalt und molares Verhältnis Schwefel zu Chlor für ausgewählte Regelbrennstoffe, Biomassebrennstoffe und Ersatzbrennstoffe [40].

Quellen: Kunststoffe, Klärschlamm, Braunkohle, Steinkohle: [41]; EBS, Pellets, Gartenabfälle: [42]; Hausmüll:[43], BRAM:[44]; Holzpellets:[45].

Im Hinblick auf das Korrosionsrisiko muss weiter darauf hingewiesen werden, dass bei den Biomassebrennstoffen (z.B. Holzpellets oder Gartenabfälle) das Verhältnis Schwefel zu Chlor deutlich niedriger ist, als bei Regelbrennstoffen wie Braun- und Steinkohle (Bild 3).

Brennstoffeigenschaften	Einheit	Brennstoff		
		Biomassebriketts	Altholzschnitzel <sup>1</sup>	Altholzschnitzel <sup>2</sup>
<b>chemische Eigenschaften</b>				
<i>Elementaranalyse</i>				
Kohlenstoff	Ma. % wf			45
Wasserstoff	Ma. % wf			5,63
Stickstoff	Ma. % wf			0,376
Sauerstoff	Ma. % wf			36,37
Schwefel	Ma. % wf	0,51	0,06	0
Chlor <sub>ges.</sub>	Ma. % wf	0,574	0,0453	0,1225
Chlor <sub>anorg.</sub>	Ma. % wf	0,534	0,0329	
S/Cl Verhältnis	mol/mol	0,89	1,32	0,00
Fluor	Ma. % wf	0,0086	<0,001	
Summe einschließlich Asche				100
<i>Kurzanalyse</i>				
Wassergehalt	Ma. % roh	17,6	45,5	20
Asche	Ma. % wf	32,4	1	12,5
flüchtige Bestandteile	Ma. % wf			
gebundener Kohlenstoff	Ma. % wf			
<i>Spurenanalyse</i>				
As	mg/kg	<2	<2	
Pb	mg/kg	68	52	
Cd	mg/kg	1,5	<0,6	
Cr <sub>ges.</sub>	mg/kg	200	<5	
Cu	mg/kg	116	5	
Hg	mg/kg	0,08	<0,07	
<i>Aschaanalyse</i>				
K <sub>2</sub> O	Ma. % wf	3,9	2,8	
Na <sub>2</sub> O	Ma. % wf	1,4	2,7	
CaO	Ma. % wf			
MgO	Ma. % wf	1,8	3,9	
SiO <sub>2</sub>	Ma. % wf			
Erweichungstemperatur	°C	1170	1160	
Halbkugeltemperatur	°C	1190	1180	
Fließtemperatur	°C	1370	1190	
<b>mechanische Eigenschaften</b>				
Schüttdichte	kg/m <sup>3</sup>			150
<b>kalorische Eigenschaften</b>				
untere Heizwert	MJ/kg wf	13,24	18,28	18,98
Verbrennungstemp (adiabat, Lambda = 1,0)	°C			2549
Verbrennungstemp (adiabat, Lambda = 1,6)	°C			1839
Mindestsauerstoffbedarf	m <sup>3</sup> /kg			0,72
Mindestluftbedarf	m <sup>3</sup> /kg			3,46
Mindestabgasvolumen	m <sup>3</sup> /kg			4,16

Tabelle 4: Chemische und kalorische Eigenschaften von Biomassebriketts und Altholzschnitzel<sup>1</sup> [7] und Altholzschnitzel<sup>2</sup> [8].

Die Beispiele sollen zeigen, dass es i.d.R. nicht möglich ist, mit einzelnen wenigen Parametern einen Brennstoff zu charakterisieren. Vielmehr sind labortechnische Untersuchungen in Verbindung mit Untersuchungen im Pilotmaßstab, bei denen die Verhältnisse von Großanlagen simuliert werden können durchzuführen und diese Ergebnisse 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 liegen deutlich weniger Daten bezüglich der Brennstoffeigenschaften vor als für Biomassen. Zunächst hat man aus den Erfahrungen beim Einsatz von Ersatzbrennstoffen in verschiedenen Kraftwerken und Zementwerken [46], [47], [48] Anforderungen (Tabelle 5 und Tabelle 6) abgeleitet.

Einsatzbereiche	Quelle	Kraftwerke Median der Einzelanforderungen		Pyrolysevorsichtanlage eines Kraftwerks	
		Eckardt		Eckardt	
	Einheit	Maximalwerte	Praxiswerte	Maximalwerte	Praxiswerte
<b>1. Chemische Eigenschaften</b>					
Wassergehalt	Ma.-% OS	20	–	20 – 30	–
Aschegehalt	Ma.-% TS	20	–	k.A.	–
Schwefel	Ma.-% TS	0,9	–	1	–
Chlor	Ma.-% TS	1	0,75	3	1,62
Fluor	Ma.-% TS	0,08	–	0,2	–
Stickstoff	Ma.-% TS				
Aluminium element.	Ma.-% TS				
<b>Schwermetalle</b>					
Cadmium	mg/kg TS	5	3	21	10
Thallium	mg/kg TS	2	1	20	4,5
Quecksilber	mg/kg TS	1	0,6	0,9	0,5
Arsen	mg/kg TS	20	9	45	20
Kobalt	mg/kg TS	12	8	54	50
Nickel	mg/kg TS	100	50	55	50
Selen	mg/kg TS	1/10	k.A.	k.A.	k.A.
Tellur	mg/kg TS	5/21	k.A.	k.A.	k.A.
Antimon	mg/kg TS	52	25	68	50
Blei	mg/kg TS	280	50	495	250
Chrom	mg/kg TS	150	40	453	200
Kupfer	mg/kg TS	600	100	2.100	1.500
Mangan	mg/kg TS	200	50	645	360
Vanadium	mg/kg TS	25	10	115	25
Zinn	mg/kg TS	40	10	104	100
Zink	mg/kg TS	1.000	k.A.	k.A.	k.A.
Beryllium	mg/kg TS	2	0,4	k.A.	k.A.
Natrium + Kalium	mg/kg TS				
Aschezusammensetzung		keine Einschätzung möglich		k.A.	
Ascheschmelzverhalten		keine Einschätzung möglich, laufende Untersuchungen in einigen Kraftwerken		k.A.	
<b>2. Mechanische Eigenschaften</b>					
maximale Korngröße (Maximalwerte)	mm	20			
		Staubfeuerung: 20 Wirbelschicht: 50		Zerkleinerung vor Ort auf < 200	
<b>Anlieferungsform/Schüttdichte</b>					
flugfähiges Material (Fluff)	t/m <sup>3</sup>	0,2 – 0,3 (6 Anlagen)		Anlieferung in Ballen,	
anpeltiertes Material	t/m <sup>3</sup>	k.A. (1 Anlage, Braunkohlekraftwerk)		lose Schüttung	
Störstoffe		sehr hohe Anforderung an die Störstoff-freiheit (Metalle, Mineralien, Holz, Hartkunststoffe, Langteile)		k.A.	
Staubgehalt					
<b>3. Kalorische Eigenschaften</b>					
Mindestheizwert	MJ/kg	13		11	
		Steinkohlekraftwerke: 14, Braunkohlekraftwerke: 11			
Durchschnittsheizwert	MJ/kg	17		–	

Tabelle 5: Spezifikationen für Ersatzbrennstoffe (EBS) für Kraftwerke nach Literaturangaben.

