

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Biomasseheizkraftwerken auf der Basis von
Pyrolyse-, Vergasungs- und Verbrennungsverfahren durch Erhöhung der
Brennstoffflexibilität und eine prozessorientierte Bewertung von Biomassen***

der Forschungsstelle(n)

Nr. (1,2,3,4), CUTEC-Institut GmbH, TU Dresden/WWS, KIT/ITC, TU Clausthal/IEVB

Das IGF-Vorhaben 17223 BG der Forschungsvereinigung GVT - Forschungs-Gesellschaft
Verfahrens-Technik e.V. (Frankfurt a.M.) wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Clausthal-Zellerfeld, 30.09.2014

Ort, Datum

ppa S. Vodegel

Dr.-Ing. Stefan Vodegel

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Aufgabenstellung	8
3	Änderungen gegenüber der Antragsstellung	10
3.1	Änderungen im Projektbegleitenden Ausschuss	10
3.2	Laufzeitverlängerung	10
3.3	Änderungen Allgemein	10
3.4	Änderungen Forschungsstelle 1 (CUTEC)	10
3.5	Änderungen Forschungsstelle 2 (TU Dresden/VWS)	11
3.6	Änderungen Forschungsstelle 3 (KIT/ITC)	11
3.7	Änderungen Forschungsstelle 4 (TU Clausthal/IEVB)	12
4	Vorgehensweise	13
4.1	Methodische Vorgehensweise	13
4.2	Erläuterung der Arbeitspakete	15
4.3	Projektkoordination und Qualitätssicherung	20
5	Auswahl und Einteilung der Biomassen	21
6	Ergebnisse	23
6.1	Brennstofftechnische Charakterisierung der Biomassen	23
6.1.1	Chemische Brennstoffeigenschaften	24
6.1.2	Kalorische Brennstoffeigenschaften	32
6.1.3	Mechanische Brennstoffeigenschaften	33
6.1.4	Verbrennungstechnische Kenngrößen und Berechnungsansätze	35
6.1.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	39
6.2	Zündverhalten und Thermogravimetrie	42
6.3	Veraschungsverhalten unter reduzierender und oxidierender Atmosphäre	56
6.4	Thermochemische Konversion in Einzelreaktoren	62
6.4.1	Drop tube reactor	62
6.4.2	Batchrostofen	65
6.5	Thermische und mechanische Aufbereitung von Biomassen	69

6.6	Pyrolyse: Massen- und Energiebilanzierung, Gas- und Kokseigenschaften	77
6.6.1	Langsame Pyrolyse	77
6.6.2	Mittelschnelle Pyrolyse	87
6.6.3	Zusammenfassung der Pyrolyseversuche	90
6.7	Erfahrungen zur Festbettvergasung	91
6.8	Wirbelschichtvergasung: Gas- und Ascheeigenschaften, Bilanzierung	97
6.8.1	Errechnung der Enthalpiebilanz	98
6.8.2	Abhängigkeit höhere Kohlenwasserstoffe von Methan	109
6.8.3	Stoffflussanalysen	114
6.8.4	Enthalpiebilanz	118
6.8.5	Ascheerweichung	121
6.8.6	Simulierte Destillation	124
6.9	Wirbelschichtverbrennung: Emissionen und Bilanzierung	128
6.10	Rostverbrennung: Emissionen und Bilanzierung	134
6.11	Staubfeuerung: Emissionen und Bilanzierung	149
6.12	Verschlackungs- und Korrosionsverhalten	162
7	Bewertung und Vergleich.....	168
7.1	Stand der Technik deutscher Biomassekraftwerke.....	168
7.1.1	Datenbeschaffung und –auswertung	168
7.1.2	Entwicklung der Technik	168
7.1.3	Thermochemische Reaktoren	171
7.1.4	Strom- und Wärmeerzeugung	173
7.1.5	Gasreinigung	174
7.2	Ratgeber für Biomasseproduzenten, Ingenieurbüros u. Betreiber	175
7.3	Prozessorientierte Biomassebewertung	177
8	Industrielle Anwendbarkeit der Ergebnisse.....	189
9	Danksagung und Förderhinweis	192
10	Unterschriften	193
11	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	194
12	Verwendete Quellen.....	196

13	Projektspezifische Veröffentlichungen	199
14	Anhänge	200
14.1	Tabellenverzeichnis	200
14.2	Abbildungsverzeichnis	202
14.3	Symbolverzeichnis	211
14.4	Abkürzungsverzeichnis	215
14.5	Analysenwerte der Brennstoffcharakterisierung nach Standardmethoden.....	217
14.6	Koeffizienten zur Berechnung des Ascheschmelzverhaltens	221
14.7	Vergleich Heiz- und Brennwertwertkorrelationen.....	222
14.8	Eigenschaften Einsatzstoffe im Festbettvergaser und ZWSF	223

1 Zusammenfassung

Gemäß Antragstellung wurden drei Teilziele angestrebt:

- Z1:** *Ermittlung der Brennstoffflexibilität bestehender Anlagen. Welches Verfahren weist welche Flexibilität im Hinblick auf den Austausch von Standardbiomassen auf ?*
- Z2:** *Wie muss die Verfahrens- und Apparatechnik bestehender Anlagen mit möglichst geringem Aufwand geändert werden, um neue Biomassen aufnehmen zu können ?*
- Z3:** *Welche verfahrenstechnischen Möglichkeiten ergeben sich beim Einsatz neuer biogener Brennstoffe für die Auslegung von Neuanlagen ?*

Z1: Das Ziel, Aussagen über die Brennstoffflexibilität bestehender Anlagen zu ermitteln, wurde erreicht. In unterschiedlichen Verfahren, wie der Pyrolyse im Drehrohr, der Vergasung im Festbett und der Wirbelschicht sowie der Verbrennung auf dem Rost, in der Wirbelschicht und in einer Brennkammer (Staubfeuerung), wurden neben dem Referenzbrennstoff Naturholzhackschnitzel alternative Brennstoffe, wie z. B. Switchgras, Getreidereststoffe, KUP (Pappelholz) oder Gärreste eingesetzt. Anhand der experimentell ermittelten Ergebnisse konnten Aussagen zum Betriebsverhalten mit Hilfe der im Antrag definierten Kriterien getroffen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Drehrohrpyrolyse, Rostfeuerung (Vorschubrost), Wirbelschichtvergasung und –verbrennung hinsichtlich des Schwankungsbereiches der brennstofftechnischen Eigenschaften eine hohe Brennstoffflexibilität besitzen. Die Brennstoffflexibilität von Staubfeuerungen wird wesentlich durch die Korngröße der Einsatzstoffe limitiert, die in der Regel durch die technischen Spezifikationen, z. B. des Brenners, vorgegeben sind.

Z2: Basierend auf den Ergebnissen zu Z1 können nun in Abhängigkeit der gewählten Apparate und Prozesse prozessorientierte Vorschläge unterbreitet werden, wie die alternativen Biomassen in den bestehenden Verfahren optimal eingesetzt werden könnten.

Die **Pyrolyse**, unabhängig von der Aufheizrate (langsam oder mittelschnell), weist apparatechnisch eine hohe Flexibilität bezüglich der Biomassen auf. Brennstofftechnisch/chemische Hindernisse waren nicht zu finden. Wichtig ist, dass das Material zerkleinert und das Eintragssystem auf die mechanischen Eigenschaften ausgelegt ist. Der Verfahrensparameter Temperatur stellte wesentlich die Produktausbeuten hinsichtlich Koks, Permanentgas und Kondensat ein. Mit den Fraktionen sind unterschiedliche Verwertungen in weiteren Prozessen denkbar.

Für die **Rostfeuerung (Vorschubrost)** gibt es beispielsweise die Option, Biomassen mit niedrigem Ascheerweichungspunkt wie z.B. Getreidereststoffe in einer Mischung mit dem Referenzbrennstoff Holz zu verbrennen, um damit Blockaden durch gesinterte Asche zu verringern. Die Alternative zum Vorschubrost ist ein Wechsel der Technologie, z.B. der Einsatz eines Vibrationsrostes, der auch eine Monoverbrennung von schwierigen Biomassen erlaubt.

Die **Wirbelschichtvergasung und –verbrennung** bieten verschiedene verfahrenstechnische Maßnahmen, um das thermochemische Verhalten zu optimieren. So können bei der thermochemischen Konversion zur Minimierung des Verschlackungsrisikos Additive wie z. B. Kalk eingesetzt werden. Darüber hinaus kann durch eine gezielte Luft- und/oder Brennstoffstufung bei der Verbrennung eine primärseitige Beeinflussung der NO_x-Emissionen erfolgen.

Im Vorhaben konnten alle eingesetzten Biomassen durch Vergasung in einer zirkulierenden Wirbelschicht in 100 h-Dauerversuchen umgesetzt werden.

Um eine Steigerung der Brennstoffflexibilität von **Staubfeuerungen** zu erreichen, sind in Abhängigkeit von der technischen Ausführung des Brenners ggf. umfangreiche Modifizierungsmaßnahmen erforderlich. Beispiele hierfür sind bewegliche Drallerzeuger oder die nachträgliche Installation von Brennstoff- bzw. Luftlanzen (Brennstoff- und/oder Luftstufung), um prozesseitig das Verbrennungsverhalten zu beeinflussen. Der hohe elektrische Aufwand und die ebenfalls hohen Kosten für die Zerkleinerung, insbesondere von holzbasierten Brennstoffen, machen aber die kommerzielle Umsetzung fraglich. Beide Punkte können durch eine thermische Vorbehandlung der Biomassen wie Torrefizierung oder Pyrolyse reduziert werden.

Z3: Die verfahrenstechnischen Möglichkeiten sind für jede Biomasse in jedem Verfahren separat zu erörtern. Hier können keine pauschalen Aussagen getroffen werden. Dies wird besonders am Beispiel des Einsatzes von Biomassen mit unterschiedlichem Brennstoff-N- und -S-Gehalt in einer Zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung (ZWSF) deutlich. Die erwartete Zunahme der NO_x- und SO₂-Konzentrationen im Abgas aufgrund steigender Brennstoff-N- und -S-Gehalte konnte nicht beobachtet werden, was auf das Zusammenspiel von komplexen Vorgängen in der Wirbelschicht zurückzuführen ist.

Auch wenn für die Rostfeuerung ermittelt wurde, dass mit Zunahme der Elemente Chlor, Schwefel und Stickstoff im Brennstoff die Emissionen bei der Verbrennung durch HCl, SO₂ und NO_x steigen werden, ist dennoch die Verteilung insbesondere von Chlor und Schwefel in Gas- und Feststoffphasen, z.B. in Belägen, stark von Stöchiometrie und Temperaturverteilung in den ausgeführten Apparaten sowie der Prozessführung abhängig. Je nach Ziel des Prozesses kann z.B. durch eine vorgeschaltete Pyrolyse die Verteilung der Elemente auf die Gas- bzw. Feststoffphase in Abhängigkeit der Pyrolyseendtemperatur gesteuert werden, um den nachfolgenden Verbrennungsprozess für Gas bzw. den Koks von Schadstoffen zu entfrachten.

Dies wurde am Beispiel von Gärresten in der prozessorientierten Bewertung ausgeführt.

Schwierigkeiten mit hohem Flugascheanteil und Belagsbildung/korrosion an Wärmetauscherflächen können vermieden werden, wenn mit der Wirbelschichtvergasung und folgendem Heißgasfilter gearbeitet wird. Bis 840 °C zeigten sich für alle Biomassen keine Sintererscheinungen bei der Filterasche.

Die Zerkleinerung von ausgewählten biogenen Materialien unter einen Partikeldurchmesser von 1 mm war kosten- und energieintensiv. Durch einen thermischen Aufschluss mittels Pyrolyse wurde ein feinkörniger Koks erhalten, dessen Grobteile mit weit geringerem Energieaufwand als die ursprüngliche Biomasse zu mahlen sind. Somit ist z.B. die Verfahrenskombination Pyrolyse-Staubfeuerung aus verfahrenstechnischer Sicht interessant.

Generell gilt, dass bei der Projektierung und Auslegung von Neuanlagen die brennstofftechnischen Eigenschaften im Zusammenspiel mit den dargestellten verfahrens- und apparatespezifischen Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Dabei ist die reine Kenntnis der mit Standardmethoden ermittelten brennstofftechnischen Eigenschaften nicht ausreichend. Vielmehr ist mit Hilfe von Labor- und Technikumsversuchen eine genaue Charakterisierung der dem jeweiligen Verfahren zu Grunde liegenden Teilprozesse notwendig. Dies beinhaltet z. B. die Freisetzungskinetik der flüchtigen Bestandteile in Abhängigkeit von der Aufheizrate, die Zusammensetzung der flüchtigen Bestandteile, das Zündverhalten des

Brennstoffes, die Reaktivität des Feststoffabbrandes auf einem Rost usw. Im Rahmen des Projektes wurde dies für unterschiedliche Biomassen untersucht. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse und Daten können von Beginn an in den Engineering-Prozess zur Auslegung von Neuanlagen einfließen. So ist z. B. mit Hilfe der abgeleiteten reaktionskinetischen Daten eine biomassespezifische Adaption von existierenden Modellierungswerkzeugen möglich. Durch gezielte Simulations- und Optimierungsstudien kann so für die in Frage kommenden Brennstoffe unter Berücksichtigung verfahrenstechnischer Randbedingungen eine verbesserte Auslegung von Neuanlagen erfolgen.

2 Aufgabenstellung

Das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) fördert seit 2000 den Ausbau der regenerativen Energien. In den letzten Jahren rückten besonders die Techniken der Photovoltaik und Windenergie in den Vordergrund der öffentlichen Wahrnehmung. Gemessen an der installierten Leistung nehmen biomassebasierte Stromerzeugeranlagen im Jahr 2014 nur einen Anteil von 7 % ein (s. **Tab. 2-1**).

Tab. 2-1: Prognostizierte installierte Leistungen regenerativer Energieträger in 2014 [1]

Photovoltaik [MW]	Windkraft (Onshore) [MW]	Windkraft (Offshore) [MW]	Sonstige [MW]	Biogasanlagen [MW]	Biomassekraftwerke [MW]
40.244	36.046	2.631	2.067	4.805	1.300

Bei solch beeindruckenden Zahlen scheint die Bioenergie keine große Rolle bei der Energiewende mehr zu spielen. Dies entspricht aber nicht der Realität, da nicht die installierte Leistung, sondern die abgegebene Arbeit entscheidend ist. Und hier wandelt sich das Bild völlig: Techniken mit Biomassen besaßen mit 47,1 TWh einen Anteil von 31 % an der elektrischen Arbeit der regenerativen Energien in 2013 (incl. Klär- und Deponiegasverstromung, Strombereitstellung aus biogener Müllfraktion und biogenem Anteil der Mitverbrennung in Papier- und Zellstoffindustrie) [2,3]; bei der Wärmelieferung waren es sogar 89 % [2] (s. **Tab. 2-2**).

Tab. 2-2: Wärmebereitstellung erneuerbarer Energien in 2013 [2]

Solarenergie [PJ]	Umgebungs-/ Erdwärme [PJ]	Biomasse [PJ]
25,6	34,2	506,7

Hinzu kommt, dass Biogasanlagen und Biomassekraftwerke wetterunabhängig sind. Sie liefern zuverlässig Strom und Wärme.

Die Kraftwerke aber leiden unter dem seit Jahren steigenden Holzbezugspreis besonders für das Altholz (s. **Abb. 2-1**). Von 2003 bis 2010 stiegen die Preise signifikant an. Oft übersteigt das in 2010 vorhandene Preisniveau die kalkulierten Preise, welche den Investitionsentscheidungen zugrunde lagen. Daran hat sich auch während des Projektverlaufs nichts geändert. Einen Ausweg könnte eine Erweiterung der Biomassepalette bieten.

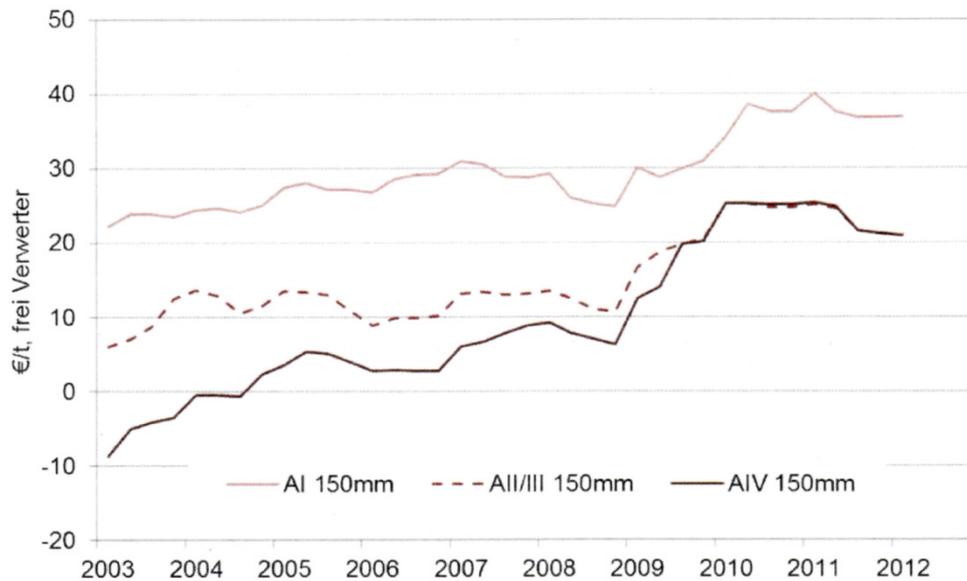


Abb. 2-1: Preisentwicklung der Durchschnittspreise von Altholzsortimenten [4]

Aufgabe des vorliegenden Vorhabens war es, verschiedene Verfahrensketten zu betrachten. Als relevant angesehen wurden:

1. Einsatz von aufbereiteter stückiger Biomasse zur Verbrennung auf dem Rost oder in der Wirbelschicht
2. Einsatz von aufbereiteter stückiger Biomasse zur Vergasung in Festbett oder Wirbelschicht und Nutzung der Gase in einem Gasmotor
3. Einsatz von thermochemisch durch Pyrolyse aufbereiteter stückiger Biomasse zur Verbrennung in einer Brennkammer
4. Einsatz von mechanisch aufbereiteter staubförmiger Biomasse zur Co-Verbrennung in einer Staubfeuerung

Zu ermitteln waren bei Einsatz von Biomassen aus völlig unterschiedlichen Quellen die technische Machbarkeit, die Gewinnung brennstofftechnischer Daten und die Ermittlung verfahrenstechnischer Parameter. Schlußendlich war alles zusammenzufassen in einem Ratgeber für Ingenieurbüros, Anlagenbauer und -betreiber sowie Landwirte.

3 Änderungen gegenüber der Antragsstellung

3.1 Änderungen im Projektbegleitenden Ausschuss

Dem Projektbegleitenden Ausschuss (Abk.: PA) gehörten zum Zeitpunkt der Antragstellung vierzehn Firmen an. Davon zählten sieben Unternehmen zu den KMU (Kleine Mittlere Unternehmen). Im Projektverlauf kamen die FNR-Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Gülzow) als Gast sowie die Fa. Becker Umweltdienste GmbH (Chemnitz) hinzu.

Einen herben Verlust bedeutete der Tod von Hr. Dr.-Ing. Göttlicher (EnBW). Seine Nachfolge trat Hr. Dipl.-Ing. Schlagermann an. Die Fa. Evonik Energy Services firmierte um zu STEAG Energy Services; aus der RWE Innogy wurde die RWE Energiedienstleistungen. Ihr Vertreter, Hr. Dr. Hauk, ging während des Projektverlaufs in den Ruhestand. Ihm folgte Hr. Dr.-Ing. Kretschmann nach.

Der Geschäftsführer der Fa. ProEn, Hr. Dr. Heidler, entsendete Hr. Jakisch (Fa. Köster Marine Proteins). Beide Firmen gehören zur selben Holding. Hr. Dipl.-Ing. Topf machte sich selbstständig. Mit seiner Fa. VZR Verfahrenszentrum Reichstädt GmbH blieb er dem PA erhalten.

3.2 Laufzeitverlängerung

Die ursprüngliche Laufzeit betrug 01.07.2011 bis 31.12.2013 (30 Monate). Auf Antrag der Forschungsstellen bewilligte die *Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik e.V.* mit Schreiben vom 24.05.2013 die für die AiF kostenneutrale Verlängerung bis zum 30. Juni 2014.

3.3 Änderungen Allgemein

Auf die Validierung der in diesem Vorhaben generierten Ergebnisse an kommerziellen Anlagen (im Arbeitspaket (AP) 6) wurde verzichtet, da **a)** das Risiko für den kommerziellen Betrieb hoch war und **b)** die benötigten Mengen an alternativen Biomassen nur zu hohen Preisen hätten beschafft werden können. Die Kosten waren aus dem Projekt heraus nicht zu bestreiten. Die Ergebnisse aus den Technikums- bzw. Pilotanlagen besitzen eine genügend große Aussagekraft für die Anwendbarkeit in der Kraftwerkstechnik.

3.4 Änderungen Forschungsstelle 1 (CUTEC)

Das CUTEC Institut weitete im AP 5.3 *Wirbelschichtvergasung* seine Untersuchungen zu vollständigen Massen- und Energiebilanzen und Stoffstromanalysen aus. Die ökonomische Begleitbetrachtung entfiel, da mit allen Biomassen nach Entwicklungsarbeiten bei der Prozessführung kontinuierliche Versuche möglich waren und es das optimale Produktgas nicht gab. Die Kokse aus Pyrolyse und Vergasung wurden mittels REM und chemischer Analysen anstatt EDX untersucht. Da auf den REM-Aufnahmen deutlich die heterogene Korngrößenverteilung sowie eine fehlende Versinterung zu erkennen war, konnten die kostenintensiven BET-Messungen entfallen. Im Projektverlauf ergab sich die Aufgabe, Unterschiede in den charakteristischen Ascheschmelztemperaturen bezüglich der Herstellung der Aschen in

reduzierender oder oxidierender Atmosphäre und der Atmosphäre im Ascheschmelzmikroskop herauszufinden. Hierzu baute CUTEC einen Ofen um und führte entsprechende Experimente durch. Diese neue Aufgabe kann dem AP 3 *Laborversuche* zugeordnet werden.

Als sehr aufwändig stellte sich die thermische und mechanische Aufbereitung von Biomassen im AP 5 für alle Partner heraus. Da sich ergab, dass einige Biomassen stabilisiert werden mussten, wurde zur Trocknung der großen Mengen im Tonnen-Maßstab eine Einrichtung gebaut. Die Ergebnisse zur Zerkleinerung wurden energetisch bilanziert.

Zusätzlich gegenüber der Antragstellung wurde die Aufgabe *Ermittlung des Standes der Technik deutscher Biomassekraftwerke* übernommen. Diese ist dem AP 6 zuzuordnen.

3.5 Änderungen Forschungsstelle 2 (TU Dresden/VWS)

Alle für das Erreichen der Gesamtzielstellung des Forschungsvorhabens wichtigen Teilaufgaben der Forschungsstelle 2 konnten durchgeführt werden.

A3 Drop tube reactor

Einschränkungen im Versuchsumfang sind bei den Untersuchungen im Drop Tube Reactor (DTR) hinsichtlich der oxidierenden Atmosphäre eingetreten. Aufgrund der im Vergleich zu Kohlen schwierigen brennstofftechnischen Eigenschaften der Biomassen ergaben sich ein erhöhter Zeitaufwand und Einschränkungen im Versuchsablauf. Daher wurden nur Untersuchungen zum Entgasungsverhalten von Biomassen durchgeführt, die auch in den Pilotversuchen eingesetzt wurden. Das Gesamtziel wurde daher nicht gefährdet. Vielmehr hat sich ein Erkenntnisgewinn zur Untersuchung von schwierigen Brennstoffen im DTR ergeben, der für folgende Untersuchungen eine wichtige Basis darstellt.

A5.2 Staubfeuerung vertikal

Gemäß Projektantrag sollte das Verbrennungsverhalten staubförmiger Biomassebrennstoffe in zwei Staubfeuerungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von 50 kW_{th} und 1 MW_{th} untersucht werden.

Durch die eingeschränkte mengenmäßige Verfügbarkeit von Biomassen mit einer Korngröße, die den technischen Spezifikationen (Brennstofftransport und -dosierung) entsprechen, war eine Zerkleinerung der Biomassen erforderlich. Aufgrund des hohen Energieaufwandes für die Zerkleinerung sowie den damit verbundenen hohen Kosten konnten Versuche zur Monoverbrennung nur in der 50 kW_{th} Staubfeuerung durchgeführt werden.

3.6 Änderungen Forschungsstelle 3 (KIT/ITC)

Zur Erreichung der Gesamtziele des Projektes konnten alle Teilaufgaben von der Forschungsstelle ITC durchgeführt werden. Aus Gründen der Flexibilität wurden die Untersuchungen zum Abbrandverhalten nicht- wie ursprünglich vorgesehenen- an der Vorschubrostanlage TAMARA sondern an einem kleineren Vorschubrost durchgeführt. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf industrielle Rostfeuerungen ist dennoch zusammen mit den

brennstofftechnischen Untersuchungen und den Versuchen an dem Batchrostofen KLEAA in vollem Umfang möglich.

3.7 Änderungen Forschungsstelle 4 (TU Clausthal/IEVB)

Da das keramische Drehrohr des IEVB nach dem Projektstart beschädigt wurde und sich in einer langwierigen Reparaturphase befand, wurden die im Arbeitspaket 4 genannten Pyrolyseversuche während der Projektlaufzeit nicht durchgeführt. Es ergab sich, dass die diesbezüglichen Ergebnisse der Projektpartner für das Vorhaben ausreichend waren. Das am IEVB eingesetzte Personal wurde während der Projektlaufzeit dennoch forschungszielgerichtet eingesetzt, da neben den in Arbeitspaket 3 ursprünglich geplanten Versuchen bei einer festen Einstellung (900°C, $\lambda=1,8$) zusätzlich Versuche bei einer zweiten Temperatur und Luftzahl (1100°C, $\lambda=1,2$) durchgeführt wurden, um die Verschlackungsneigung der Biomassen in Abhängigkeit der Partikeltemperatur zu bestimmen. Diese sich zusätzlich ergebenden Erkenntnisse wurden in der Veröffentlichung [5] zusammengefasst. Die für diese zusätzlichen Untersuchungen notwendigen Brennstoffproben wurden zudem am IEVB vorbereitet und aufgemahlen.

4 Vorgehensweise

4.1 Methodische Vorgehensweise

Die Vorgänge der Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung in einem Apparat mit Aussagekraft für Großanlagen darzustellen, ist technisch nicht möglich. Daher wurden verschiedene Labor- und Technikumsanlagen der Partner genutzt, um die komplexen Vorgänge für verschiedene Biomassen abzubilden, zu analysieren und verfahrenstechnisch optimieren zu können.

Dazu waren im Antrag zur besseren Strukturierung und Übersichtlichkeit Ziele Z mit zu erwartenden Ergebnissen E, die mit Methoden M in entsprechenden Arbeitspaketen münden, entwickelt worden.

- Ausgehend von **Zielen Z**
- werden **Ergebnisse E** formuliert, die
- mit Hilfe einer **Methodik M**
- in **Arbeitspaketen A** abgearbeitet werden.

Diese Vorgehensweise hat sich bewährt und wird bereits in weiteren Projekten angewendet.

Die Ziele des Vorhabens sind unter Abschnitt 1 formuliert worden, sie werden daher hier nicht nochmals wiederholt. Ausgehend von den Fragestellungen wurden wissenschaftlich-technische Ergebnisse (E) erarbeitet, die im Abschnitt 5 und 6 dargestellt sind:

- E1:** Angabe des Potentials zur energetischen Nutzung von unterschiedlichen Biomassegruppen (Abschnitt 6.1) in den unterschiedlichen Verfahren anhand einer prozessorientierten Bewertung. Als Referenzbrennstoff wurde Holz und als Referenzverfahren die Rostfeuerungstechnologie definiert. Mit Hilfe dieser Bezugsgrößen ließen sich für ausgewählte Biomassen Soll- und Istprofile bzw. Wirkungsgrade, z. B. in Form einer Bewertungsmatrix unter der Maßgabe von Variationsbereichen, angeben.
- E2:** Empfehlungen zu Modifikationen von bestehenden Verfahren und der zugehörigen Anlagentechnologie für den Einsatz unterschiedlicher Biomassegruppen mit den entsprechenden Variationsbereichen.
- E3:** Biomasseadaptierte Empfehlung für die Projektierung neuer Anlagen.

Die Bewertungsmatrix als Ergebnis von E1 ist als Leitfaden im Abschnitt 7.2 dargestellt.

Die Ergebnisse E2 und E3 sind bei den jeweiligen Prozessen auf Basis der Untersuchungen formuliert.

Ausgehend von den Ergebnissen aus E1 und E2 können anhand der hier entwickelten Kriterien ausgewählte Biomassen zu den Verfahren mit den Hauptprozessgruppen Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung mit der entsprechenden apparativen Ausgestaltung zugewiesen werden. Erkenntnisse aus E3 stehen für die Neuplanung von Anlagen vor Planungsbeginn zur

Verfügung und sortenspezifische Probleme können zur Erhöhung der Brennstoffflexibilität in Neubaukraftwerken bei der Auslegung berücksichtigt werden.

Die Arbeitspakete A lassen sich aus den Methoden M ableiten. Daher wird auf die Formulierung der Methoden verzichtet und gleich die realisierten Arbeitspakete aufgeführt. Eine detaillierte Erläuterung erfolgt im Abschnitt 4.2.

Die die Einzelprozesse umfassende Methodik der prozessorientierten Bewertung von Biomassen erlaubt es, eine Abschätzung darüber zu geben, inwieweit neue Brennstoffe in bestehenden Verfahren zur energetischen und /oder stofflichen Nutzung eingesetzt werden können oder an welchen Stellen dafür Änderungen im Verfahren notwendig sind. Gegebenenfalls können aber auch Verfahren für bestimmte Brennstoffe ganz ausgeschlossen oder es müssen neue Verfahren entwickelt werden.

Kriterien, nach denen hier die Prozesse bewertet wurden, sind:

- Verschlackungsverhalten, Ascheerweichungsverhalten und -aufkommen von Biomassen in den unterschiedlichen Prozessen,
- Verfahrenstechnische Parameter wie Verbrennungstemperatur, Luftzahl etc.
- video-optische Parameter wie z.B. den aus dem Flammenbild einer Staubfeuerung ermittelten Flammenschwerpunkt,
- Zündfähigkeit und Zündverhalten der Biomassen unter den unterschiedlichen Bedingungen in den Prozessen, z.B. durch Kennzahlen wie die Zündrate,
- Ausbrandgrad und -verhalten, z.B. durch Kennzahlen wie die Massenumsatzrate,
- Korrosionsneigung der Aschen und Beläge aus der Verbrennung der Biomassen in Form des Schwefel- zu Chlorverhältnisses in den Belägen,
- Mahlbarkeit, Förderbarkeit,
- Transporteigenschaften, Lagerfähigkeit,
- feste und gasförmige Emissionen aus den Prozessen (Verbrennung: NO_x, SO₂, CO, HCl oder Staub, unverbrannte Bestandteile oder Koks) und Vergasung (Permanentgase, Teere, Wasser, Schwefelverbindungen, Chlorwasserstoff, Phosphor, Alkali und Erdalkali, Schwermetalle) und
- Produktausbeuten bei Vergasungs- und Pyrolyseprozessen,
- Energetische Wirkungsgrade bei der Wirbelschichtvergasung.

Darüber hinaus wurde auf Basis von Literaturdaten und eigenen Untersuchungsergebnissen Aussagen zum elektrischen Energiebedarf bei der Zerkleinerung getroffen. Die Literaturdaten zur spezifischen Zerkleinerungsarbeit in Schneidmühlen wurden über die Heizwerte der untersuchten Biomassen angepasst und lassen daher eine Abschätzung des Energieaufwandes zu.

Ergebnisse zum Emissionsverhalten wurden beispielsweise für NO_x durch Darstellung einer Fenimore-Kurve prozessübergreifend ausgewertet. Ähnliche Auswertungen gibt es für HCl, Staub und SO₂.

4.2 Erläuterung der Arbeitspakete

Zugeordnet zu den angestrebten Projektzielen Z1-Z3 und der methodischen Vorgehensweise wurden die einzelnen Arbeitspakete (siehe **Tab. 4.2-1**), wie nachfolgend zusammengefasst dargestellt, von den Forschungsstellen einzeln oder gemeinsam bearbeitet.

Tab. 4.2-1: Bezeichnung und Aufteilung der Arbeitspakete auf die Forschungsstellen

Arbeitspaket	Bezeichnung	Forschungsstellen
A1	Auswahl und Einteilung der Biomassen	alle
A2	Brennstofftechnische Charakterisierung der Biomassen nach Standardmethoden	alle gemäß Aufteilung
A3	Ermittlung und Festlegung von Kriterien durch Laborversuche	ITC/ IEVB/VWS/CUTEC
A4	Technikumsversuche (Batchrost-Reaktor (KLEAA) zur Vergasung und Verbrennung, Schneckenreaktor	ITC
A5	Untersuchungen an Pilotanlagen	alle gemäß Aufteilung
A6	Bewertung und Vergleich	alle - Federführung CUTEC

Die Ergebnisse der in den Arbeitspaketen durchgeführten Untersuchungen sind in Abschnitt 6 thematisch zusammengefasst dargestellt.

A1 Auswahl und Einteilung der Biomassen

Zu Projektbeginn erfolgte eine Auswahl und Einteilung des Einsatzstoffspektrums an Biomassen, die im weiteren Projektverlauf auf ihre Eignung zur energetischen Nutzung in verschiedenen thermischen Verfahren und Apparaten untersucht wurden. Bei der Auswahl der Biomassen wurde das industrielle Interesse an einer späteren energetischen Nutzung sowie das jeweilige Biomassepotential in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss berücksichtigt.

Die Einteilung von festen Biomassen erfolgt gegenwärtig nach *DIN EN 14961 Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen* [6] auf Basis von Herkunft und Ursprung. Danach wird eine Einteilung in die Hauptgruppen *holzartige, halmgutartige und fruchtartige Biomassen* vorgenommen. Diese Klassifizierung wurde aufgegriffen und um die Gruppen *Reste aus der landwirtschaftlichen Produktion (R. LW.)*, *Reste aus der Lebensmittelherstellung und –verarbeitung (R. LH.)* und *Reste aus aerober und anaerober Zersetzung (R. A. Z.)* erweitert.

A2 Brennstofftechnische Charakterisierung der Biomassen nach Standardmethoden

Nach Auswahl der Biomassegruppen und den zugeordneten Biomassen bzw. biogenen Reststoffen wurden die brennstofftechnischen Eigenschaften der Biomassen ermittelt. Ziel war es dabei die Substitutionsbrennstoffe mit einem Referenzbrennstoff zu vergleichen. Aus den Ergebnissen wurden erste Aussagen zu möglichen Auswirkungen im Betrieb abgeleitet.

Darüber hinaus wurde geprüft, ob das auf Herkunft und Ursprung beruhende Klassifizierungssystem auf die Brennstoffeigenschaften übertragbar ist. Auch die Berechnung verbrennungstechnischer Kenngrößen (Mindestluftbedarf, adiabate Verbrennungstemperatur), die Ableitung von Korrelationen zur Abschätzung spezifischer Verbrennungseigenschaften (Heizwert, Ascheschmelzverhalten) und die Abschätzung des Verschlackungs- und Korrosionspotentials auf Basis von Kennzahlen und Indices waren Gegenstand der Arbeiten.

In Analogie zu Kohlen und Ersatzbrennstoffen wurden dazu die **chemischen, kalorischen und mechanischen Eigenschaften** bestimmt. Dabei wurden standardisierte Methoden angewandt, die in den Normen des Technischen Komitees der Europäischen Union CEN/TC 335 „Feste Biobrennstoffe“ zusammengefasst sind. Die Aufteilung der einzelnen standardisierten Methoden auf die Forschungsstellen ist in **Tab. 4.2** dargestellt.

Tab. 4.2-2: Einteilung der Hauptverantwortlichkeiten für die Arbeitsschritte auf die Forschungsstellen in Arbeitspaket A2

Aufgabe - Untersuchungen	Projektpartner			
	CUTEC	ITC	VWS	IEVB
Chemische Größen			X	X
Kalorische Größen	X			
Mechanische Größen	X			
verbrennungstechnische Größen		X		

A3 Ermittlung und Festlegung von Kriterien durch Laborversuche (TGA, Zündofen, Drop Tube Reaktor, Veraschungs-ofen-Aschemikroskop)

Um die bei der Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung stattfindenden Einzelprozesse unter Berücksichtigung der spezifischen Prozessbedingungen zu untersuchen, wurden Versuche in Laboranlagen durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen waren Basis für die Ableitung von prozessspezifischen Bewertungskriterien.

1. Labor und technische Thermowaage (ITC/ IEVB)

Mit Hilfe der thermogravimetrischen Untersuchungen wurde das Umsatzverhalten der Einsatzstoffe unter reduzierenden (Entgasung, Pyrolyse) und oxidierenden (Vergasung, Verbrennung) Bedingungen bei langsamen Aufheizraten untersucht. Dabei wurde die Massenänderung der Probe bei einer Aufheizung mit konstanter Heizrate messtechnisch erfasst. Die Labor-TGA diente der Charakterisierung des „wahren“ Umsatzverhaltens der Probe. Ziel ist es dabei Wärme- und Stofftransportwiderstände zu vermeiden, was durch eine starke Zerkleinerung des Probenmaterials (<250 µm) realisiert wird. Im Gegensatz dazu wurde die technische Thermowaage zur Charakterisierung des Umsatzverhaltens der Probe bei der jeweiligen Stückigkeit eingesetzt, welches realitätsnahe Aussagen zum Umsatzverhalten auf einem Rost oder in einem Drehrohr zulässt.

Als Bewertungskriterien für den Vergleich der Biomassen wurden z. B. der Beginn und das Ende der Massenänderung, die Temperatur und die Geschwindigkeit der maximalen Massenänderungsgeschwindigkeit sowie die Charakterisierung der flüchtigen Bestandteile herangezogen. Daraus abgeleitet wurden reaktionskinetische Daten, die eine Modellierung des Umsatzverhaltens erlauben.

2. Zündofen (IEVB)

Für die Verbrennung staubförmiger Brennstoffe in einer Brennkammer (Staubfeuerungen) spielt dessen Zündverhalten eine wichtige Rolle. Die Untersuchungen erfolgten in einem Zündofen. Dabei wurde der staubförmige Brennstoff bei verschiedenen Temperaturen und Gasatmosphären in einen heißen Ofenraum geblasen. Die Zündung der Staubwolke wurde mit Hilfe von Fotodioden erfasst. Die daraus abgeleitete Zündverzugszeit diente als Bewertungskriterium für den Vergleich der Biomassen.

3. Verschlackungsreaktor (IEVB)

Um den Einfluss der Biomassen auf das Verschlackungsverhalten in Staubfeuerungen zu untersuchen, wurde ein Verschlackungsreaktor eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine 15 kW Staubfeuerung, die die gezielte Einstellung der Luftzahl und der Wandtemperatur erlaubt. Die Bewertung des Verschlackungsrisikos erfolgte auf Basis von Ansatzproben, die dem Feuerraum entnommen wurden. Die auf den Ansatzproben abgelagerten Beläge wurden hinsichtlich ihrer Morphologie und der chemischen Zusammensetzung mit Hilfe von RFA, XRD und SEM-IDFix charakterisiert. Zusätzlich wurde das Verbrennungsverhalten anhand der Abgaszusammensetzung (CO , CO_2 , NO_x , und SO_2) in verschiedenen Abständen zum Brenner charakterisiert.