Einsatzbereiche	Quelle	Richtwerte der BGS e.V.		Zementwerke Median der Einzelanforderungen	
		BGS		Eckardt	
	Einheit	Medianwert <sup>4)</sup>	80. Perzentilwert <sup>4)</sup>	Maximalwerte	Praxiswerte
<b>1. Chemische Eigenschaften</b>					
Wassergehalt	Ma.-% OS			25	–
Aschegehalt	Ma.-% TS			20	–
Schwefel	Ma.-% TS			1	–
Chlor	Ma.-% TS			1	0,75
Fluor	Ma.-% TS			0,07	–
Stickstoff	Ma.-% TS				
Aluminium element.	Ma.-% TS				
<b>Schwermetalle</b>					
Cadmium	mg/kg TS	4	9	9	4
Thallium	mg/kg TS	1	2	2	1
Quecksilber	mg/kg TS	0,6	1,2	1,2	0,6
Arsen	mg/kg TS	5	13	13	5
Kobalt	mg/kg TS	6	12	12	6
Nickel	mg/kg TS	25 <sup>1)</sup> /80 <sup>2)</sup>	50 <sup>1)</sup> /160 <sup>2)</sup>	100	25
Selen	mg/kg TS			5	3
Tellur	mg/kg TS			5	3
Antimon	mg/kg TS	25 <sup>5)</sup>	60 <sup>5)</sup>	60	25
Blei	mg/kg TS	70 <sup>1)</sup> /190 <sup>2)</sup>	200 <sup>1)</sup> /– <sup>3)</sup>	200	70
Chrom	mg/kg TS	40 <sup>1)</sup> /125 <sup>2)</sup>	120 <sup>1)</sup> /250 <sup>2)</sup>	120	40
Kupfer	mg/kg TS	120 <sup>1)</sup> /350 <sup>2)</sup>	– <sup>3)</sup> /– <sup>3)</sup>	300	100
Mangan	mg/kg TS	50 <sup>1)</sup> /250 <sup>2)</sup>	100 <sup>1)</sup> /500 <sup>2)</sup>	125	50
Vanadium	mg/kg TS	10	25	25	10
Zinn	mg/kg TS	30	70	70	30
Zink	mg/kg TS			k.A.	k.A.
Beryllium	mg/kg TS			2	0,5
Natrium + Kalium	mg/kg TS				
Aschezusammensetzung				überwiegend individuelle Festlegung	
Ascheschmelzverhalten				k.A.	
<b>2. Mechanische Eigenschaften</b>					
maximale Korngröße (Maximalwerte)	mm			30	
				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalzinatorf.: 35, für flächiges Material bis zu 200 mm</li> <li>• Primärf.: 10 – 15 für Hartkunststoffe</li> </ul>	
<b>Anlieferungsform/Schüttdichte</b>					
flugfähiges Material (Fluff)	t/m <sup>3</sup>				0,1 – 0,3 (9 Anlagen)
anpelletiertes Material	t/m <sup>3</sup>				0,3 (1 Anlage, ZWS)
Störstoffe				hohe Anforderung an die Störstofffreiheit (Metalle, Mineralien, Holz, Hartkunststoffe, Langteile)	
Staubgehalt					
<b>3. Kalorische Eigenschaften</b>					
Mindestheizwert	MJ/kg			18	
				Primärfeuerung: 20, Kalzinatorfeuerung: 14/18	
Durchschnittsheizwert	MJ/kg				–

Tabelle 6: Spezifikationen für Ersatzbrennstoffe (EBS) der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V. (BGS) und für Zementwerke nach Literaturangaben.

<sup>1)</sup> Für Sekundärbrennstoff aus produktionsspezifischen Abfällen.

<sup>2)</sup> Für Sekundärbrennstoff aus den heizwertreichen Fraktionen von Siedlungsabfällen.

<sup>3)</sup> Festlegung erst bei gesicherter Datenlage aus der Sekundärbrennstoffaufbereitung.

(Erste Erfahrungen zeigen für die 80. Perzentile im Sekundärbrennstoff aus produktionsspezifischen Abfällen Werte für Kupfer von 500 mg/kg, bei den Sekundärbrennstoffen aus den heizwertreichen Fraktionen von Siedlungsabfällen für Kupfer von 1.000 mg/kg und für Blei von 500 mg/kg. Bei den Kupferwerten sind im Einzelfall Überschreitungen aufgrund von Inhomogenitäten in der Analysenprobe feststellbar.)

<sup>4)</sup> Die o.g. Schwermetallgehalte sind gültig ab einem Heizwert von  $H_{u,TS} = 16$  MJ/kg für heizwertreiche Fraktionen aus Siedlungsabfällen und ab einem Heizwert von  $H_{u,TS} = 20$  MJ/kg für produktionsspezifische Abfälle. Bei Unterschreitung dieser Heizwerte sind die o.g. Werte entsprechend linear abzusenken, eine Erhöhung ist nicht zugelassen.

<sup>5)</sup> Bei Anwendung des Königswasser-Druckaufschlusses sind die Richtwerte um 100 % zu erhöhen.

Für Ersatzbrennstoffe müssen im Hinblick auf die o.g. Eigenschaften die zugehörigen Charakterisierungsmethoden und Bewertungskriterien auf der Basis der vorhandenen Erfahrungen von unterschiedlichen Primärbrennstoffen noch abgeleitet und z.T. neu entwickelt werden. Für die chemischen, mechanischen und kalorischen Eigenschaften sind insbesondere bei den Bestimmungsmethoden bereits erste Fortschritte zu verzeichnen (siehe [5]). Schwierig stellt sich im Vergleich dazu die Ermittlung reaktionstechnischer Parameter dar. Auf Untersuchungsmöglichkeiten dieser Brennstoffeigenschaften bei Ersatzbrennstoffen wird im Folgenden eingegangen.

### **3 Methoden zur Charakterisierung der Brennstofftechnischen Eigenschaften**

#### **3.1 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 zur Erwärmung des Brennstoffes und der Verbrennungsluft von Umgebungstemperatur auf Zündtemperatur erforderlich ist. Da die Zündung selbst jedoch als ein Anlaufvorgang betrachtet werden muss und nicht nur von einer bestimmten Zündtemperatur sondern auch maßgeblich von der Geschwindigkeit der Wärmeaufnahme, dem Verbrennungsluftmassenstrom, der Verbrennungslufttemperatur, der Strömungsgeschwindigkeit im Bett bzw. der Relativgeschwindigkeit zwischen Korn und Verbrennungsluft und der Korngröße abhängt, sind für genauere Aussagen in der Regel experimentelle Untersuchungen zum Zündverhalten verschiedener Brennstoffe erforderlich.

Für diese Untersuchungen kommen u.a. folgende Methoden in Frage:

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

### *Zündreaktor*

In dieser Versuchsanordnung wird eine pulverförmige Probenmasse von ca. 300 mg in einen bis auf 1100 °C vorgewärmten, horizontal positionierten Reaktor eingebracht.

Mittels eines optischen Sensors und der installierten Thermoelemente (siehe Bild 4 und Bild 5) kann die Temperaturverteilung über dem Strömungsweg ermittelt werden.

Eckdaten des Zündreaktors:

- Probenmasse: 300 mg,
- Innendurchmesser: 300 mm,
- Heizleistung: 6 kW,
- Länge des Eindüsvorgangs: 20 ms,
- Austrittsgeschwindigkeit: 20 m/s (entspricht in etwa den Bedingungen wie sie bei industriellen Staubbrennern vorherrschen),
- Ofenatmosphäre: oxidierend, kohlendioxidangereichert zur Minderung des Sauerstoffpartialdrucks,
- Variationsmöglichkeiten: Änderung der Ofen- bzw. Eindüsparameter und/oder der Probenparameter.



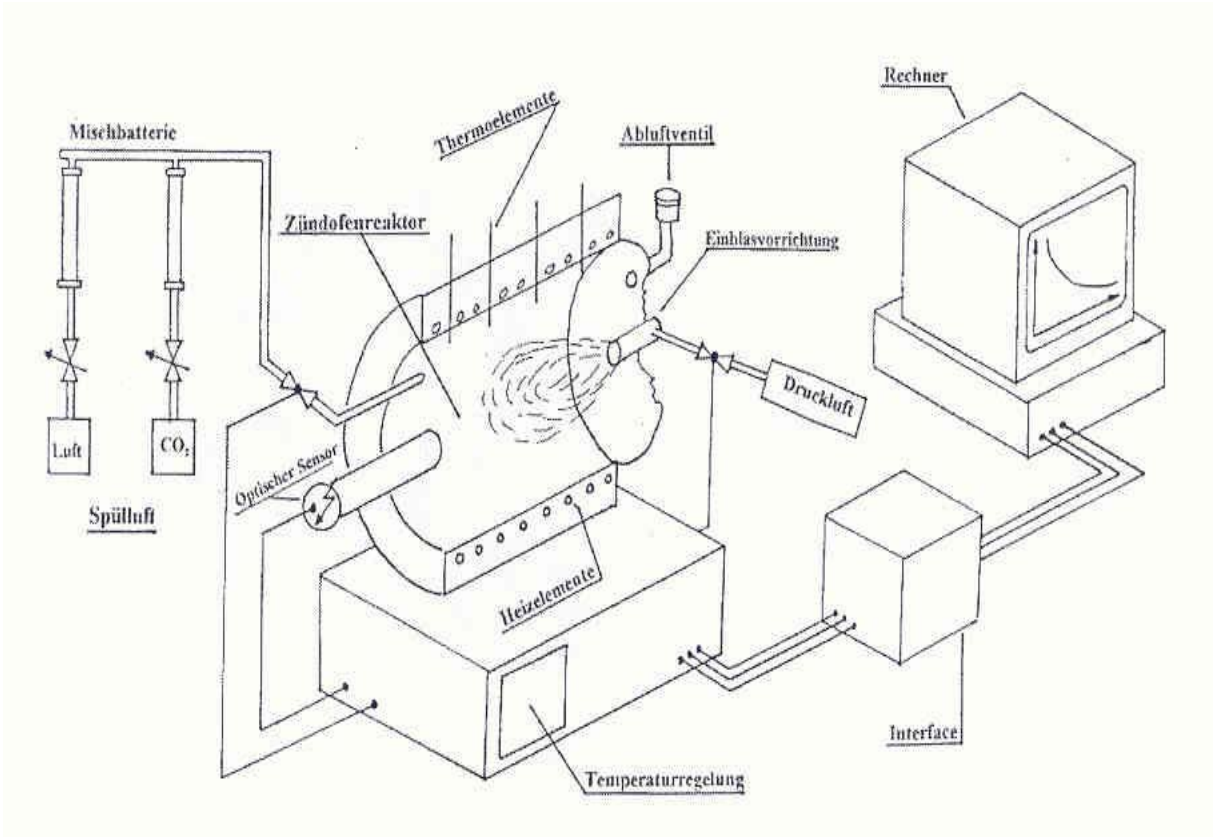


Bild 4: Schema des Zündreaktors.

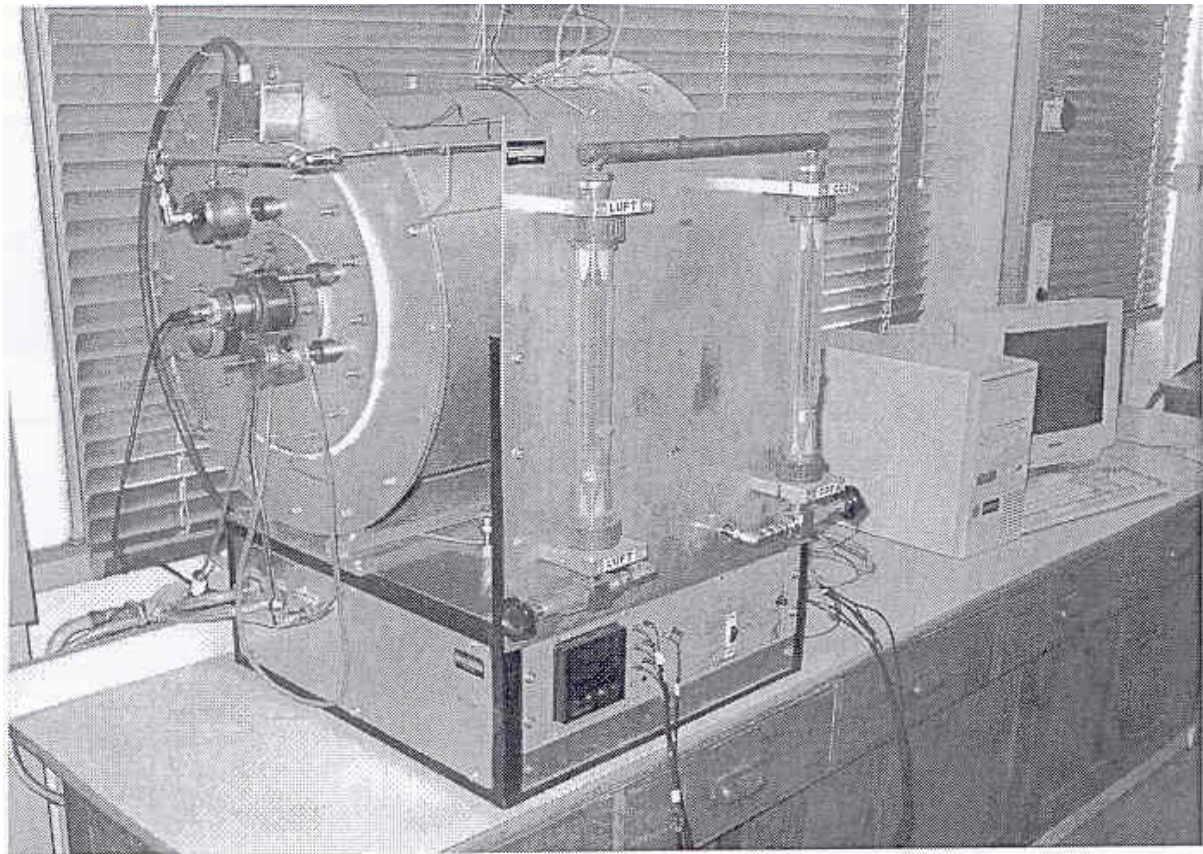


Bild 5: Photo des Zündreaktors (TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik).

### *Labor-Thermowaage*

Mit einer Labor-Thermowaage (Bild 6, Bild 7) können Zünd- und Abbrandverhalten unter unterschiedlichen Temperatur-Zeit-Bedingungen und unterschiedlichen Gasatmosphären, reaktionskinetische Konstanten usw. 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, wie sie bei industriellen Prozessen (Drehrohrofen, Brennkammer) vorherrschen, simulieren [13].

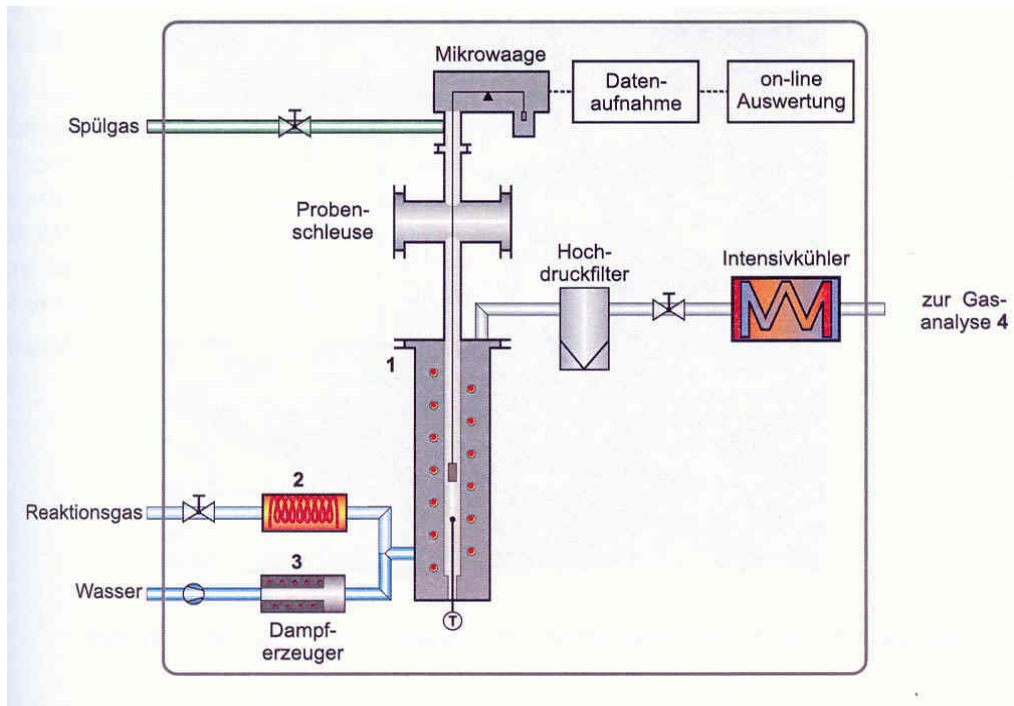


Bild 6: Schema der Labor-Thermowaage.

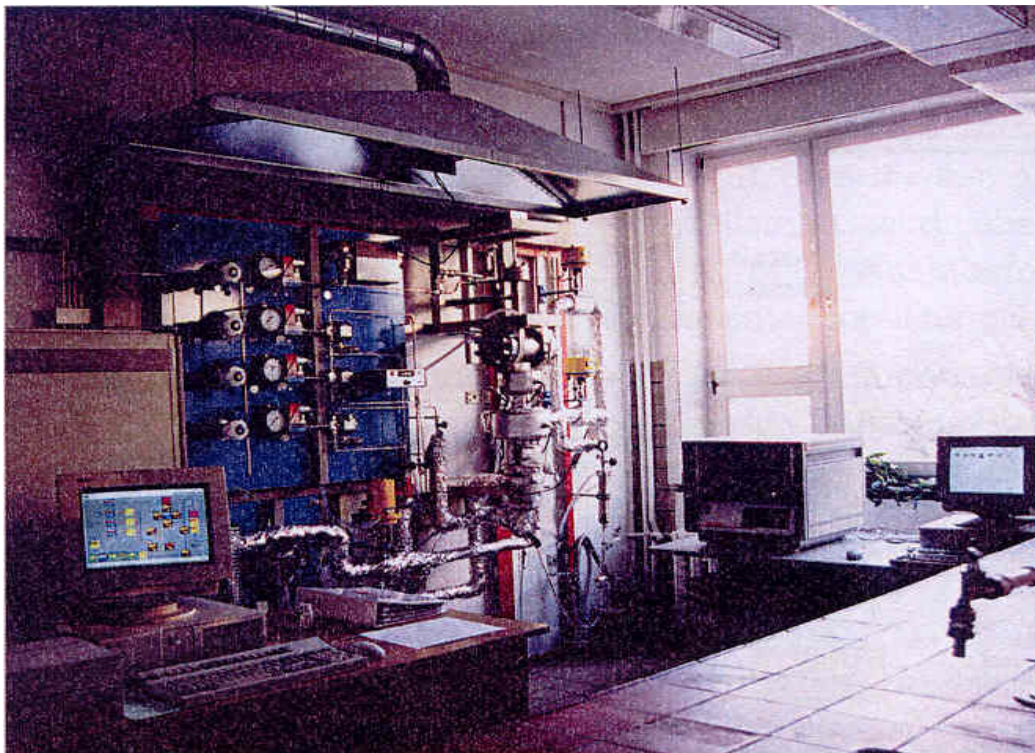


Bild 7: Foto der Labor-Thermowaage.