4. Drop Tube Reactor (VWS)

Um das Einzelpartikelumsatzverhalten von staubförmigen Partikeln bei hohen Aufheizraten zu untersuchen, wurde ein Fallrohrreaktor (drop tube reactor) eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein beheiztes Fallrohr, in dem definierte Reaktionstemperaturen und Gasatmosphären eingestellt werden können. Die Charakterisierung des Umsatzverhaltens erfolgte auf Basis von Laboranalysen der Feststoffrückstände, die in verschiedenen Höhen des Fallrohres entnommen wurden. Aus den erhaltenen Umsatzverläufen wurden mit Hilfe eines mathematischen Modells reaktionskinetische Daten als Kriterien für die Auslegung von Brennersystemen abgeleitet.

5. Veraschungs-ofen-Aschemikroskop (CUTEC)

Unter dem Aschemikroskop sind oxidierende und reduzierende Atmosphären möglich. Verglichen werden kann somit das Ascheerweichungsverhalten unter beiden Bedingungen während der Analyse. Fraglich aber ist, ob sich Unterschiede ergeben würden, wenn die Ascheherstellung alternativ zur standardmäßigen Methode durch Oxidation unter reduzierender Atmosphäre stattfinden würde. Daher baute das CUTEC Institut einen Röhrenofen auf die Aufgabenstellung um.

A4 Technikumsversuche (Batchrost-Reaktor (KLEAA) zur Vergasung und Verbrennung, Pyrolysereaktor) (ITC)

In diesem Arbeitsschritt erfolgten mit einem Teil der ausgewählten Biomassen für die einzelnen Verfahrensgruppen Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung Untersuchungen in Technikumsanlagen.

1. Batchrost-Reaktor KLEAA (ITC)

Der Batchrost-Reaktor (KLEAA) eignet sich zusammen mit einem halbempirischen Modell als Bewertungsmethode, um das Abbrandverhalten fester, stückiger Biomassen für die Anwendung in einem Biomassekraftwerk mit einer Rostfeuerung zu charakterisieren. Die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens erfolgte u. a. mit Hilfe der Zündfrontgeschwindigkeit.

2. Pyrolysereaktor (ITC)

Zur Bereitstellung von heizwertreichen Biokohlen als Ersatzbrennstoffe für den Einsatz im Zementbereich, in der Stahl- und Hüttenindustrie oder im Kraftwerksbereich wurden Untersuchungen an einem Schneckenpyrolysereaktor mit integrierter Heißgasfiltration (STYX) durchgeführt. Neben dem Einfluss der Verweilzeit auf die Produktverteilung wurde untersucht, in wie weit Branntkalk als Additiv zur Steigerung des Heizwertes des Pyrolysegases und zur Bindung von Chlor in Form von CaCl_2 eingesetzt werden kann.

A5 Untersuchungen an Pilotanlagen

Um den Einfluss verschiedener Biomassen auf das Pyrolyse-, Vergasungs- und Verbrennungsverhalten unter realen Bedingungen zu untersuchen und die vorangegangenen Ergebnisse der Labor- und Technikumsversuche zu validieren, wurden Versuche in Pilotanlagen durchgeführt. Diese entsprechen in der verfahrenstechnischen und apparativen Gestaltung den Gegebenheiten realer Anlagen zur energetischen Nutzung fester Brennstoffe.

Die mechanische Aufbereitung der halmgutartigen Brennstoffe erfolgte beim CUTEC Institut mit einem zweistufigen Häcksler. KUP-Hölzer wurden in einer Schneidmühle zerkleinert. Alle feuchten Biomassen wurden zur biologischen Stabilisierung mit warmer Luft getrocknet. Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von staubförmigen Brennstoffen für die experimentellen Untersuchungen in den Staubfeuerungsanlagen wurden zur Mahlung dieser Einsatzstoffe externe Unternehmen beauftragt nach vorheriger Grobzerkleinerung durch CUTEC, falls dieses notwendig war.

Es wurden die folgenden Verfahren-Anlagen-Kombinationen betrachtet:

Pyrolyse im Drehrohr (CUTEC)

In einem Drehrohr wurde der Einfluss von Temperatur und Verweilzeit auf die Ausbeute an Feststoff und Pyrolysegas für verschiedene Biomassen untersucht. Darüber hinaus wurden die Zusammensetzung und der Energieinhalt der Pyrolyseprodukte im Hinblick auf eine weitere energetische Nutzung betrachtet.

Vergasung im Festbett (VWS)

In einem Gleichstromfestbettvergaser wurde das Vergasungsverhalten von Biomassen und deren Mischungen im Hinblick auf die motorische Nutzung untersucht. Die Bewertung des Vergasungsverhaltens erfolgte auf Basis der Brenngasqualität, die durch die Zusammensetzung und den Heizwert des Permanentgases sowie die Teer- und Staubkonzentration des Brenngases charakterisiert ist.

Vergasung in der Wirbelschicht (CUTEC)

In einer zirkulierenden Wirbelschicht ($400 \text{ kW}_{\text{therm}}$) wurde das Vergasungsverhalten von Biomassen unter Variation der Prozessbedingungen (Menge und Art Vergasungsmittel, Temperatur, Verweilzeit) untersucht. Einen besonderen Schwerpunkt bildete dabei neben der Brenngaszusammensetzung die Aschequalität. Darüber hinaus wurden Berechnungen zu den Stoffströmen (Elementbilanzen) sowie Massen- und Energiebilanzen durchgeführt.

Verbrennung auf dem Rost (ITC)

Es wurde das Verbrennungsverhalten unterschiedlicher Biomassen bei der Verbrennung auf dem Rost untersucht. Variiert wurden die Verbrennungsluftmenge und die Rostgeschwindigkeit. Zur Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens wurde neben der Abgaszusammensetzung die Aschequalität (Zusammensetzung von Asche und Schlacke) herangezogen.

Verbrennung in der Wirbelschicht (VWS)

In einer $300 \text{ kW}_{\text{th}}$ zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung wurde das Verbrennungsverhalten von Biomassen mit unterschiedlichen Brennstoff-N- und -S-Gehalt untersucht. Dazu wurde die Verbrennungsluftmenge bei einstufiger Prozessführung (ungestufte Verbrennung) variiert. Die Charakterisierung des Verbrennungsverhaltens erfolgte auf Basis der Abgaszusammensetzung unter besonderer Berücksichtigung der Schadstoffe NO_x und SO_2 .

Staubfeuerung (ITC, IEVB, VWS)

Die Untersuchung der Mono- und Co-Verbrennung staubförmiger Biobrennstoffe wurde in vier Staubfeuerungsanlagen mit unterschiedlichen Feuerungswärmeleistungen realisiert. Die Bewertung des Verbrennungsverhaltens erfolgte auf Basis der Abgaszusammensetzung im Hinblick auf die Schadstoffemissionen NO_x und SO_2 . Darüber hinaus wurde bei der Co-Verbrennung mit Hilfe optischer Messverfahren das Zündverhalten des Brennstoff-Luft-Gemisches und die Stabilität der Flamme charakterisiert.

A6 Bewertung und Vergleich

In zwei beispielhaften Prozessketten wurden energetische Betrachtungen durchgeführt und Emissionen sowie Verschlackungsverhalten für verschiedene Biomassen des Projektes bewertet. Ein erstellter Ratgeber soll als Entscheidungshilfe für Ingenieurbüros, Anlagenbauer/-betreiber und Biomasseproduzenten dienen. Um einen Bezug der Projektergebnisse zu kommerziellen Anlagen herzustellen, wurde der Stand der Technik deutscher Biomassekraft-

werke hinsichtlich Verfahrens- und Apparatechnik der thermochemischen Konversion, Gasreinigung und Stromerzeugung ermittelt und in einer relationalen Datenbank (auf Basis MS Access) verarbeitet.

4.3 Projektkoordination und Qualitätssicherung

Zur Abstimmung der Tätigkeiten der vier Partner fungierte das CUTEC Institut als Projektkoordinator. Verschiedene Maßnahmen zur Qualitätssicherung wurden eingeführt. Eine wichtige Institution dabei war der Projektbegleitende Ausschuss (PA). Er traf sich im Abstand von ca sechs Monaten, also sechsmal. Die Forschungsstellen berichteten über die jeweiligen Projektfortschritte, stellten diese zur Diskussion und holten Rückmeldungen ein. Die Einladung mit Aufstellung einer Tagesordnung erfolgte im Namen der GVT durch den Koordinator. Dieser erstellte zu jeder Sitzung ein umfangreiches Protokoll, welches nach Abstimmung mit den Partnern an die PA-Mitglieder und Gäste versendet wurde.

Vor den PA-Sitzungen trafen sich die Forschungsstellen zu Plenarsitzungen zwecks Vorbereitung.

Für die Erleichterung der Kommunikation erstellte das CUTEC Institut ein Projekthandbuch, in dem Standards wie Programme für den Informationsaustausch, Protokollführung u.w. sowie wichtige Adressen verzeichnet waren. Mit insgesamt sieben Revisionen wurde es bei Bedarf (speziell Personenwechseln) aktualisiert und elektronisch versandt.

Das CUTEC Institut legte ebenfalls eine Liste Offener Punkte (LOP) und einen Gesamtterminplan an.

Neben den Plenarsitzungen lud der Koordinator in unregelmäßigen Abständen zu Arbeitssitzungen an wechselnden Orten ein.

Im letzten Jahr der Projektlaufzeit wurden Arbeitsgruppen gegründet mit der Aufgabe, die Vielzahl an apparativen Einzelergebnissen thematisch zusammenzufassen.

Veröffentlichungen wurden, soweit es inhaltlich möglich war, gemeinsam verfaßt.

Die jährlichen Zwischenberichte wurden ebenfalls zu einem gemeinsamen Exemplar abgestimmt.

5 Auswahl und Einteilung der Biomassen

In **Tab. 5-1** sind die eingeteilten Biomassegruppen und deren Vertreter zusammengefasst. Als Referenzbrennstoff wurde eine Mischung aus naturbelassenen Nadel- und Laubholz festgelegt. In Abhängigkeit der durchgeführten Untersuchungsmethoden wurde dieses in stückiger Form als Hackschnitzel (HHS 1 und HHS 2) oder staubförmig (Holzstaub) eingesetzt.

Tab. 5-1: Eingeteilte Biomassegruppen und deren Vertreter

Gruppe	Biomasse	Anzahl der Chargen
<i>Holzartig</i>	Mischholz (Nadel-Laubholz)	3
	KUP 1 [*] : Weide	1
	KUP 2: Pappel	1
	KUP 3: Robinie	1
<i>Halmgutartig</i>	Weizenstroh (Ernte 2011)	1
	Energiegras (Szarvasi1/Hirschgras)	1
	Zuckerhirse-Silage	1
	Switchgras Saarland 2009/2010	4
<i>Fruchtartig</i>	Haselnussschalen	1
	Kirschkerne	1
<i>Reste aus der landwirtschaftlichen Produktion (R. LW.)</i>	Grünschnitt	2
	Getreidereststoffe (Spelzen, Bruchkorn)	3
	Reisspelzen	1
	Baumwollreste	1
<i>Reste aus der Lebensmittelherstellung und -verarbeitung (R. LH.)</i>	Rohkaffeestaub	1
	Röstkaffeestaub	1
	Kaffeeschalen	1
	Biertreber	1
<i>Reste aus aerober und anaerober Zersetzung (R. A. Z.)</i>	Gärreste aus Biogasanlage (Ausgangsmaterial: Zuckerhirse+ Hühnertrockenkot)	2

In Tab. 5-1 wird deutlich, dass in der Gruppe der fruchtartigen Biomassen sowie in der Gruppe der Reste aus aerober und anaerober Zersetzung (R. A. Z.) zwei bzw. nur eine Biomasse für die weiterführenden Untersuchungen festgelegt wurden. Dies ist zum einen auf das entsprechende Biomassepotential (Menge) und zum anderen auf die saisonale und regionale

^{*} KUP: Kurzumtriebsplantage

Verfügbarkeit der Biomassen zurückzuführen. Des Weiteren werden diesen Gruppen zuzuordnende biogene Reststoffe oftmals anderen Nutzungspfaden zugeführt (Nutzungskonkurrenzen). Zum Beispiel Apfeltrester, der zu den fruchtstämmigen Biomassen zählt, wird üblicherweise als Tierfutter verwendet.

Um den Einfluss von Schwankungen der brennstofftechnischen Eigenschaften innerhalb einer Biomasseart zu berücksichtigen, wurden im Arbeitspaket A2 exemplarisch von einigen Vertretern mehrere Chargen untersucht.

6 Ergebnisse

6.1 Brennstofftechnische Charakterisierung der Biomassen

Aus brennstofftechnischer Sicht ist in Anlehnung an die Beschreibung von fossilen Brennstoffen eine Aufteilung in *organische* und *anorganische* Bestandteile zweckmäßig (s. **Abb. 6.1-1**). Die organische Brennstoffsubstanz lässt sich bei festen Biomassen weiter in die makromolekularen Hauptbestandteile *Cellulose*, *Hemicellulose* und *Lignin* sowie der Gruppe der *Extraktstoffe* (z. B. *Fette*, *Harze*, *Öle*, *Proteine*) unterscheiden. Die anorganische Brennstoffsubstanz besteht aus *Wasser* und *mineralischen Bestandteilen*.

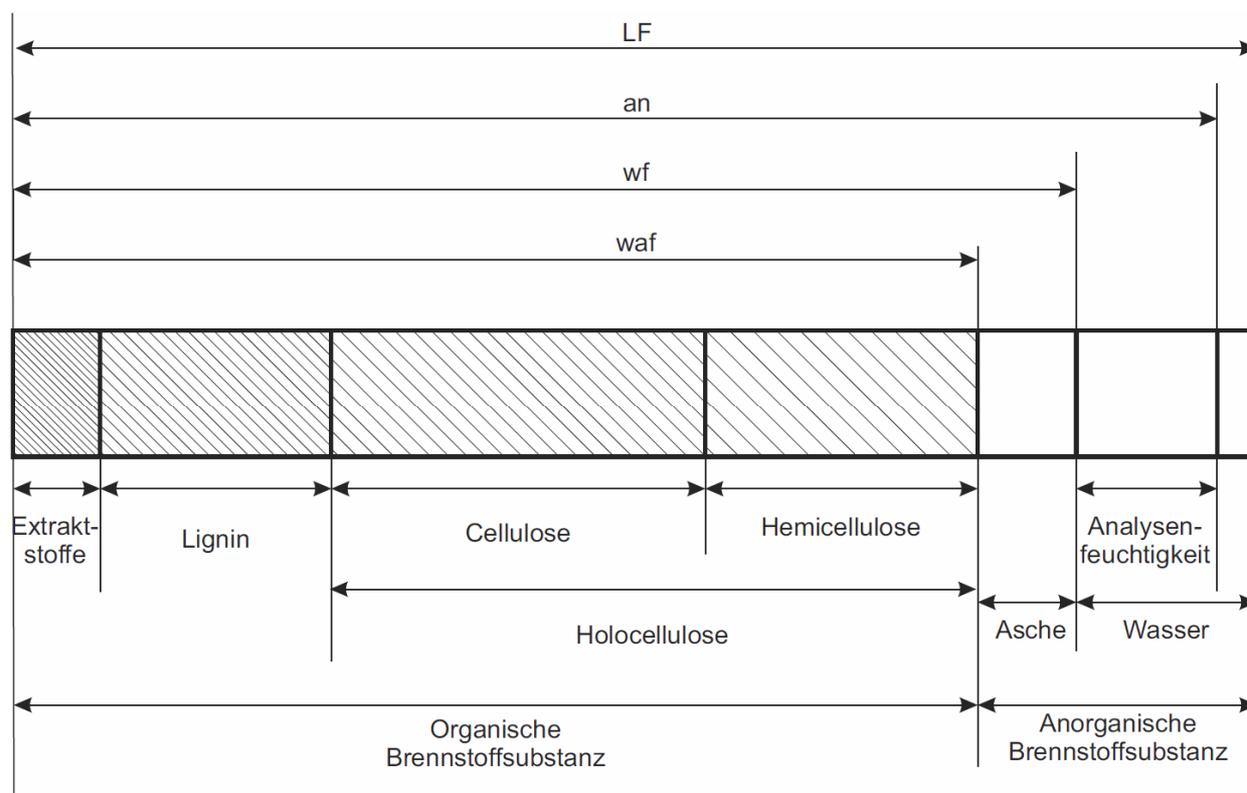


Abb. 6.1-1: Zusammensetzung fester Biomassen und Bezugszustände

Ziel der Untersuchungen

Zielstellung der brennstofftechnischen Charakterisierung der Biomassen nach Standardmethoden war die Bereitstellung von Daten für:

- den Vergleich verschiedener Biomassen mit dem Referenzbrennstoff Holz,
- erste Einschätzungen zu feuerungstechnischen Auswirkungen eines Brennstoffwechsels (Referenz- zu Substitutionsbrennstoff),
- die Überprüfung der Übertragbarkeit des bestehenden Klassifizierungssystems auf die Brennstoffeigenschaften und
- die Ableitung von Verbrennungskenngrößen und Berechnungsansätzen zur Abschätzung ausgewählter Brennstoffeigenschaften.

Untersuchungsmethodik

Die Bestimmung der brennstofftechnischen Eigenschaften erfolgte mit biomassespezifischen Standardmethoden, die in **Tab. 6.1-1** zusammengefasst sind. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Materialien und Geräten sind den angegebenen Normen zu entnehmen.

Tab. 6.1-1: Untersuchungsmethoden und Normen

Bezeichnung	Norm / Methode
1. Chemische Eigenschaften	
<u>Immediatanalyse (Kurzanalyse)</u>	
Wassergehalt	DIN EN 14774 und DIN 51718
Aschegehalt (bei 550 °C und 815 °C)	DIN EN 14775 und DIN 51719
Flüchtige Bestandteile	DIN EN 15148
Fixer Kohlenstoff	DIN 51734
<u>Elementaranalyse</u>	
Kohlenstoff	DIN EN 15104
Wasserstoff	DIN EN 15104
Sauerstoff	Differenz
Stickstoff	DIN EN 15104
Schwefel	DIN EN 15289 und DIN 51724-3
<u>Mineralische Brennstoffsubstanz (Brennstoff- und Ascheanalyse)</u>	
Haupt- und Spurenelemente in Brennstoff und Asche	DIN 51729-10 (RFA), DIN 38406 (ICP-OES), DIN EN 15290 bzw. 15297 (ICP-MS)
Chlor (gesamt und wasserlöslich)	DIN EN 15289 und DIN EN 15105
<u>Ascheschmelzverhalten an 550 °C Asche</u>	
Oxidierende Atmosphäre	DIN GEN/TS 15370-1
2. Kalorische Eigenschaften	
Brenn- und Heizwert	DIN EN 14918
3. Mechanische Eigenschaften	
Korngrößenverteilung	DIN 66165; DIN EN 15415; DIN EN 15149
Reindichte	Pyknometer nach Gay-Lussac
Schüttdichte	Stampfvolumeter und DIN EN 15103

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Brennstoffcharakterisierung dargestellt. Die Messwerte sind in Anhang 14.5 zusammengefasst. Die Angabe erfolgt gemäß Abb. 6.1-1 in den Bezugszuständen wasser- und aschefrei (waf), wasserfrei (wf) oder Analysen- (an) bzw. Lieferzustand (LF).

6.1.1 Chemische Brennstoffeigenschaften

1) Immediatanalyse (Kurzanalyse)

In **Abb. 6.1-2** sind die Ergebnisse der Kurzanalyse dargestellt. Da das untersuchte Probenmaterial zum Zwecke einer biologischen Stabilisierung vorgetrocknet wurde, erfolgt die

Angabe der Ergebnisse im Bezugszustand wf. Der Wassergehalt der Proben im Lieferzustand betrug zwischen 3,81 Ma.-% (Röstkaffeestäube) und 21,83 Ma.-% LF (Grünschnitt).

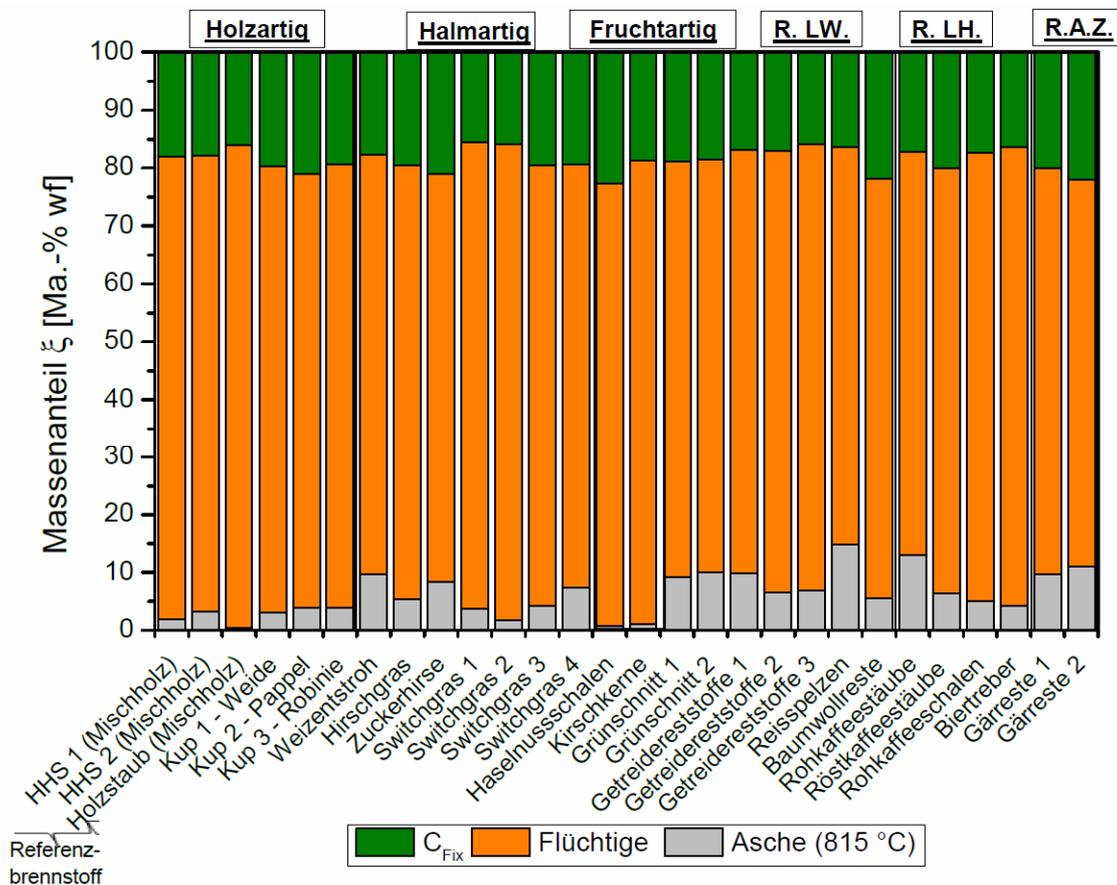


Abb. 6.1-2: Analyseergebnisse Kurzanalyse

Der Schwankungsbereich der Analysenwerte für Asche-, Flüchtig- und C_{Fix}-Gehalt ist in Tab. 6.1-2 zusammengefasst.

Tab. 6.1-2: Schwankungsbereich Analyseergebnisse Kurzanalyse (Bezugszustand wf)

Eigenschaft	Minimum	Maximum
Aschegehalt [Ma.-% wf]	0,47 (Holzstaub)	14,84 (Reisspelzen)
Flüchtigengehalt [Ma.-% wf]	67,11 (Gärreste 2)	83,43 (Holzstaub)
C _{Fix} -Gehalt [Ma.-%]	15,57 (Switchgras 1)	22,69 (Haselnusschalen)

Der niedrige Aschegehalt des Holzstaubes ist darauf zurückzuführen, dass es sich dabei um zerkleinertes Stammholz handelt, welches für die Pelletproduktion eingesetzt wird (geringer Rindenanteil). Der hohe Aschegehalt der Reisspelzen resultiert aus einem hohen Anteil an Silicium, welches in die Zellstruktur der Reisspelzen eingelagert ist (siehe mineralische Brennstoffsubstanz **Abb. 6.1-6**)

Generell ist festzustellen, dass der Aschegehalt des Referenzbrennstoffes im Allgemeinen kleiner ist als der Aschegehalt der meisten anderen untersuchten Biomassen (Ausnahmen: Haselnussschalen (0,77 Ma.-%) und Kirschkerne (1,13 Ma.-%)).

Im Hinblick auf die Substitution des Referenzbrennstoffes ist dieser Sachverhalt bezüglich der Auslegung und Modifikation des Ascheaustragssystems sowie der Ascheentsorgung von Bedeutung.

Im Hinblick auf den Vergleich der organischen Brennstoffsubstanz der Biomassen ist der Flüchtigengehalt und der Gehalt an fixem Kohlenstoff im Bezugszustand waf von Bedeutung. So schwankt der Flüchtigengehalt zwischen 75,37 Ma.-% waf (Gärreste 2) und 83,89 Ma.-% waf (Switchgras 2) bzw. der Gehalt an fixem Kohlenstoff zwischen 16,11 Ma.-% waf (Switchgras 2) und 24,63 Ma.-% waf (Gärreste 2).

Die Unterschiede im Flüchtig- und C_{Fix} -Gehalt sind auf eine veränderliche Zusammensetzung der organischen Brennstoffsubstanz in Bezug auf die Hauptbestandteile Cellulose, Hemicellulose, Lignin und Extraktstoffe zurückzuführen. Wie u.a. in [7] dargestellt, beträgt der Flüchtigengehalt der Cellulose und Hemicellulose ca. 92 Ma.-% waf und der des Lignins ca. 62 Ma.-% waf. Das heißt, je höher der Ligninanteil desto niedriger ist der Flüchtigengehalt bzw. umso höher ist der C_{Fix} -Gehalt einer Biomasse. In **Abb. 6.1-3** ist beispielhaft die molekulare Zusammensetzung der Hauptbestandteile ausgewählter Biomassen dargestellt.

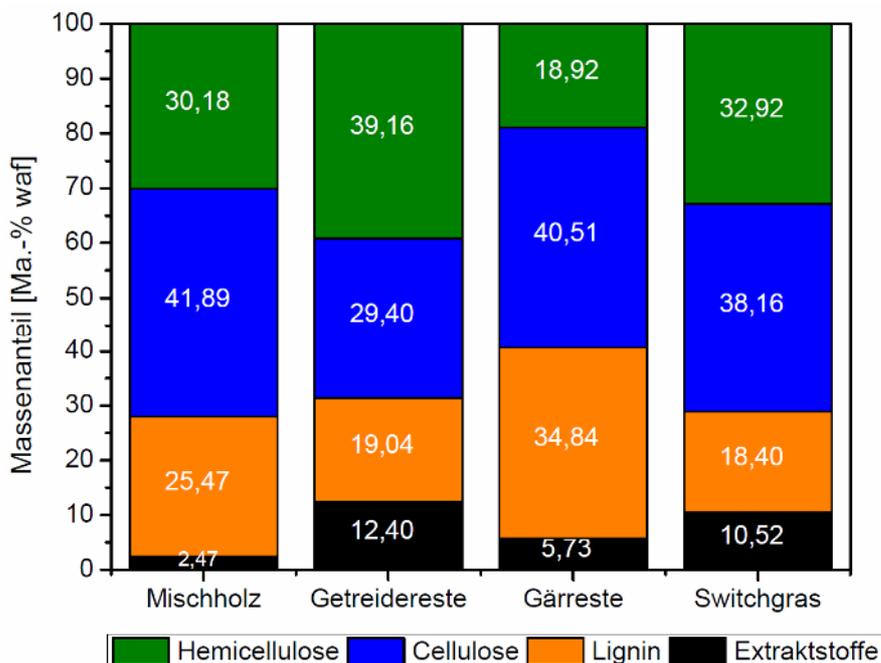


Abb. 6.1-3: Molekulare Zusammensetzung ausgewählter Biomassen

Es wird deutlich, dass die Gärreste den höchsten Lignin-Anteil besitzen. Dieser ist auf die bereits stattgefundenen Zersetzungsprozesse während der Fermentation zurückzuführen, woraus der geringe Anteil an flüchtigen Bestandteilen resultiert.

2) Elementaranalyse

Die Charakterisierung der organischen Brennstoffsubstanz kann auch auf Basis der Elementarzusammensetzung erfolgen. Zur übersichtlichen Darstellung sowie zum Vergleich und zur Einordnung sind die *C*-, *H*- und *O*- Gehalte der Biomassen in **Abb. 6.1-4** als Mol-Verhältnisse im Vergleich zu anderen Festbrennstoffen im Van Krevelen Diagramm dargestellt. Die zugehörigen Absolutwerte sind in Anhang 14.5 aufgeführt.

Es wird deutlich, dass sich die Biomassen zwischen den Strukturkomponenten Lignin und Cellulose einordnen. Sowohl das *H/C*- als auch das *O/C*-Verhältnis der untersuchten Biomassen variieren in einem weiten Bereich um den Referenzbrennstoff. Die geringste Variation liegt innerhalb der holzartigen und halmgutartigen naturbelassenen Biomassegruppen vor. Die *H/C*- und *O/C*-Verhältnisse der anderen Biomassegruppen unterscheiden sich dagegen erheblich. Eine Übertragung des existierenden Klassifizierungssystems auf die Elementarzusammensetzung bzw. das *H/C* und *O/C*-Verhältnis ist daher nicht zweckmäßig.

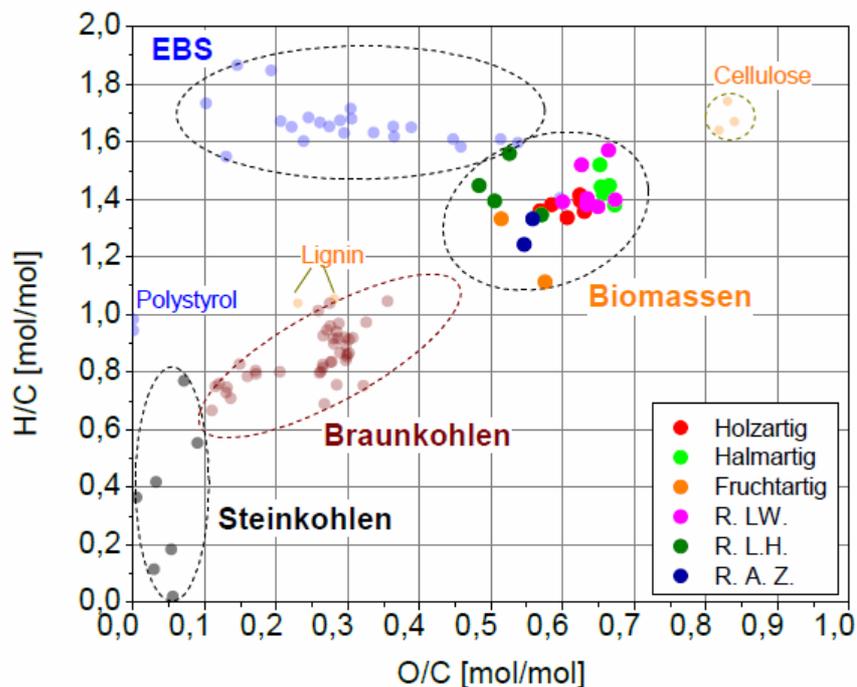


Abb. 6.1-4: Eigenschaften der organischen Brennstoffsubstanz biogener Festbrennstoffe im Vergleich zu Kohlen und Ersatzbrennstoffen

Im Hinblick auf die Schadstoffbildung sind u. a. die Elemente Schwefel und Stickstoff von Interesse. In Biomassen liegen diese v. a. in Form von Aminosäuren, Proteinen, Enzymen und Ölen in den Extraktstoffen organisch gebunden vor. Wie **Abb. 6.1-5** zeigt, variieren beide Elemente, v. a. der Stickstoffanteil, in erheblichem Maße, wobei ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen beiden Elementen besteht. Dieser Zusammenhang ist auf ähnliche Anteile beider Elemente in den genannten Extraktstoffen zurückzuführen (z. B. in den Aminosäuren Cystein und Methionin). Es wird auch deutlich, dass sich gemäß der Zuordnung von Biomassen entsprechend der eingeteilten Gruppen keine Aussage bezgl. des *S/N*-Verhältnisses ableiten lässt. Während sich hinsichtlich des *O/C*- und *H/C*-Verhältnis für

holzartige Biomassen ein enger Wertebereich ergibt (siehe Abb. 6.1-4), ist dies für das S/N-Verhältnis nicht der Fall. Der große Wertebereich hinsichtlich des S/N-Verhältnis begründet sich insbesondere durch den Einfluss von Düngemitteln bei den Hölzern von Kurzumtriebsplantagen (KUP).

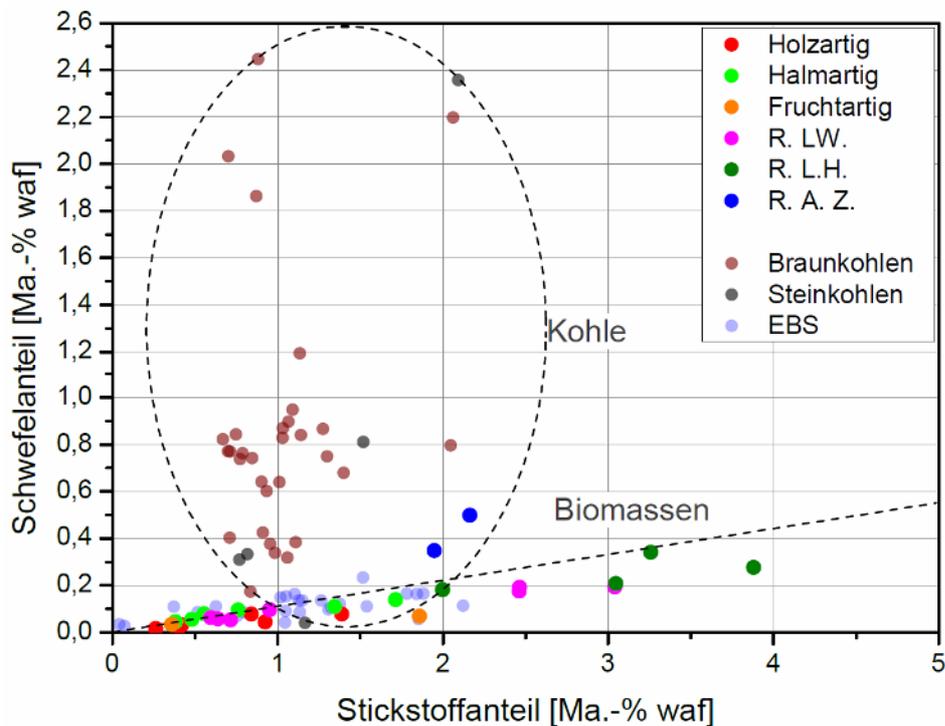


Abb. 6.1-5: Schwefel- und Stickstoffanteil im Brennstoff

Zur Klassifizierung der Brennstoffe bietet sich daher auch hier eine Clusterung in Gruppen ähnlicher Brennstoff-S- und -N-Gehalte an.

3) Mineralische Brennstoffsubstanz (Brennstoff- und Ascheanalyse)

Das Entstehen von Brennraumverschlackungen, Belägen auf Wärmeübertragerflächen und Korrosionserscheinungen an Kesselbauteilen wird wesentlich von der Zusammensetzung der mineralischen Brennstoffsubstanz bestimmt [8,9]. In Biomassen dominieren v. a. Salze (Chloride, Phosphate, Sulfate) und an die organische Struktur gebundene Elemente. Diese gelten in Bezug auf Verschlackung und Korrosion als besonders reaktiv [10].

Wie in **Abb. 6.1-6** deutlich wird, dominieren im Mittel die Elemente Si, K und Ca gefolgt von Mg, P, Na, Cl, Fe und Al. Bei dem Referenzbrennstoff und den holzartigen Biomassen im Allgemeinen dominiert v. a. das Element Calcium, welches i. d. R. als Calciumoxalat in der Brennstoffsubstanz vorliegt. In den KUP-Hölzern sind im Vergleich dazu erhöhte K- und P-Gehalte feststellbar, die auf die oben genannte Düngung zurückzuführen sind. In den halmgutartigen Biomassen dominieren v. a. Silizium und Kalium in Verbindung mit Chlor und Phosphor. Hervorzuheben ist die erhebliche Streuung innerhalb einer Switchgrasart. Insbesondere der Erntezeitpunkt, die Bodenbeschaffenheit, die Düngung und der eventuelle Verbleib der Ernte auf dem Feld (Auswaschung von mineralischen Bestandteilen) beeinflussen dabei die Zusammensetzung der mineralischen Brennstoffsubstanz.

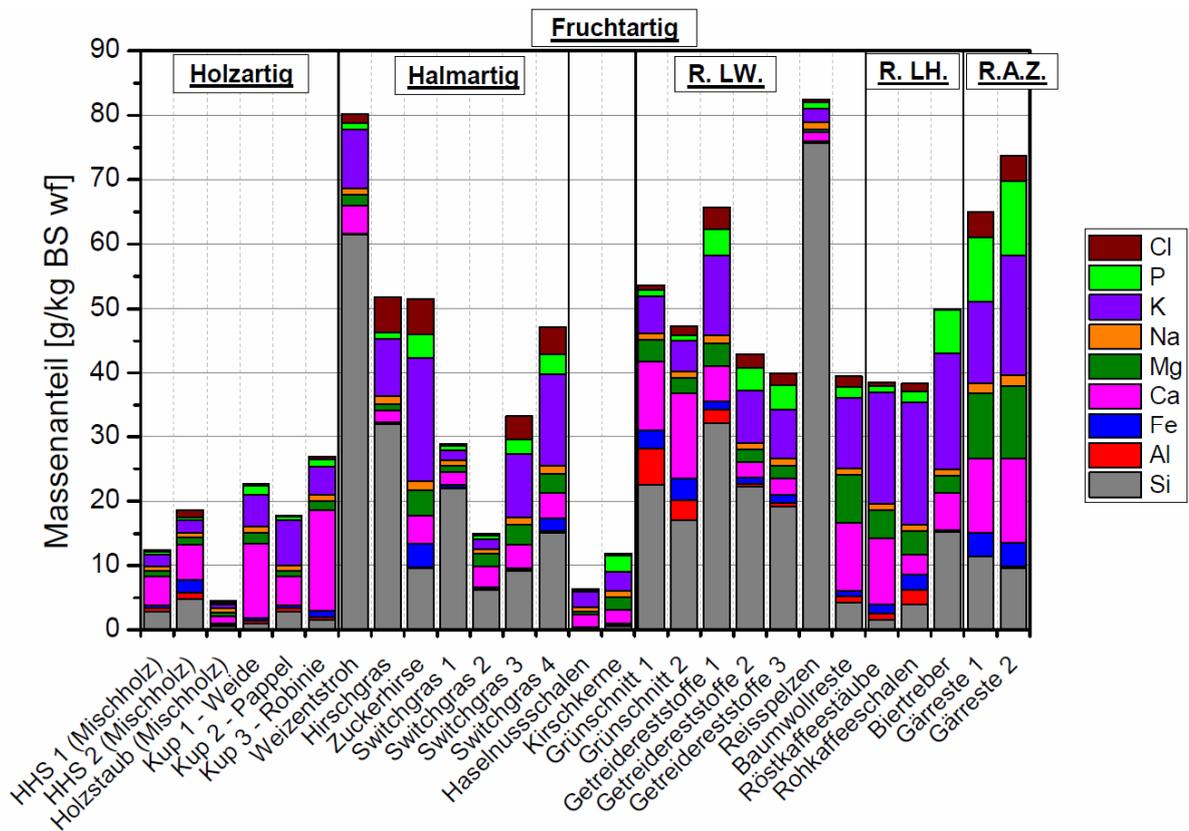


Abb. 6.1-6: Elementverteilung der mineralischen Brennstoffsubstanz

Werden die Elementgehalte der Biomassen innerhalb der eingeteilten Biomassegruppen betrachtet, so ist keine Übereinstimmung feststellbar. Besonders deutlich wird dies am Beispiel von Switchgras 1-4. So besitzen Switchgras 3 und 4 im Vergleich zu Switchgras 1 und 2 deutlich höhere K-, P- und Cl-Anteile. Um diese Variationsbreite in einer Klassifizierung zu berücksichtigen, bietet sich auch hier eine Clusterung ähnlicher Gehalte der einzelnen Elemente an.

Wie oben aufgeführt ist die Bindungsform der Elemente in der mineralischen Substanz im Hinblick auf Verschlackung und Korrosion von Bedeutung. Aus den vorangegangenen Betrachtungen lassen sich jedoch keine Aussagen dazu ableiten. Daher wurde untersucht, in welcher Form Zusammenhänge zwischen den Elementen vorliegen. In **Abb. 6.1-7** ist das Ergebnis einer Korrelationsanalyse in Form eines Matrix-Streudiagrammes dargestellt.

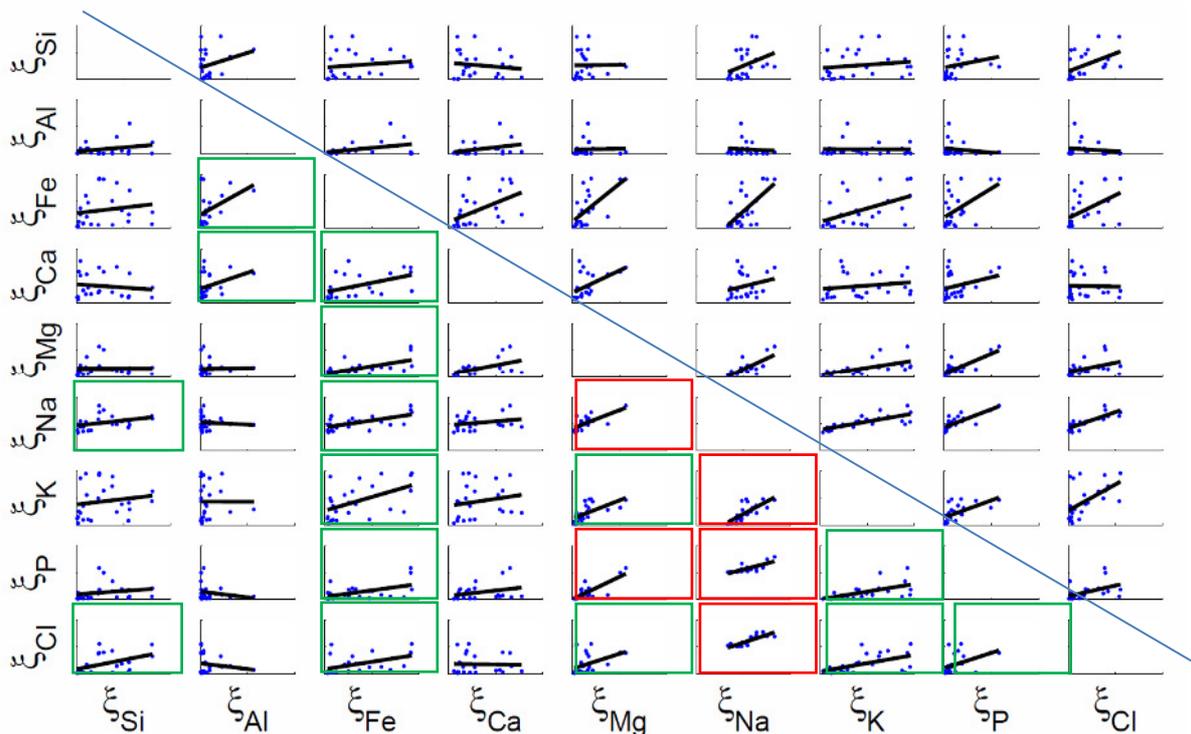


Abb. 6.1-7: Matrix-Streudiagramm der Elemente der mineralischen Substanz (grüner Rahmen: $1/3 \leq R^2 < 2/3$, roter Rahmen: $2/3 \leq R^2 < 1$)

Es wird deutlich, dass zwischen einzelnen Elementen der mineralischen Brennstoffsubstanz lineare Zusammenhänge existieren. Das höchste Bestimmtheitsmaß R^2 † der linearen Regression liegt dabei für die Elementkombinationen Mg-Na, Mg-P; Na-K, Na-P und Na-Cl vor. Es ist daher davon auszugehen dass die Elemente Na, Mg und K hauptsächlich als Chlorid und Phosphat gebunden sind.

Um detaillierte Informationen zu den mineralischen Bestandteilen zu erhalten sind weitere Analyseverfahren heranzuziehen, die jedoch nicht standardisiert sind (z. B. XRD, REM-EDX, DTA/DSC).

4) Ascheschmelzverhalten (ASV)

Zur Abschätzung der Verschlackungsneigung eines Brennstoffes wird üblicherweise das Ascheschmelzverhalten herangezogen. Dazu wird die Biomasse entsprechend der Norm bei 550 °C unter oxidierenden Bedingungen (Luftatmosphäre) verascht. Die Charakterisierung des Ascheschmelzverhaltens erfolgt anhand der *Sinter-* (ST), *Erweichungs-* (ET), *Halbkugel-* (HT) und *Fließtemperatur* (FT). In **Abb. 6.1-8** ist der Schmelzbereich der Brennstoffasche (Sinter- bis Fließtemperatur) dargestellt.

† Das Bestimmtheitsmaß R^2 dient als Maß, um die Güte der linearen Abhängigkeit zwischen zwei aschebildenden Elementen zu bewerten. Bei $R^2=1$ liegt ein linearer Zusammenhang zwischen den zwei betrachteten Elementen vor.

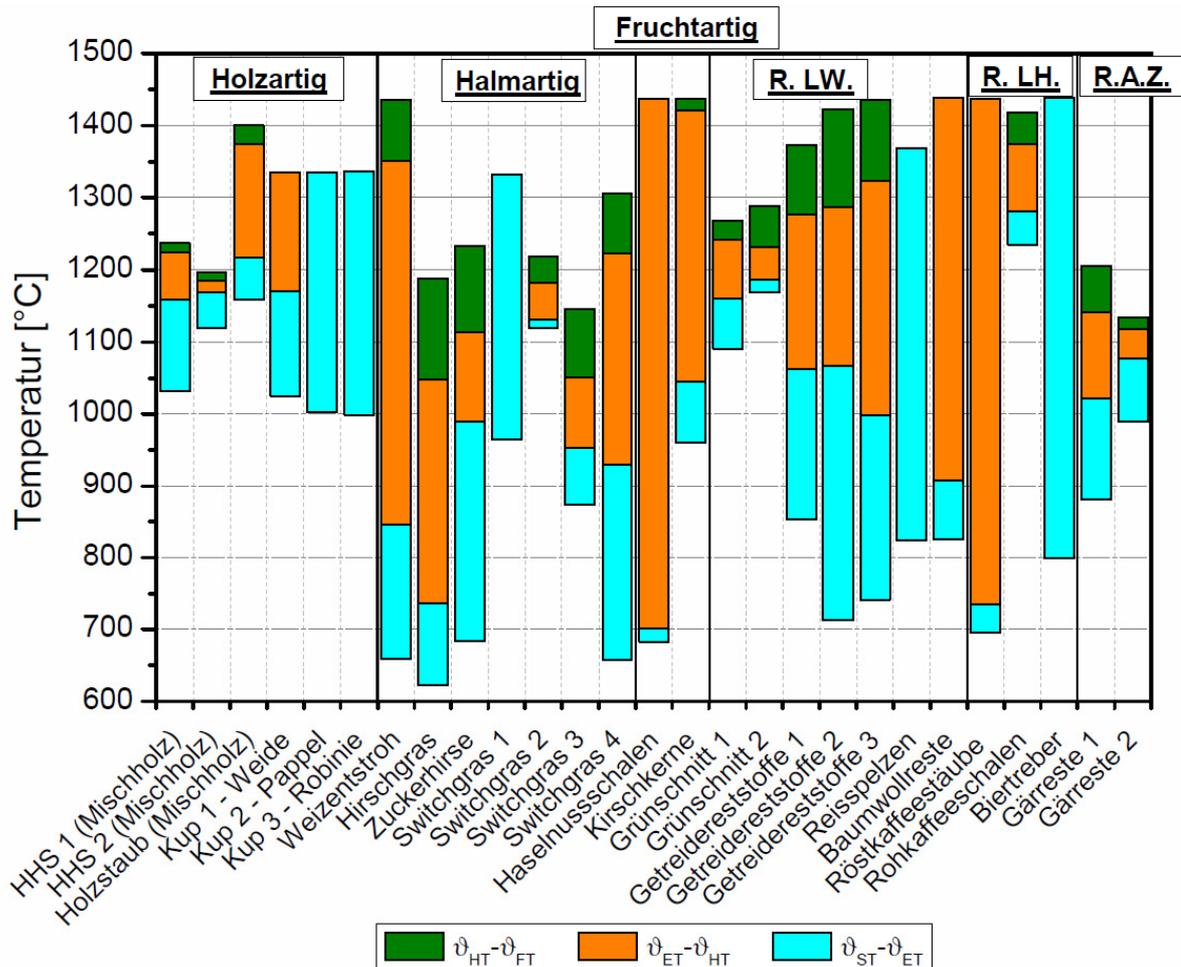


Abb. 6.1-8: Ascheschmelzverhalten der Brennstoffasche nach Standardmethode (oxidierend verascht bei 550 °C und unter oxidierender Atmosphäre erhitzt)

Generell ist festzustellen, dass die im Labor erzeugten Aschen des Referenzbrennstoffes und der KUP-Hölzer bei höheren Temperaturen schmelzen als die Laboraschen der anderen Biomassen. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Erweichungstemperatur, da bei dieser Temperatur die Bildung von schmelzflüssigen Aschephase beginnt, und damit erste Verklebungen auftreten können. Beim Referenzbrennstoff ist diese Temperatur größer als 1100 °C. Ähnliche bzw. höhere Erweichungstemperaturen wurden für das Switchgras 1 und 2, Grünschnitt 1 und 2, Reisspelzen sowie Rohkaffeeschalen ermittelt. Die niedrigsten Erweichungstemperaturen wurden bei den Haselnusschalen (702 °C) und dem Hirschgras (737 °C) festgestellt. Hervorzuheben ist, dass innerhalb einer Biomasseart erhebliche Schwankungen im Ascheschmelzverhalten auftreten können, die von praktischer Relevanz sind. Beispielhaft soll hierbei das Switchgras 1-4 genannt werden.

Um den Einfluss von Reaktionsgaszusammensetzung und Temperatur zu untersuchen, wurde über das Standardverfahren hinaus das Veraschungs- und das Ascheschmelzverhalten unter reduzierenden Bedingungen bestimmt (siehe Abschnitt 6.3).

6.1.2 Kalorische Brennstoffeigenschaften

Von wesentlicher Bedeutung für die thermische Nutzung der Biomassen ist der Heizwert h_u . Dieser bestimmt den Brennstoffmassenstrom, der für eine zu erzielende Feuerungs-wärmeleistung benötigt wird. Der Heizwert beeinflusst damit indirekt auch die Lagerkapazität und die Brennstoffförderung.

Die experimentelle Bestimmung des Heizwertes erfolgt standardmäßig aus dem mit einem Bombenkalorimeter gemessenen Brennwert. Der Heizwert wird von den brennbaren (C, H, S erhöhen h_u) und nichtbrennbaren Brennstoffbestandteilen (Wasser, Asche, N, O senken h_u) bestimmt. Für den praktischen Einsatz ist daher vor allem der Heizwert im Lieferzustand von Interesse. Für den Brennstoffvergleich ist es zweckmäßiger den Bezugszustand waf zu verwenden. In **Abb. 6.1-9** sind beide Bezugszustände dargestellt.

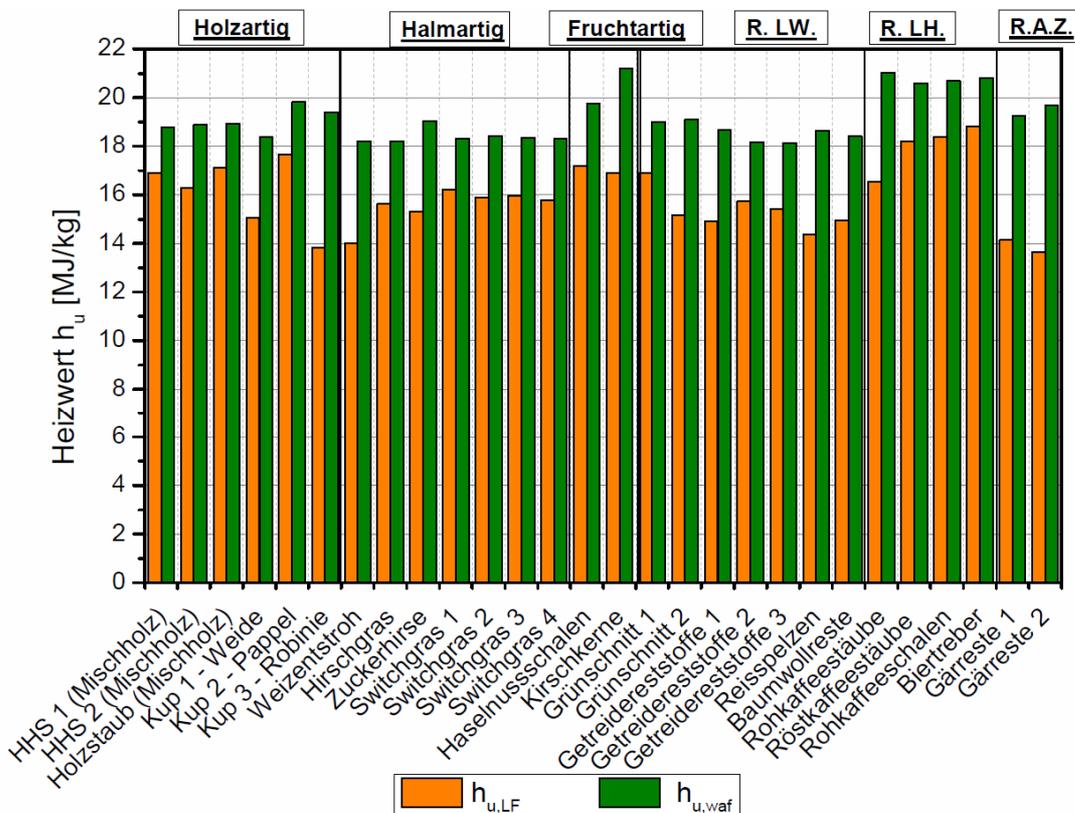


Abb. 6.1-9: Heizwerte im Liefer- (LF) und wasseraschefreien (waf) Zustand

Der Heizwert im Lieferzustand variiert zwischen 13,67 MJ/kg LF (Gärreste 2) und 18,83 MJ/kg LF (Biertreber). Der Heizwert des Referenzbrennstoffes beträgt im Mittel 17 MJ/kg LF. Die Variation des Heizwertes im Lieferzustand ist v. a. auf die unterschiedlichen Wasser- und Aschegehalte (vgl. Abb. 6.1-2) zurückzuführen. Der Heizwert der wasseraschefreien Substanz liegt zwischen 18,13 MJ/kg waf (Getreidereststoffe) und 21,21 MJ/kg waf (Kirschkern). Der Heizwert des Referenzbrennstoffes beträgt 19 MJ/kg waf.

Die Unterschiede im Heizwert der auf den waf-Zustand bezogenen Brennstoffsubstanz resultieren aus den unterschiedlichen Anteilen der Hauptbestandteile Cellulose, Hemicellulose und Lignin. Wie in **Abb. 6.1-10** dargestellt, ist der Heizwert von Lignin ($h_u = 27,3$ MJ/kg waf)

deutlich größer als der von Holocellulose (Cellulose+Hemicellulose, $h_u = 15,8$ MJ/kg waf). Je größer der Ligninanteil einer Biomasse ist, desto größer ist damit auch der waf-Heizwert.

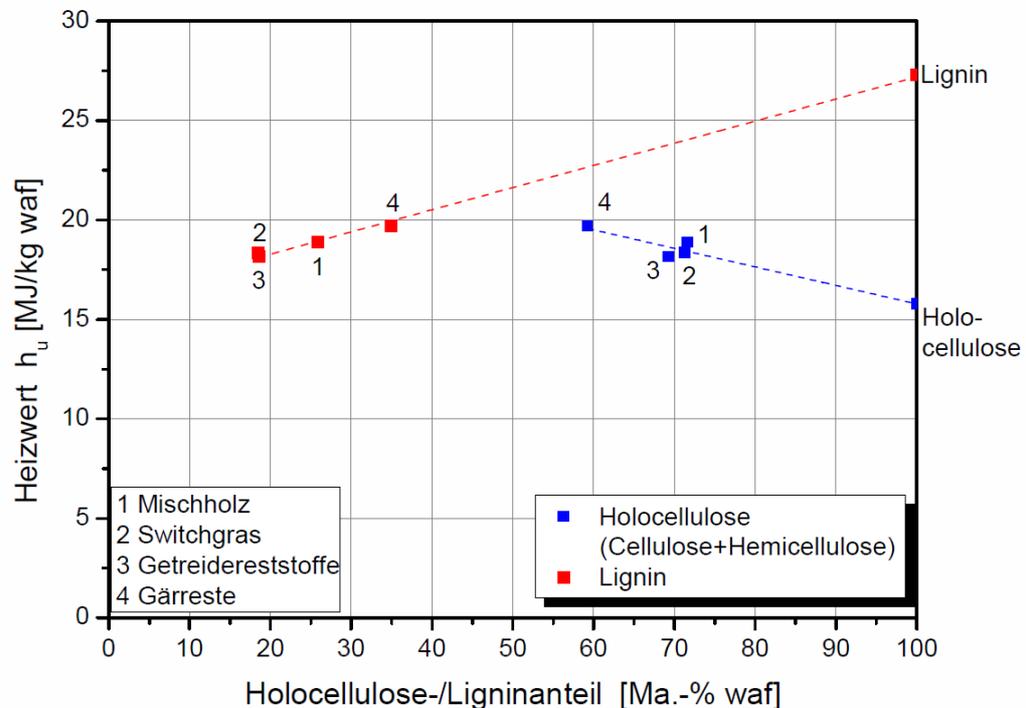


Abb. 6.1-10: Heizwert waf in Abhängigkeit des Holocellulose- und Ligninanteils.

6.1.3 Mechanische Brennstoffeigenschaften

Zu den mechanischen Brennstoffeigenschaften zählen u. a. die Korngrößenverteilung, die Reindichte und die Schüttdichte.

Die Korngrößenverteilung wird erheblich von der Zerkleinerung des Ausgangsmaterials beeinflusst. In **Abb. 6.1-11** sind daher die Korngrößenverteilungen ausgewählter *staubförmiger* und *stückiger* Biomassen zusammen mit daraus abgeleiteten charakteristischen Kennzahlen (minimale $d_{\min,3}$ und maximale Korngröße $d_{\max,3}$, Medianwert $d_{50,3}$) gegenübergestellt.

Bei den staubförmigen Biomassen wird deutlich, dass das Mischholz signifikant größere Partikel im Vergleich zum Switchgras und zu den Getreidereststoffen enthält. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei dem Mischholzstaub um Ausgangsmaterial für die Pelletproduktion handelt. Dagegen wurden Switchgras und Getreidereststoffe für die Versuche in den Staubfeuerungsanlagen aufgemahlen.

Die Auswirkung der unterschiedlichen Korngrößen auf das Zünd- und Verbrennungsverhalten in Staubfeuerungsanlagen sind in Abschnitt 6.11 dargestellt. In Bezug auf die stückigen Biomassen (Abb. 6.11-1 rechts) ist feststellbar, dass das Mischholz (Hackschnitzel) über eine breitere Korngrößenverteilung mit einem höheren Anteil an größeren Partikeln verfügt. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Korngröße stückiger Biomassen auf Ausbrand und Schadstoffemissionen in einer zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung ist in Abschnitt 6.9 dargestellt.

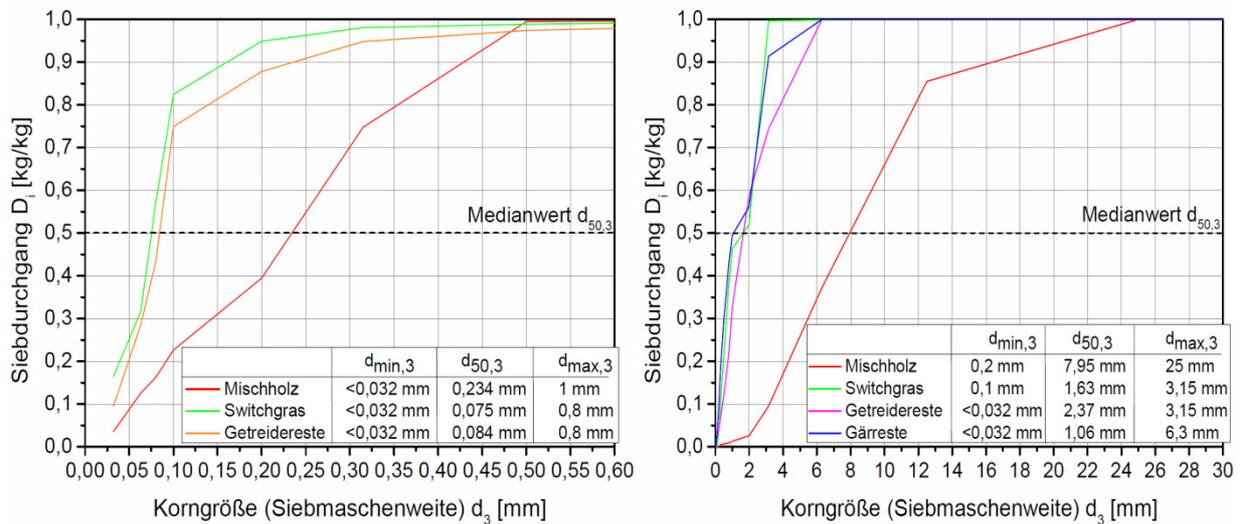


Abb. 6.1-11: Korngrößenverteilungen ausgewählter staubförmiger (links) und stückiger Biomassen (rechts)

In **Abb. 6.1-12** sind die trockene Reindichte (wf) ohne Poren und die Schüttdichte (LF) der untersuchten Biomassen gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass die Reindichte mit Ausnahme der Haselnussschalen ($1440 \text{ kg/m}^3 \text{ wf}$), der Kirschkern ($1350 \text{ kg/m}^3 \text{ wf}$) und dem Biertreber ($1374 \text{ kg/m}^3 \text{ wf}$) nur geringfügig schwankt. Dies ist damit zu begründen, dass die trockene Reindichte nur von der Zusammensetzung der organischen und anorganischen (mineralischen) Brennstoffsubstanz bestimmt wird (s. **Abb. 6.1-2**).

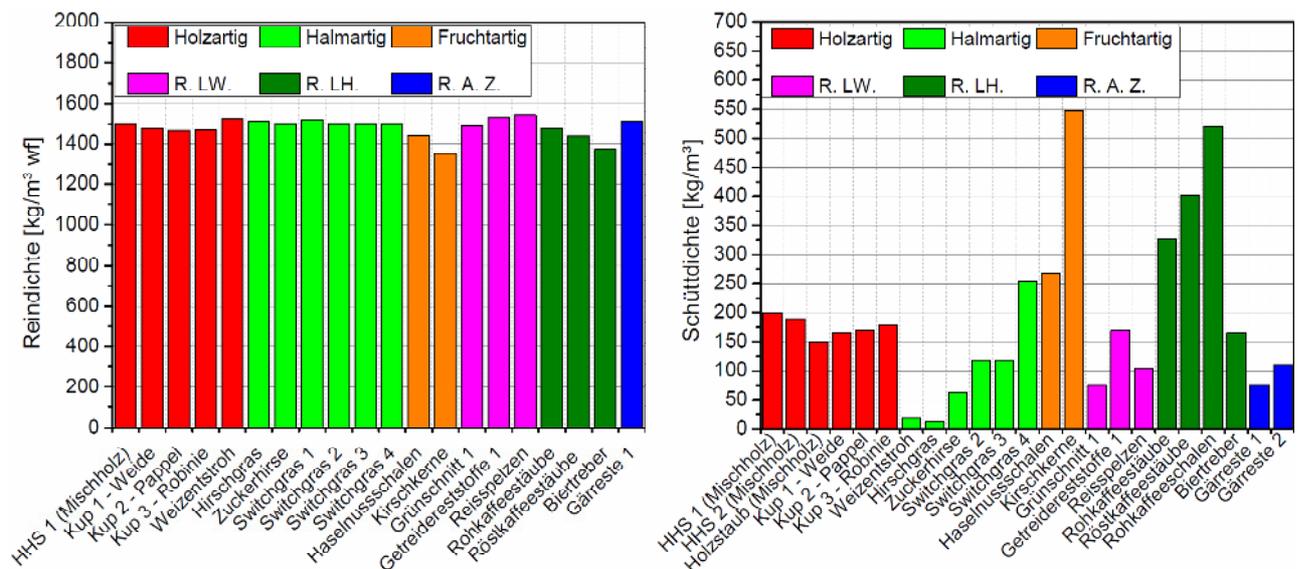


Abb. 6.1-12: Gegenüberstellung von Reindichte (links) und Schüttdichte (rechts) ausgewählter Biomassen

Die im Gegensatz dazu großen Schwankungen in der Schüttdichte sind darauf zurückzuführen, dass diese im Wesentlichen von der Größe und Struktur der Einsatzstoffe abhängen. Die Biomassen Hirschgras (12 kg/m³ LF) und Weizenstroh (19 kg/m³ LF) lagen als Halmgut vor (keine mechanische Aufbereitung) und hatten daher eine geringe Packungsdichte. Im Gegensatz dazu ist die Schüttdichte der Kirschkerne (548 kg/m³ LF) größer, da die näherungsweise kugelförmigen Partikel eine sehr hohe Packungsdichte aufweisen.

6.1.4 Verbrennungstechnische Kenngrößen und Berechnungsansätze

1) Trockener Mindestluftbedarf und adiabate Verbrennungstemperatur

Über eine Verbrennungsrechnung können aus den Daten der Elementaranalyse und dem Heizwert verbrennungsspezifische Kenngrößen wie z. B. der trockene Mindestluftbedarf $L_{\min, \text{tr}}$ und die adiabate Verbrennungstemperatur ϑ_{ad} berechnet werden. Diese liefern wichtige Informationen welche Auswirkungen ein Brennstoffwechsel z. B. auf das Verbrennungsluftgebläse und die theoretisch maximal mögliche Verbrennungstemperatur hat. In **Abb. 6.1-13** sind der berechnete trockene Mindestluftbedarf und die adiabate Verbrennungstemperatur für die Biomassen dargestellt.

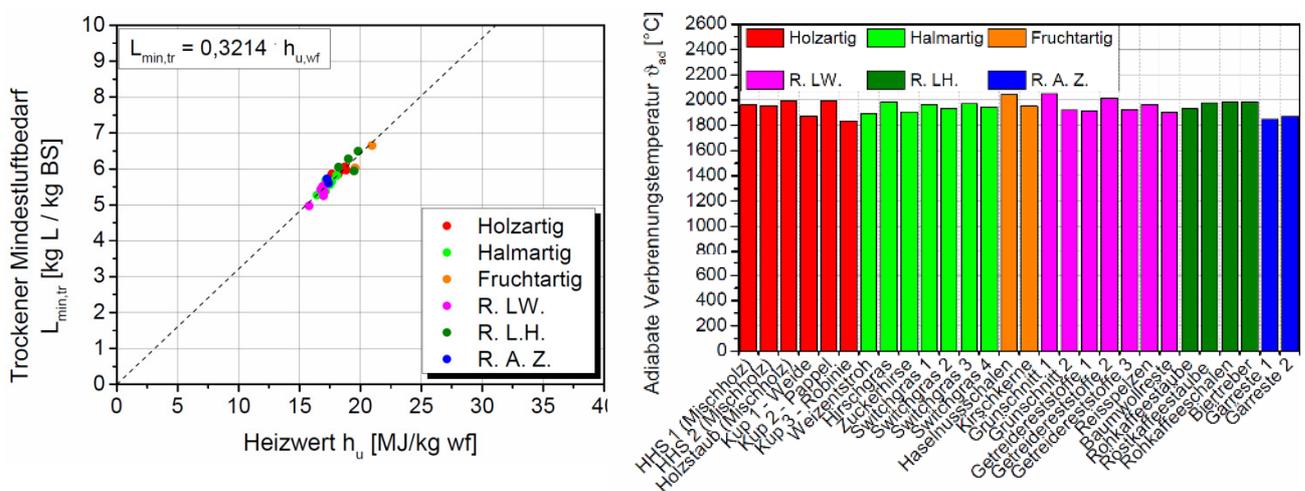


Abb. 6.1-13: Trockener Mindestluftbedarf $L_{\min, \text{tr}}$ in Abhängigkeit vom Heizwert und adiabate Verbrennungstemperatur ϑ_{Ad}

Der trockene Mindestluftbedarf liegt zwischen 4,97 kg L / kg BS (Reisspelzen) und 6,65 kg L / kg BS (Kirschkerne). Der trockene Mindestluftbedarf des Referenzbrennstoffes beträgt im Mittel 5,92 kg L / kg BS. Wie der lineare Zusammenhang zwischen $L_{\min, \text{tr}}$ und h_u zeigt, kann der trockene Mindestluftbedarf mit ungefähr einem Drittel des Heizwertes abgeschätzt werden.

Die in Abb. 6.1-13 (rechts) dargestellte adiabate Verbrennungstemperatur variiert zwischen 1838 °C (KUP 3-Robinie) und 2048 °C (Grünschnitt 1). Die adiabate Verbrennungstemperatur des Referenzbrennstoffes beträgt rund 2000 °C.

2) Abschätzung des Heizwertes

Für den Fall, dass kein Zugang zu experimentell ermittelten Daten besteht, sind Gleichungen zur Abschätzung des Energieinhaltes eines Brennstoffes nützlich. Ausgehend von den brennbaren Bestandteilen im Brennstoff lassen sich Zusammenhänge zum Heiz- und Brennwert ableiten. Im Schrifttum sind eine Vielzahl entsprechender Gleichungen dokumentiert. Um deren Anwendbarkeit auf die untersuchten Biomassen zu prüfen, wurden Heiz- und Brennwerte mit einer Auswahl dieser Gleichungen berechnet. Darüber hinaus wurden im Rahmen des Projektes zwei neue Gleichungen entwickelt, die auf Basis einer multiplen linearen Regression aus den Messergebnissen abgeleitet wurden. Eine grafische Gegenüberstellung der Mess- und Berechnungsergebnisse ist in Anhang 14.7 dargestellt.

Ausgewählte Gleichungen zur Berechnung des Heizwertes

Dulong (aus [11]):

$$h_{u,an} = 33,9 \cdot \xi_{C,an} + 10,5 \cdot \xi_{S,an} + 121,4 \cdot \left(\xi_{H,an} - \frac{\xi_{O,an}}{8} \right) - 2,44 \cdot \xi_{W,an} \quad \text{Gl. 1}$$

Boie [12]:

$$h_{u,an} = 34,8 \cdot \xi_{C,an} + 93,9 \cdot \xi_{H,an} - 10,8 \cdot \xi_{O,an} + 10,5 \cdot \xi_{S,an} + 6,3 \cdot \xi_{N,an} - 2,44 \cdot \xi_{W,an} \quad \text{Gl. 2}$$

Aus den Analyseenergebnissen abgeleitete Heizwert-Gleichung:

$$h_{u,an} = 39,0 \cdot \xi_{C,an} + 17,7 \cdot \xi_{H,an} - 4,9 \cdot \xi_{O,an} + 120,5 \cdot \xi_{S,an} + 28,2 \cdot \xi_{N,an} - 4,3 \cdot \xi_{W,an} \quad \text{Gl. 3}$$

Ausgewählte Gleichungen zur Berechnung des Brennwertes

Mott & Spooner [13]:

$$h_{o,wf} = 33,6 \cdot \xi_{C,wf} + 141,8 \cdot \xi_{H,wf} - (15,3 - 0,072 \cdot \xi_{O,wf}) \cdot \xi_{O,wf} + 9,41 \cdot \xi_{S,wf} \quad \text{Gl. 4}$$

Yin [14]:

$$h_{o,wf} = 0,2949 \cdot \xi_{C,wf} + 0,8250 \cdot \xi_{H,wf} \quad \text{Gl. 5}$$

Aus den Analyseenergebnissen abgeleitete Brennwert-Gleichung:

$$h_{o,wf} = 37,76 \cdot \xi_{C,wf} + 21,4 \cdot \xi_{H,wf} - 3,46 \cdot \xi_{O,wf} + 23,47 \cdot \xi_{N,wf} - 107,70 \cdot \xi_{S,wf} \quad \text{Gl. 6}$$

Um die Qualität der unterschiedlichen Berechnungsansätze zu prüfen, zeigt **Abb. 6.1-14** den Mittelwert der relativen Abweichungen. Es kann eine hinreichend gute Übereinstimmung für die Ansätze von Boie und Yin sowie die beiden aus den Messdaten abgeleiteten Gleichungen festgestellt werden.

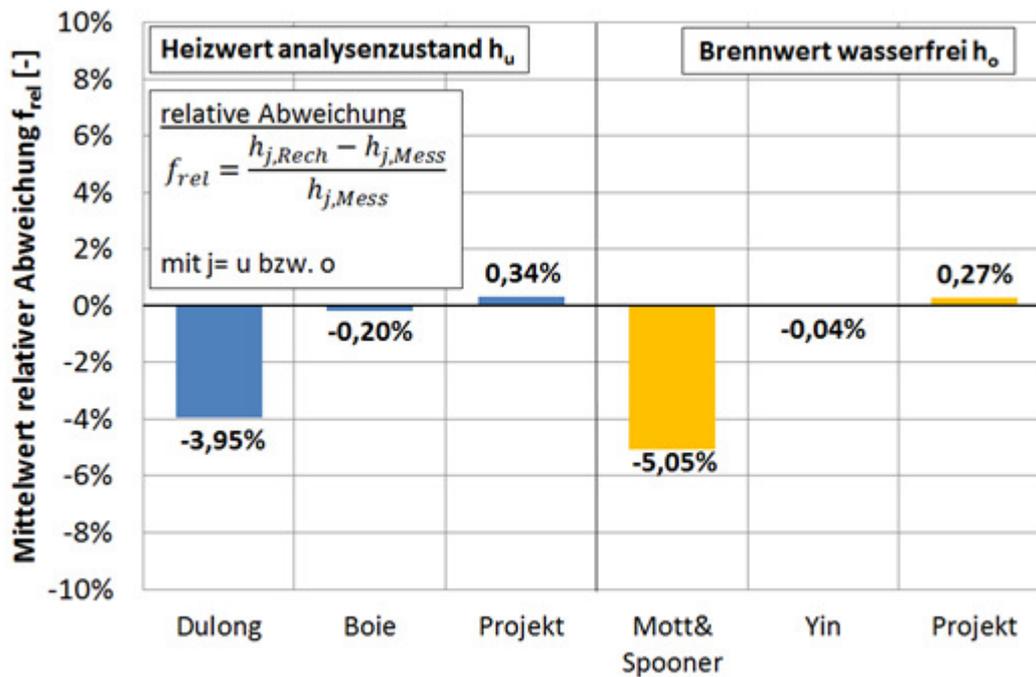


Abb. 6.1-14: Mittelwert der relativen Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Heiz- und Brennwerten

3) Abschätzung des Ascheschmelzverhaltens mit Hilfe von Korrelationen

Für eine praxistaugliche schnelle Vorhersage des Ascheschmelzverhaltens werden oftmals einfache Korrelationen nachgefragt. Es ist bekannt, dass bestimmte Elemente wie K und Na die Ascheschmelztemperaturen erniedrigen und andere Elemente wie Ca und Mg die Ascheschmelztemperaturen erhöhen [15].

Um einen empirischen Zusammenhang zwischen den Elementen der mineralischen Brennstoffsubstanz (siehe Abb. 6.1-6) und den charakteristischen Ascheschmelztemperaturen (s. Abb. 6.1-8) abzuleiten, wurde eine multiple lineare Regression auf Basis der Analysenwerte durchgeführt. Die für Gl. 7 bestimmten Koeffizienten sind in Anhang 14.6 tabelliert.

$$\vartheta_j = b + m_1 \cdot \xi_{Si,wf} + m_2 \cdot \xi_{Al,wf} + m_3 \cdot \xi_{Fe,wf} + m_4 \cdot \xi_{Ca,wf} + m_5 \cdot \xi_{Mg,wf} + m_6 \cdot \xi_{Na,wf} + m_7 \cdot \xi_{K,wf} + m_8 \cdot \xi_{P,wf} + m_9 \cdot \xi_{Cl,wf} \quad \text{Gl. 7}$$

mit $j \dots$ ST, ET, HT, FT und $\xi_{i,wf}$ in [kg/kg wf]

Die Bestimmtheitsmaße für die vier charakteristischen Temperaturen betragen $R^2_{ST}=0,5210$; $R^2_{ET}=0,4736$; $R^2_{HT}=0,7080$; und $R^2_{FT}=0,5455$. Die Werte sind viel kleiner als eins, so dass keine brauchbare Korrelation besteht. Die Gründe sind v.a. in der Komplexität der ablaufenden Teilprozesse zu suchen und nachfolgend kurz erläutert.

Die mineralischen Substanzen bzw. deren Umwandlungsprodukte bilden ein Vielstoffsystem, welches ein komplexes thermodynamisches Verhalten aufweist. Die Zusammensetzung dieses

Vielstoffsystems in Abhängigkeit von der Temperatur beeinflusst dabei die Bildung von festen und flüssigen Phasen, wobei auch Eutektika und Mischungslücken auftreten können. Darüber hinaus beeinflusst, wie in Abschnitt 6.3 gezeigt, die Zusammensetzung des umgebenden Gases das Schmelzverhalten der Asche.

4) Abschätzung des Verschlackungs- und Korrosionsrisikos mit Hilfe von Kennzahlen und Indices

Für die vorausschauende Bewertung von Brennstoffeigenschaften zur Abschätzung des Verschlackungs- und Korrosionsrisikos sind für die Praxis einfach handhabbare Gleichungen hilfreich. Im Schrifttum sind eine Reihe von Kennzahlen und Indices dokumentiert, die auf der Aschezusammensetzung bzw. der im Brennstoff enthaltenen aschebildenden Elemente beruhen. Eine Zusammenstellung wesentlicher Kenngrößen ist z. B. in [8,15-17] enthalten. Dazu zählen z. B.