#### Eckdaten der Labor-Thermowaage:

- Standard-TGA-Hochdruckreaktor (1100 °C, 100 bar), ((1) in Bild 6),
- Gasversorgung für Reaktionsgasherstellung aus drei oder mehr (bis zu ca. zehn) Gaskomponenten mit und ohne Wasserdampf (2),
- Wasserdampferzeuger (100 bar) (3),
- Gasanalysator (Massenspektrometer Balzers, m/Z = 1 bis 200),
- Probenmasse bis 1 g,
- Reaktionsgasatmosphäre: inert, oxidierend, reduzierend, korrosiv,
- Temperaturbedingungen: isotherm, nicht-isotherm mit  $dT/dt = 20 \text{ °K}$  bis  $100 \text{ °K/min}$ .

#### Untersuchungsmöglichkeiten:

- TG, DTG-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 Laborthermowaagen durch solche in so genannten Technischen Thermowaagen (siehe Bild 8, Bild 9) zu ergänzen.

#### Eckdaten der Technischen Thermowaage:

- Hitzebeständiger Stahl als Reaktionskammer ((1) in Bild 8) Länge 0,8 m, Durchmesser 0,143 m,
- Beheizter Röhrenofen (2) für Aufheizraten bis zu 20 K/min bis auf 1200 °C
- Wägebereich 0 bis 3 kg, Auflösung 0,1 g,
- Atmosphäre: Stickstoff als Spül- und Kühlgas im Waagenraum, Reaktionsgas in Reaktionskammer aus Gasflaschen (Stickstoff, Luft mit Sauerstoff-

angereicherte Luft usw.), Keramikugeln (siehe 5 in Bild 8) dienen der Vergleichmäßigung des Strömungsprofils.

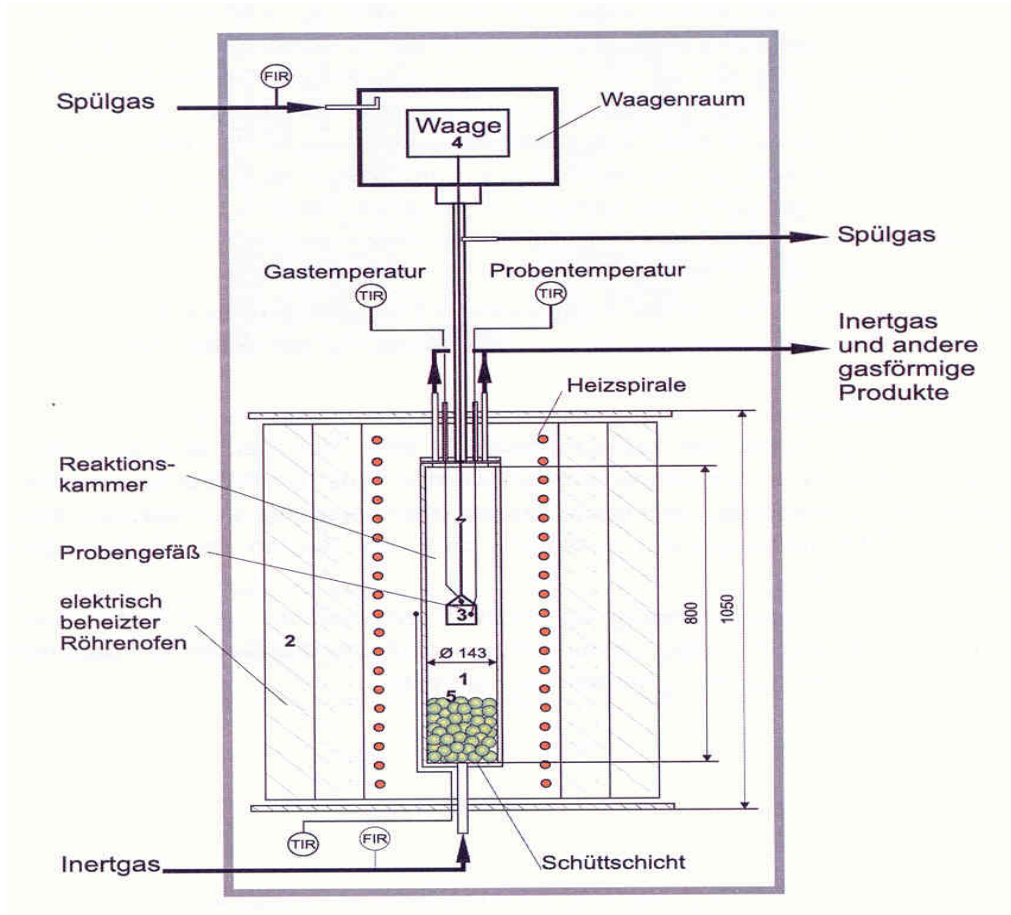


Bild 8: Schema der Technischen Thermowaage (TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik).

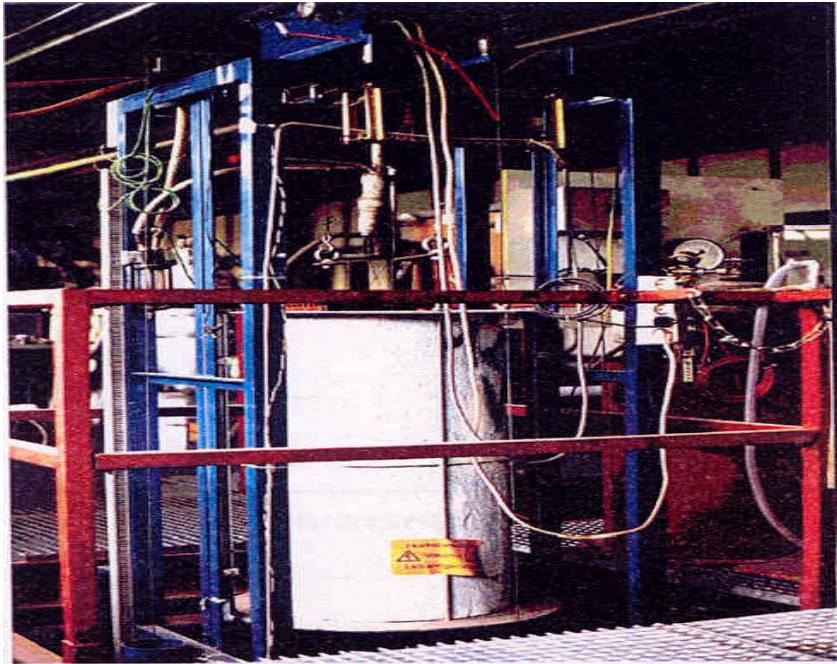


Bild 9: Foto der Technischen Thermowaage (TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik).

Zur Ermittlung kinetischer Daten z.B. im Hinblick auf Fragestellungen des Scale-up liefert der Vergleich der Versuchsergebnisse der beiden unterschiedlichen Thermowaagen geeignete Anhaltspunkte (z.B. [19]). In Bild 10 zeigen die Kurven die Massenabnahme über der Zeit für Kohle gleicher Körnung in inerter Atmosphäre für verschiedene Aufheizgeschwindigkeiten in einer Laborthermowaage und in einer Technischen Thermowaage. Aus den Kurvenverläufen ist der Einfluss der unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeit – einerseits durch das Aufheizprogramm vorgegeben, andererseits aufgrund der unterschiedlichen Probenmasse in den beiden Thermowaagen.