- Das Base-Säure-Verhältnis (engl. Slagging Index),

$$R_{B/S} = \frac{\xi_{Fe_2O_3} + \xi_{CaO} + \xi_{MgO} + \xi_{Na_2O} + \xi_{K_2O}}{\xi_{SiO_2} + \xi_{Al_2O_3} + \xi_{TiO_2}}$$

- der Alkali-Index,

$$AI = \frac{0,1 \cdot \xi_A \cdot (\xi_{Na_2O} + \xi_{K_2O})}{h_{u,wf}}$$

- das Schwefel zu Chlor-Verhältnis und

$$S/Cl = \frac{\xi_{S,BS}}{\xi_{Cl,BS}} \cdot \frac{M_{Cl}}{M_S}$$

- die Chlorkorrosionskennzahl.

$$K_{Cl} = \frac{\xi_{S,BS}}{100 \cdot M_S} \cdot \frac{1}{2 \cdot \text{Max} \left(\frac{\xi_{Na,BS}}{100 \cdot M_{Na}} + \frac{\xi_{K,BS}}{200 \cdot M_K}; \frac{\xi_{Cl,BS}}{200 \cdot M_{Cl}} \right)}$$

Für jede dieser Kennzahlen werden Bereiche definiert, die eine Gefährdungseinteilung in gering, mittel und groß angeben. Im Rahmen der Untersuchungen wurden 13 Kennzahlen berücksichtigt. In **Tab. 6.1-3** ist die Verteilung des vorhergesagten Verschlackungs- bzw. Korrosionsrisikos für einige Biomassen exemplarisch dargestellt. Nicht alle berücksichtigten Kennzahlen lieferten plausible Werte für die Bewertung, was hauptsächlich durch den jeweiligen Gültigkeitsbereich der Kennzahlgleichung begründet ist.

Tab. 6.1-3: Anzahl der Kennzahlen und Indices, die ein niedriges, mittleres und hohes Verschlackungs- bzw. Korrosionsrisiko vorhersagen

Biomasse	Niedriges Risiko	Mittleres Risiko	Hohes Risiko
HHS 1	3	1	9
Weide	1	3	7
Pappel	2	1	8
Robinie	2	2	6
Weizenstroh	8	1	1
Zuckersilage	0	3	8
Hirschgras	7	2	1
Switchgras 1	8	1	1
Haselnussschalen	4	0	7
Getreidereststoffe	3	5	3
Reisspelzen	9	1	0
Grünschnitt	2	4	4
Rohkaffestaub	0	3	9
Röstkaffestaub	2	0	9
Biertreber	5	2	4
Gärreste 1	2	2	7

Es wird deutlich, dass bei den meisten Biomassen eine sehr starke Streuung des Gefährdungspotentials erkennbar ist. Die Ursache dafür ist, dass die komplexen Vorgänge der Ascheumwandlung, der Freisetzung und Ablagerung von Aschebestandteilen, die Mehrphasen-thermodynamik der Schmelzen sowie die Reaktionen von Aschebestandteilen mit den Kesselmaterialien nicht mit einfachen algebraischen Gleichungen abgebildet werden können. Daher ist die Verwendung derartiger Kennzahlen allgemein nicht zu empfehlen (siehe auch Korrelation Ascheschmelztemperaturen – Gl. 7)

6.1.5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen der brennstofftechnischen Charakterisierung von Biomassen nach Standardmethoden wurden die Brennstoffeigenschaften von 28 Biomasseproben bestimmt. Als Referenzbrennstoff wurde eine Mischung aus Nadel-Laub-Holz verwendet, die in Form von Holzhackschnitzeln und Holzstaub vorlagen. Die Unterteilung der Brennstoffeigenschaften erfolgte nach chemischen, kalorischen und mechanischen Kriterien.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Brennstoffeigenschaften des Einsatzstoffspektrums variieren im Vergleich zu den Eigenschaften des Referenzbrennstoffes in z. T. erheblichem Maße. Hervorzuheben sind hierbei insbesondere der Aschegehalt, der Brennstoff-N und –S-Gehalt, die

Zusammensetzung der mineralischen Substanz und das Ascheschmelzverhalten. Variationen dieser Größen nehmen einen entscheidenden Einfluss auf den Prozess und die Anlagentechnik. Zu nennen sind hierbei z. B. Schadstoffemissionen (NO_x und SO_2), die Gefahr von Verschlackung und Korrosion des Brennraumes und der Wärmeübertragerflächen sowie die Auswirkungen auf die Verbrennungsluft- und Abgasmenge.

- Das existierende Klassifizierungssystem, welches auf Herkunft und Ursprung von Biomassen beruht, ist nicht auf die brennstofftechnischen Eigenschaften übertragbar. Es scheint zweckmäßiger eine Gruppierung / Clusterung ähnlicher Brennstoffeigenschaften vorzunehmen.
- Es wurden vier im Schrifttum dokumentierte Gleichungen zur Berechnung des Heiz- und Brennwertes auf Anwendbarkeit geprüft. Demnach liefern die Heizwertgleichung von Boie und Yin auf Basis der Elementar- und Kurzanalyse eine zufriedenstellende Vorhersagegüte für das untersuchte Einsatzstoffspektrum. Darüber hinaus wurden mit Hilfe einer multiplen linearen Regression zwei weitere Gleichungen auf Basis von Elementar- und Kurzanalyse abgeleitet. Auch diese liefern eine sehr gute Vorhersagegüte, wobei keine signifikante Verbesserung gegenüber den Gleichungen von Boie und Yin erzielt werden konnte.
- Mit einer multiplen linearen Regression wurden vier Gleichungen zur Vorausberechnung der vier charakteristischen Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens (Sinter-, Erweichungs-, Halbkugel- und Fließtemperatur) aus den Analysendaten abgeleitet. Eine zufriedenstellende Vorhersage kann damit jedoch nicht erreicht werden. Dies trifft im erweiterten Sinne auch auf andere Gleichungen zu, die im Schrifttum dokumentiert sind. Als Ursache wird die Komplexität der ablaufenden physikalisch-chemischen Vorgänge angesehen, die nicht durch einfache algebraische Gleichungen wiedergegeben werden können. Die Anwendung derartiger Gleichungen wird daher als problematisch angesehen.
- Zur Abschätzung des Verschlackungs- und Korrosionspotentials auf Basis der Brennstoff- und Aschezusammensetzung wurden 13 im Schrifttum dokumentierte Kennzahlen und Indices berechnet. Aufgrund deutlicher Unterschiede in der Bewertung des Verschlackungs- und Korrosionsrisikos (niedrig, mittel, hoch) der einzelnen Kennzahlen und Indices kann die Anwendung der selbigen nicht empfohlen werden. Wie bei der Vorausberechnung des Ascheschmelzverhaltens ist die Ursache in der Komplexität der ablaufenden physikalisch-chemischen Vorgänge zu suchen, die sehr stark von den Prozessbedingungen abhängen.

Für die im Folgenden dargestellten Untersuchungen in den Labor- und Technikumsanlagen wurde der ursprüngliche Umfang an Biomassen reduziert. In **Tab. 6.1-4** sind die in den jeweiligen Versuchsanlagen eingesetzten Biomassen zusammengefasst.

Tab. 6.1-4: Aufteilung der Biomassen auf Labor- und Technikumsuntersuchungen

Biomassen	Zünd- ofen	Labor- TGA	Technische TGA	Veraschung	Schnecken- pyrolyse	Batch- Rost	DTR
Mischholz	X	X	X		X	X	X
KUP 1: Weide							
KUP 2: Pappel	X	X	X		X	X	
KUP 3: Robinie							
Weizenstroh				X			
Energiegras						X	
Zuckerhirse- Silage							
Switchgras	X	X	X	X		X	X
Haselnusschalen							
Kirschkerne	X		X				
Grünschnitt	X	X	X				
Getreidereststoffe	X	X	X	X	X	X	
Reisspelzen	X	X	X		X	X	
Baumwollreste							
Rohkaffeestaub	X		X		X	X	
Röstkaffeestaub		X					
Kaffeeschalen							
Biertreber							
Gärreste	X	X	X	X	X	X	

6.2 Zündverhalten und Thermogravimetrie

Zündverhalten

Ziel der Untersuchungen

Zur Bestimmung der Zündtemperatur wurde ein Laborzündofen verwendet. Die Untersuchungen am Zündofen des IEVB ermöglichen eine relativ schnelle Bestimmung der Zündwilligkeit eines staubförmigen Brennstoffes. Die Zündwilligkeit ist ein wichtiger Parameter bei der Bestimmung der kinetischen Eigenschaften eines Brennstoffes.

Versuchsaufbau

Der Zündofen des IEVB (s. **Abb. 6.2-1**) besteht aus einem waagerechten beheizten zylindrischen Ofen, in den über einen Druckimpuls eine Probe des zu untersuchenden Brennstoffs eingeblasen wird. Durch die Strahlungswärme der heißen Ofenwände wird die eingeblasene Probe gezündet. Diese Zündung wird über einen optischen Sensor registriert und es wird die Zeit gemessen, die zwischen dem Druckimpuls und der Zündung vergangen ist. Diese Zeitspanne wird Zündverzögerung genannt. Die Einblasgeschwindigkeit beträgt 20 m/s. Bei den Standarduntersuchungen ist der Sauerstoffgehalt 21 Vol.-% (Luft) bzw. 10,5 Vol.-% (Luft/Stickstoff-Gemisch). Jeder Versuch wird bei verschiedenen Ofentemperaturen durchgeführt und es wird die Ofentemperatur über der Zündverzögerung aufgetragen (s. **Abb. 6.2-2**). Als charakteristische Zündtemperatur T_{Z150} wird diejenige Ofentemperatur angenommen, bei der die Zündung in der Luftatmosphäre nach einer Zündverzögerung von 150 ms eintritt.

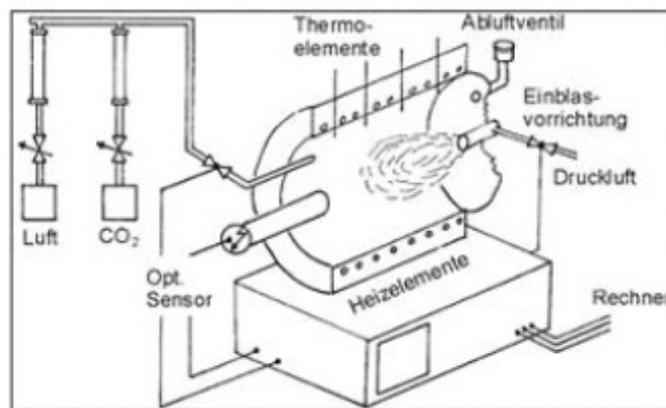


Abb. 6.2-1: Prinzipieller Aufbau des Zündreaktors

Versuchsergebnisse

In **Abb. 6.2-3** ist zu erkennen, dass die Zündtemperaturen aller untersuchten staubförmigen Biomassen zwischen 621 °C bis 707 °C zu finden sind. Die Steinkohle Middleburg liegt bei einer Zündtemperatur von 780°C.

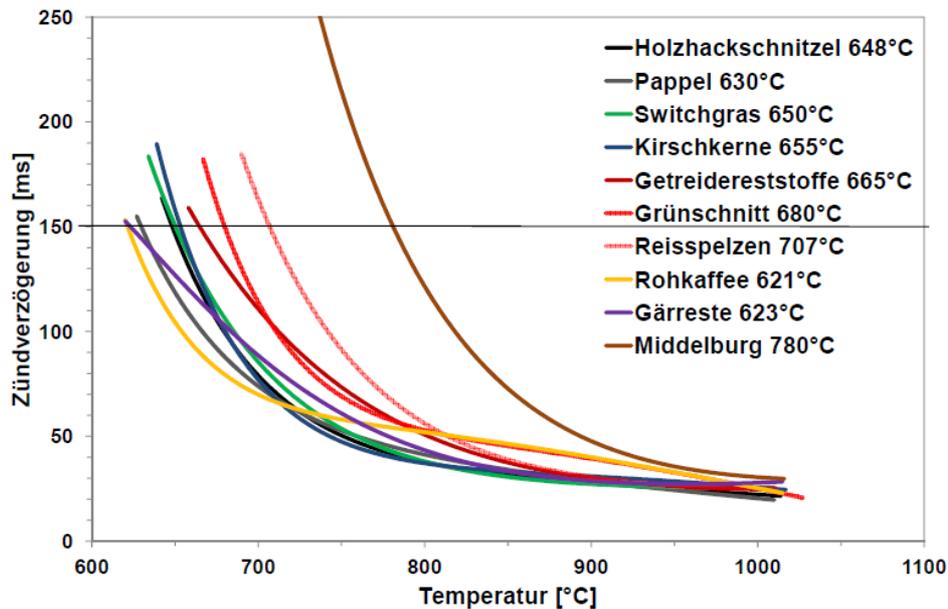


Abb. 6.2-2: Zündverzögerung am Zündreaktor über Ofentemperatur für die untersuchten Biomassen

Die Biomassen Rohkaffee, Gärreste und Pappel charakterisieren sich durch niedrige Zündtemperaturen zwischen 621 °C und 630 °C. Reste aus der landwirtschaftlichen Verarbeitung (Grünschnitt, Getreidereststoffe, Reisspelzen) weisen höhere Zündtemperaturen (665 °C - 707 °C) auf. Auffällig ist hier, dass alle Biomassen im Vergleich zu Kohle eine niedrigere Zündtemperatur besitzen (s. Abb. 6.2-3).

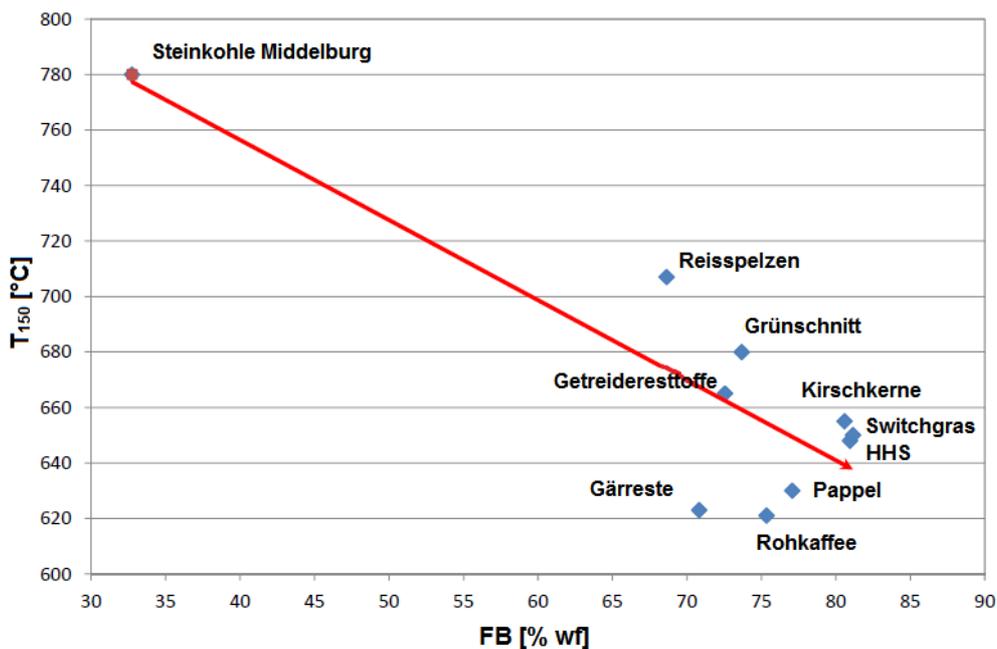


Abb. 6.2-3: Zündverzögerung am Zündreaktor über flüchtige Bestandteile (FB)

Ein Erklärungsansatz für dieses Phänomen ist, dass mit einigen Ausnahmen mit steigenden flüchtigen Bestandteilen die Brennstoffe zu niedrigen Zündtemperaturen geführt werden und dass die flüchtigen Bestandteile von Kohlen zu einem großen Teil aus nicht-, oder schwer entzündlichen Gasen wie H_2O , CO_2 sowie Teeren und Ölen mit einem hohen Kondensationspunkt bestehen. Um diese Vermutung zu untermauern, müssen jedoch noch weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

Untersuchungen an der technischen Thermowaage (IEVB)

Ziel der Untersuchungen

Mit Hilfe der Thermogravimetrie-Analyse (TGA) untersucht man physikalische Vorgänge und chemische Reaktionen, die mit der Massenänderung einer Probe verbunden sind. Diese Massenveränderung wird abhängig von der Temperatur und/oder Zeit gemessen. Bei Verdampfung, Zersetzung, chemischen Reaktionen, magnetischen oder elektrischen Umwandlungen treten Massenänderungen auf.

Versuchsaufbau

Die Technische Thermowaage des IEVB (s. **Abb. 6.2-4**) unterscheidet sich von Laborthermowaagen hauptsächlich durch ihre Größe und damit in der Menge des zu untersuchenden Brennstoffs. Während in Labor-Thermowaagen staubförmige Proben im Milligramm- bis Gramm-Bereich untersucht werden können, können bei der technischen Thermowaage heterogene nicht gemahlene Probenmengen bis zu 3 kg untersucht werden. Auf Grund der geringen Schüttdichten der Biomassen konnte nur eine Probemenge von 200 g in der Thermowaage untersucht werden, da direkt oberhalb der Probe in einem Abstand von ca. 1 cm die Gastemperatur gemessen wird. Mit Hilfe eines weiteren Thermoelements kann die Temperatur direkt in der Mitte der Probe bestimmt werden. Das Kernstück der Anlage (Thermowaage) bildet eine elektrisch beheizte Reaktionskammer, die mit unterschiedlichen Aufheizgeschwindigkeiten (bis max. 20 K/min) und verschiedenen isothermen Haltephasen (bis max. 1000°C) über eine Programmregelung variabel betrieben werden kann. In der Mitte der Reaktionskammer hängt ein zylindrisches Probengefäß aus Stahlblech, in dem sich der zu untersuchende Einsatzstoff befindet. Das Probengefäß ist über eine Stange mit der sich im Waageraum befindliche Waage verbunden. Diese Waage ist eine handelsübliche Laborwaage mit einem Wägebereich von 0 bis 3 kg und einer Auflösung von 0,1 g. Um die Waage zu kühlen bzw. vor heißen und korrosiven Gasen zu schützen, wird in den Waageraum Spülgas (Stickstoff) geführt.

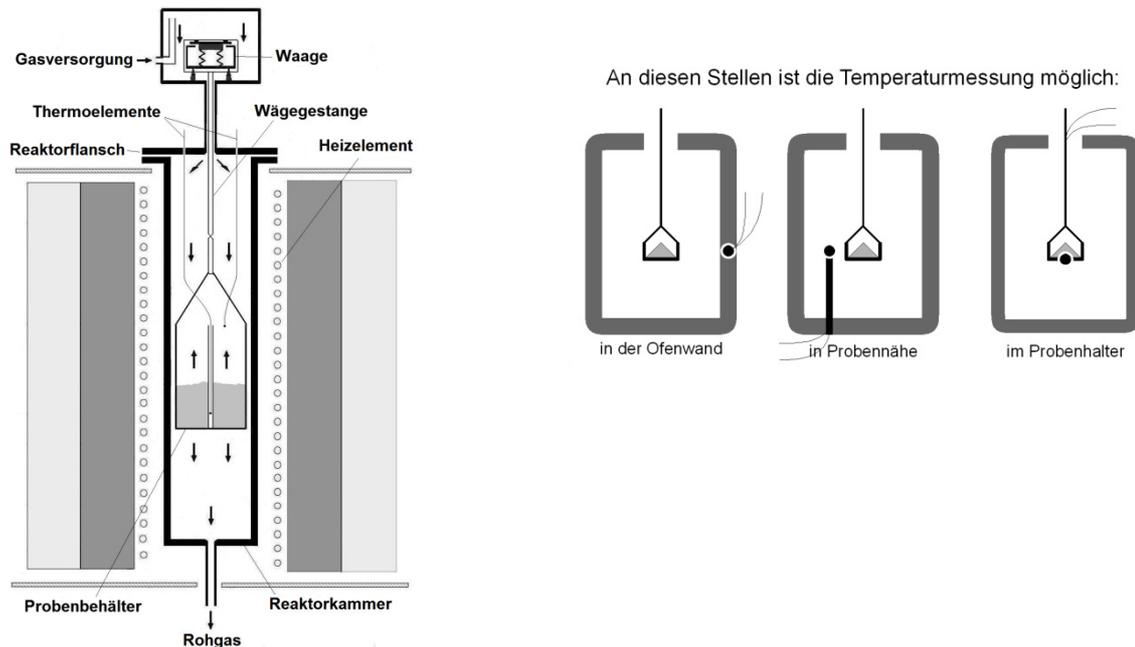


Abb. 6.2-4: Schematische Darstellung der Thermowaage des IEVB

Zur Probenvorbereitung werden die Biomassen zunächst mit einer Mühle auf die gewünschte Korngröße zerkleinert, d.h. für die ausgewählten Biomassen (Holzhackschnitzel, Pappel, Switchgras, Kirschkern, Getreidereststoffe, Grünschnitt, Reisspelzen, Gärreste) auf eine Korngröße kleiner als 2 mm. Der Rohkaffeestaub wird wie im Anlieferungszustand benutzt.

Die Probe wird auf dem Probenträger platziert, der in der Reaktionskammer befestigt wird. Dann wird das gesamte System mit Stickstoff bei einem Volumenstrom von 300 dm³/h ausgespült. Die Versuche werden mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/min und isothermen Haltephasen bis 900°C durchgeführt.

Das aus der Reaktionskammer austretende Abgas (Pyrolysegas) wird teilweise mit einer Pumpe abgesaugt und zum Gasanalysesystem geleitet und der Rest durch die Abgasleitung in die Atmosphäre freigesetzt. Alle Messdaten, die zum Gasanalysesystem geleitet werden, werden an ein PC-Rechnersystem geschickt, welches die Daten zur späteren Auswertung in einer Datei speichert.

Versuchsergebnisse

Abb. 6.2-5 stellt die Massenänderungen als Funktion der Probentemperatur für die untersuchten Biomassen dar. Die thermogravimetrische Kurve liefert die Information über die Temperaturbeständigkeit einer Probe, über die Temperaturbereiche, in denen Reaktionen ablaufen und die Temperatur des maximalen Reaktionsumsatzes. Bei den durchgeführten Versuchen sieht man in den Ergebnissen, dass die Massenänderung bei allen untersuchten Biomassen eine einstufige Massenabnahme zeigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die flüchtigen Bestandteile hauptsächlich in einem engen Temperaturkorridor zwischen 200°C und 600°C

austreiben. Der Restkoksgehalt ist bei allen untersuchten Biomassen recht gering und liegt zwischen 25 Ma.-% und 35 Ma.-%.

In Abb. 6.2-5 ist zu erkennen, dass bei einer Aufheizgeschwindigkeit von 5 K/min die Entgasung der Kirschkerne den schnellsten und der Getreidereststoffe den langsamsten Thermo gravimetrie-Prozess aufweisen. Auf der anderen Seite weisen alle Prozesse unter diesen Bedingungen sehr ähnliche Entgasungsgeschwindigkeiten auf.

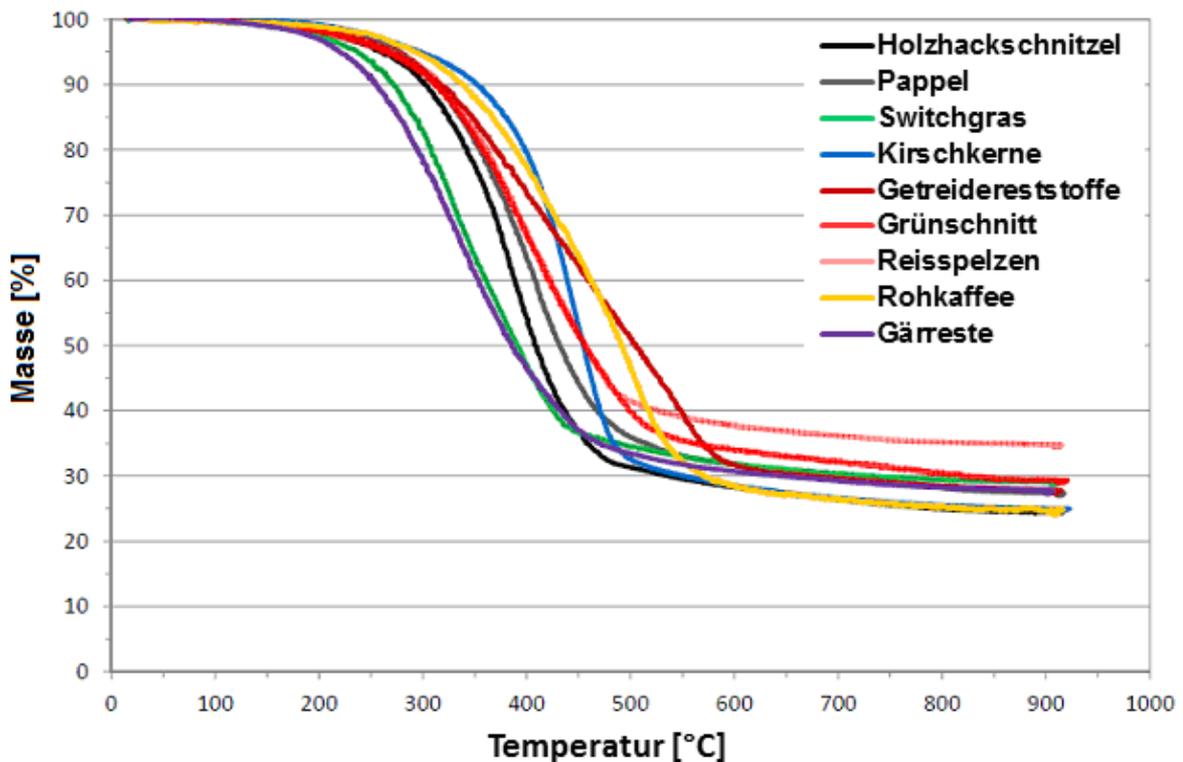


Abb. 6.2-5: Massenänderungen [%] als Funktion der Probestemperatur [°C]

Die Masse und die Konzentrationen der Abgaskomponenten (in Vol.-%) CO, CO₂, CH₄ und H₂ werden mit Abgasanalytoren abhängig von Temperatur und Zeit gemessen. Das PC-Rechnersystem speichert alle 5 Sekunden die Messwerte für die Masse, Temperaturen sowie die Konzentrationen der Abgaskomponenten und in den folgenden Abbildungen sind diese Komponenten in Vol.-% in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

Vergleicht man die CO₂-Anteile im Pyrolysegas der untersuchten Biomassen sieht man, dass die CO₂-Anteile bei Pappel in einem Temperaturbereich 400 – 450 °C bei ca. 12 %, bei der Holzackschnitzel und Switchgras in einem Temperaturbereich 370 – 410 °C bei ca. 11%, liegen. Diese Biomassen weisen die höchsten Werte von CO₂-Anteilen in den Abgasen auf. Der maximal erreichte CO₂-Anteil im Abgas bei Rohkaffeestaub und Gärresten ist ca. 7%. Somit weisen der Rohkaffeestaub und die Gärreste den geringsten CO₂-Anteil im Abgas auf.

Der höchste CO-Anteil mit ca. 9,3 % befindet sich bei Holzackschnitzeln in einem Temperaturbereich von 380 – 450 °C und bei den anderen Biomassen zwischen 3,5 – 8 Vol.-%. Die Biomassen Pappel und Getreidereststoffe enthalten im Vergleich zu den anderen

Biomassen einen höheren CaO-Gehalt. In diesem Verfahren wird CaO zunächst zu CaCO_3 und in einem hohen Temperaturbereich zurück zu CaO und CO reagiert. Aus diesem Grund wurde bei Pappel und Getreidereststoffe im Temperaturbereich von 700 - 850 °C mit einem zweiten Peak ca. 2,5 % CO-Anteil gemessen. In den Untersuchungen wird CH_4 für alle Biomassen ab 300 °C freigesetzt. Die Biomassen Getreidereststoffe und Rohkaffe weisen mit einem ähnlichen Verlauf bei ca. 600 °C den höchsten CH_4 -Anteil auf. Der Anteil beträgt für diese Biomassen um 5,3 %. Für die anderen Biomassen liegt dieser Anteil zwischen 2,2 – 4,8 Vol-% im Temperaturbereich von 350 - 550 °C. Die ersten Peaks von H_2 von Holzhackschnitzel, Getreidereststoffe, Rohkaffeestaubes und der Reisspelzen wurden in den Temperaturbereichen 400 – 430 °C gemessen. Bei Gärresten, Pappel und Switchgras wurden die ersten Peaks in einem niedrigerem Temperaturbereich (bei ca. 300 °C) gemessen. Die maximalen H_2 -Anteile liegen bei den Biomassen Holzhackschnitzel, Getreidereststoffe, Pappel, Switchgras und Reisspelzen zwischen 3 – 4 Vol.-%. Bei den anderen Biomassen Rohkaffeestaub und Gärreste kann man einen maximalen Volumenanteil von H_2 über 5 % ablesen.

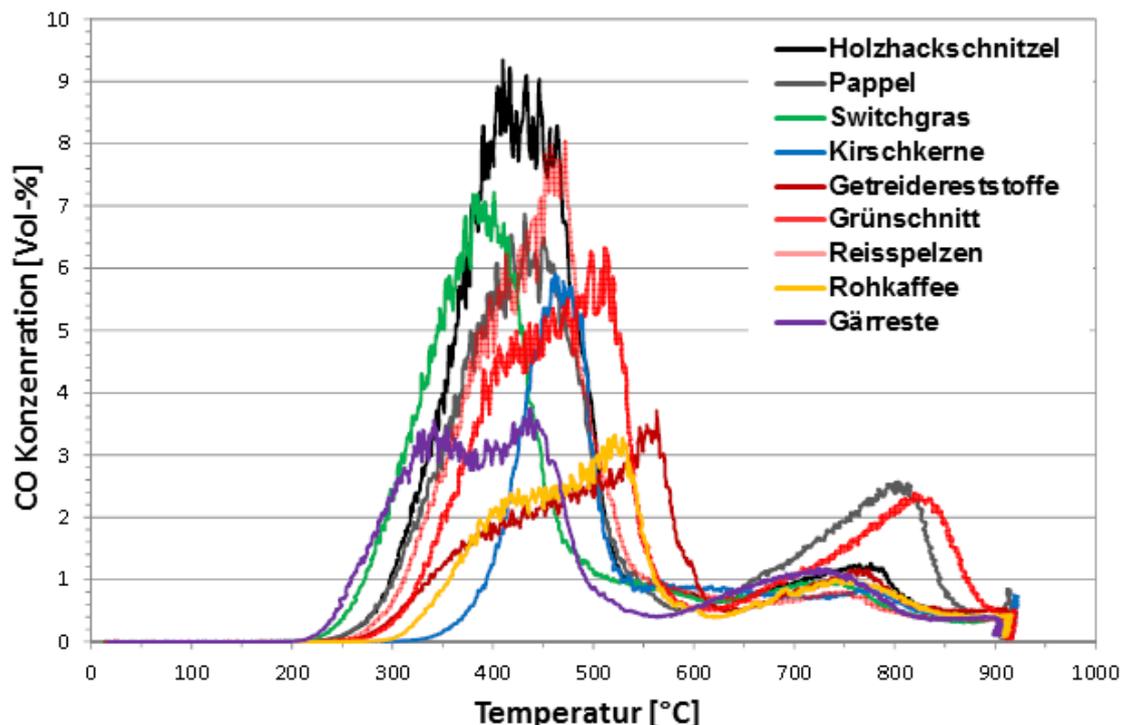


Abb. 6.2-6: CO-Konzentrationen

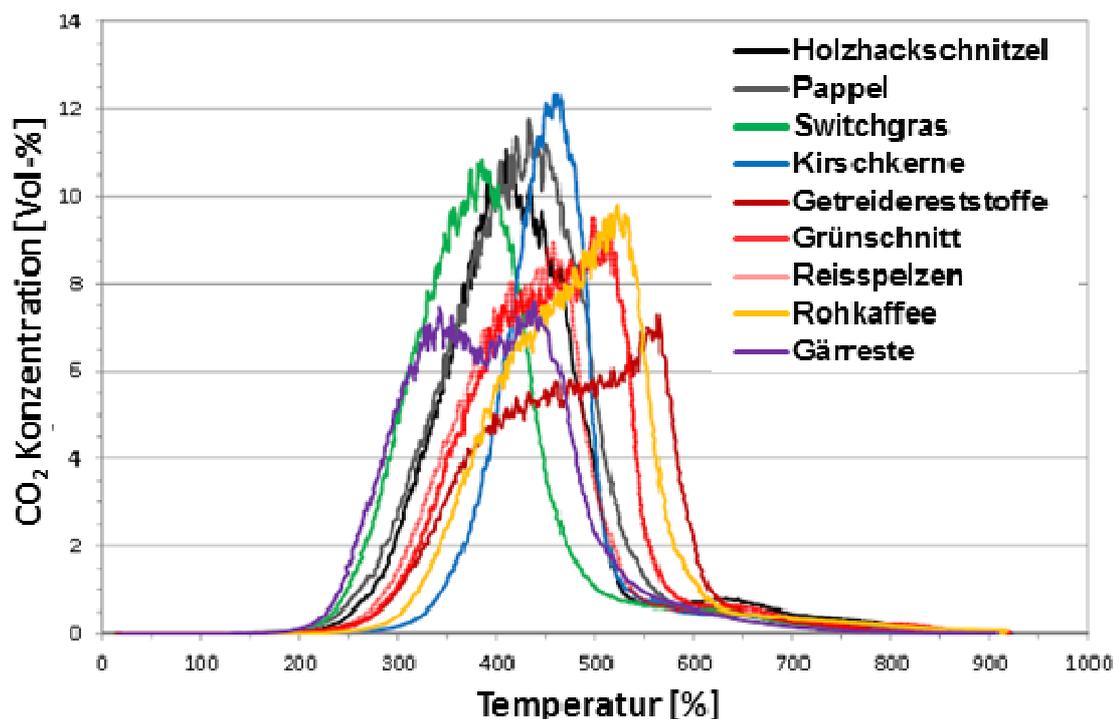


Abb. 6.2-7: CO₂-Konzentrationen

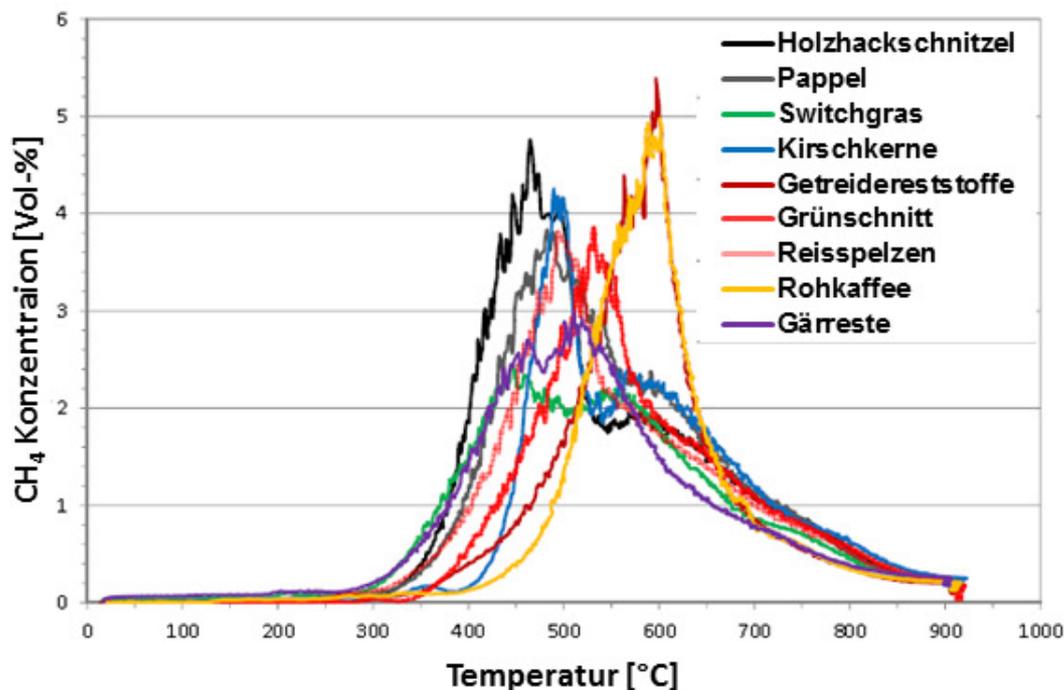


Abb. 6.2-8: CH₄-Konzentrationen

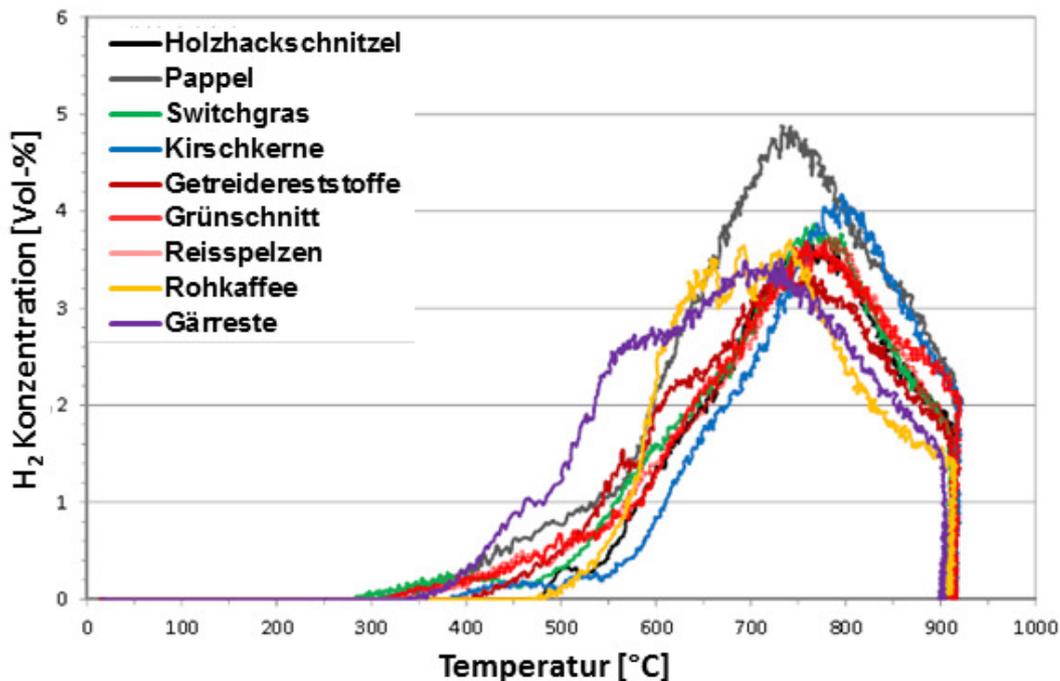


Abb. 6.2-9: H₂-Konzentrationen

Bei diesen Untersuchungen wurden die kondensierbaren Bestandteile vom Pyrolysegas abgetrennt und analysiert. Diese Analyse zeigt, dass die Biomasse Pappel unter den untersuchten Brennstoffen mit einem Anteil von ca. 19,5 % den größten und die Getreidereststoffe mit einem Anteil von ca. 9 % den niedrigsten Teergehalt besitzt (s. **Tab. 6.2-1**).

Tab. 6.2-1: Massenbilanz an der Technischen Thermowaage

Biomasse	Eingangsmasse [g]	Koksmassenanteil [%]	freigesetzter Massenanteil [%]	Gemessene Gase [%]	Teer [%]	Gemessene Ausgang [%]	Unbekannte Ausgang [%]
Holzackschnitzel	199,40	24,27	75,73	22,84	13,09	60,21	39,79
Pappel	200,00	27,10	72,90	25,29	19,50	71,89	28,11
Switchgras	199,30	28,80	71,20	20,14	13,60	62,54	37,46
Kirschkerne	198,50	24,63	75,37	17,54	22,49	64,67	35,33
Getreidereststoffe	199,20	27,36	72,64	18,95	9,13	55,43	44,57
Grünschnitt	198,90	29,06	70,94	21,11	16,07	66,24	33,76
Reisspelzen	199,50	34,59	65,41	17,45	13,10	65,13	34,87
Rohkaffee	201,30	24,14	75,86	21,50	14,01	59,65	40,35
Gärreste	198,60	27,29	72,71	19,79	14,83	61,91	38,09

In dem Vorhaben wurden folgende Brennstoffe auf ihr thermisches Verhalten unter kontrollierten Bedingungen sowohl in einer Laborthermowaage (ITC) wie auch in einer Technikumsthermowaage (IEVB) untersucht: Röstkaffeestaub, Reisspelzen, Gärreste, Holzackschnitzel, Switchgras, Pappel, Getreidereststoffe und Grünschnitt. Die Proben lagen bei der Laborthermowaage jeweils in getrocknetem, pulverisiertem Zustand vor. Der Vergleich

der Ergebnisse zwischen beiden Thermowaagen ergibt, dass sich die Restmassen sowie die Temperaturen bei Beginn und Ende der Entgasung unterscheiden (s. **Tab. 6.2-2**). Ein Erklärungsansatz für diese Abweichungen ist, dass die Einsatzmasse und Partikelgröße der Biomassen in beiden Thermowaagen nicht identisch war. In der Technikumsthermowaage wurden die Biomassen mit der Partikelgröße kleiner als 2 mm und mit einer Masse 200 g eingesetzt, während die Biomassen in der Laborthermowaage in pulverisiertem Zustand mit einer Einsatzmasse 20-25 g untersucht wurden.

In der Thermogravimetrie-Analyse kann die Massenänderung einstufig oder mehrstufig erfolgen. **Abb. 6.2-10** zeigt den Vergleich der charakteristischen Temperaturen einer einstufigen Massenänderung für das Beispiel Holz hackschnitzel (HHS) an den beiden eingesetzten Thermowaagen. Dabei werden aus der TG-Kurve anhand von Tangentenkonstruktionen die Punkte A und B sowie die zugehörigen Temperaturen als Beginn- und Endtemperatur nach DIN EN ISO 11358 bestimmt.

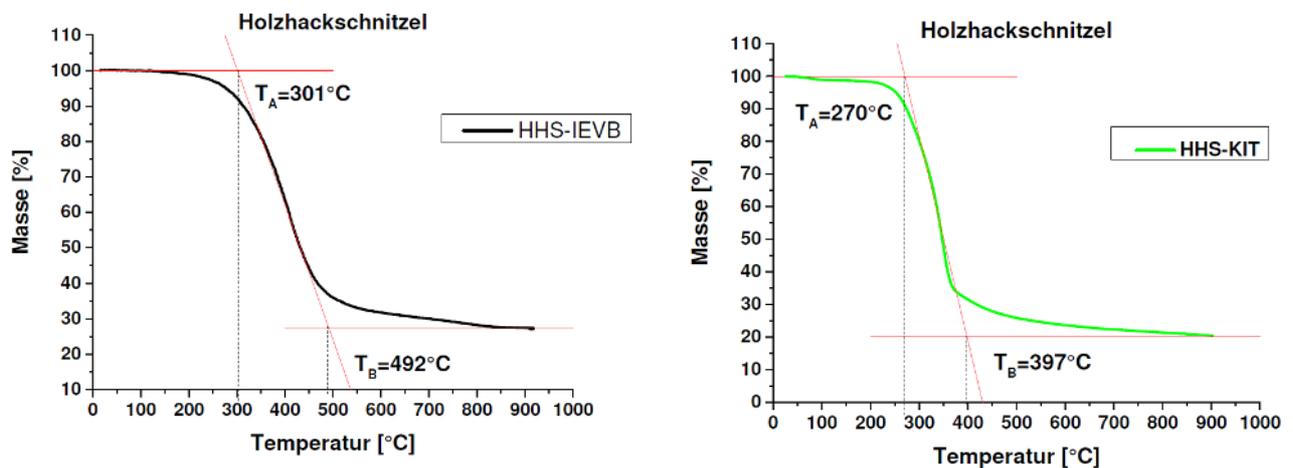


Abb. 6.2-10: Auswertung einer Messkurve mit einstufiger Massenabnahme

Die nach dieser DIN-Norm bestimmten Temperaturen wurden in der Tab. 6.2-2 dargestellt.

Tab. 6.2-2: Ausgangsmasse, Anfangs- und Endtemperaturen der Biomassen bei der TGA

Biomasse	Technische Teermowaage-IEVB			Labor Thermowaage-KIT		
	Koksgehalt in %	Beginn der Entgasung (T _A) in °C	Ende der Entgasung (T _B) in °C	Koksgehalt in %	Beginn der Entgasung (T _A) in °C	Ende der Entgasung (T _B) in °C
Holz hackschnitzel	24,27	301	492	20,42	270	397
Pappel	27,10	315	482	23,64	250	401
Switchgras	28,80	257	439	22,00	265	397
Getreidereststoffe	27,36	284	602	28,51	342	371
Grünschnitt	29,06	299	516	28,52	256	399
Reisspelzen	34,59	297	503	32,15	257	397
Gärreste	27,29	235	450	30,93	247	374

Die untersuchten Biomassen sind chemisch unterschiedlich zusammengesetzt, zeigen jedoch ein ähnliches thermisches Verhalten, das durch Besonderheiten der jeweiligen Substanzen jeweils leicht abweichen kann. Generell lässt sich in Stickstoff nach der Freisetzung der anhaftenden Restfeuchte eine breite Gewichtsabnahme bei der Laborthermowaage im Bereich

200 °C bis 400 °C und bei der Technikumsthermowaage im Bereich 250 °C bis 600 °C feststellen. Nach Auswertung der DTG-Daten (1. Ableitung der thermogravimetrischen Kurve) ist diese Masseabnahme durch 2 bis 3 kinetische Stufen unterteilt. Ab 500 °C sind nur noch sehr geringe Masseabnahmen zu beobachten. Die Restmassen aus der Pyrolyse der untersuchten Biomassen bei 900 °C liegen je nach Aschegehalt und fixem Kohlenstoff bei der Laborthermowaage in einem Bereich von 20 % (HHS) bis 32 % (Reisspelzen) und bei der Technikumsthermowaage von 24 % (HHS) bis 34 % (Reisspelzen).

In synthetischer Luft zeigt sich erwartungsgemäß ein zweiter Bereich der Masseabnahme bei höherer Temperatur (400 ° - 500 °C), in dem die Zündung und Verbrennung der organischen Substanz abläuft. Die Vergasungsprozesse sind leicht zu tieferen Temperaturen (um 300 °C) verschoben.

Für jede der Biomassen wurden die Ergebnisse der Untersuchungen in Stickstoff und in Luft detailliert gegenübergestellt. Ein charakteristisches Beispiel für das unterschiedliche thermische Verhalten in beiden Atmosphären zeigt **Abb. 6.2-11** für HHS.

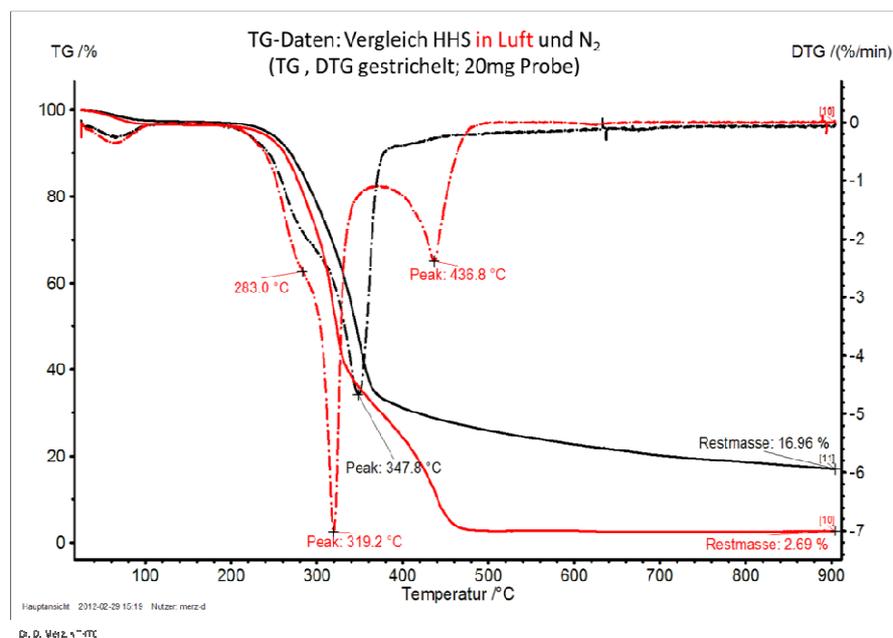
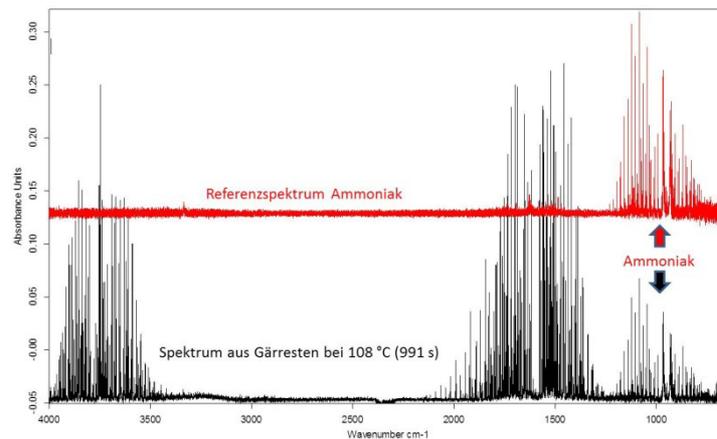


Abb. 6.2-11: Holzhackschnitzel (HHS) in Luft und N₂, TG und DTG-Daten, Labor-TG am ITC

Man erkennt in Stickstoff eine Masseabnahme im Bereich von 300 °C bis 400 °C, die durch eine Schulter und einen breiteren Peak in den DTG-Daten beschrieben werden kann. Die DTG-Daten der Behandlung in Luft zeigen eine Verschiebung der Vergasungsreaktionen zu tieferen Temperaturen in den Bereich von 280 °C (Schulter) und 319 °C (Minimum) und eine zusätzliche Masseabnahme – Zündung und Verbrennung – im Bereich von 400 °C (Minimum 436 °C).

Eine Besonderheit zeigte sich bei der TG von Gärresten: Bei rund 110 °C wird NH₃ freigesetzt (s. **Abb. 6.2-12**).

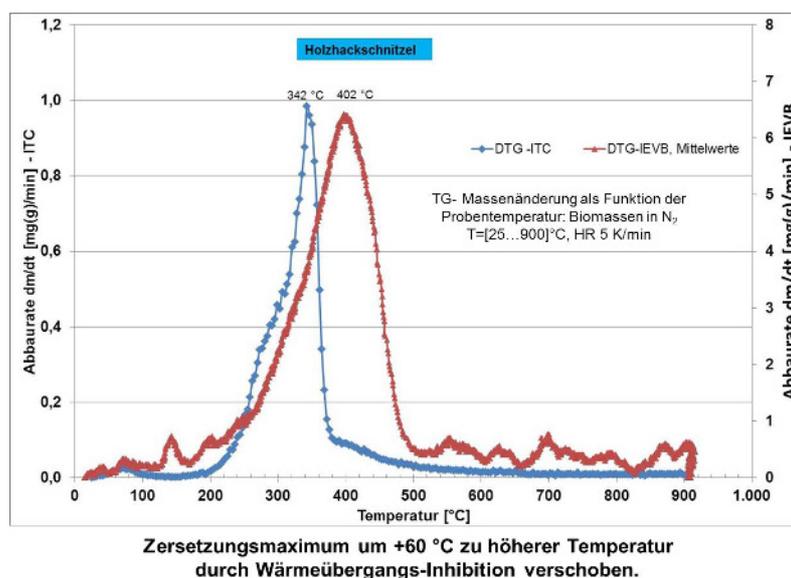


Dr. D. Merz, KIT-ITC

Abb. 6.2-12: Freisetzung von NH_3 bei Gärresten bei niedrigen Temperaturen, Labor-TG am ITC

Dies ist ein bekannter Vorgang, der bei der Trocknung von Gärresten an Biogasanlagen zu einer entsprechenden Gasreinigung mittels Wäschern geführt hat.

Der Vergleich der TG bzw. DTG- Kurven für die Laborthermowaage und technische Thermowaage zeigt, dass bedingt durch die Wärmeübergangsinhibition an der Technikumsthermowaage sich die Zersetzungsmaxima zu höheren Temperaturen verschieben. Dies muss insbesondere bei der Auswertung zum Zweck der Ableitung kinetischer Parameter berücksichtigt werden (s. **Abb. 6.2-13**).



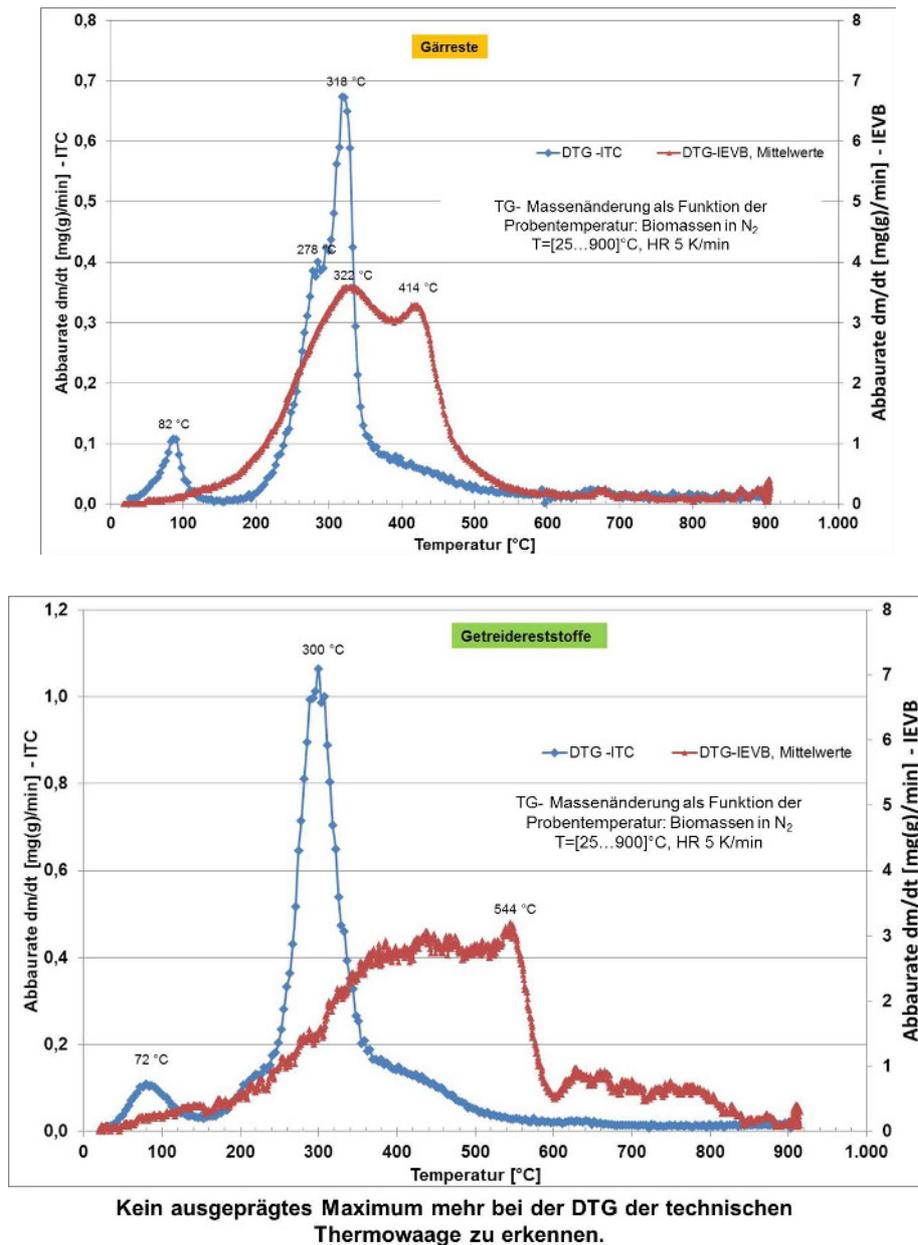


Abb. 6.2-13: Holz hackschnitzel (HHS), Gärreste und Getreidereststoffe in N₂, DTG-Daten, unterschiedliche Reaktoren

Die Verschiebung des Zersetzungsmaximums kann soweit führen, dass kein ausgeprägtes Maximum -wie bei den Getreidereststoffen zu sehen- erkennbar ist.

Der Einfluss der Apparatur und der Aufheizrate wird besonders deutlich, wenn man – hier am Beispiel von Holz hackschnitzeln- die Koks ausbeuten der Labor- bzw. Technikumsanlagen Pyrolyseschneckenreaktor STYX und das Pyrolysedrehrohr bei bestimmten Pyrolyse- endtemperaturen hinzuzieht.

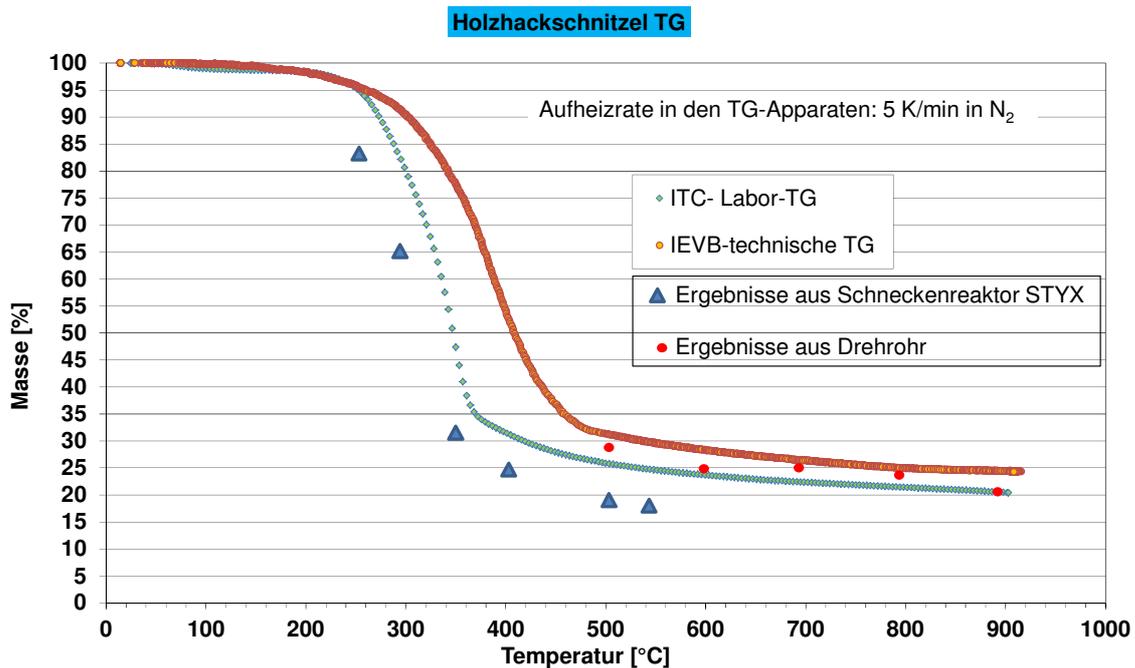


Abb. 6.2-14: Massenabnahme als Funktion der Temperatur für HHS in unterschiedlichen Apparaten

Bedingt durch höhere Aufheizraten im Schneckenreaktor und im Drehrohr im Vergleich zur TG und deutlich verschiedenen Wärmeübergangsbedingungen unterscheiden sich die Koksausbeuten beider Reaktoren, z.B. bei 500 °C, entsprechend voneinander. Überraschenderweise liegen jedoch die Koksausbeuten, die im Drehrohr ab 500 °C ermittelt wurden, im Bereich der Werte für die technische TG und der Labor-TG. Für diesen Temperaturbereich ab etwa 500 °C bis 900 °C könnten dann bereits TG- Versuche erste Abschätzungen hinsichtlich zu erwartender Koksausbeuten liefern.

Die Untersuchungen zur TG bzw. DTG zeigen hier über einen weiten Temperaturbereich deutlich den Einfluss der Apparatur auf charakteristische Zersetzungstemperaturen. Zur Ableitung von Daten, die zur mathematischen Beschreibung des Zersetzungsverhaltens dienen, können grundsätzlich sowohl die Labor-TG als auch die technische TG eingesetzt werden, wenn der Einfluß des Wärmeübergangs in der Auswertung der Daten berücksichtigt wird.

Für die kinetische Auswertung wird ein Modellansatz von Mätzing [18] für die Daten aus der Labor-TG hinzugezogen, mit dessen Hilfe die Zersetzung mathematisch beschrieben werden kann.

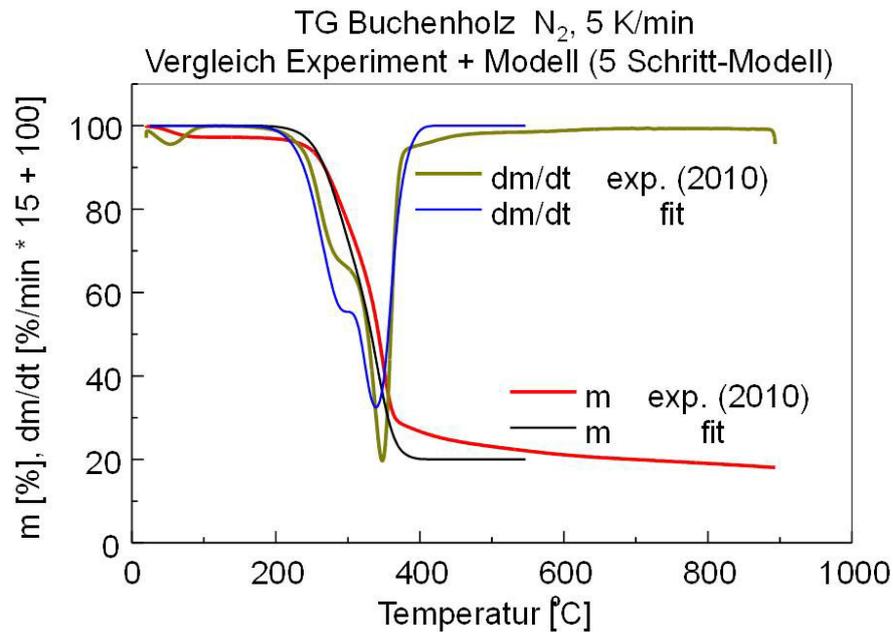


Abb. 6.2-15: Kinetisches Modell zur mathematischen Beschreibung der Zersetzung von HHS

Mit Hilfe dieses Modellansatzes kann die Zersetzung von HHS mathematisch in guter Übereinstimmung mit experimentellen Daten beschrieben werden (s. **Abb. 6.2-15**).

Dieser Ansatz kann selbstverständlich auch an die übrigen Brennstoffe angepasst werden, wenn zusätzlich zur Brennstoffanalyse die Anteile an Cellulose, Hemicellulose und Lignin bekannt sind.

6.3 Veraschungsverhalten unter reduzierender und oxidierender Atmosphäre

Das Ascheschmelzverhalten eines Brennstoffs wird standardmäßig nach DIN 51730 an feingemahlene, nach DIN 51719 veraschten Proben des Brennstoffs, die nach Befeuchtung zu kleinen, prismatischen Probekörpern gepresst werden, in einem Ascheschmelzmikroskop bestimmt. Üblicherweise sind die Aschen dabei sowohl bei der Erzeugung als auch im Ascheschmelzmikroskop oxidierenden Atmosphären (in der Regel Luft) ausgesetzt.

Die ermittelten Parameter Erweichungs-, Halbkugel- und Fließtemperatur sowie Sinterbeginn dienen üblicherweise der Abschätzung des Verhaltens der Aschen in Verbrennungsanlagen. Oftmals soll das oberflächliche Anschmelzen und die dadurch bedingte Agglomeration der Asche vermieden werden. Bei anderen thermischen Prozessen, wie z.B. der Vergasung oder Pyrolyse, stellt sich die Frage, ob die hier vorliegenden reduzierenden Atmosphären auch die sich bildenden Aschen und deren Schmelzverhalten beeinflussen, so dass sich bei einer Analyse andere charakteristische Temperaturen ergeben. Insbesondere die befürchtete Absenkung der Erweichungstemperatur wäre bei einer Vergasung in einer Wirbelschicht ein Grund für das Agglomerieren und Zusammenbrechen des Wirbelbetts.

Die ursprünglich aus der Kohlenanalytik stammenden Normen zur Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens nach DIN 51730 bzw. zur Veraschung nach DIN 51719 erforderten für die Anwendung auf Biomassen einige Anpassungen an deren spezifische Eigenschaften, beispielsweise die Veraschung nach DIN EN 14775 bei 550°C, um leichtflüchtige Aschebestandteile für die Untersuchung des Ascheschmelzverhaltens zu erhalten. Im Ascheschmelzmikroskop können die Proben in der Regel auch in reduzierender Atmosphäre erhitzt werden, was ggf. zu anderen Resultaten führt. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob auch die Reaktionsbedingungen bei der Erzeugung der Ascheproben Auswirkungen auf die Ergebnisse der Ascheschmelzuntersuchungen haben.

In Arbeitspaket 2 des Forschungsprojekts wurden u.a. zahlreiche Analysen des Ascheschmelzverhaltens diverser Biomassen von mehreren Partnern durchgeführt, die hier nur stichpunktartig zusammengefasst sein sollen:

VWS (TU Dresden): Einige exemplarische Analysen

- Asche erzeugt bei 550°C unter oxidierender Atmosphäre
- Ascheschmelzuntersuchungen unter oxidierender Atmosphäre

CUTEC: Zahlreiche Biomassen, auch außerhalb des festgelegten Spektrums

- Asche erzeugt bei 550°C unter oxidierender Atmosphäre
- Ascheschmelzuntersuchungen unter oxidierender Atmosphäre

ITC (KIT): Viele Biomassen bei diversen Bedingungen (durchgeführt von Eurofins)

- Asche erzeugt bei 550°C und 815°C unter oxidierender Atmosphäre
- Ascheschmelzuntersuchungen unter oxidierender und reduzierender Atmosphäre

Die Übereinstimmung der Ergebnisse bei gleichen Versuchsbedingungen war meistens gut, nur in Einzelfällen gab es größere Abweichungen.

Die hier interessierende Abhängigkeit der ermittelten Parameter von der Art der Atmosphäre (oxidierend oder reduzierend) im Ascheschmelzmikroskop kann nur für die Untersuchungen des

ITC, die von Eurofins durchgeführt wurden, beurteilt werden. Hier wurden sogar verschiedene Veraschungstemperaturen angewendet, allerdings jeweils mit oxidierenden Bedingungen im Glühofen. Folgende Diagramme (**Abbn. 6.3-1 und 6.3-2**) sollen für einige ausgewählte Biomassen die Unterschiede der Ergebnisse bei den verschiedenen Randbedingungen darstellen.

Der schwierig zu definierende Sinterbeginn, s. Abb. 6.3-1, ist dabei wohl ein weniger geeigneter Parameter zur Beurteilung des Einflusses verschiedener Randbedingungen bei der Bestimmung des Ascheschmelzverhaltens. Es gibt keine eindeutigen Tendenzen zu den erwarteten niedrigeren charakteristischen Temperaturen unter reduzierender Atmosphäre im Ascheschmelzmikroskop. Lediglich bei den Getreidereststoffen und teilweise bei Weizenstroh und Gärresten lassen sich – jeweils für die unterschiedlichen Veraschungstemperaturen getrennt betrachtet – entsprechende Veränderungen registrieren.

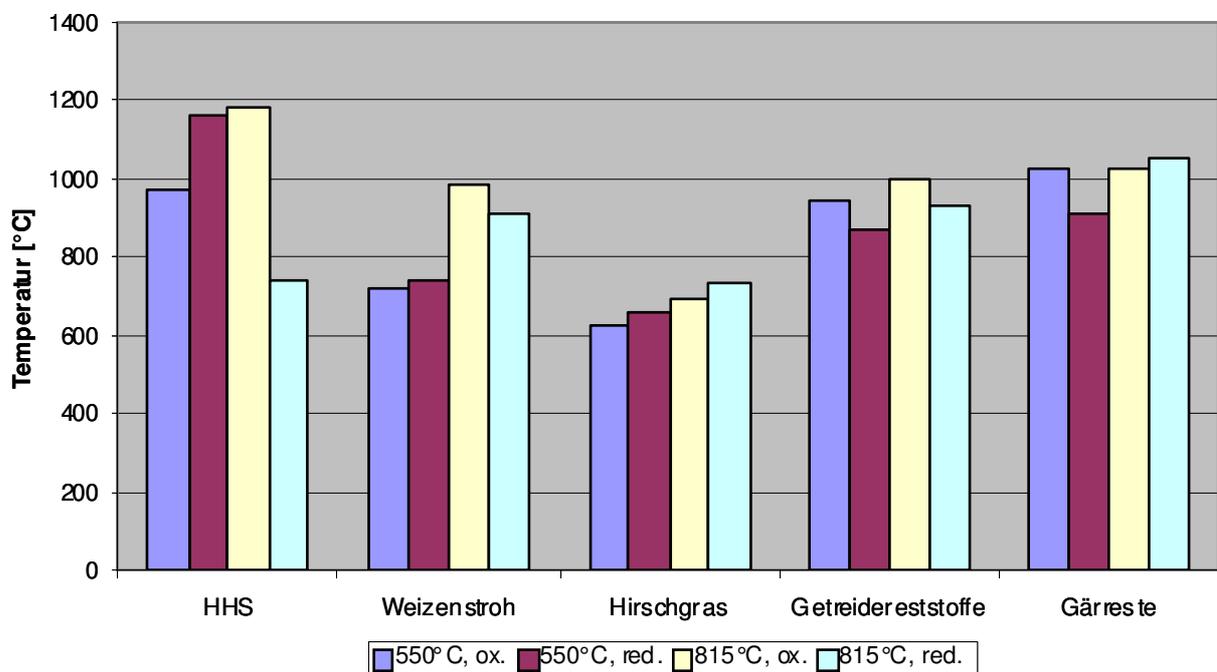


Abb. 6.3-1: Sinterbeginn ausgewählter Biomassen in Abhängigkeit der Randbedingungen

Beim Erweichungspunkt in Abb. 6.3-2 bietet sich ein ähnliches Bild, aber mit eindeutigeren Tendenzen für die genannten Biomassen und zusätzlich die Misch-Holzchackschnitzel (HHS). Beim Halbkugelpunkt gibt es kaum noch nennenswerte Unterschiede und auch keine einheitliche Tendenz. Da sie ebenso wie die Fließtemperatur bei den hier betrachteten Apparaten (keine Schmelzfeuerungen) nicht für die Beurteilung einer geeigneten Prozesstemperatur relevant ist, wird auf eine ausführliche Darstellung dieser Analysenergebnisse verzichtet.

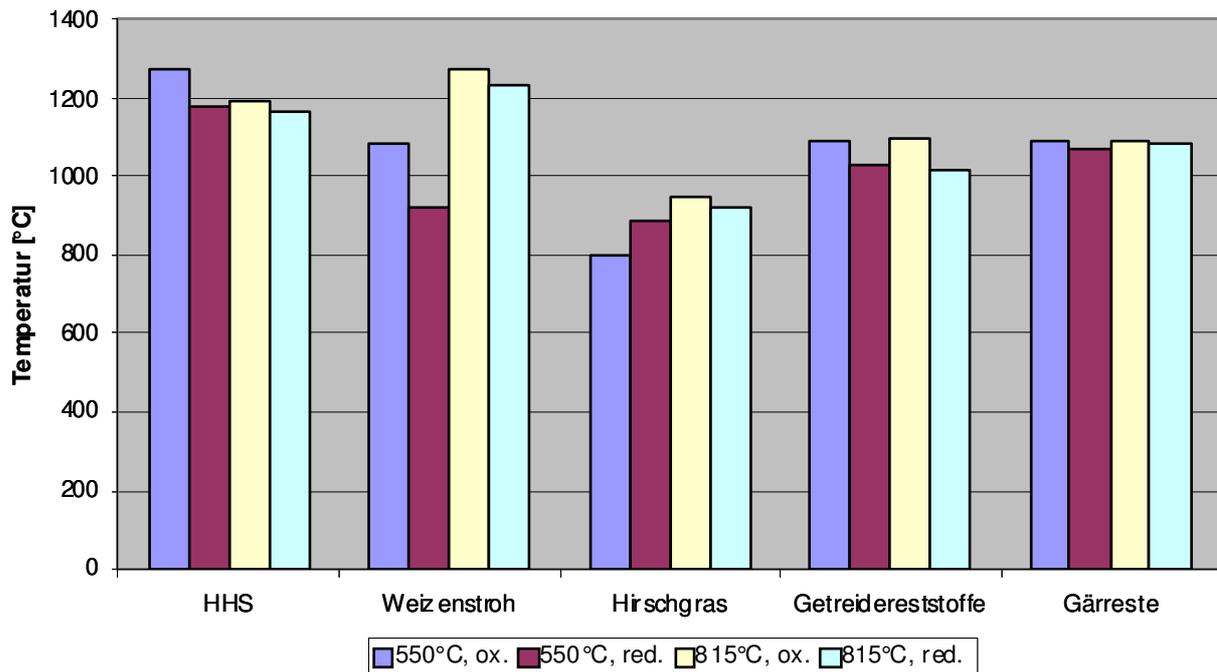
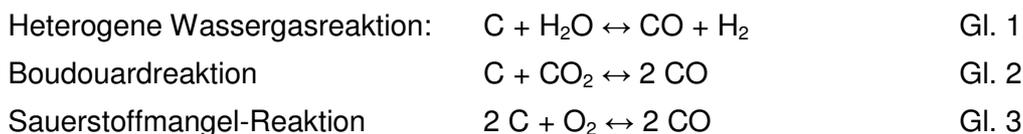


Abb. 6.3-2: Erweichungspunkt ausgewählter Biomassen in Abhängigkeit der Randbedingungen

Um auch Biomasseaschen untersuchen zu können, die unter reduzierenden Bedingungen im Labor erzeugt wurden, musste zunächst ein Verfahren entwickelt werden, welches eine solche Erzeugung bei definierten Randbedingungen zulässt. Dabei lassen sich folgende Reaktionen, die auch in Vergasungs- und Pyrolyseanlagen ablaufen, dazu nutzen:



Jede dieser Reaktionen beschreibt allerdings nur den Abbau des fixen Kohlenstoffs. Die Flüchtigen der Biomasse sind also in einem vorangehenden Schritt auszutreiben, wozu die Biomasse in einem mit Stickstoff gespülten Glühofen von Umgebungstemperatur auf ca. 400-450°C langsam erhitzt wird. Der Vorteil der separaten Pyrolyse in einem Glühofen liegt unter anderem darin, dass der Apparat für die oben dargestellten Vergasungsreaktionen nicht durch die teerbeladenen Pyrolysegase stark verschmutzt wird.

Nach dem Abkühlen wird der entgaste Biomassekoks in Glühtiegeln in einen Röhrenofen mit Quarzrohr gegeben, der mittels einer Gasversorgungsstation mit diversen Flaschengasen, aber auch mit Wasserdampf beschickt werden kann. Je nach gewünschter Vergasungsreaktion muss neben dem Trägergas Stickstoff das entsprechende Vergasungsmittel zudosiert werden.

Die Sauerstoffmangel-Reaktion laut Reaktionsgleichung (3) lässt sich jedoch in einem chargenweise betriebenen Ofen nicht auf Dauer betreiben. Eine direkte Oxidation zu CO_2 und spätestens bei entsprechend fortgeschrittenem C_{fix} -Abbau auch die Anwesenheit von nicht mehr abreagierendem O_2 ist hier nicht vermeidbar.

Die stark endotherme Boudouardreaktion nach Gleichung (2) läuft nur bei Temperaturen größer 900°C mit hinreichender Reaktionsgeschwindigkeit ab. Die heterogene Wassergasreaktion nach Gleichung (1) sollte bereits bei ca. 800°C genügend schnell sein. Da die Asche möglichst nicht über einer Temperatur von 815°C erzeugt werden sollte (siehe oben), fiel die Entscheidung auf die heterogene Wassergasreaktion, also das Vergasungsmittel Wasserdampf. Im Laufe der Untersuchungen wurden auch niedrigere und höhere Vergasungstemperaturen getestet, die jedoch die bereits getätigten Vermutungen bestätigten: Unter 800°C dauern die Reaktionen zu lange (mehrere Tage), bei 815°C reichen in der Regel 20 Stunden Reaktionszeit für einen vollständigen Umsatz aus. Die Aufbewahrung der Proben nach abgeschlossener Vergasung bis zur Analyse im Ascheschmelzmikroskop fand unter Stickstoffatmosphäre statt.

Abb. 6.3-3 zeigt ein Beispiel von Probenmaterial vor und nach Vergasung und die Aufstellung der Glühtiegel im Quarzrohr des aufgeklappten Röhrenofens. Die optisch wahrnehmbaren Unterschiede der Ascheproben nach oxidierender und reduzierender Veraschung sind unbedeutend und betreffen hauptsächlich die Körnigkeit. Farbunterschiede beispielsweise, die ein Hinweis auf andere Aschekomponenten sein könnten, treten nicht deutlich auf.



Abb. 6.3-3: Röhrenofen mit Quarzrohr und Glühtiegeln (Mitte); Getreidereststoffe bei 400°C pyrolysiert (oben) und bei 815°C mit Wasserdampf vergast (unten)

Die wesentlichen Ergebnisse der anschließenden Untersuchungen zum Ascheschmelzverhalten sind in **Abb. 6.3-4** für die Erweichungspunkte einiger Biomassen dargestellt. Für die oxidierende Veraschung ergibt sich die bereits bekannte Absenkung der Erweichungstemperatur um ca. 50 – 130°C bei reduzierenden Bedingungen im Ascheschmelzmikroskop gegenüber den oxidierenden Bedingungen. Der Vergleich bei gleichen Reaktionsbedingungen im Schmelzmikroskop (reduzierend) aber unterschiedlichen Veraschungsbedingungen (oxidierend und reduzierend: hellgelbe und hellblaue Säulen) zeigt jedoch ein unerwartetes Resultat: alle durch Wasserdampf-Vergasung gewonnenen Aschen erweichen erst bei ca. 100°C höheren Temperaturen. Insbesondere bei den Halmgutaschen steigt die Erweichungstemperatur sogar

über die der unter oxidierender Atmosphäre untersuchten Aschen. Letzteres Verhalten kann man auch bei den Halbkugelttemperaturen nachweisen, wobei allerdings die anderen genannten Unterschiede verschwimmen.