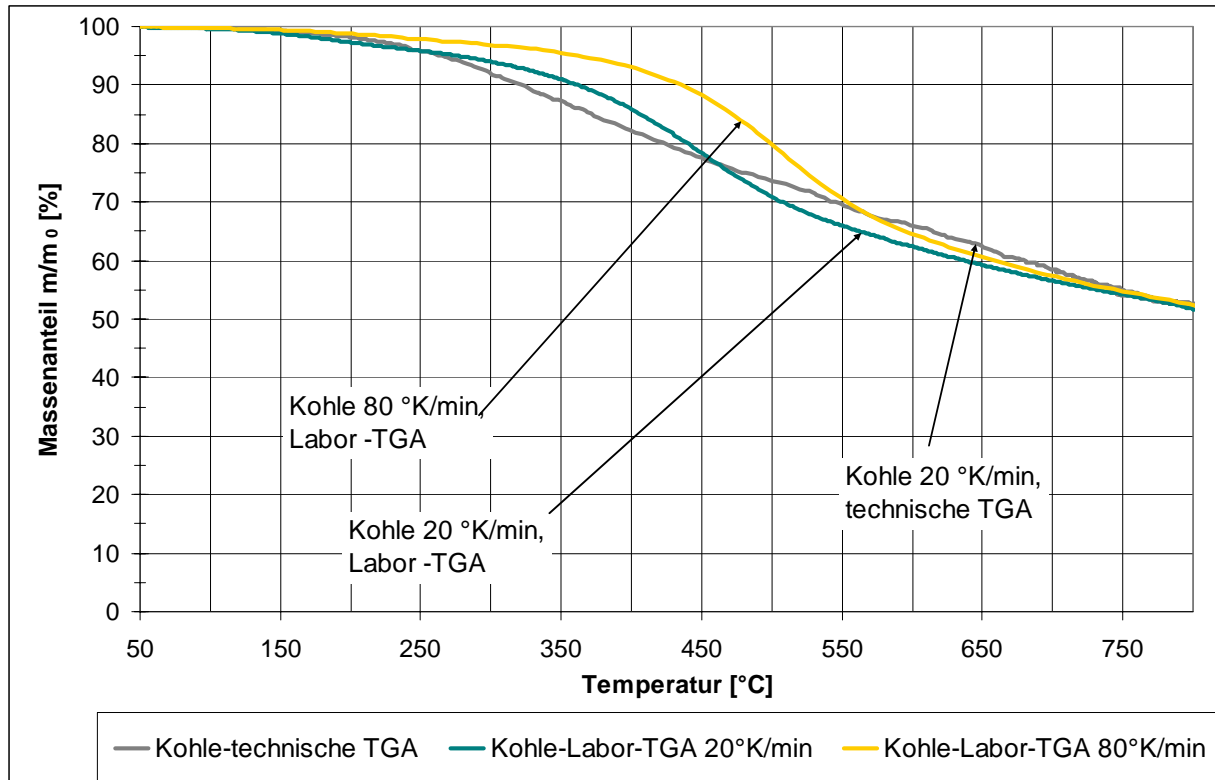


Bild 10: Vergleich der Untersuchungsergebnisse zum Umsatz von Kohle in inerter Atmosphäre in einer Labor- und einer Technischen Thermowaage.

### Batch-Reaktor

Für die Ermittlung von kinetischen Daten für den Feststoffumsatz im Festbett oder in der Wirbelschicht (Zündverhalten und Abbrandgeschwindigkeit) können weiter so genannte Batch-Reaktoren eingesetzt werden [6], [14], [15], [35]. Bild 11 und Bild 12 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 (s.u.) 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: ca. 40 kW,
  - Feuerraumwandtemperatur: 850 bis 950 °C,
  - Max. Brennstoffvolumen: ca. 32 l (400 mm x 265 mm x 300 mm),

- Rostfläche: ca. 11 dm<sup>2</sup>.
- Parametervariationen:
  - Primärluftvolumenstrom
    - über Blenden-Messstrecke 1: 20 bis 200 m<sup>3</sup>/h i.B.,
    - über Blenden-Messstrecke 2: 5 bis 50 m<sup>3</sup>/h i.B..
  - Sekundärluftvolumenstrom
    - über Blenden-Messstrecke : 3 bis 30 m<sup>3</sup>/h i.B..
  - Verhältnis Primärluft/Sekundärluft: ca. 8:1,
  - Zufuhr weiterer Reaktionsgase (siehe Haupteinflussgrößen), auch vorgewärmt möglich,
  - Einsatz von Bettmaterial (ebenfalls vorgewärmt, z.B. im Hinblick auf die Simulation von Bedingungen einer Wirbelschicht).

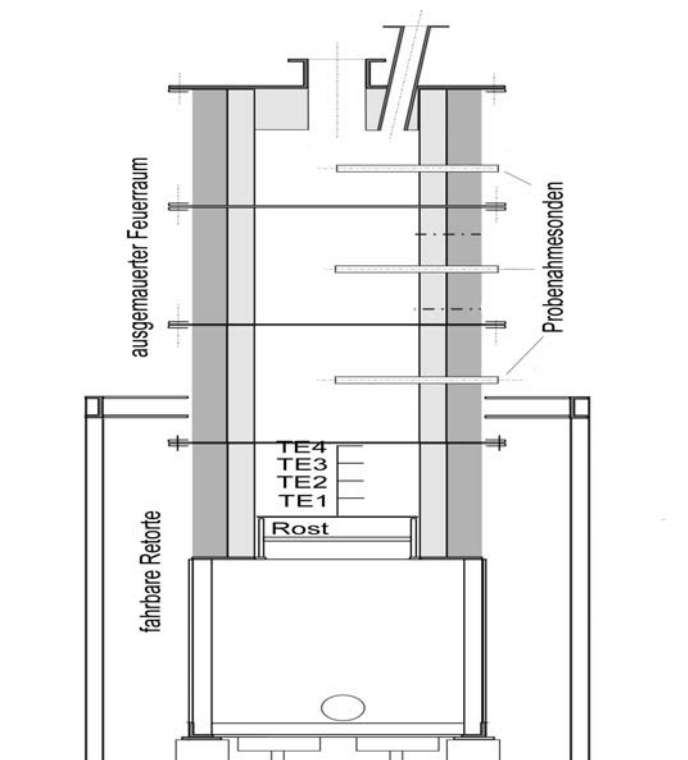


Bild 11: Schema des Batch-Reaktors.





Bild 12: Foto des Batch-Reaktors.

Während des Versuches werden verschiedene Temperaturen im Bett und im Feuerraum, die Gaskonzentrationen unmittelbar oberhalb des Bettes und im Feuerraum, Druckverlust der Schüttung usw. ermittelt. Beispielhaft zeigt das Bild 13 die Verläufe der Betttemperaturen für eine Schüttung von zwei verschiedenen Brennstoffen (Biomassebriketts [7] und Altholz). Beide Brennstoffe weisen den gleichen Heizwert von ca. 12 MJ/kg (bezogen auf den Einsatzzustand, d.h. Rohzustand) auf. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich hinsichtlich des Wassergehaltes und des Aschegehaltes (Biomassebrikett: Wasser: 18 Ma.-%, Asche: 35 Ma.-%; Altholz: Wasser: 45 Ma.-%, Asche: 1 Ma.-%). Aus den Temperaturverläufen ist zu erkennen, dass die Biomassebriketts u.a. 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 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 v.g. Messwerte hinaus schließen sich auch Untersuchungen der verbleibenden Asche und des Bettmaterials an. Weiter können auch Belagssonden (s.u.) eingesetzt werden.

Es sei erwähnt, dass im Rahmen eines derzeit laufenden Forschungsvorhabens [1] Proben in drei verschiedenen Batch-Reaktoren in einer Art Ringtest untersucht werden. Der Vergleich der Ergebnisse soll die Festlegung von geeigneten Versuchsbedingungen, die Ergebnisvalidierung und die Ergebnisinterpretation in Hinblick auf das Scale-up und die Klassifizierung unterstützen.