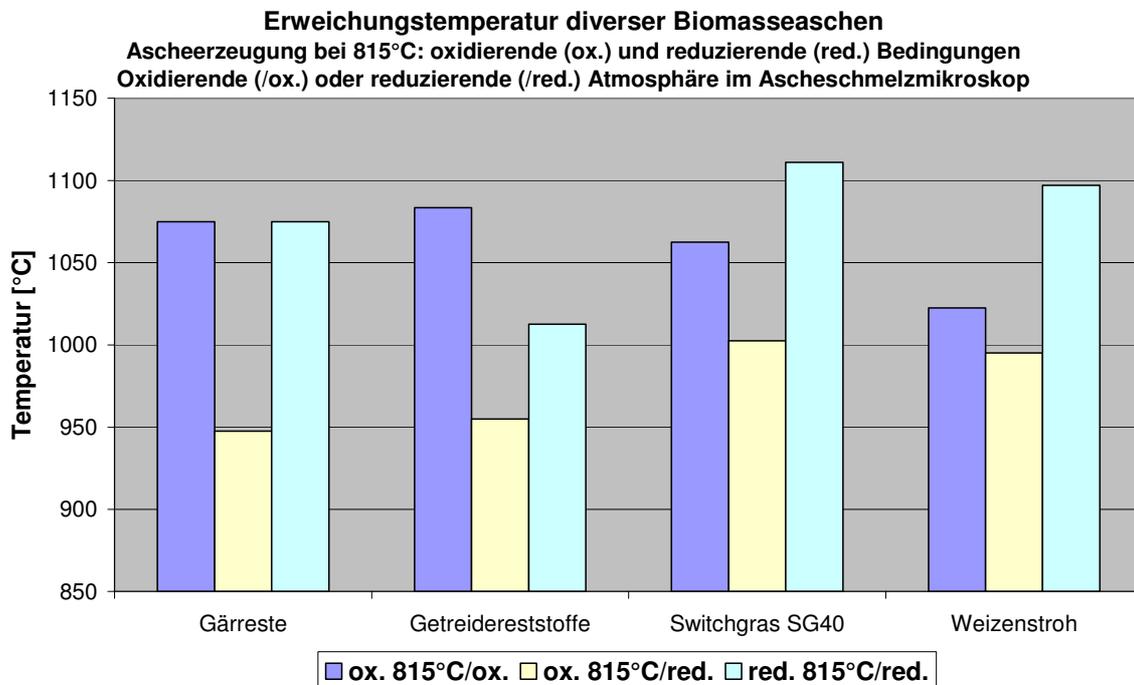


Abb. 6.3-4: Erweichungstemperaturen diverser Biomasseaschen, die unter oxidierenden und reduzierenden Bedingungen verascht bzw. geschmolzen wurden

Um eine mögliche Erklärung des überraschenden Resultats zu finden, wurden für die zwei Biomasseaschen aus Getreidereststoffen und Weizenstroh Spurenanalysen auf die Haupteinflusselemente des Ascheschmelzens (Ca, K, Na) durchgeführt, und zwar jeweils für die oxidativ und reduktiv erzeugte Asche bei 815°C. Das Ergebnis dieser Analysen ist in **Abb. 6.3-5** dargestellt. Es zeigt sich, dass die Ca-Konzentrationen sich nicht signifikant verändern, die Na-Konzentrationen bei Vergasungsbedingungen etwas ansteigen aber die K-Konzentrationen abfallen – beim Halmgut Weizenstroh sogar drastisch. Die Gründe für diese Unterschiede konnten im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht weiter untersucht werden. Es bleibt auch noch unklar, ob die Veränderung der Kaliumkonzentration allein den Anstieg der Erweichungstemperatur hervorruft oder ob es durch das Vergasungsmittel Wasserdampf zu weiteren Unterschieden der Aschezusammensetzung kommt, die das Schmelzverhalten beeinflussen.

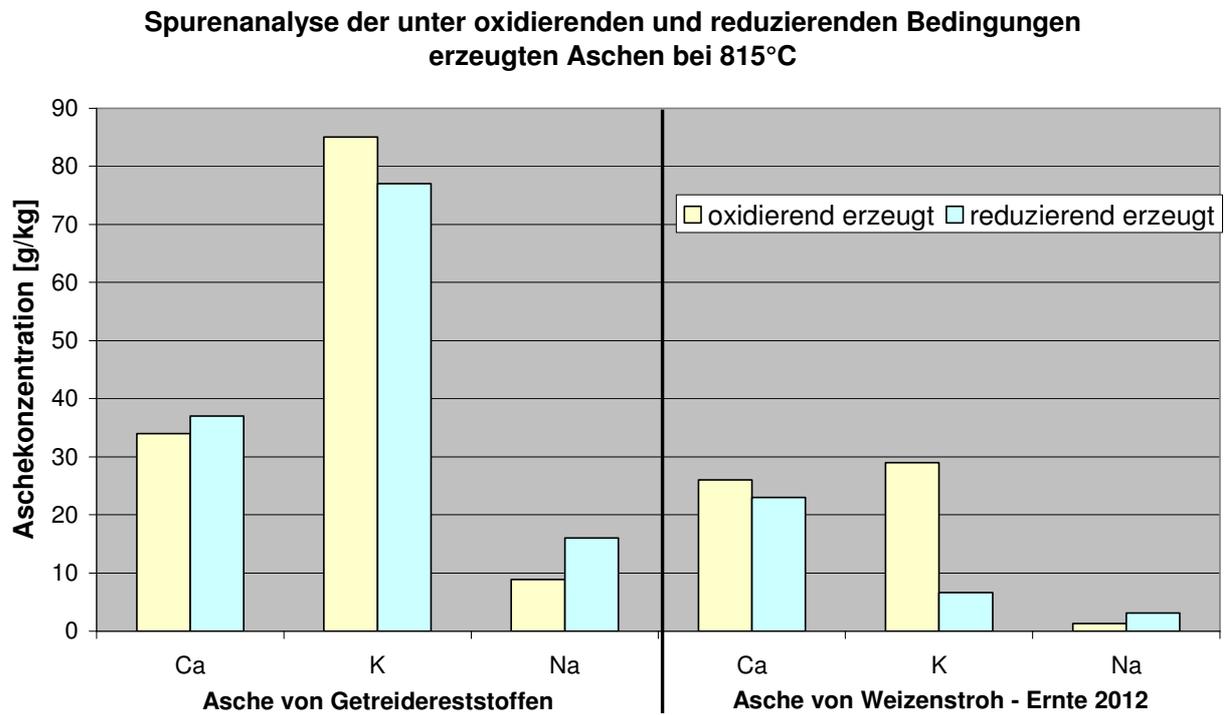


Abb. 6.3-5: Ascheanalysen auf wesentliche Alkali- und Erdalkalielemente, die das Schmelzverhalten beeinflussen

6.4 Thermochemische Konversion in Einzelreaktoren

6.4.1 Drop tube reactor

Ziel der Untersuchungen

Im Hinblick auf den Einsatz von staubförmigen Einsatzstoffen in einer Brennkammer ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs des Einzelpartikelumsatzes bei hohen Aufheizraten von großer Bedeutung. Wird ein Brennstoffpartikel in eine heiße Brennkammer gegeben, so finden die Teilprozesse der Trocknung, Freisetzung der flüchtigen Verbindungen (Entgasung), die Oxidation der flüchtigen Verbindungen und die Oxidation des Restkokes statt. Ziel der Untersuchungen im drop tube reactor war, es den zeitlichen Verlauf der Entgasung für unterschiedliche Biomassen zu bestimmen und diese zu vergleichen. Aus den Messergebnissen wurden dann reaktionskinetische Daten abgeleitet, die für eine mathematische Modellierung verwendet werden können.

Untersuchungsmethodik

Die experimentellen Untersuchungen wurden in einem Fallrohrreaktor (engl. drop tube reactor) nach FIELD durchgeführt, welcher in **Abb. 6.4-1** schematisch dargestellt ist.

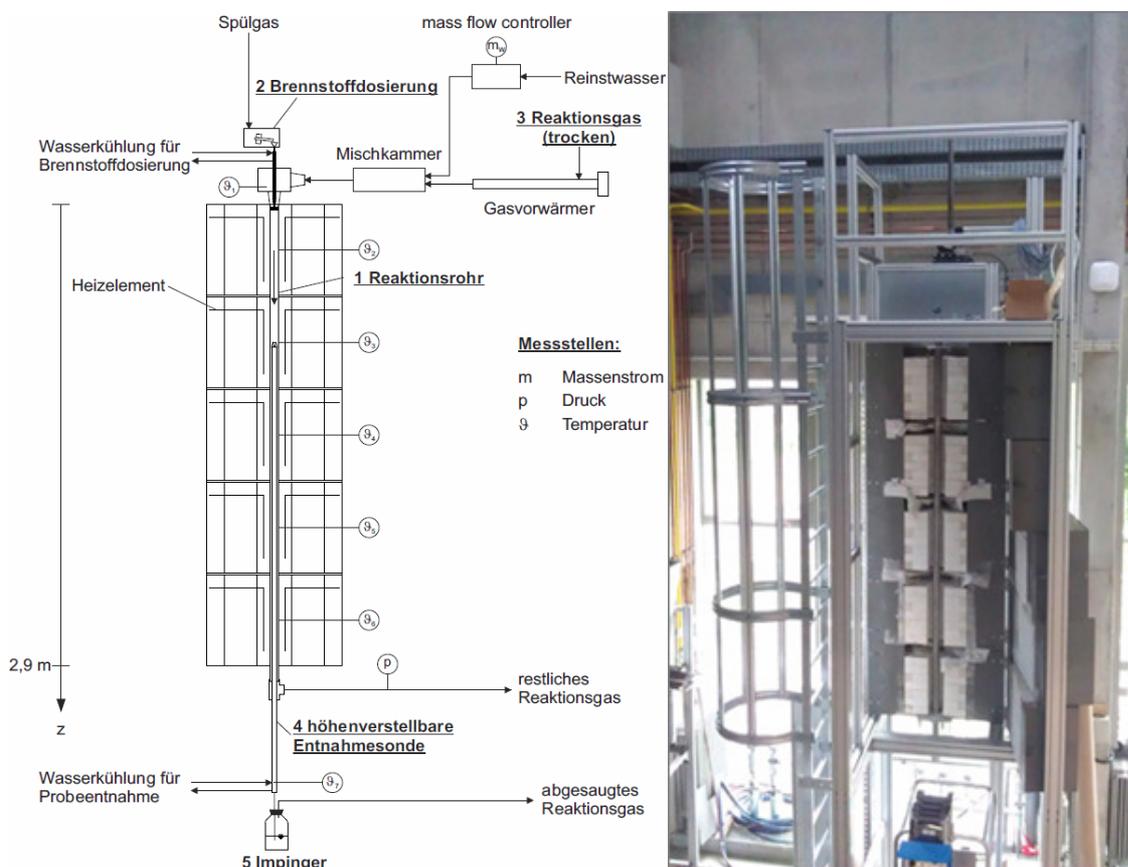


Abb. 6.4-1: Fließbild Versuchsanlage drop tube reactor

Dieses besteht aus einem elektrisch beheizten Edelstahlrohr (1). Über einen Vibrationszuteiler (2) wurden etwa 3 g/h des Einsatzstoffes (nahezu als Einzelpartikel) dem Reaktionsrohr kontinuierlich von oben zugeführt. Das Reaktionsrohr wurde mit auf 700 °C vorgewärmten Stickstoff ($V = 3,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$) als Reaktionsgas (3) durchströmt. Mit einer wassergekühlten Entnahmesonde (4) wurden die teilentgasten Partikel in unterschiedlichen Höhen isokinetisch abgesaugt. Die entnommenen Partikel wurden in einem mit Reinstwasser gefüllten Nassabscheider (5) abgeschieden. Aus dem zurückgelegten Reaktionsweg und der Partikelgeschwindigkeit wurde die Verweilzeit τ_{VWZ} der Partikel ermittelt.

Im Labor wurden im Anschluss die Partikel abfiltriert, getrocknet und weiteren Laboruntersuchungen zugeführt. Diese beinhalteten im Wesentlichen eine Kurzanalyse, mit der der Gehalt an flüchtigen Bestandteilen, der Restkoksanteil sowie der Aschegehalt bestimmt wurden. Der Aschegehalt musste um die in der Wasservorlage gelösten Aschebestandteile korrigiert werden. Dazu wurden mit Hilfe der Ionenchromatographie die gelösten Salze bestimmt.

Aufgrund des großen Zeitbedarfs für die Erzeugung der für die Standardanalytik (s. Tab. 6.1-1) erforderlichen Koksmengen musste eine Methode für die Kurzanalyse entwickelt werden, die weniger Probenmaterial benötigte. Die Realisierung erfolgte als Methodenprogramm für eine Thermowaage, mit der die o. g. Bestandteile bestimmt wurden.

Zur Auswertung wurde der Entgasungsgrad $u(\tau_{\text{VWZ}})$ aus dem Aschegehalt und dem Gehalt an fixen Kohlenstoff des Ausgangsmaterials und der Rückständen ermittelt.

Für die mathematische Modellierung des Entgasungsverlaufs wird in Anlehnung an das "Two Competing Rates Model" von Kobayashi [19] ein Modell mit zwei parallelen Reaktionen zu Grunde gelegt. Dabei wird die Entgasungsrate der schwer oder erst bei hohen Temperaturen freigesetzten flüchtigen Bestandteile mit einer Arrhenius-Gleichung erster Ordnung beschrieben. Eine weitere Arrhenius-Gleichung stellt dann die parallele Entgasung der einfach freisetzbaren Flüchtigen dar. Die reaktionskinetischen Daten beinhalten die Massenanteile der schwer und leicht entgasbaren Flüchtigen Bestandteile (α_1 und α_2), die Frequenzfaktoren (k_1 und k_2) sowie die Aktivierungsenergien ($E_{A,1}$ und $E_{A,2}$). Die Bestimmung dieser Parameter erfolgt über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate durch Minimierung der Abweichung zwischen Mess- und Berechnungswerten.

Untersuchungsergebnisse

In **Abb. 6.4-2** ist beispielhaft das gemessene und berechnete Entgasungsverhalten von Mischholz (Referenzbrennstoff) im Vergleich zu Switchgras und einer Trockenbraunkohle (TBK) mit den abgeleiteten reaktionskinetischen Daten dargestellt.

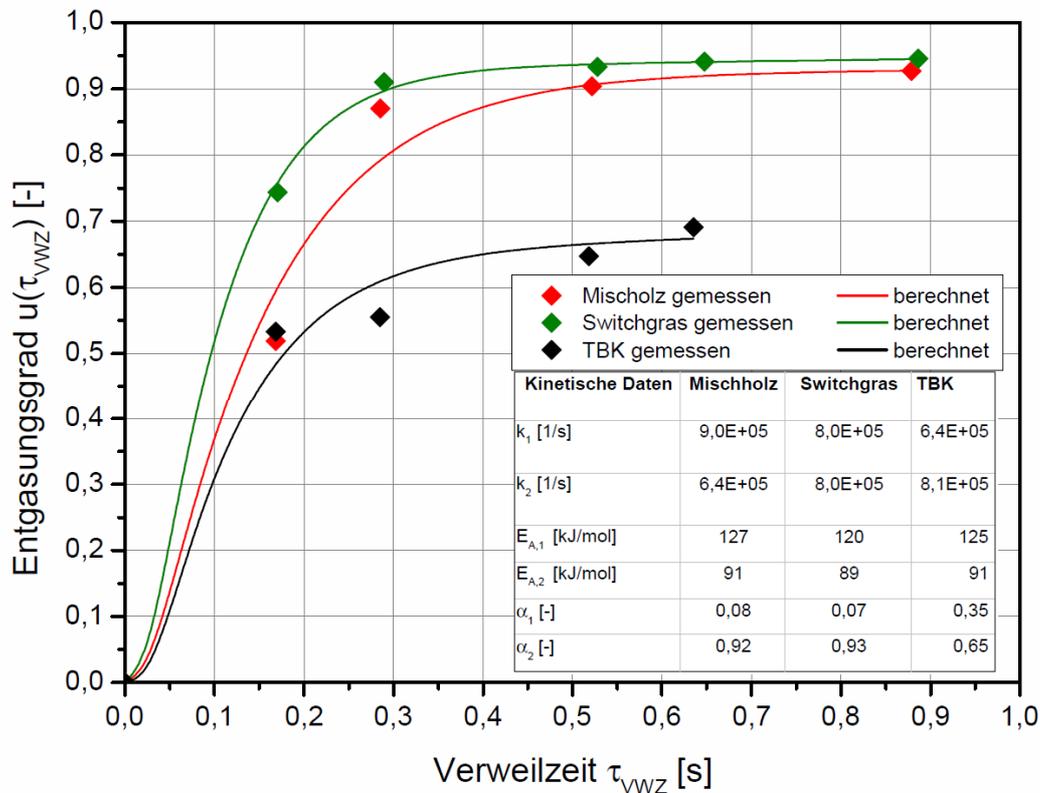


Abb. 6.4-2: Vergleich des Entgasungsverhaltens von Mischholz, Switchgras und Trockenbraunkohle (TBK) ($N_2 / 700 \text{ °C} / 63 - 80 \text{ }\mu\text{m}$)

Es wird deutlich, dass beide Biomassen im Gegensatz zur TBK einen steileren Verlauf der Entgasungsgradkurve aufweisen. Im Vergleich der Biomassen zeigt sich, dass Switchgras im Vergleich zum Mischholz zu Beginn deutlich schneller entgast, wobei mit zunehmender Verweilzeit der Unterschied zwischen den Entgasungskurven geringer wird. Nach einer Verweilzeit von 0,9 s sind bei beiden Biomassen rund 95 % der flüchtigen Bestandteile freigesetzt.

Die Unterschiede im Entgasungsverhalten wirken sich auch auf die reaktionskinetischen Daten aus. Wesentliche Unterschiede betreffen die Frequenzfaktoren (k_1 und k_2) und den Anteil der schwer und leicht entgasbaren Bestandteile (α_1 und α_2).

Das dargestellte Entgasungsverhalten führt in Verbindung mit der Qualität der freigesetzten flüchtigen Bestandteile (Zusammensetzung und Heizwert) zu einem unterschiedlichem Zünd- und Verbrennungsverhalten, das in Abschnitt 6.2 und 6.11 dargestellt ist.

6.4.2 Batchrostofen

Der Batchrostofen (Acronym am ITC „KLEAA“) eignet sich zusammen mit einem halbempirischen Modell als Bewertungsmethode, um das Abbrandverhalten fester, stückiger Biomassen für die Anwendung in einem Biomassekraftwerk mit einer Rostfeuerung (Wanderrost, Vorschubrost) zu charakterisieren.

Festbettreaktor KLEAA zur Ermittlung des Abbrandverhaltens für kontinuierliche Rostanlagen

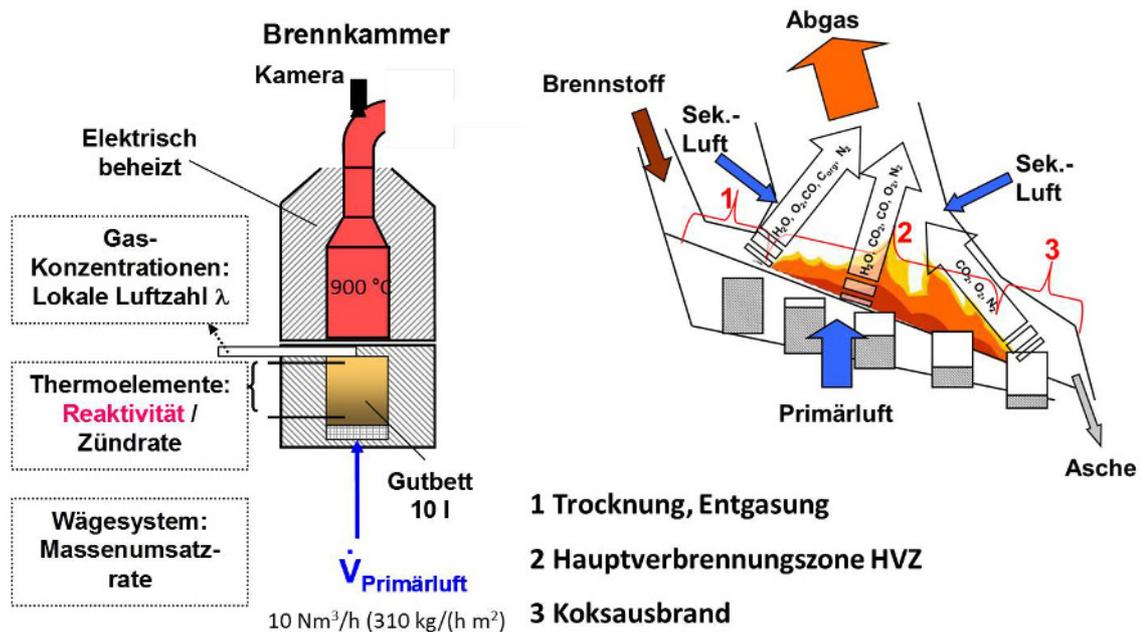


Abb. 6.4-3: Batchrostofen und Rostanlage

Das im Batchrostofen in **Abb. 6.4-3** links als Funktion der Zeit und Betthöhe ablaufende Abbrandverhalten findet sich rechts auf dem Rost über der Länge und Betthöhe wieder. Beide Apparate sind über die effektive Brennstoffgeschwindigkeit auf dem Rost miteinander gekoppelt. Ist diese bzw. die mittlere Verweilzeit des Brennstoffes auf dem Rost bekannt, kann das Abbrandverhalten vom Batchrostofen mit Hilfe von Kennzahlen auf den Rost übertragen werden.

Dazu wurden Versuche mit Gärresten, Getreidereststoffen, Hirschgras, Holzhackschnitzel (HHS), Kaffeepellets, KUP-Pappel, Reisspelzen, Switchgras und Kirschkernen durchgeführt. Vergleicht man die Geschwindigkeiten der Zündfront, die sich nach der ersten Zündung der Flüchtigen an der Gutbettoberfläche von oben nach unten Richtung Roststab bewegt, so erkennt man deutlich den Einfluss der Schüttdichte und der Feuchte: Mit abnehmender Schüttdichte zündet der Brennstoff schneller; steigt demgegenüber der Wassergehalt, wird dieser Prozess entsprechend verlangsamt (s. **Abb. 6.4-4**).

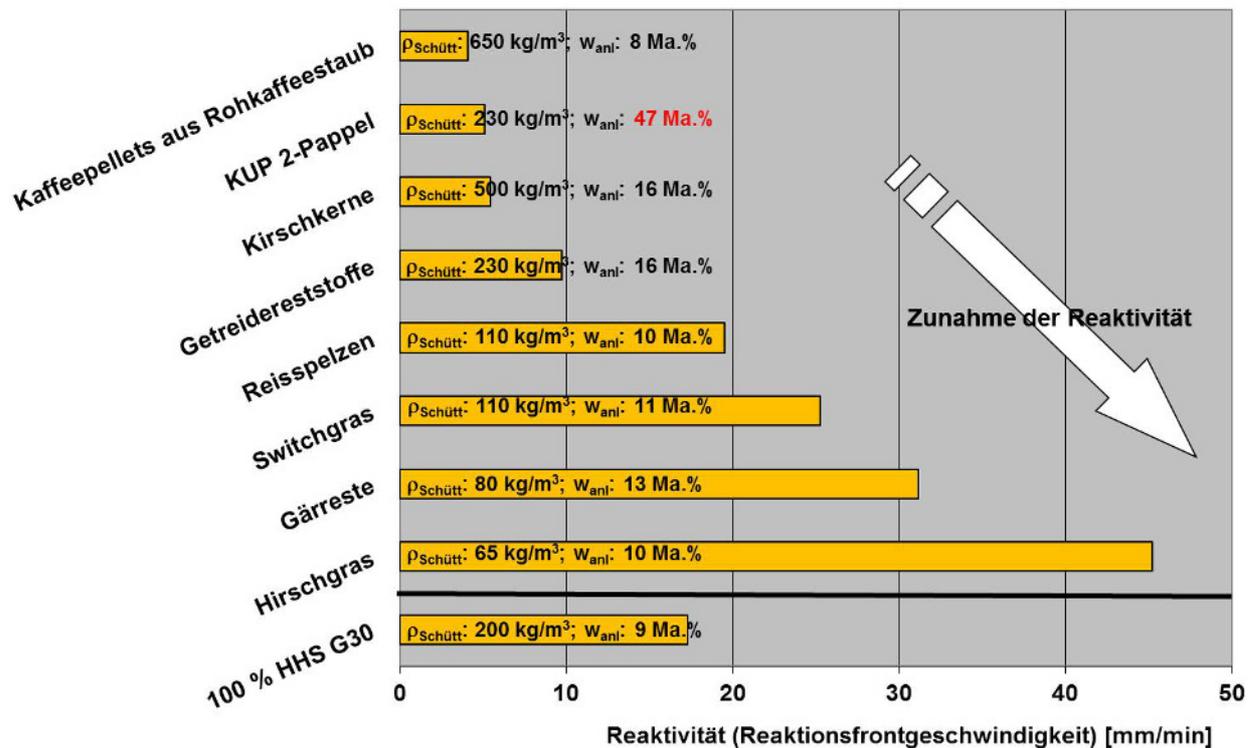


Abb. 6.4-4: Vergleich der Reaktionsfrontgeschwindigkeiten unterschiedlicher Brennstoffe im Batchrostofen KLEAA

Aus der Reaktionsfrontgeschwindigkeit lässt sich durch Multiplikation mit der Brennstoffschüttdichte die Zündrate ZR ermitteln. Sie beschreibt die je m² Rostfläche und Zeit gezündete Brennstoffmasse und kann mit der Massenumsatzrate MUR I verglichen werden. Die Massenumsatzrate MUR I wird aus dem Wägesignal berechnet und hat die gleiche Einheit wie die ZR. Sie beschreibt die umgesetzte Masse und wird zum Vergleich mit der ZR um den im Brennstofftopf verbleibenden Aschegehalt korrigiert. Übertragen auf einen kontinuierlichen Rostprozess, z.B. einen Wanderrost, der in der Industrie häufig zusammen mit einem Wurfbeschicker für Biomassen üblich ist, beschreiben die ZR und die MUR I die Hauptverbrennungszone (HVZ). Werden in KLEAA deutlich höhere ZR als MUR I ermittelt, deutet dies auf eine notwendige separat ausgeprägte Koksbrandphase hin, da mehr Brennstoff zündet als in die Gasphase umgesetzt werden kann. Bei Kenntnis der Abmessungen des kontinuierlichen Rostes, des Brennstoffmassenstromes und der mittleren Brennstoffverweilzeit auf dem Rost können mit Hilfe der im Batchrostofen KLEAA ermittelten Kennzahlen die erforderlichen Längen für die HVZ und Koksbrandphase unter Berücksichtigung vergleichbarer lokaler Primärluftmengen abgeschätzt werden. Dieses Vorgehen ist bereits validiert [20] und mittlerweile durch ein numerisches Modell ergänzt worden [20,21], das es erlaubt, auch bei unterschiedlichen Primärluftverteilungen zwischen Batchrost und kontinuierlichem Rost eine Übertragung zu berechnen.

Als prozesstechnisch kritisch erwies sich erwartungsgemäß der niedrige Ascheerweichungspunkt der Getreidereststoffe, denn hier kam es zu Verbackungen der Asche und zu einem inhomogenen Verbrennungsprozess. Hinsichtlich des Brennstofftransportes von Hirschgras und

Reisspelzen auf einem Rost könnten die im Vergleich zum Referenzbrennstoff Holzhackschnitzel geringen Brennstoff- und insbesondere Ascheschüttdichten ($< 20 \text{ kg/m}^3$) zu Schwierigkeiten führen.

Eine ausführliche prozessorientierte Bewertung wird für die Rosttechnologie in Kapitel 6.10 gegeben.

Eine Pelletierung von feinkörnigen bzw. sehr leichten Materialien kann hier unter Berücksichtigung der Kosten wie am Beispiel der Kaffeepellets in Erwägung gezogen werden.

Für die Untersuchungen am HDG- Kessel (Abschnitt 6.10) mussten jedoch aus Gründen der Förderbarkeit in der Beschickung Pellets für die Getreidereststoffe und Gärreste hergestellt werden. Zum Vergleich der Ergebnisse wurden die Pellets auch in KLEAA verbrannt.

Der Einfluss der Pelletierung auf die Reaktionsfrontgeschwindigkeit zeigt sich bei allen Brennstoffen in **Abb. 6.4-5**.

Durch die Verdichtung der Brennstoffe verkleinert sich die Reaktionsfront deutlich in etwa umgekehrt proportional zur Schüttdichte bei vergleichbarem Wasser- und Flüchtigengehalt der eingesetzten Brennstoffe.

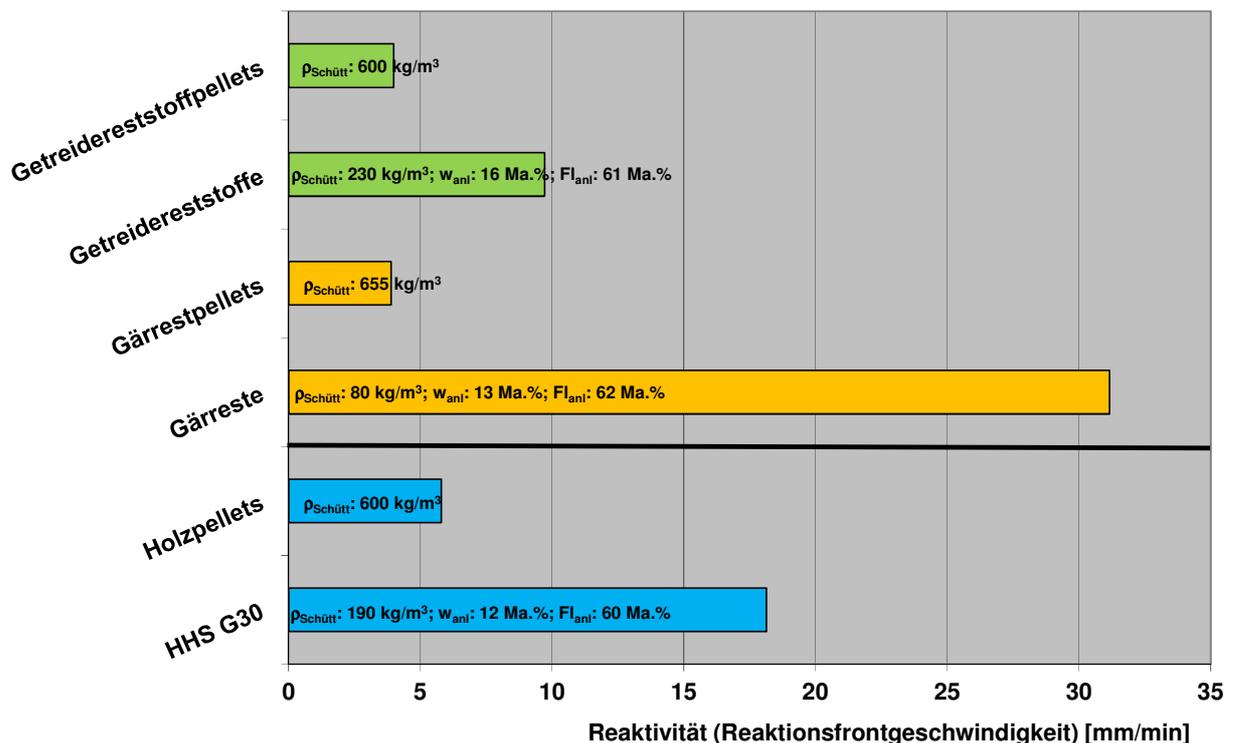


Abb. 6.4-5: Vergleich der Reaktionsfrontgeschwindigkeiten pelletierter und nicht pelletierter Brennstoffe in einem Batchrostofen KLEAA

Erwartungsgemäß zeigt sich nur ein geringer Einfluss der Pelletierung auf die Zündrate, da die Reaktionsfront mit der Schüttdichte multipliziert wird und sich damit die umgekehrte Proportionalität mit der Schüttdichte aufhebt (s. **Abb. 6.4-6**). Hingegen steigt die MUR I durch

die Pelletierung an, was gleichbedeutend mit einer Verkürzung der HVZ auf einem Wanderrost ist. Der Einfluss steigt, je größer die Differenz der Schüttdichten mit und ohne Pelletierung ist.

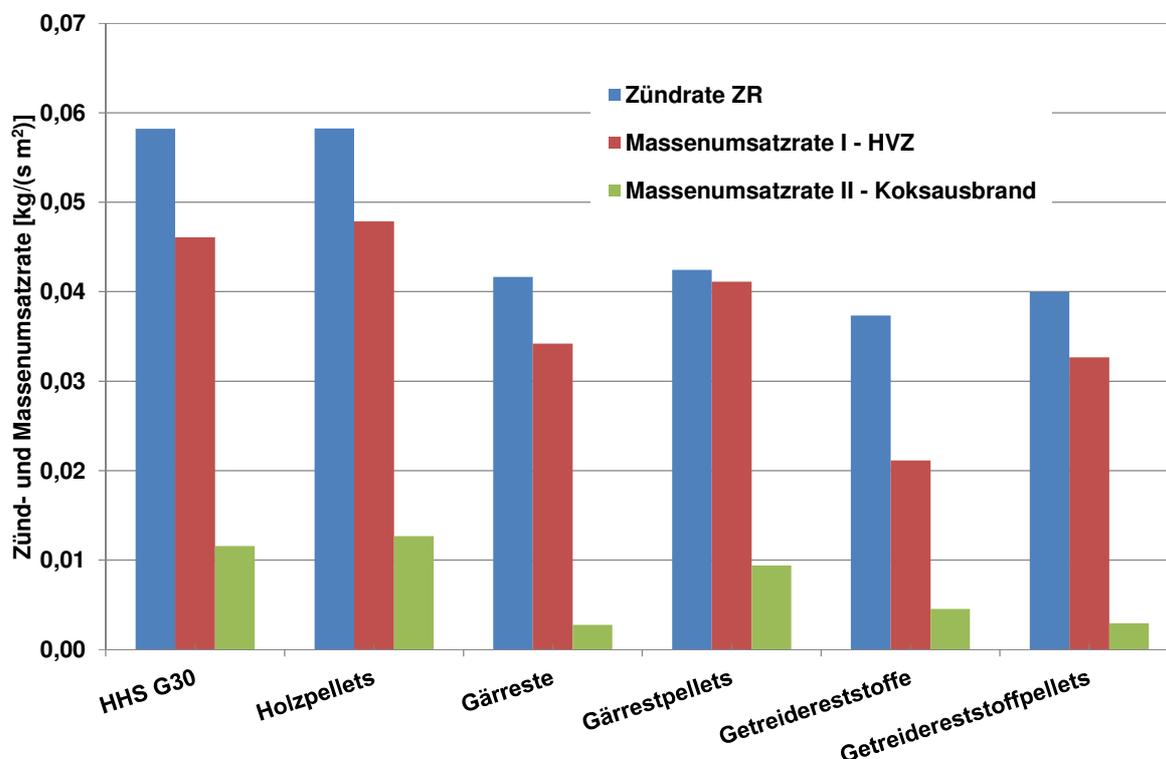


Abb. 6.4-6: Vergleich der Kennzahlen Zündrate und Massenumsatzrate pelletierter und nicht pelletierter Brennstoffe im Batchrostofen KLEAA

Dabei ist zu bemerken, dass die Qualität der Pellets sehr unterschiedlich war: Während die Holzpellets eine hohe Stabilität aufwiesen, waren die Getreidereststoffpellets brüchig und setzten feines Material frei. Möglicherweise kann der Feinanteil, der eine deutlich größere spezifische Oberfläche besitzt, den Massenumsatz gegenüber den nicht pelletierten Materialien steigern. Hier sei ergänzend erwähnt, dass alle Brennstoffe zur Pelletierung zuvor entsprechend aufgemahlen werden müssen.

Für Betreiber von Rostanlagen kann sich die Frage stellen, ob er Brennstoffe im Rohzustand oder pelletiert der Feuerung zuführen will. Unabhängig von den Kosten, die für Pellets etwa um den Faktor 2 höher sind (vgl. **Abb. 6.10-8**), kann eine Pelletierung durchaus sinnvoll sein, um einerseits für den Transport die spezifische Energiedichte je Volumen zu erhöhen, aber auch in der Beschickung können Pellets einfacher zu handhaben sein als die unbehandelten Materialien. Bei einem Wanderrost mit Wurfbeschickung könnten beide Optionen anwendbar sein: Holzhackschnitzel können in einer Mischung mit Getreidereststoffpellets über den Stößel oder eine Schnecke beschickt werden oder die Brennstoffe werden aus einer Kombination aus Holzhackschnitzeln auf dem Rost und Getreidereststoffe über die Wurfbeschickung in den Ofen gefördert.

6.5 Thermische und mechanische Aufbereitung von Biomassen

Die Aufbereitung der teils erntefrischen Biomassen vor ihrem Einsatz in den thermischen Behandlungsanlagen verfolgt die Ziele:

1. Erhöhung der Lagerstabilität durch Reduzierung des Wassergehalts,
2. Erhöhung des Heizwertes durch Vortrocknung,
3. Verbesserung der Transporteigenschaften (Rieselfähigkeit, Schüttdichte),
4. Erzeugung einer geeigneten Stückigkeit für die unterschiedlichen Apparatearten und -größen (Zerkleinerung, Pelletierung).

Punkt 3 dieser Aufzählung war hier weniger wichtig, während Punkt 1 eine zentrale Bedeutung zukam, da die Biomassen zwischen Ernte bzw. Erzeugung und dem Einsatz in den Forschungsanlagen monate- bis jahrelang zwischengelagert werden mussten. Insbesondere bei sehr feuchten und nährstoffreichen Biomassen (z.B. Birtreber, Zuckerrübenschnitzel, Gärreste mit jeweils 75-80% Wassergehalt, aber auch frisch geerntete Hölzer mit ca. 50% Wassergehalt) kann dies zu unerwünschten biologischen Reaktionen führen, die ein Verschimmeln oder eine Kompostierung zur Folge haben. Neben dem kontraproduktiven Abbau der organischen Substanz (also des Energieträgers) sind solche Reaktionen in der Regel auch mit einer Wärmetönung verbunden, die bei einer Haufwerkslagerung zu einem Wärmestau bis zu einer Selbstentzündung führen kann. Alle eingesetzten Brennstoffe sind daher unmittelbar nach der Lieferung auf Wassergehalte < 15% getrocknet worden, sofern sie nicht bereits hinreichend trocken geliefert wurden. Während die kleineren Mengen für Laboruntersuchungen in Labor-Trockenschränken schonend bei max. 60°C vollständig getrocknet werden konnten, waren für die Technikums- und Pilotanlagenversuche andere Verfahren zur raschen Behandlung mehrerer Tonnen Material anzuwenden. Im Sommer reichte bei trockenem Wetter die großflächige Ausbreitung z.B. von ca. 15 to Kurzumtriebsplantagenholz (KUP) in einer Schichtdicke von max. 10 cm und mehrfaches Wenden aus, um das völlig durchnässte Holz innerhalb weniger Wochen hinreichend zu trocknen. Zur thermischen Aufbereitung kleinerer Mengen bis ca. 300 kg wurde ein vorhandener Biomassebunker zu einem Festbett-Chargentrockner umgerüstet, indem Edelstahl-Lochbleche eingesetzt und eine Rohrleitung mit integriertem elektrischen Luftherhitzer zur Warmluftversorgung verlegt wurden. Damit war die vollständige Trocknung einer Charge innerhalb von 2 bis 3 Tagen möglich.

Die thermische Aufbereitung von sehr feucht angelieferten Biomassen hat zudem den Vorteil, dass der sich anschließende thermische Prozess (Pyrolyse, Vergasung oder Verbrennung) energetisch nicht mit der Verdampfung des Wassers belastet wird. Großtechnisch würde für die Vortrocknung ohnehin vorhandene (oft nicht genutzte) Abwärme verwendet werden, was die Energiebilanz in der Regel nicht negativ beeinflusst. Es sind allerdings Zusatzinvestitionen nötig für die erforderlichen Trocknungsapparate, beispielsweise Trommel- oder Fließbettrockner oder als einfachste Ausführung Lagermieten auf warmluftdurchströmten Spaltenböden. Sofern überschüssige Abwärme genutzt werden kann, verbleiben als zusätzliche Betriebskosten neben anteiligen Personalkosten die Antriebsenergien für Ventilatoren und Transportaggregate.

Die mechanische Aufbereitung der verwendeten Biomassen war insofern eine große Herausforderung, als durch den Einsatz vieler verschiedener Verfahren (Verbrennung, Vergasung, Pyrolyse) und Apparate (Wirbelschichten, Rost, Drehrohre, Festbettreaktor, Staubfeuerungen), die zudem noch in diversen Größenmaßstäben (Labor-, Technikums-, Pilotmaßstab) Berück-

sichtigung fanden, sehr unterschiedliche Anforderungen an die physikalische Beschaffenheit der Einsatzstoffe gestellt wurden. Überwiegend waren Zerkleinerungen und Siebungen durchzuführen, um Partikelgrößen zu erzeugen, die auf die Größe der jeweiligen Versuchsanlage und das angewandte thermische Verfahren angepasst waren. Dabei stellen Drehrohr- und Festbettreaktoren erheblich geringere Ansprüche an die erforderliche Partikelfinheit als Wirbelschicht- oder Flugstromreaktoren – zu beachten sind aber auch Einschränkungen bezüglich der Breite der erzeugten Partikelgrößenverteilung, z.B. bei durchströmten Festbett-schüttungen, die ein lockeres Haufwerk mit größeren freien Strömungskanälen benötigen. Einschränkungen des geeigneten Kornspektrums werden vor allem durch den Größenmaßstab der einzusetzenden verschiedenen Versuchsanlagen vorgegeben. Neben den Abmessungen des Reaktionsraums spielen hier insbesondere die Art und Größe der Eintrags- und Austrags-systeme für Einsatz- und Reststoffe eine große Rolle für die verwendbaren Partikelgrößen.

Im CUTEC Institut fanden neben den Zerkleinerungen für die Untersuchungen im Labor-maßstab (Schneid-, Schlagkreuz-, Prall-, Scheibenschwingmühle) auch Aufbereitungsarbeiten im größeren Maßstab (mehrere Tonnen) für die Versorgung aller Projektpartner statt. Zum Einsatz kamen dabei eine Rotorschere (langsamlaufende große Schneidmühle) in Kombination mit Sieben für holzartige Biomassen und ein aus dem landwirtschaftlichen Bereich weiterent-wickelter Häcksler für die Behandlung ballenförmig gepressten Halmguts.

Von den Hölzern war die Pappel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) nach einer längeren erfor-derlichen Außenlagerung nicht nur völlig durchnässt, sondern durch die verwendeten Ernte-maschinen auch weitaus zu grob (bis 30 cm lange Zweige oder Abschnitte). Hier musste ein mehrstufiger Trocknungs-, Zerkleinerungs- und Siebprozess durchgeführt werden, um auf den Sollwert der Korngröße von $x < 20$ mm zu gelangen. Die Misch-Holz hackschnitzel (HHS) waren bereits vorgetrocknet und hinreichend zerkleinert als Ware G30 W10 (Korngröße $x < 30$ mm, Wassergehalt $w < 10\%$) geliefert worden. Die Gärreste benötigten ebenfalls keine Aufbereitung, da sie am Erzeugungsort mit Abwärme vorgetrocknet wurden. Getreidereststoffe sind ihrer Entstehung entsprechend immer trocken und feinkörnig. Nur für den Einsatz in Staubfeuerun-gen mussten einige to von Getreidereststoffen, Switchgras und HHS einer externen Feinmah-lung unterzogen werden.

Ein größerer Zerkleinerungsaufwand war für die Pilotanlagenversuche mit Halmgütern (Switch-gras, Weizenstroh) erforderlich, da der Transport vom Erzeuger in Form von gepressten Ballen (Rundballen mit ca. 1,4 m Durchmesser und 1,2 m Höhe; Quaderballen mit typischen Abmes-sungen von ca. 1,2 m x 0,8 m x 2,2 m; Masse je Ballen ca. 250 bis 350 kg) mit vollständigen Halmen erfolgt. Daraus waren für die Projektpartner Häckselgüter mit 7 mm und 20 mm Halmlänge zu erzeugen. Hierfür kam ein im CUTEC Institut vorhandener Strohhäcksler zum Einsatz, der aus einem Ballenauflöser (hydraulisch absenkbar, rotierende Trommel mit unten-liegendem, exzentrisch angeordnetem Zerfaserungsmesser) und einer daran angeschlossenen Stroh-mühle (Rotationsschneidmühle mit wählbarem Siebeinsatz und pneumatischem Material-transport) bestand, s. **Abb. 6.5-1**.



Abb. 6.5-1: Verwendeter Halmgut-Häcksler, bestehend aus Ballenauflöser und Strohühle

Bei diesen umfangreichen Halmgutzerkleinerungen von unterschiedlichen Biomassen und Lieferungschargen fiel im Rahmen der Betriebsüberwachung und Qualitätssicherung eine große Datenmenge an, die anschließend wissenschaftlich ausgewertet wurde. **Abb. 6.5-2** zeigt ein Beispiel für die mögliche Verschiedenartigkeit von dem Namen nach gleichen Biomassen. Es handelt sich um zwei bereits gehäckselte Lieferungen von Switchgras, die offensichtlich zu unterschiedlichen Reifezeiten geerntet wurden. Während bei der Lieferung 1 die Halme noch grün, dünn und biegsam sind (früher Erntezeitpunkt), ist das Material der Lieferung 2 vollständig reif und durchgetrocknet, wodurch die Halme dicker und fester sind. Diese Verschiedenartigkeit führt bei der Zerkleinerung zwangsläufig zu unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des Häckselgutes, wie im Folgenden am Beispiel der Schüttdichte gezeigt wird.



Foto links: Gleiche Häcksellängen, aber zwei verschiedene Lieferungen von Switchgras:
Lieferung 1: „grasig“ – dünne, biegsame Halme
Lieferung 2: „strohig“ – feste, dickere Halme

- Verschiedene Anbaugebiete
- Verschiedene Erntezeitpunkte

Dazu ein Wort aus der Praxis:

Homogenität wie bei flüssigen Brennstoffen ist kaum gegeben, jedes Bündel Stroh und auch jeder Halm ist anders. Das betrifft nicht nur die Inhaltsstoffe, sondern resultiert auch aus Wachstumsverläufen, Ernte- und Lagerungsarten, Feuchtigkeit.

Dipl. agr. Ing. B. Pilz, PTG Pelletier- und Transportgesellschaft mbH Flurstedt
Aus seinem Vortrag „Praxiserfahrung bei der Kompaktierung halmgutartiger Biomasse“ bei der 1. Intern. Fachtagung – Strohennergie 2008 in Jena.

Abb. 6.5-2: Unterschiede zwischen zwei Lieferungen von Switchgras

In **Abb. 6.5-3** sind für die Biomassen Weizenstroh und Switchgras die Schüttdichten bei lockerer Lagerung in Abhängigkeit der Häcksellänge (bzw. des gewählten Siebeinsatzes der Strohmühle) dargestellt. Für das Weizenstroh stellt sich ein erwarteter Verlauf ein: je länger das Häckselgut, desto geringer die Schüttdichte – dies resultiert aus dem größeren Lückenvolumen zwischen den längeren Halmen. Beim Switchgras ist die Situation komplizierter, denn es tritt scheinbar ein lokales Minimum der Schüttdichte bei einer Häcksellänge von 40 mm auf, was sich aber allein aus der Haufwerkmechanik nicht erklären lässt. Anhand der Rückstellproben konnte jedoch die Ursache dieser Anomalie ermittelt werden: offenbar wurden zwei verschiedene Lieferungen des Switchgrases verarbeitet, wobei das auf 60 mm Länge zerkleinerte Material ungewöhnlich viel Feingut enthielt. Dieses vermag sich in den relativ großen Lücken zwischen den Halmen festzusetzen und erhöht damit die Schüttdichte gegenüber anderen Materialien, in denen wenig Feingut enthalten ist. Das Vorhandensein größerer Feingutmengen ist ungewöhnlich für den Halmguthäcksler, da die Strohmühle (im Prinzip ein Ventilator mit Schneidmessern) gleichzeitig als Windsichter arbeitet und dadurch relativ schmale Partikelgrößenverteilungen erzeugt, s. **Abb. 6.5-4**. Normalerweise sollten die Verteilungskurven parallel versetzt nebeneinander liegen mit der größten Häcksellänge rechts und der kleinsten links. Dies ist zumindest im Falle $x = 60$ mm nicht der Fall, was durch die Verschiedenartigkeit der Biomasselieferungen, aber auch durch andere betriebstechnische Abweichungen beim Zerkleinerungsprozess (z.B. Massenstrom der Zugabe, Schärfe der Messer) hervorgerufen werden kann.

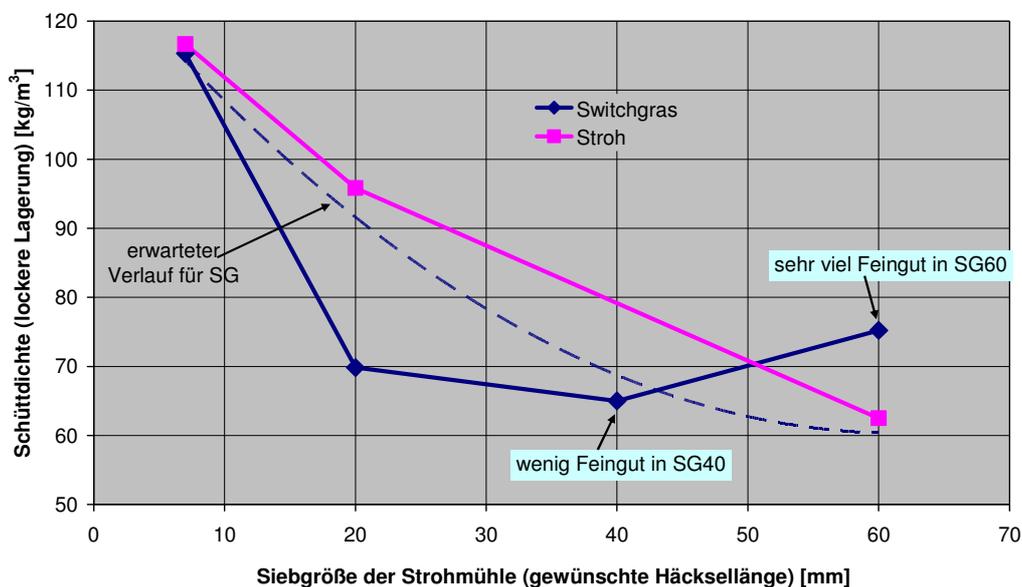


Abb. 6.5-3: Schüttdichte von gehäckseltem Switchgras und Weizenstroh (locker)

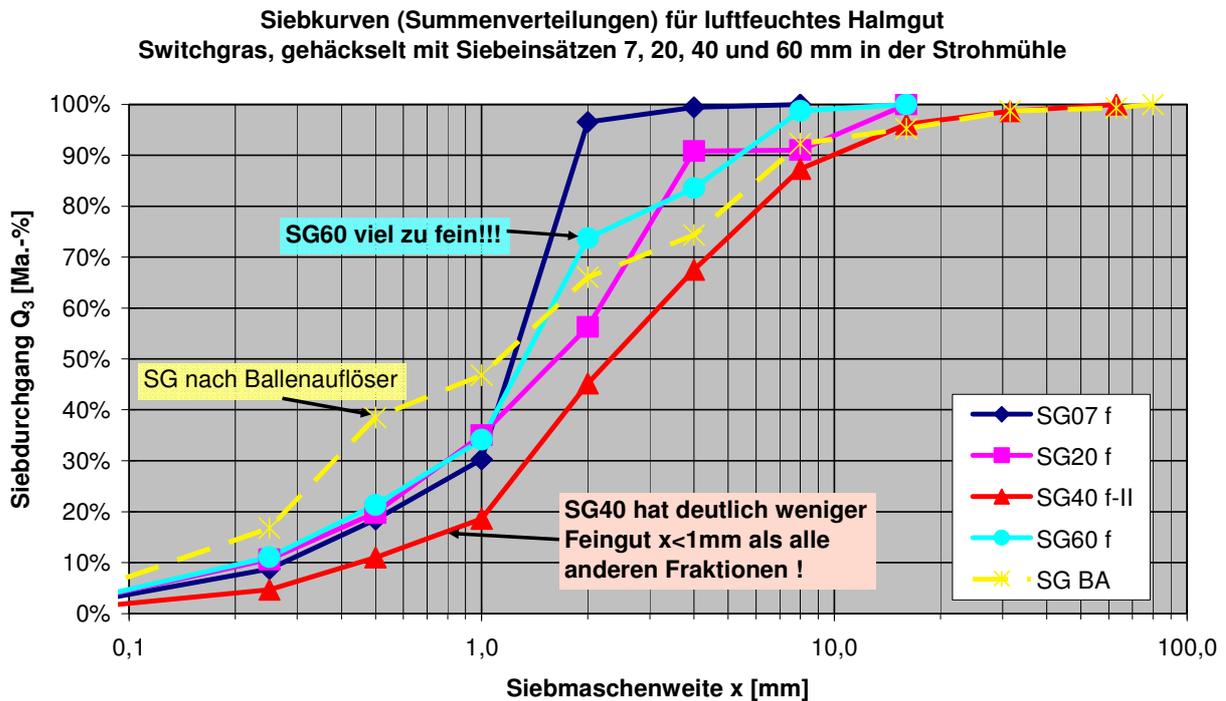


Abb. 6.5-4: Partikelgrößenverteilungen von Switchgrass (SG) mit unterschiedlichen Häcksel­längen sowie nach Vorzerkleinerung im Ballenauf­löser (BA)

Ein Beispiel für die Auswirkungen solcher unerwarteter Inhomogenitäten der aufbereiteten Biomassen zeigt **Abb. 6.5-5** anhand des Massenstroms einer Förderschnecke, welche den Einsatzstoff aus einem Vorratsbunker in eine Wirbelschicht transportiert. Oftmals wird mangels einer geeigneten Massenstromerfassung die Drehzahl der Schnecke als Maß für den Durchsatz verwendet, sofern sich der Einsatzstoff nicht ändert. Im Diagramm sind weitere Einflussgrößen des Massenstroms durch eine Förderschnecke genannt: Schneckengeometrie, Füllgrad und Schüttdichte. Die eingetragenen Messpunkte wurden bei gleicher Schneckendrehzahl bestimmt und sind somit – gleicher Füllgrad vorausgesetzt – ein Maß für die Schüttdichte des geförderten Materials in Abhängigkeit der Häcksellänge. Es zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie in Abb. 6.5-3, wodurch obige Aussagen bestätigt werden. Für die Praxis heißt das, dass Vorsicht im Gebrauch von Schneckenkennlinien zur Bestimmung des Durchsatzes geboten ist, sofern man die physikalischen Eigenschaften des Fördergutes und deren möglichen Änderungen nicht genau kennt.

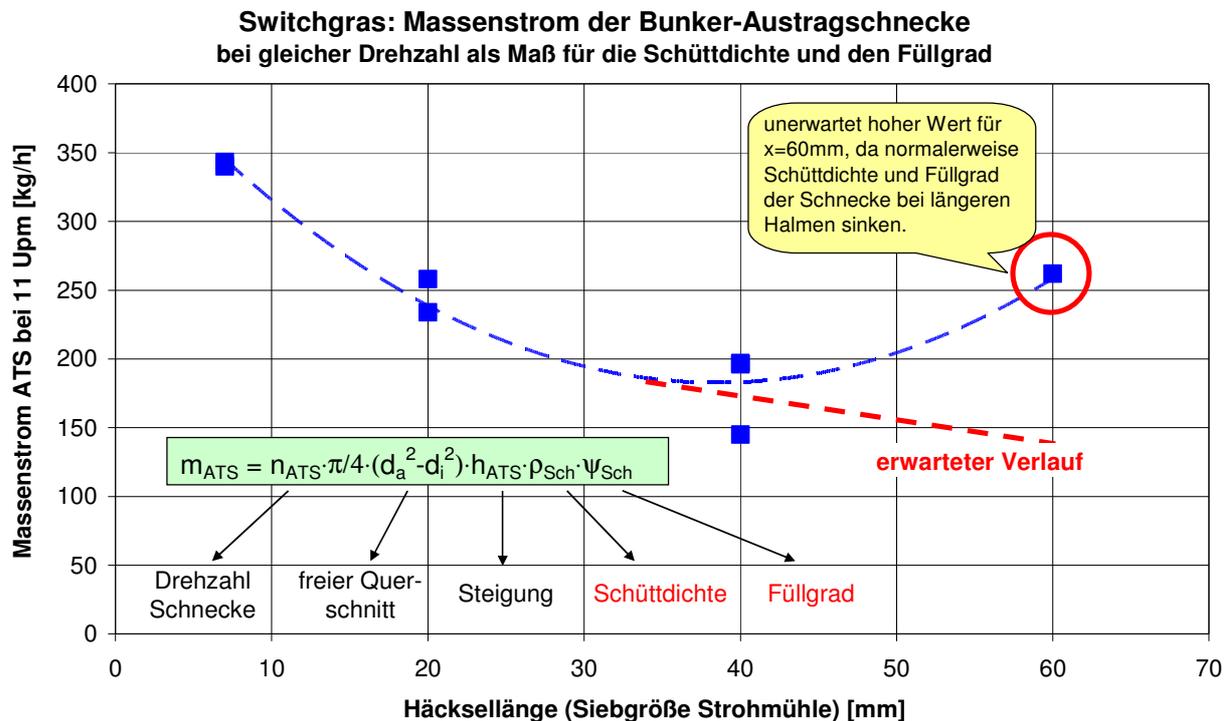


Abb. 6.5-5: Massenstrom einer Förderschnecke als Beispiel für die Auswirkungen verschiedener Schüttdichten der geförderten Materialien

Weitere für die Praxis wichtige Kennzahlen bei der Zerkleinerung von Biomassen sind der spezifische Energieverbrauch und der Mühlen- bzw. Mahlkörperverschleiß. Letzterer ließ sich bei den Häckselungen im CUTEC Institut zwar nicht quantitativ bestimmen, es waren aber durchaus deutliche Abzehrungen der Schneidmesser von Ballenauflöser und Strohmühle wahrnehmbar. Diese sind auch vom Vorhandensein von Störstoffen, wie Steine, Sand, Drähte und Bindfäden, abhängig, die erntebedingt immer in Halmgutballen enthalten sind. Bei den extern vergebenen Feinmahlungen von Switchgras (vorzerkleinert auf 7 mm) und Getreidereststoffen auf eine Endfeinheit von $x < 0,5$ mm mit einer Prallsichtermühle wurde ein spezifischer Verschleiß von 0,35 kg/to Biomasse ermittelt. Daraufhin riet der beauftragte Aufbereiter (Hosokawa) von einer großtechnischen Vermahlung dieser Einsatzstoffe mit dem verwendeten Mahlsystem ab.

Hinsichtlich des spezifischen Energieverbrauchs zeigt **Abb. 6.5-6** auf der linken Seite einen allgemeinen Zusammenhang in Abhängigkeit der angestrebten Partikelgröße aus einem Lehrbuch und im rechten Teil aus der Literatur Anwendungsfälle mit verschiedenen Mühlentypen, Biomassen und Einsatzfeuchten. Es bestätigt sich die bekannte Tatsache, dass bei Zerkleinerungen mit Partikelgrößen $x < 5$ mm die spezifische Zerkleinerungsarbeit exponentiell mit der Feinheit zunimmt. Dass das Aufgabematerial für die Mühlen nicht zu feucht sein sollte, versteht sich von selbst.

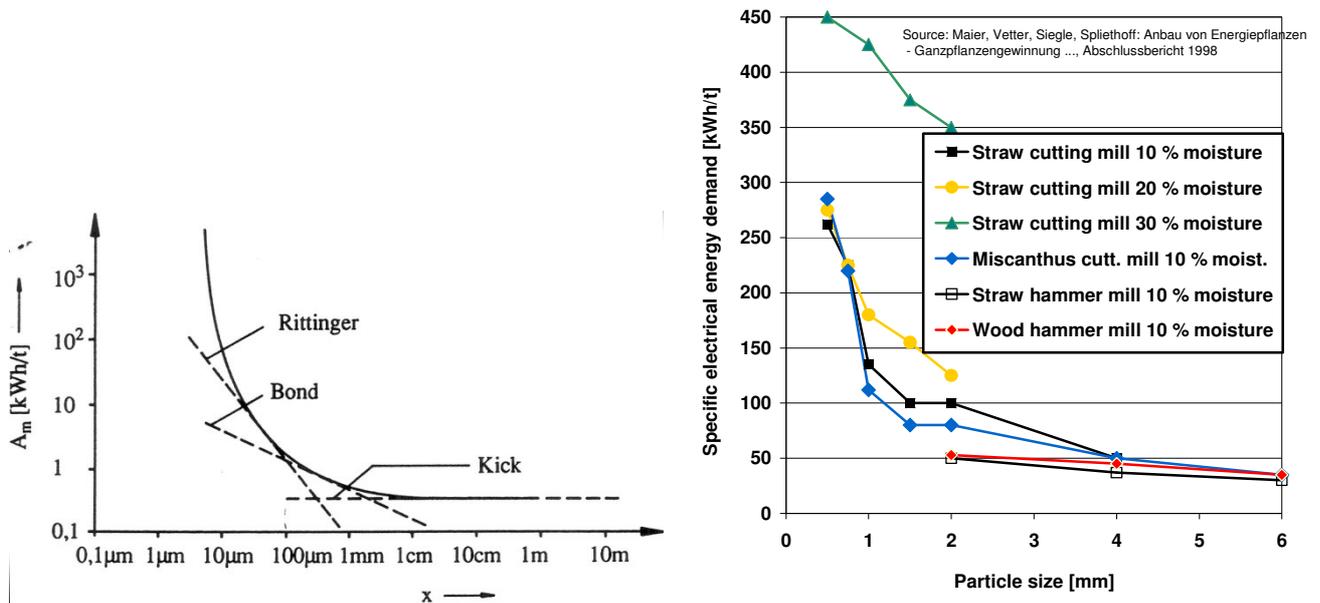


Abb. 6.5-6: Literaturangaben zur spezifischen Zerkleinerungsarbeit in Abhängigkeit der angestrebten Partikelgröße (links allgemein, rechts Messwerte für Biomassen [23])

Die eigenen Messwerte bei den umfangreichen Zerkleinerungen von Halmgütern wurden aufwändig ausgewertet und ergeben die in **Abb. 6.5-7** dargestellten Zusammenhänge in Abhängigkeit der Häcksellänge, die zwischen 7 mm und 60 mm variierte. Zusätzlich eingetragen sind Messwerte für die Strohzerkleinerung auf 40 mm Häcksellänge. Die genannten Energieverbräuche stellen Rechenwerte für die reine Zerkleinerungsarbeit dar, bei denen die im Leerlaufbetrieb ohne Materialzufuhr gemessenen Leerverbräuche von den gemessenen Gesamtverbräuchen abgezogen wurden. Die Leerverbräuche belaufen sich auf immerhin 80-90% des Gesamtverbrauchs und sind u.a. durch die Ventilatorleistung der Strohühle für den pneumatischen Transport des Häckselgutes bedingt.

Der spezifische Energieverbrauch der Strohühle zeigt den erwarteten praktisch linearen Verlauf mit umso höheren Werten, je feiner zerkleinert wird – eine Folge der erforderlichen Anzahl von Schnitten durch die ursprünglichen Halme. Der Energieverbrauch des Ballenauflösers zeigt hingegen einen wenig plausiblen Verlauf. Normalerweise sollte dieser unabhängig von der gewünschten Endfeinheit sein, da hierfür nur die Strohühle mit den entsprechenden Wechselsiebsätzen verantwortlich ist. Die reine Auflösung der Ballen sowie eine gewisse Vorzerkleinerung durch das Schneidmesser des Ballenauflösers müsste hingegen mit einem konstantem Energieaufwand verbunden sein, solange das Aufgabegut immer das gleiche ist, die Betriebsweise des Aggregats ähnlich bleibt und das der Strohühle zugeführte Material immer die gleiche Halmlänge aufweist. Dies war aber offensichtlich nicht der Fall, da die Energieverbrauchskurve ein Minimum bei Endfeinheiten zwischen 20 und 40 mm durchläuft. Die Gründe hierfür mögen die gleichen sein, wie sie bereits bei den Schüttdichten diskutiert wurden.

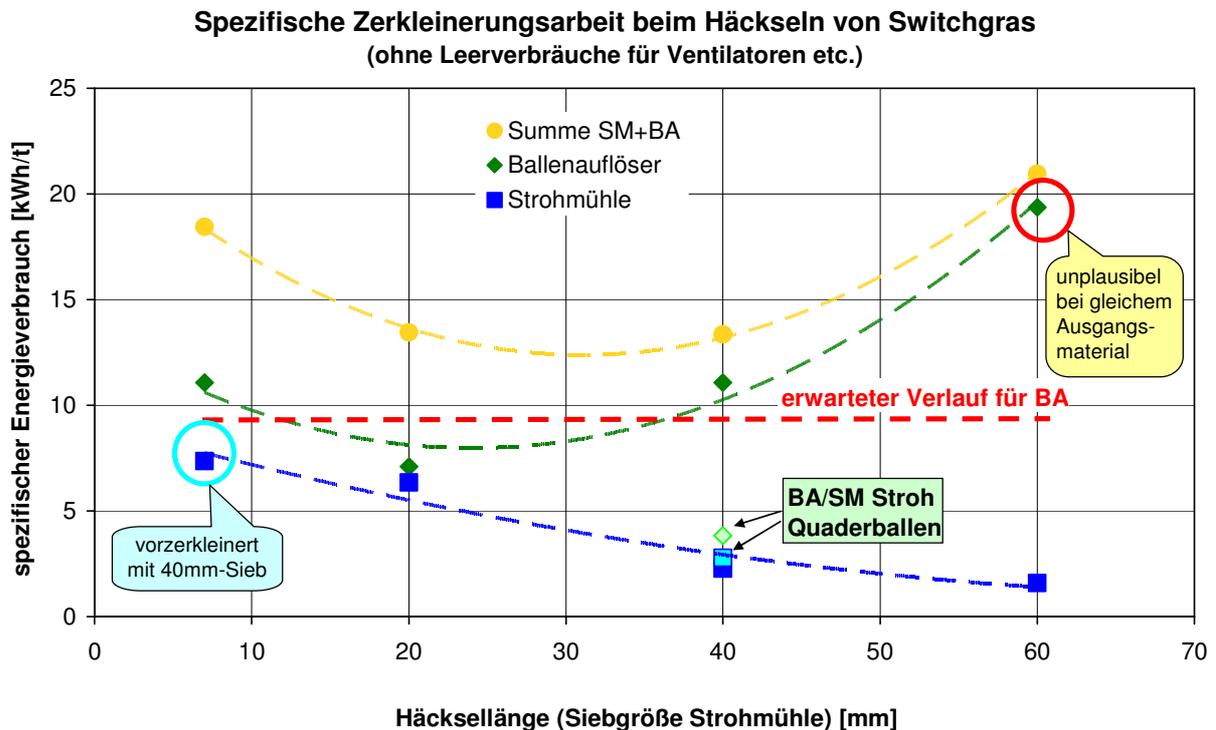


Abb. 6.5-7: Spezifischer Energieverbrauch von Ballenauflöser (BA) und Strohühle (SM) bei der Zerkleinerung von Switchgras auf verschiedene Häcksellängen

Bei der extern vergebenen Feinzerkleinerung zweier Biomassen mit einer Prallsichtermühle auf Endfeinheiten von $x < 0,5$ mm wurden vom beauftragten Aufbereiter folgende spezifische Energieverbräuche bestimmt:

- Getreidereststoffe: 850 kWh/to
- Switchgras 7 mm: 1.450 kWh/to

Die selbst ermittelte reine Zerkleinerungsarbeit durch schneidende Beanspruchung liegt nach Abb. 6.5-7 bei 7 kWh/to für Stroh (40 mm) und zwischen 12 und 20 kWh/to für Switchgras (7 bis 60 mm). Selbst bei Mitberücksichtigung der Leerverbräuche des Halmguthäckslers dürfte der spezifische Energiebedarf für eine Zerkleinerung auf 7 mm Häcksellänge nicht über 200 kWh/to liegen, also viel geringer als die Feinmahlung in der Prallsichtermühle. Zum Vergleich sei der (thermische) Energieinhalt der Biomassen genannt: ca. 5.000 kWh/to (entsprechend einem Heizwert von 18 MJ/kg). Hieran sollte man in der Praxis die Zweckmäßigkeit einer Feinmahlung (beispielsweise für den Einsatz in einer Staubfeuerung) bewerten.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass bei der Interpretation aller in diesem Forschungsvorhaben erarbeiteten Analysen- und Versuchsergebnisse (insbesondere bei der Bewertung von Prozessen und Prozessketten) berücksichtigt werden muss, dass immer zuerst eine Biomasse-Aufbereitung stattgefunden hat und die Forschungsstellen dann mit dem von ihnen gewünschten Aufbereitungsprodukt beliefert wurden, während die marktgängigen Einsatzstoffe durchaus andere Eigenschaften aufweisen können.

6.6 Pyrolyse: Massen- und Energiebilanzierung, Gas- und Kokseigenschaften

Die Pyrolyse ist kein eigenständiges Verfahren zur energetischen Nutzung von Biomassen, sondern ausschließlich als Vorbehandlungsstufe für sich anschließende Prozesse zu sehen bzw. als ein Schritt innerhalb einer Prozesskette. Die dabei entstehenden Pyrolyseprodukte Koks, Öl und Gas stehen in den nachfolgenden Prozessen als Einsatzstoffe und Energielieferanten zur Verfügung oder können als eigenständige Produkte vertrieben werden. Als Vorteile einer eigenständigen pyrolytischen Prozessstufe zur Herstellung von „Biokohle“ sind u.a. zu nennen:

- Vereinheitlichung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der behandelten Stoffe: aus unterschiedlichsten Biomassen werden relativ gleichartige Produkte,
- bessere Mahlbarkeit des Kokes gegenüber den unbehandelten Biomassen,
- Herstellung lagerfähiger Produkte (Koks, Öl),
- Möglichkeit der dezentralen Pyrolyse und zentralen Verwertung der Pyrolyseprodukte.

Dabei ergeben sich für die Nutzung der Pyrolyseprodukte z.B. folgende Möglichkeiten:

- Pyrolysekoks: Vergasung oder Verbrennung in diversen Apparaten, z.B. Staubfeuerung, Herstellung von Aktivkohle, Ersatz von Koksen aus Stein- und Braunkohlen,
- Pyrolyseöl: Verbrennung z.B. in einem Motor oder (ohne vorherige Kondensation des Pyrolyserohgases) zur Reaktorbeheizung, Vergasung (z.B. bioliq®-Verfahren),
- Permanentgas: Verbrennung zur Reaktorbeheizung.

Das Ziel der durchgeführten Versuche im Technikums- und Pilotmaßstab bestand zunächst in grundlegenden Untersuchungen zu Anfall und Eigenschaften verschiedener Produktströme der Pyrolyse von Biomassen (Koks, Kondensate, Permanentgas). Dazu wurde eine breite Variation von Biomassearten und -gruppen, Prozesstemperaturen und Verweilzeiten vorgenommen. Aus den Versuchsergebnissen sollten dann die Verwertbarkeit der einzelnen Produktströme beurteilt sowie Auslegungswerte für die Konzipierung von Großanlagen bereitgestellt werden.

6.6.1 Langsame Pyrolyse

Das Pyrolysedrehrohr des CUTEC Instituts (s. **Abb. 6.6-1**) ist für eine breite Einsatzstoffpalette von Biomassen bis zu Abfällen mit Körnungen bis zu 30 mm ausgelegt und daher sehr robust konstruiert. Es besteht aus einem glatten Rohr von 0,3 m Durchmesser und einer gesamten Länge von 5,8 m, wovon 3,6 m elektrisch von außen beheizt werden. Die Heizung ist in 4 Zonen mit einer Leistung von je 10 kW aufgeteilt. In jeder Zone wird die Heizleistung durch die jeweilige Rohrwandtemperatur geregelt, die in einem weiten Bereich bis 900 °C variiert werden kann. Da die Wärmeübertragung auf den Einsatzstoff im Wesentlichen über die Rohrwand auf die (in der Regel schlecht wärmeleitende) Gutbettschüttung stattfindet, handelt es sich um eine mittelschnelle bis langsame Pyrolyse. Die Feststoffverweilzeit beträgt bei den hier gewählten Betriebsparametern ca. 30 bis 45 min, die Gasverweilzeit je nach Temperatur 15 bis 30 sek. Die Pyrolysegase werden im Gleichstrom mit dem Gutbett geführt, wodurch Gas-Feststoff-Reaktionen mit dem Pyrolysekoks stattfinden können. Das Rohgas wird am Drehrohrende im Teilstrom beprobt und in die Bestandteile Flugkoks, Öl, Wasser und Permanentgas getrennt.

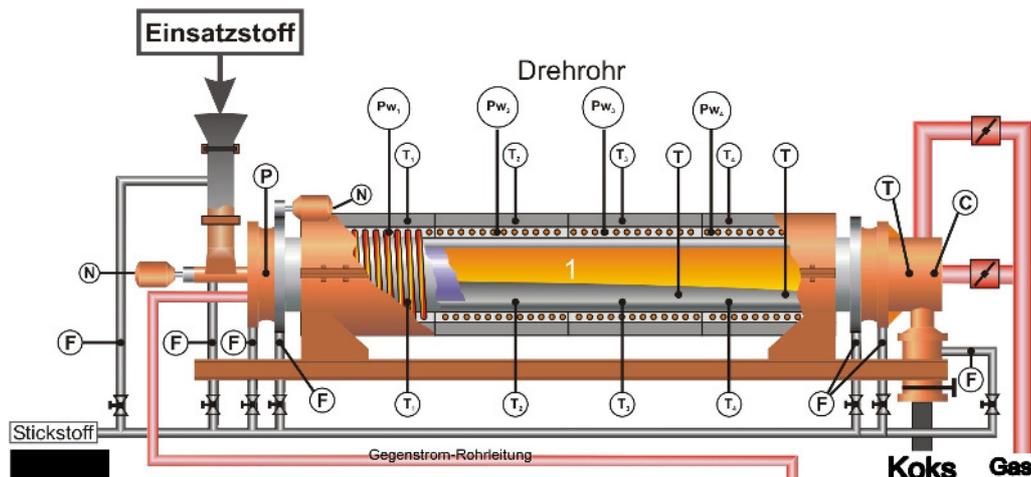


Abb. 6.6-1: Schema des CUTEK-Pyrolysedrehrohrs

In den durchgeführten Versuchen sind die Biomassen mit einer Feuchte von 10 bis 20 % und einem Massenstrom von 20 kg/h eingesetzt worden. Das Hauptziel der Untersuchungen lag in der Ermittlung von Massen- und Energieverteilungen bzw. Eigenschaften der Pyrolyseprodukte in einem weiten Prozesstemperaturbereich von 500 bis 900 °C. **Abb. 6.6-2** zeigt beispielhaft für Gärreste die Produkt-Massenverteilungen und **Abb. 6.6-3** die chemisch gebundenen Energieanteile, für die anderen Biomassen ergeben sich grundsätzlich ähnliche Abhängigkeiten von der Pyrolysetemperatur.

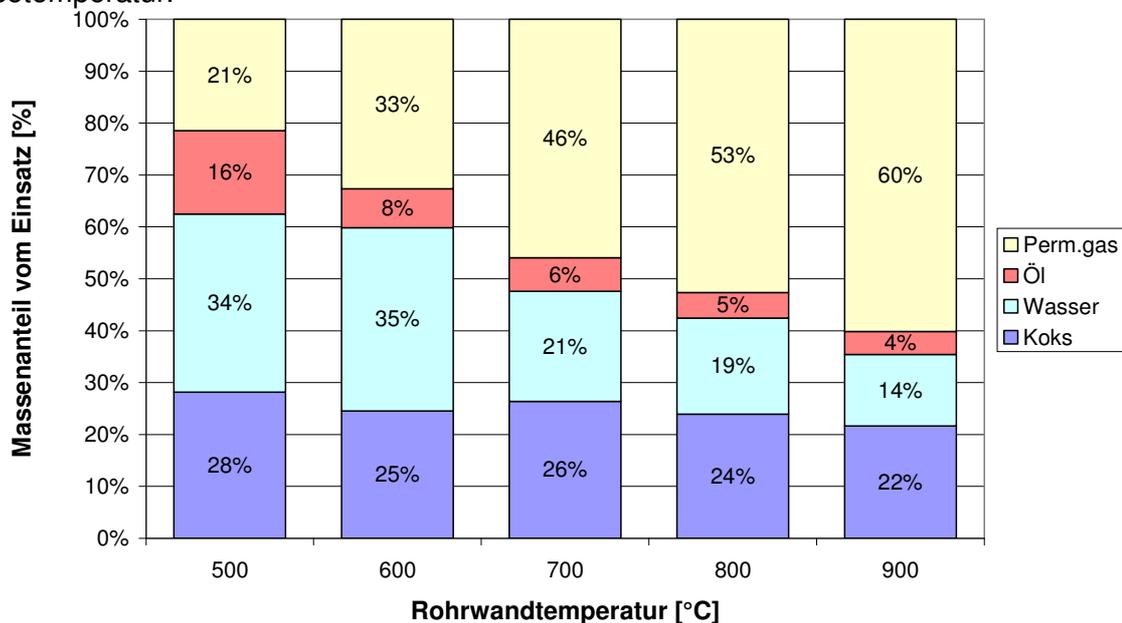


Abb. 6.6-2: Produkt-Massenverteilung für die Gärreste-Pyrolyse

Die Massenanteile des Kokes sind im betrachteten Temperaturbereich weniger beeinflussbar als bei noch niedrigeren Temperaturen. Es findet keine Torrefizierung, sondern eine weitgehend vollständige Pyrolyse mit einer Nachvergasung des Kokes durch Wasserdampf bei hohen Temperaturen statt. Die sehr deutlich ausgeprägte Abhängigkeit der Rohgasbestandteile

Wasser, Öl und Permanentgas ist nur in Prozessen bedeutsam, in welchen diese als Zielprodukte erzeugt werden sollen.