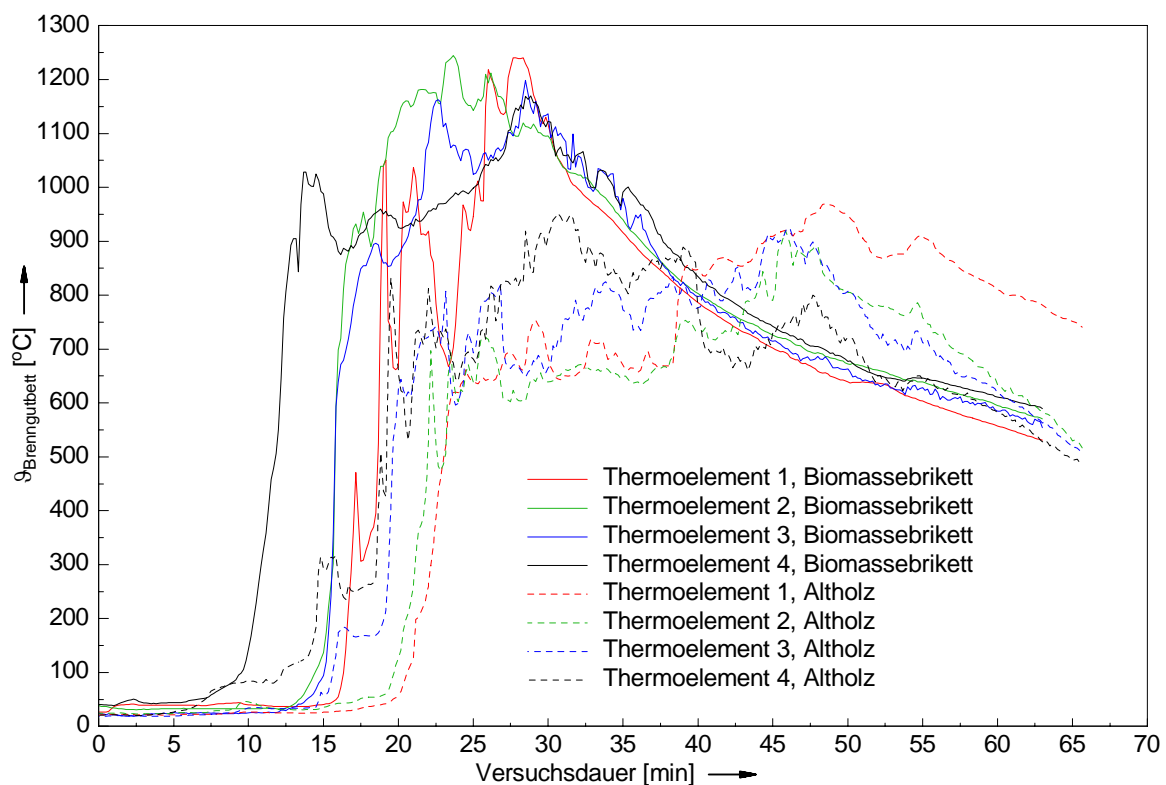


Bild 13: Betttemperaturen (Thermoelement 1 bis 4 über der Betthöhe) über der Versuchsdauer für zwei verschiedene Versuchseinstellungen.

### 3.2 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 Ersatzbrennstoffen und Biomassebrennstoffen in Kraftwerken u. dgl. die Neigung der Brennstoffe zur Ausbildung von Ablagerungen vor deren Einsatz abschätzen zu können. In den Standard-Laborversuchen (Ascheschmelzpunktmikroskop) 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 (Bild 14, Bild 15).

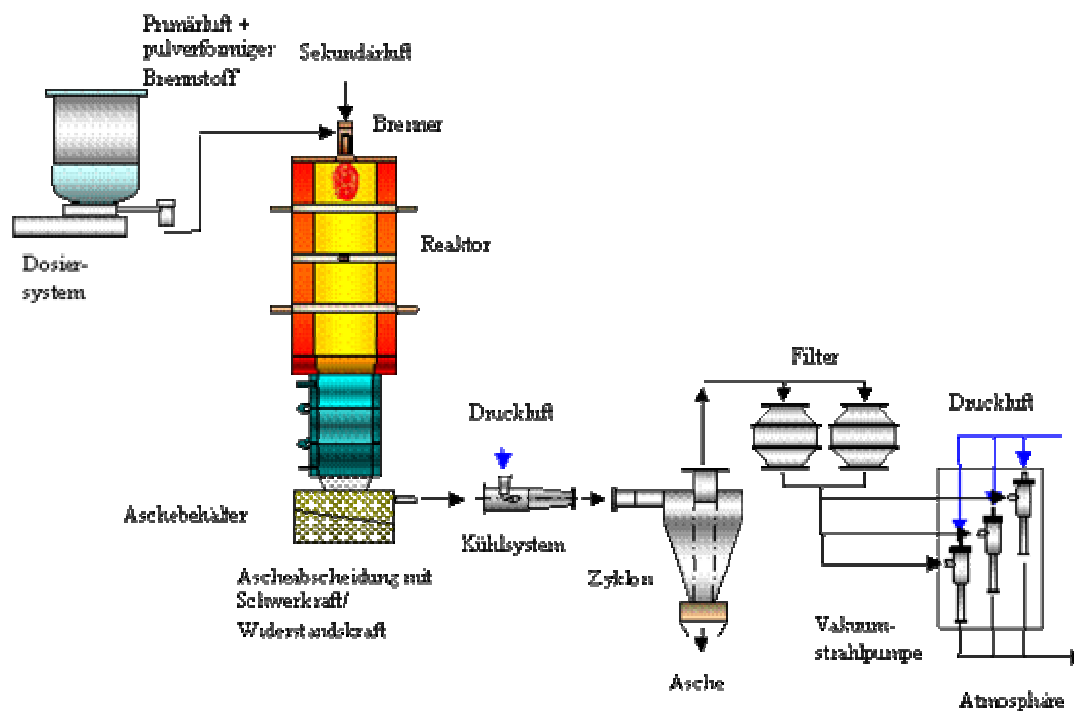


Bild 14: Reaktor zur Untersuchung des Verschlackungsverhaltens von festen Brennstoffen und Mischungen mit Biomassebrennstoffen (TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik).

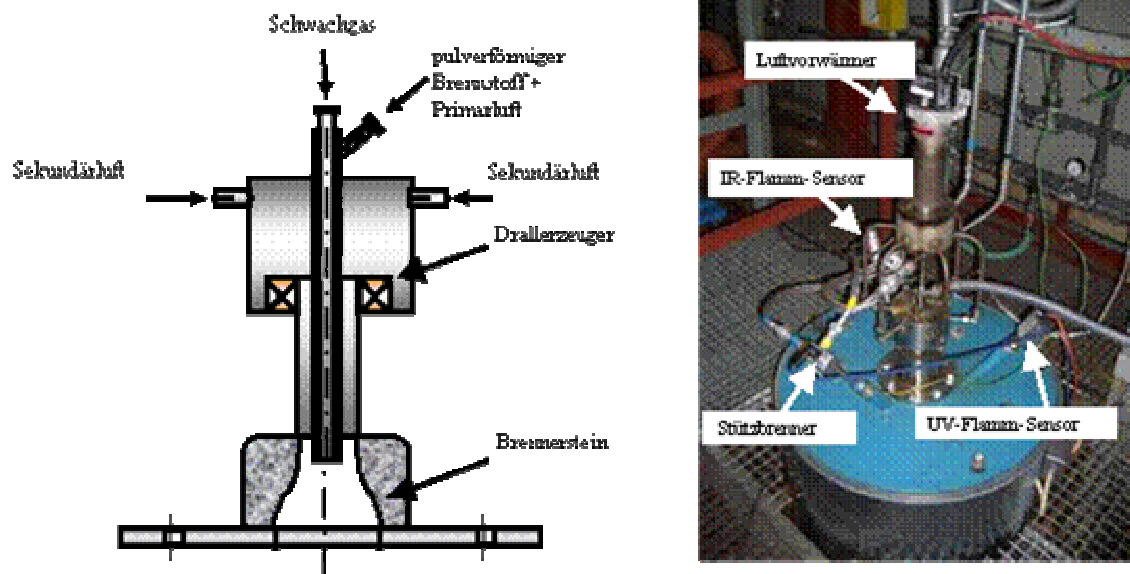


Bild 15: Brenner-Konstruktion des Verschlackungsreaktors (TU Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik).

Eckdaten des Verschlackungsreaktors:

- Thermische Leistung: 50 kW,
- Reaktortemperatur: max. 1400 °C,
- Versuchsdauer: 4 bis 6 Stunden,
- Durchsatz: 2 bis 7 kg/h,
- Heizleistung: 38 kW.

Die Probennahme erfolgt entweder im laufenden Betrieb durch so genannte Belagssonden oder anschließend im Stillstand der Anlage. Bei Einsatz einer Belagssonde im Gasstrom scheidet sich - isokinetisch - die Fracht der physikalisch (fest, flüssig) und stofflich (Silikate, Oxide, Chloride, Sulfate, Hydroxide usw.) 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 (d.h. Messungen bei unterschiedlichen

Gastemperaturen) und/oder durch Vergleich von gezielt unterschiedlichen Betriebssituationen an der gleichen Messposition lassen sich Aussagen zum Verschlackungs- und Korrosionspotenzial ableiten. Die Untersuchungen an dem Verschlackungsreaktor müssen dann im Zusammenhang mit Untersuchungen an realen Anlagen (z.B. Abfallverbrennungsanlagen) ausgewertet werden, um letztendlich geeignete Kriterien für die Bewertung eines Brennstoffes zu erhalten. In Bild 16 sind Ergebnisse aus Untersuchungen an Abfallverbrennungsanlagen dargestellt. Das linke REM-Bild (Länge des Maßstabsbalkens am unteren Bildrand ist 20  $\mu\text{m}$ ) 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 (Abgas-Temperaturen) 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), d.h. Betriebssituationen 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 (Messzeit ca. 30 min., Messposition am Kesselende). Die hier exemplarisch gezeigten blauen und grünen Punkte beziehen sich auf zwei unterschiedliche Betriebsweisen eines Kessels einer Abfallverbrennungsanlage (blau: höhere Dampflast, grün: geringere Dampflast). Entsprechend den Lagefeldern des ASP-Diagramms [27], [32], [33] ist für den Betriebszustand der blauen Punkte ein geringeres Korrosionspotential gegeben als für den der grünen Punkte.

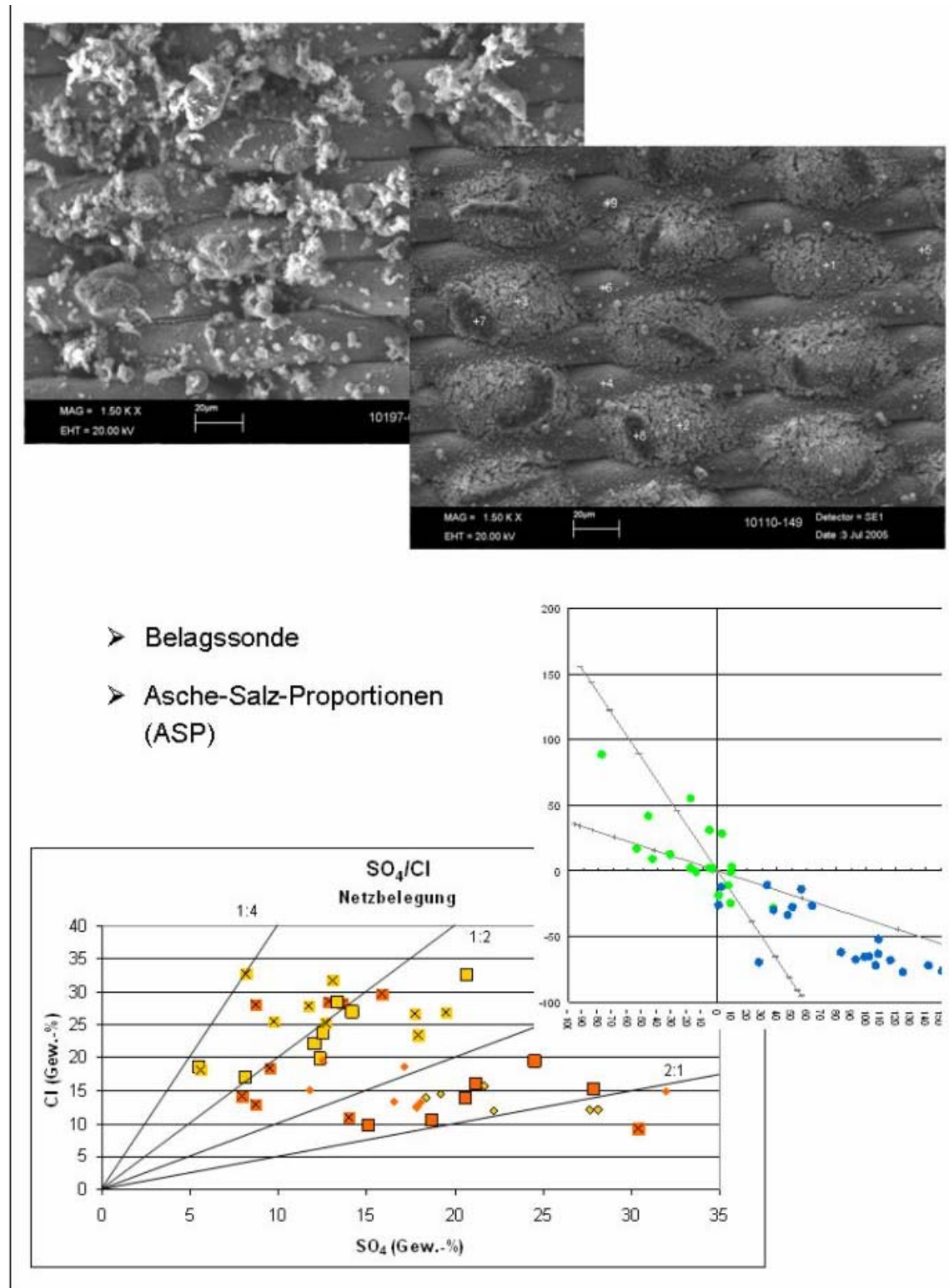


Bild 16: Betriebsweise - Belagsentwicklung (Erläuterung im Text) [11].

Die an den vorgenannten Versuchsanlagen gewonnenen Daten müssen mit Ergebnissen 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 u.a. ein laufendes Forschungsvorhaben [1] widmet.

#### **4 Zusammenfassung**

Ersatzbrennstoffe und Biomassebrennstoffe sind schwierige Brennstoffe, die besondere Anforderungen an die Prozessführung richten. Aus verfahrenstechnischer Sicht gibt es sehr umfangreiche Möglichkeiten zur Prozessgestaltung und -führung. Schwierigkeiten bei der Planung von neuen Anlagen und der Optimierung oder aber auch bei einer beabsichtigten Brennstoffsubstitution ergeben sich aufgrund fehlender und unzureichender Daten zu den brennstofftechnischen Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe und Biomassebrennstoffe. Die Beurteilung der brennstofftechnischen Eigenschaften von Ersatzbrennstoffen und Biomassebrennstoffen ist heute weitestgehend nur auf Grundlage von empirischen Ergebnissen an Großanlagen, d.h. rückwärts gerichtet, möglich und häufig auch mit erheblichen wirtschaftlichen Verlusten verbunden.

Die für die Regelbrennstoffe entwickelten Methoden zur Charakterisierung lassen sich nicht ohne weiteres auf die Ersatzbrennstoffe übertragen. D.h., 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 z.B. Thermowaagen, Zünd-, Verschlackungs- und Batch-Reaktoren, können hierbei 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).

## 5 Literatur

- [1] AiF-Vorschungsvorhaben: 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.
- [2] Arvelakis, S.; Gehrman, H.-J.; Beckmann, M.; Koukios, E. G.: Effect of Leaching on the Ash Behaviour of Olive Residue during Fluidised Bed Gasification. Proc. INFUB 2000, 5th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto, Portugal, 11. - 14.04.2000.
- [3] Beckmann, M.; Horeni, M.; Scholz, R.; Rüppel, F.: Notwendigkeit der Charakterisierung von Ersatzbrennstoffen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3- Immissions- und Gewässerschutz, Qualitätssicherung, Logistik und Verwertung, Deponierung der Schwerfraktion. TK-Verlag Thomé-Kozmiensky, Dez. 2003, ISBN 3-935317-15-8, S.213-230.
- [4] 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.
- [5] Beckmann, M.; Scholz, R.: Energetische Bewertung der Substitution von Brennstoffen durch Ersatzbrennstoffe aus Abfällen bei Hochtemperaturprozessen zur Stoffbehandlung, Teil 1 und Teil 2, ZKG International, 52 (1999) Nr. 6, S. 287-303 und Nr. 8, S. 411-419.
- [6] Beckmann, M.; Scholz, R.: Zum Feststoffumsatz bei Rückständen in Rostsystemen, Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 46 (1994), Nr.5, S. 218-229.
- [7] Winkler, G.; Krüger, S.; Beckmann, M.: Herstellung von Biomassebriketts aus Fraktionen einer Kompostanlage. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Energie aus Abfall, Band 1. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, ISBN 3-935317-24-7, Seiten 335-355.
- [8] Anderl, H.; Kaufmann, K.: Energetische Verwertung von Abfallstoffen in der Wirbelschicht. Erschienen in erschienen in Thomé-Kozmiensky, K.J.:



- Ersatzbrennstoffe 2 - Verwerter, Qualitätskontrolle, Technik, Wirtschaftlichkeit. TK Verlag Neuruppin, 2002, ISBN: 3-935317-08-5, S. 175.
- [9] Verbund 2001: Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen. Schriftreihe Forschung im Verbund, Band 73.
- [10] Beckmann, M.; Scholz, R.; Horeni, M.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. Erschienen in: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung – stofflich – energetisch. Witzenhausen. XVIII. Kasseler Abfallwirtschaftskonferenz, 25. – 27. April 2006. ISBN 3-928673-46-7, S. 180 – 205.
- [11] Beckmann, M.; Spiegel, W.: Optimierung von Abfallverbrennungsanlagen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Optimierung der Abfallverbrennung 3. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2006, ISBN 3-935317-21-2. S. 209 – 264. Tagung Berlin 20. – 22. März 2006.
- [12] Beckmann, M.; Thomé-Kozmiensky, K.J.: Das Ersatzbrennstoffproblem-Aufkommen, Charakterisierung und Einsatz. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Beckmann, M. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 5 – Herstellung und Verwertung. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2005, ISBN: 3-935317-20-4. S. 3- 32.
- [13] Beckmann, M.; Volke, K.; Hohmann, H.: Burn-out behaviour of organic matter in ceramic mass of honeycomb brick depending on the firing conditions, Stark, J. (Hrsg.): Internationale Baustofftagung Ibausil, Tagungsbericht Band 1. am 24. bis 27. September 2003, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Deutschland. ISBN 3-00-010932-3.
- [14] Bleckwehl, S.; Kolb, T.; Seifert, H.; Herden, H.: Verbrennungsverhalten von MBA-Fraktionen. Erschienen in Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2004, ISBN 3-935317-18-2, S. 417 – 426.
- [15] 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.
- [16] Carlowitz, O.; Jeschar, R.: Entwicklung eines variablen Drallbrennkammersystems zur Erzeugung hoher Energieumsetzungsdichten. Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK) 32 (1980).

- [17] Dryer, F.L.; Glasman, I.: 14th International Symposium On Combustion. Combustion Institute Pittsburgh, 1973.
- [18] Flamme, S.; Gallenkemper, B.: Inhaltsstoffe von Sekundärbrennstoffen. Ableitung der Qualitätssicherung der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V., Müll und Abfall, Heft 12/2001, S. 699 – 704.
- [19] Gehrman, H.-J.: Mathematische Modellierung und experimentelle Untersuchungen zur Pyrolyse von Abfällen in Drehrohrsystemen. Dissertation eingereicht im Sommer 2005, an der Bauhaus-Universität Weimar.
- [20] Glorius, Th.: 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. Springer-VDI-Verlag GmbH & Co.KG, Düsseldorf 2002. ISBN 3-935065-10-8. S. 83-107.
- [21] Gohlke, O.; Busch, M.; Horn, J.; Martin, J.: Nachhaltige Abfallbehandlung mit dem SyncomPlus-Verfahren. In: Thomé-Kozmiensky, K.J.: Optimierungspotential der Abfallverbrennung. TK Verlag, Neuruppin, 2003. ISBN 3-935317-13-1. S. 211 – 223.
- [22] Knörr, A.: Thermische Abfallbehandlung mit dem SYNCOM-Verfahren. VDI-Berichte 1192, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- [23] Kolb, T.; Leuckel, W.: NO<sub>x</sub>-Minderung durch 3-stufige Verbrennung - Einfluß von Stöchiometrie und Mischung in der Reaktionszone. 2. TECFLAM- Seminar, Stuttgart, 1988.
- [24] Leuckel, W.: Swirl Intensities, Swirl Types and Energy Losses of Different Swirl Generating Devices. IFRF Ijmuiden, November 1967, G 02/a/16.
- [25] Levenspiel, O.: Chemical Reaction Engineering. John Wiley and Sons. New York, 1972.
- [26] Malek, C.; Scholz, R.; Jeschar, R.: Vereinfachte Modellierung der Stickstoffoxidbildung unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Ausbrandes bei einer Staubfeuerung. VDI-Berichte Nr. 1090, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1993.
- [27] 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](http://www.chemin.de)

- [28] Prochaska, M. EBS-Charakterisierung in der EU. Erschienen in: SIDAF, Schriftenreihe 18/2005. ISBN 3-934409-26-1, S. 79 - 86.
- [29] Scholz, R.; Beckmann, M.: Möglichkeiten der Verbrennungsführung bei Restmüll in Rostfeuerungen. VDI-Berichte Nr. 895, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1991.
- [30] Scholz, R.; Beckmann, M.; Schulenburg, F.: Abfallbehandlung in thermischen Verfahren. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. 2001. ISBN 3-519-00402-X.
- [31] Scholz, R.; Jeschar, R.; Carlowitz, O.: Zur Thermodynamik von Freistrahlen. Gas-Wärme-International 33 (1984) 1.
- [32] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Belagsgeschichten. Vortrag am 2. Diskussionsforum „Rauchgasseitige Dampferzeugerkorrosion“ in Freiberg, 2005, verfügbar unter [www.chemin.de](http://www.chemin.de)
- [33] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Dynamische chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen aufgrund spezieller Belagsentwicklungen: Häufiger Befund in Abfall- und Biomasse-gefeuerten Dampferzeugern. *VGB PowerTech*, Heft 1/2, 2005, S. 89-97.
- [34] Weber, R.: Characterization of alternative fuels. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.: Optimierung der Abfallverbrennung 2. TK Verlag Karl-Thomé-Kozmiensky, 2005, ISBN 3-935317-19-0, S. 699 -708.
- [35] H. Seeger, O Kock, A.I Urban : Experimentelle Bestimmung des Verbrennungsverhaltens von Abfällen, Schriftreihe des Fachgebietes Abfalltechnik Universität Kassel, 2003.
- [36] Heyde, M.; Thiele, A.; Wiethoff, S.: Qualitätssicherungsmaßnahmen für Vorprodukte aus gemischten Abfallquellen. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 4 – Optimierung der Herstellung und der Verwertung. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2004, ISBN 3-935317-18-2, S. 255-266.

- [37] Knümann, R.; Schleussner, M.; Bockhorn, H.: Untersuchungen zur Pyrolyse von PVC und anderen Polymeren. VDI Berichte Nr. 922, VDI-Verlag GmbH Düsseldorf 1991, ISBN 3-18-090922-6, S. 237-246.
- [38] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Belagsgeschichten. Vortrag am 2. Diskussionsforum „Rauchgasseitige Dampferzeugerkorrosion“ in Freiberg, 2005, verfügbar unter [www.chemin.de](http://www.chemin.de).
- [39] Spiegel, W.; Herzog, Th.; Magel, G.; Müller, W.; Schmidl, W.: Dynamische chlorinduzierte Hochtemperaturkorrosion von Verdampfer- und Überhitzerbauteilen aufgrund spezieller Belagsentwicklungen: Häufiger Befund in Abfall- und Biomasse-gefeuerten Dampferzeugern. VGB PowerTech, Heft 1/2, 2005, S. 89-97.
- [40] Beckmann, M.; Scholz, R.; Horeni, M.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen mit hohem Chlorgehalt. Kasseler Abfalltage, 2006.
- [41] Bachhiesl, M.; Tauschitz, J.; Zefferer, H.; Zellinger, G.: Untersuchungen zur thermischen Verwertung von Biomasse und heizwertreichen Abfallfraktionen als Sekundärbrennstoffe in Wärmekraftwerken. Forschung im Verbund Schriftenreihe Band 73, 2001.
- [42] Thomé, E.: Energetische Verwertung von Ersatzbrennstoffen in einem umgebauten Kraftwerkskessel. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: Ersatzbrennstoffe 2 – Verwerter, Qualitätskontrolle, Technik, Wirtschaftlichkeit. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2002, ISBN: 3-935317-08-5, S. 210-211.
- [43] Barin, I.; Igelbüscher, A.; Zenz, F.-R. (ZEUS GmbH): Thermodynamische Analyse der Verfahren zur thermischen Müllentsorgung. Studie im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, 1995.
- [44] Steinbrecht, D.; Neidel, W.: Verbrennung von BRAM in der stationären Wirbelschicht. 4. Dialog Abfallwirtschaft M-V, 21.06.2001 Rostock.
- [45] Clausen, J. Chr.; Schmidt, E. R.: Specifications for Solid Biofuels in Denmark. Erschienen in: Institut für Energiewirtschaft und rationelle Energieanwendung Universität Stuttgart - IER (Hrsg.): Biomasse als Festbrennstoff. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Landwirtschaftsverlag GmbH Münster, ISBN: 3-7843-2821-0.

- 
- [46] Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V.: Sekundärbrennstoffe – Gütersicherung RAL-GZ724, Ausgabe Juni 2001, überarbeitet am 27. Juni 2003
- [47] Eckhardt, S.: Anforderungen an die Aufbereitung von Siedlungs- und Produktionsabfällen zu Ersatzbrennstoffen für die thermische Nutzung in Kraftwerke und industriellen Feuerungsanlagen. Dissertation an der Technischen Universität Dresden im Kooperation Verfahren mit der Hochschule Bremen, Beiträge zu Abfallwirtschaft/ Altlasten Band 41.Pima:Eigenverlag des Forums für Abfallwirtschaft und Altlasten e.V., 2005, S. A76.
- [48] Thiel, S.: Einsatz von Ersatzbrennstoffen aus aufbereiteten Siedlungs- und Gewerbeabfällen in Kohlekraftwerken – Stand, Erfahrungen und Problemfelder – Erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K.J.: Energie aus Abfall – Band 2. TK Verlag Thomé-Kozmiensky Neuruppin 2006, ISBN: 3-935317-24-7, S. 141-192.