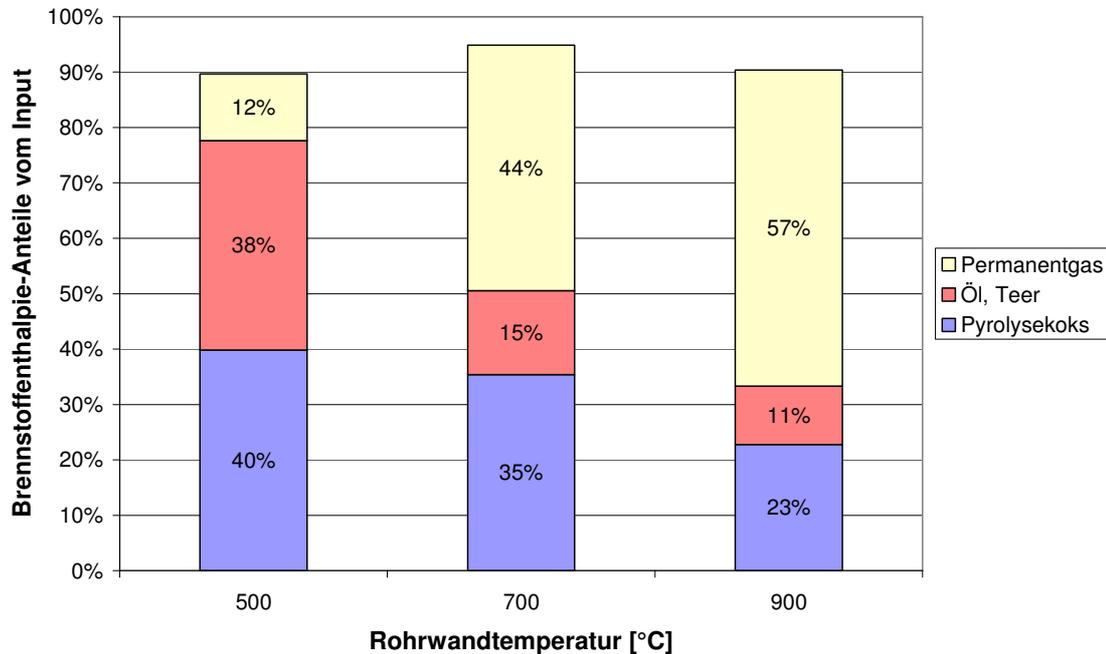


Abb. 6.6-3: Produkt-Energieverteilung für die Gärreste-Pyrolyse

Der Energieanteil des Kokes nimmt bei sehr hohen Temperaturen rasch ab, da sich der Ascheanteil der Biomasse im teils nachvergasten Koks stark anreichert und dessen Heizwert dadurch reduziert wird. Im Pyrolyserohgas (Permanentgas inkl. Kondensate) verschieben sich die Anteile von Öl und Permanentgas bei niedrigen Temperaturen zum Öl hin, was aber in den meisten Anwendungsfällen der Praxis, in denen eine Verbrennung des heißen Rohgases zwecks Bereitstellung von Heizenergie erfolgt (also keine Trennung der beiden Produkte Öl und Permanentgas stattfindet), keine Rolle spielt.

Abb. 6.6-4 zeigt die Unterschiede in den Produkt-Massenverteilungen für alle untersuchten Biomassen, jeweils für eine relativ niedrige Prozesstemperatur (600°C) und für eine hohe (800°C). Bei der vergleichenden Betrachtung bei konstanter Temperatur ist zu berücksichtigen, dass die Biomassen überwiegend im Anlieferungszustand oder nach Teiltrocknung eingesetzt wurden, also mit unterschiedlichen Restfeuchten von $w = 10$ bis 20%. Dies schlägt sich unmittelbar in den Wasseranteilen der Pyrolyseprodukte nieder. Die unterschiedlichen Koksanteile ergeben sich im Wesentlichen durch die Verschiedenartigkeit der Biomassen hinsichtlich des Aschegehalts, mit Ausnahme von Switchgras bei 600°C Pyrolysetemperatur: hier kam es wegen des nur grob gehäckselten Einsatzguts (40 mm) zu einem sehr hohen Füllgrad des Drehrohres und dadurch bedingt zu einer geringeren Ausgasung des Kokes - bei 800°C wurde deshalb feiner gehäckseltes Material (20 mm) verwendet und der Koksanteil harmonisiert durch die verbesserten Reaktionsbedingungen wieder mit dem Ascheanteil der Kurzanalyse.

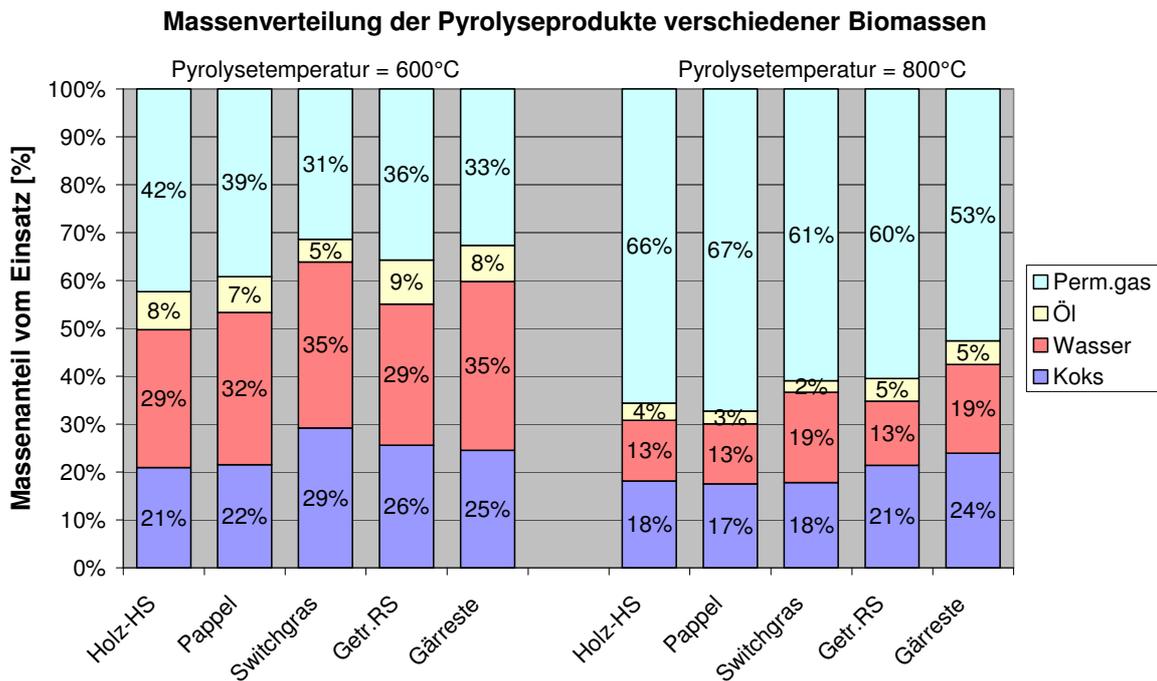


Abb. 6.6-4: Vergleich der Massen-Produktverteilungen nach Pyrolyse für verschiedene Biomassen und zwei Prozesstemperaturen (Getr.RS = Getreidereststoffe)

Der Vergleich zwischen den beiden dargestellten Pyrolysetemperaturen gibt deutliche Hinweise auf die unterschiedlichen Reaktionen. Bei niedrigen Temperaturen entsteht neben der Einsatzfeuchte viel Wasserdampf aus dem Wasserstoff der Biomasse und auch der Ölanteil ist bedeutend, während die nicht kondensierbaren Gasbestandteile zurücktreten. Bei hohen Temperaturen nehmen die Koks-, Öl- und Wasseranteile ab zugunsten eines sehr hohen Permanentgasanteils. Dies sind untrügliche Zeichen für Vergasungsreaktionen zwischen Feststoff und Rohgas (im Wesentlichen heterogene Wassergasreaktion) sowie innerhalb der Gasphase (z.B. homogene Wassergasreaktion).

Je nach Pyrolysetemperatur liegen im Pyrolysekoks bis zu 50% des Biomasseheizwerts chemisch gebunden vor, siehe Abb. 6.6-3. Bei niedrigeren Temperaturen als 500°C kann dieser Anteil sogar noch höher werden (Ziel der Torrefizierung). Damit handelt es sich energetisch gesehen um das Hauptprodukt bei der Pyrolyse bis ca. 600°C, obwohl die Massenanteile deutlich geringer als 30% sind. Für die weitere Verwendung der großtechnisch hergestellten Kokse ist die Kenntnis ihrer wesentlichen physiko-chemischen Eigenschaften wichtig, die im Folgenden näher behandelt werden sollen.

In **Abb. 6.6-5** wird am Beispiel von aus Gärresten hergestellten Koksen die allgemeine Abhängigkeit der Kurzanalyse-Parameter Aschegehalt bei 815°C Glühtemperatur (bzw. Glührückstand bei 550°C), Flüchtigengehalt und fixer Kohlenstoff C_{fix} von der angewendeten Pyrolysetemperatur gezeigt. Während die Restflüchtigen mit steigender Temperatur stetig, aber degressiv bis in die Nähe der Nachweisgenauigkeit abfallen, weisen die beiden Kurven des Aschegehalts bzw. Glührückstands einen progressiv ansteigenden Verlauf auf. Letzterer hat mehrere Ursachen: zum Einen steigen bei fallenden Flüchtigengehalten die Konzentrationen der anderen Bestandteile (Asche und C_{fix}) automatisch, andererseits finden bei höheren

Temperaturen Kohlenstoffabbaureaktionen statt, wodurch der C_{fix} -Anteil wieder sinkt und der Ascheanteil noch stärker steigt.

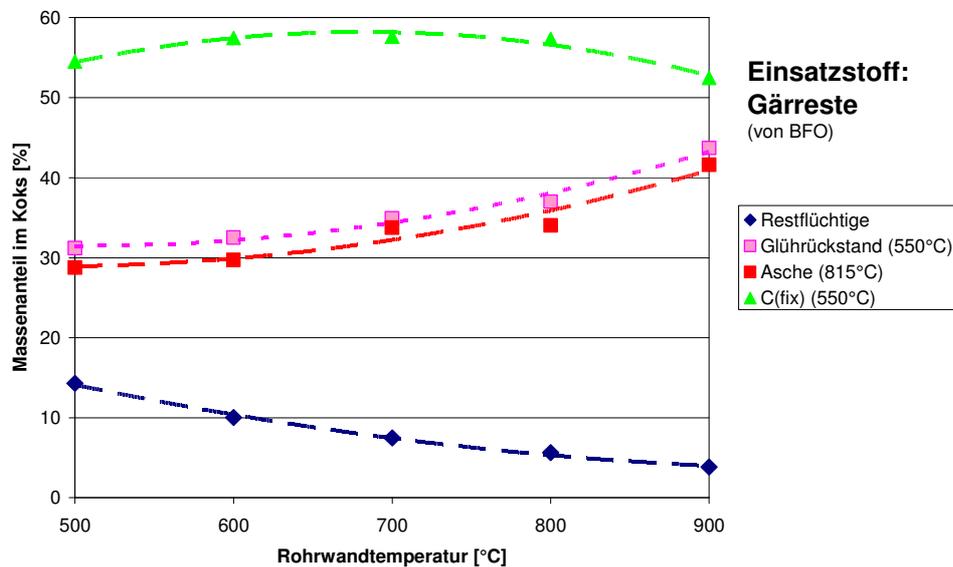


Abb. 6.6-5: Temperaturabhängigkeit der Koks­zusammensetzung nach Pyrolyse: Asche bzw. Glührückstand, Restflüchtige und fixer Kohlenstoff C(fix)

Abb. 6.6-6 zeigt für alle untersuchten Biomassen den Verlauf des Restflüchtigengehalts über der Pyrolysetemperatur. Alle diese Kurven liegen relativ dicht beisammen, wobei die Differenzen sowohl in der Zusammensetzung der Biomassen (verschiedene Aschegehalte) als auch in unterschiedlich sich einstellenden Wärmeströmen in das Gutbett, die sich durch verschiedene Schüttguteigenschaften ergeben, begründet liegen können.

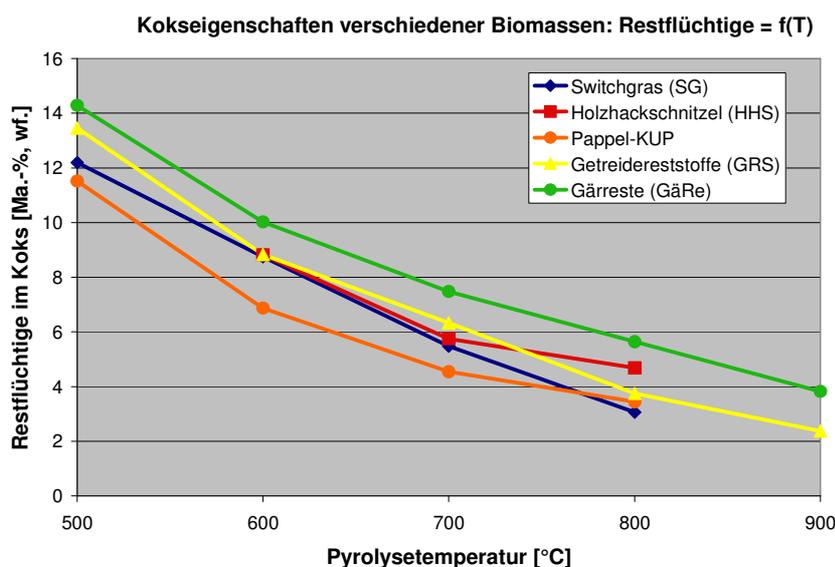


Abb. 6.6-6: Restflüchtigengehalt der Kokse aus verschiedenen Biomassen in Abhängigkeit der Prozesstemperatur

In **Abb. 6.6-7** sind die gemessenen Heizwerte der Pyrolysekokse aller eingesetzten Biomassen als Funktion der Prozesstemperatur dargestellt. Sie ergeben sich im Wesentlichen aus der

Summe der Heizwerte des C_{fix} - und des Restflüchtigenanteils. Die geringsten Heizwerte besitzen die aschereichsten Kokse aus Gärresten und Getreidereststoffen.

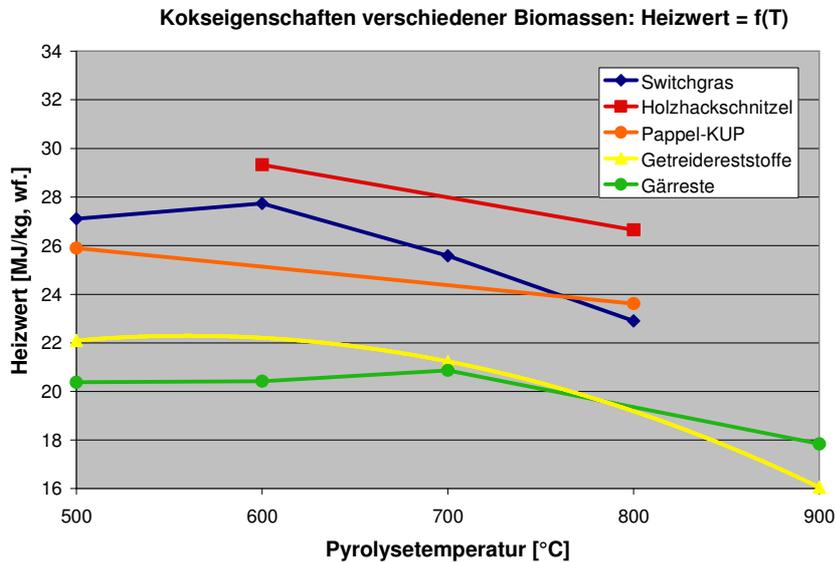


Abb. 6.6-7: Heizwert der Kokse aus verschiedenen Biomassen in Abhängigkeit der Prozesstemperatur

In **Abb. 6.6-8** ist die Veränderung des Kornspektrums von der Biomasse zum Pyrolysekoks für das Beispiel Gärreste dargestellt. Es findet eine deutliche Zerreibung bzw. Schrumpfung der ursprünglichen Partikel statt, was jedoch für andere Biomassen durchaus nicht in gleicher Weise gelten muss – beispielsweise neigen Getreidereststoffe eher zur Kornstabilität. Die Pyrolysetemperatur spielt in dem hier betrachteten Variationsbereich für diese Kornverkleinerung nur eine untergeordnete Rolle, wohl aber die Schüttgutmechanik bzw. die Intensität der Gutbettbewegung innerhalb des Drehrohres und die Abriebfestigkeit des Koks.

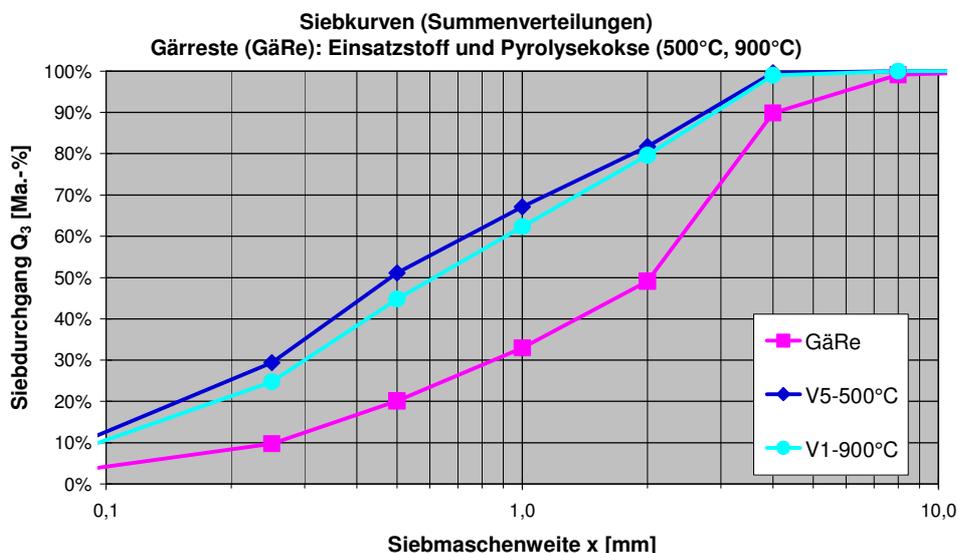


Abb. 6.6-8: Partikelgrößenverteilungen von Gärresten und daraus erzeugten Pyrolysekoksen

Die Eigenschaften des Pyrolysegases sind im Folgenden für die Produkte nach Kondensation (Permanentgas und öliges sowie wässriges Kondensat) getrennt dargestellt. Häufig wird in der Praxis auf eine Kondensation des heißen Pyrolyserohrgases verzichtet, um es direkt zu verbrennen. Dann sind die Eigenschaften unter Berücksichtigung der oben genannten Mengenverhältnisse aus den entsprechenden Werten der Einzelfractionen zu berechnen.

In **Abb. 6.6-9** ist die Zusammensetzung des Permanentgases aus der Pyrolyse von Getreidereststoffen für verschiedene Pyrolysetemperaturen beispielhaft dargestellt. Für andere Biomassen ergeben sich im Wesentlichen die gleichen Konzentrationsverläufe mit nur geringen Abweichungen der absoluten Werte. Messtechnisch oder prozessbedingte Anteile von Sauerstoff (O_2 , Falschluff im Messgas) und Stickstoff (N_2 , Spülungen von Ein- und Austrag, Falschluff) wurden rechnerisch eliminiert, so dass es sich um ein idealisiertes Gas mit maximalen Konzentrationen und Heizwert handelt.

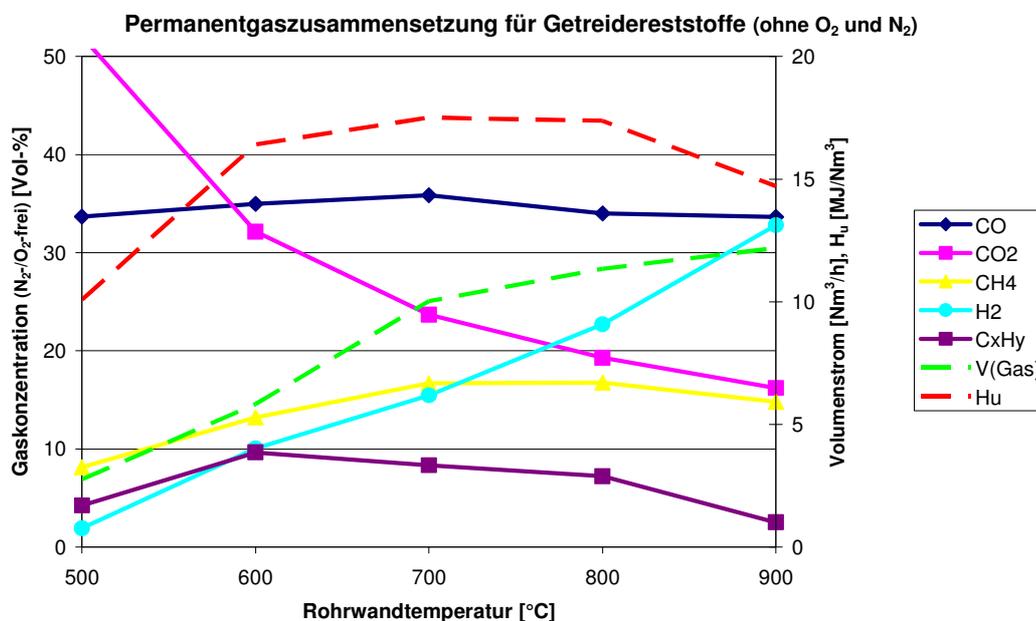


Abb. 6.6-9: Zusammensetzung, Heizwert und Volumenstrom des Permanentgases in Abhängigkeit der Prozesstemperatur bei der Getreidereststoffpyrolyse

Hinsichtlich der Gaszusammensetzung fällt zunächst die starke, gegenläufige Temperaturabhängigkeit der CO_2 - und H_2 -Konzentrationen auf, während sich die CO -Gehalte nur wenig ändern. Für den ebenfalls eingezeichneten Heizwert H_u sind insbesondere die energiereichen Anteile an CH_4 und höheren (nicht kondensierten) Kohlenwasserstoffen bestimmend. Diese drei Werte durchlaufen ein Maximum zwischen 600 °C und 800 °C . Der Verlauf der Gasausbeute $V(\text{Gas})$ ist mit der grünen, gestrichelten Linie angedeutet und wächst stetig mit der Temperatur. Dies ist Folge des intensivierten Austreibens der Flüchtigen Bestandteile bei Temperaturen bis ca. 700 °C sowie heterogenen und homogenen Vergasungsreaktionen im höheren Temperaturbereich.

Abb. 6.6-10 zeigt am Beispiel des Permanentgases aus Gärresten die Zusammensetzung der höheren Kohlenwasserstoffe (C_2 und C_3) als Funktion der Pyrolysetemperatur. Die besonders heizwertreichen C_3 -Verbindungen treten bei höheren Prozesstemperaturen zugunsten der C_2 -

Verbindungen zurück, wobei für sehr hohe Pyrolysetemperaturen von über 800 °C praktisch nur noch Ethen C_2H_4 übrig bleibt.

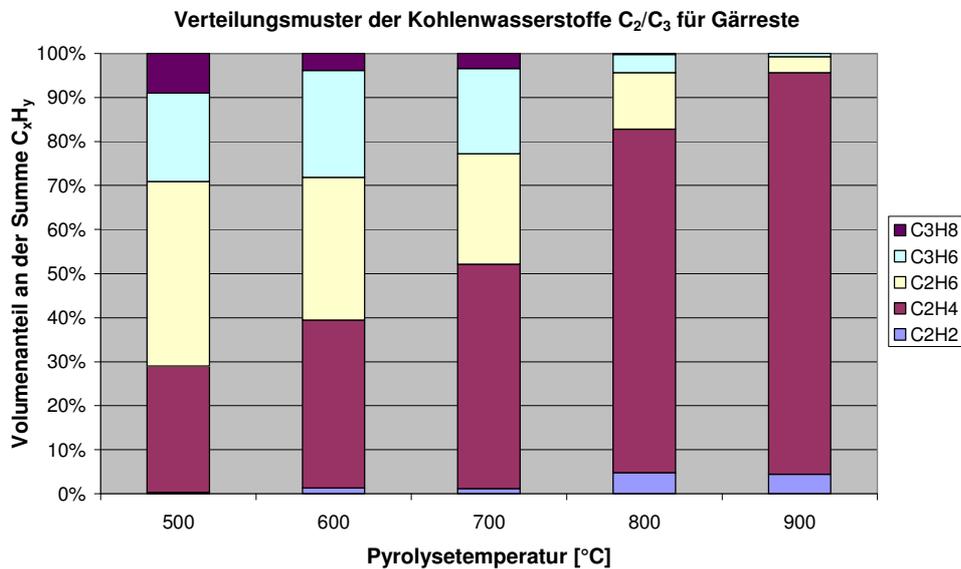


Abb. 6.6-10: Verteilungsmuster der höheren Kohlenwasserstoffe C_2/C_3 in Abhängigkeit der Prozesstemperatur bei der Pyrolyse von Gärresten

Bei den kondensierten Pyrolyseölen wurden Heizwerte von ca. 34 MJ/kg (bei 500 °C Pyrolysetemperatur) bis ca. 40 MJ/kg (bei 900 °C Pyrolysetemperatur) bestimmt. Die temperaturabhängige Zusammensetzung dieser Öle und Teere, zusammengefasst zu Familien von organischen Komponenten, zeigt Abb. 6.6-11. Die Dominanz der polyzyklischen Aromaten PAK bei höheren Prozesstemperaturen fällt hier besonders ins Auge.

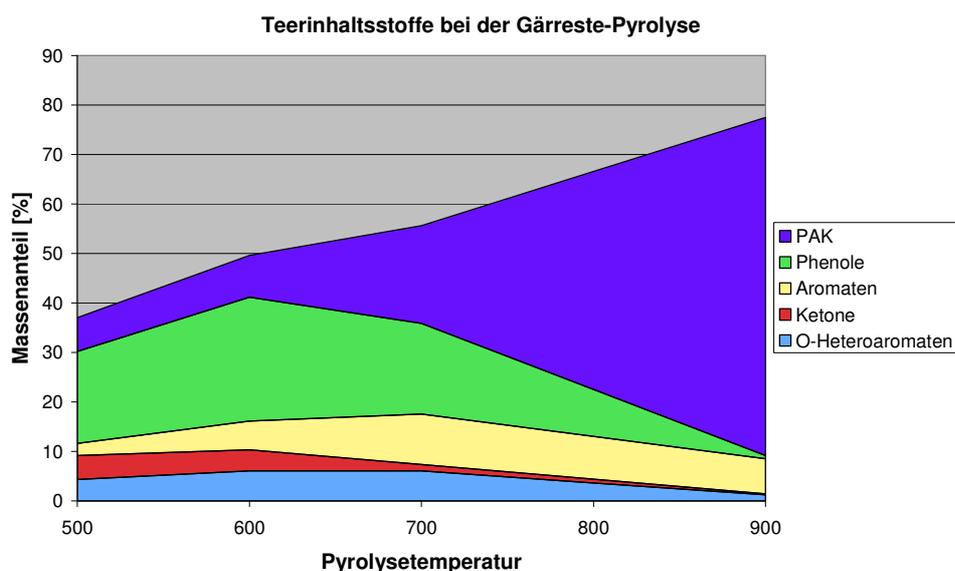


Abb. 6.6-11: Verteilungsmuster der Teerinhaltstoffe nach Organikgruppen in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur bei der Pyrolyse von Gärresten

Die wässrigen Kondensate wurden zwar nicht näher auf organische Komponenten analysiert, doch ist aus anderen Untersuchungen bekannt, dass außer Wasser auch wasserlösliche Stoffe wie Alkohole und organische Säuren enthalten sind. Besonders bei niedrigen Pyrolysetemperaturen kann deren Anteil erheblich sein: es wurden z.B. für das hydrophile Kondensat aus Getreidereststoffen TOC-Gehalte von bis zu 9 Ma.-% bestimmt (500 °C Prozesstemperatur), während bei höheren Temperaturen von 700 und 900 °C nur ca. 2 Ma.-% TOC nachweisbar waren. Bei den Gärrestekondensaten lagen letztere Werte noch wesentlich niedriger (1% bis 0,2%).

In den wässrigen Kondensaten lösen sich auch Ammoniak, Salz- und Schwefelsäure aus dem Pyrolyserohgas. Bei den stickstoffreichen Biomassen kann dies sogar zur Sättigung mit NH_3 führen, insbesondere bei höheren Pyrolysetemperaturen, bei denen weniger Kondensat anfällt. Die Verteilung der Elemente Cl, S und N auf die Pyrolyseprodukte Koks, wässriges und öliges Kondensat ist durch Stoffflussanalysen ermittelt worden und in den **Abbn. 6.6-12 bis 6.6-14** für verschiedene ausgewählte Biomassen grafisch dargestellt. Diese Verteilung ist praxisrelevant, da aus den genannten Elementen bei der Verbrennung der Pyrolyseprodukte Schadstoffe entstehen können (Salzsäure HCl , Schwefelsäure H_2SO_4 , Stickoxide NO_x).

Für Chlor ergibt sich wegen der aus den Brennstoffanalysen bekannten Tatsache, dass dieses Element vorwiegend anorganisch gebunden in den Biomassen vorliegt, die hauptsächliche Präsenz in den Pyrolysekoks, siehe **Abb. 6.6-12**. Erst bei relativ hohen Temperaturen können leichtflüchtige chloridische Salze abdampfen und so in das Kondensat gelangen. Für die hier nicht näher betrachteten Elemente Ca, Mg, Na, K, P sowie die Schwermetalle gelten grundsätzlich gleiche Zusammenhänge.

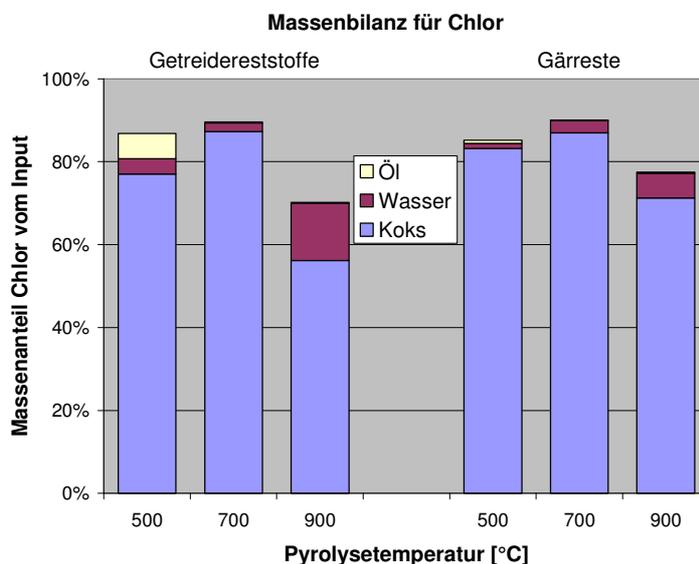


Abb. 6.6-12: Ergebnisse von Stoffflussanalysen für Chlor bei der Pyrolyse von Biomassen

Die in **Abb. 6.6-13** dargestellte Verteilung des Elements Schwefel auf die Pyrolyseprodukte zeigt einen wesentlichen Unterschied zum Verhalten des Chlors: es sind größere Mengen im Pyrolyseöl gebunden, was besonders beim Anfall großer Ölmengen – d.h. bei niedrigen Prozesstemperaturen – den Hauptteil ausmacht. Allerdings lässt die Abbildung auch erkennen, dass die Wiederfindungsrate des Schwefels mit 40 bis 70% nicht sehr hoch ausfällt. Neben

analytischen Schwierigkeiten liegt dies auch an den nicht dargestellten schlecht löslichen gasförmigen Schwefelverbindungen wie H_2S , COS , CS_2 und Mercaptane. Diese können bis zu 6% des Biomasse-Schwefels ausmachen.

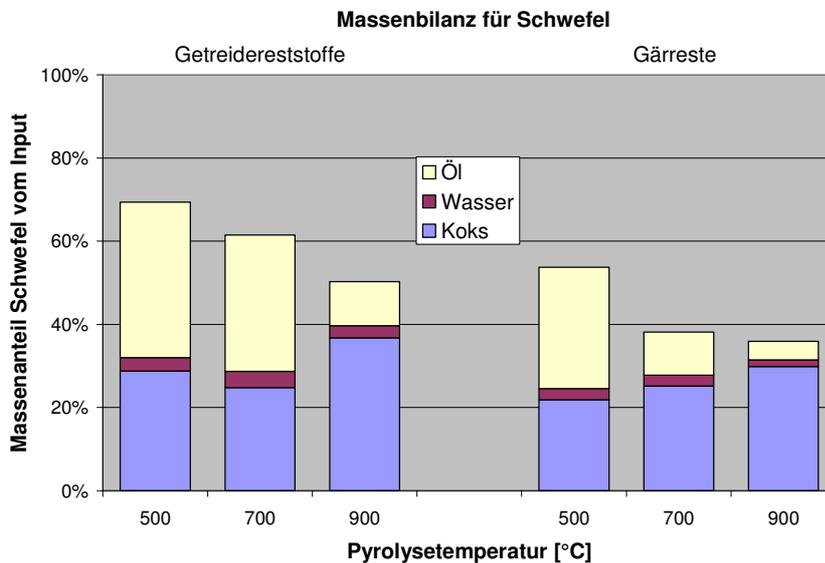


Abb. 6.6-13: Ergebnisse von Stoffflussanalysen für Schwefel bei der Pyrolyse von Biomassen

Bei der Massenbilanz für das Element Stickstoff ist die oben erwähnte schlechte Wiederfindungsrate für N-reiche Biomassen (Getreidereststoffe, Gärreste) und dabei hohen Prozesstemperaturen zu berücksichtigen. Deshalb sind in **Abb. 6.6-14** nur die stickstoffärmeren Biomassen Misch-Holz hackschnitzel und Pappelholz berücksichtigt. Auffällig ist die erhebliche Zunahme der gelösten Stickstoffverbindungen im wässrigen Kondensat mit der Temperatur. Dies lässt sich durch das Austreiben von leichtflüchtigen Ammoniumsalzen, z.B. Ammoniumchlorid (siehe auch Abb. 6.6-12 für Chlor) aus dem Koks erklären.

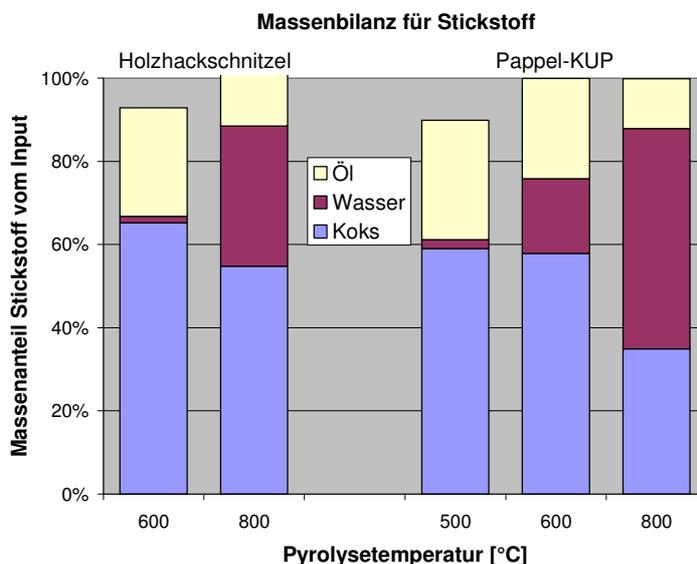


Abb. 6.6-14: Ergebnisse von Stoffflussanalysen für Stickstoff bei der Pyrolyse von Biomassen

6.6.2 Mittelschnelle Pyrolyse

Die Versuchsanlage STYX wurde für die isotherme mittelschnelle Pyrolyse von unterschiedlichen Einsatzstoffen entwickelt. Das Anlagenschema ist in **Abb. 6.6-15** dargestellt. Das Einsatzmaterial wird durch die Dosiervorrichtung in die Schnecke des Pyrolysereaktors gefördert. Das Herzstück der Anlage ist der Reaktor in Trogbauweise mit einer Förderschnecke. Die Schnecke transportiert das Einsatzmaterial durch den Reaktor, der durch Heizelemente auf der isothermen Pyrolysetemperatur gehalten wird. Bei der Pyrolyse entweichen aus der Biomasse die Pyrolysedämpfe, in der Schnecke bleibt der Koks zurück. Der Koks wird an Ende des Reaktors im Koksbehälter aufgefangen.

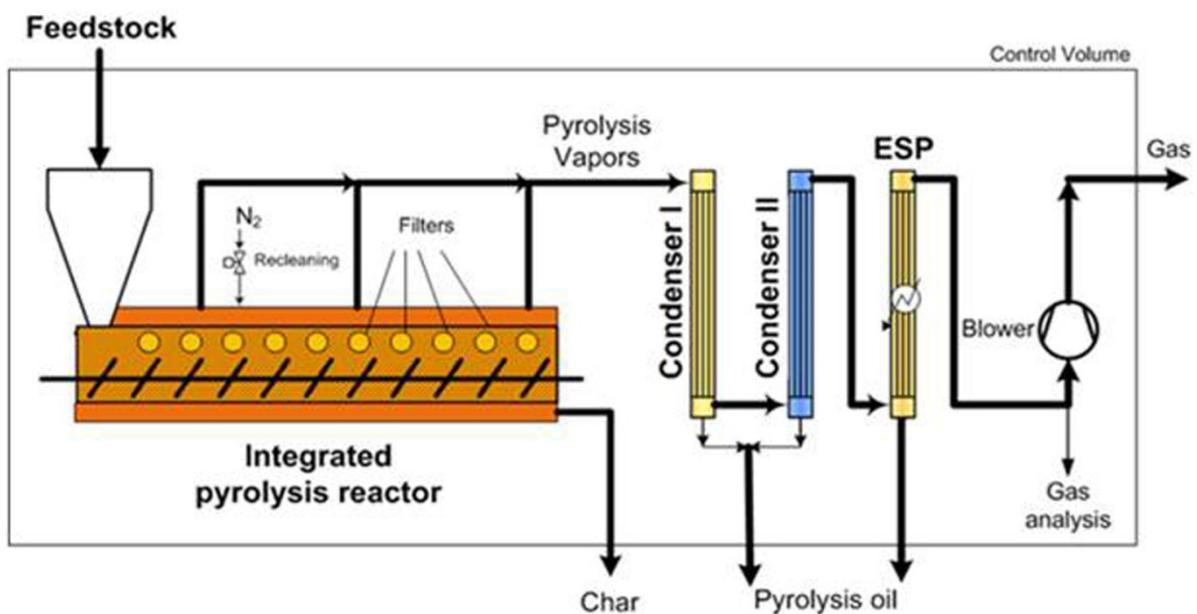


Abb. 6.6-15: Schema der Pyrolyseanlage STYX

Die Pyrolysedämpfe gelangen direkt über der Förderschnecke in die Filtereinheit, die auf den Reaktor aufgesetzt ist und mit diesem eine thermische Einheit bildet. Nach der Heißgasfiltration werden die Pyrolysedämpfe in einem Sammelrohr zusammengeführt und aus dem Reaktor abgezogen. Sie gelangen direkt im Anschluss in die Kondensationseinheit, in der die Pyrolysedämpfe sofort gequench werden. Das Pyrolysekondensat wird in den Kondensatbehältern unter den einzelnen Kondensationsstufen gesammelt. Ein Teil des Permanentgases wird nach der Kondensationseinheit durch eine Pumpe aus dem Gesamtstrom abgezogen und zu den Messgeräten zur Gasanalyse geleitet. Der Volumenstrom des Permanentgases wird mit einem Durchflusszähler bestimmt und der Absolutdruck mit einem Manometer, bevor das Gas mittels eines Saugzugs zur Fackel befördert wird. Der Reaktor kann bis zu einer Temperatur von 600°C betrieben werden, wobei diese jeweils über den gesamten Reaktor konstant gehalten wird. Dazu besitzen die Heizelemente insgesamt eine Heizleistung von 40 kW. Die Feststoffverweilzeit kann durch die Drehzahl der Förderschnecke in einem weiten Bereich von 5 min – 25 min variiert werden.

Die Filtereinheit kann mit bis zu 14 Filterkerzen bestückt werden. Bei der derzeitigen Konfiguration sind 3 Segmente mit insgesamt 6 Filterkerzen besetzt, durch die der Pyrolysedampf abgezogen wird.

Alle Biomassen wurden bei einer Endtemperatur von 500 °C umgesetzt bei einer Verweilzeit der festen Rückstände von 15 Minuten.

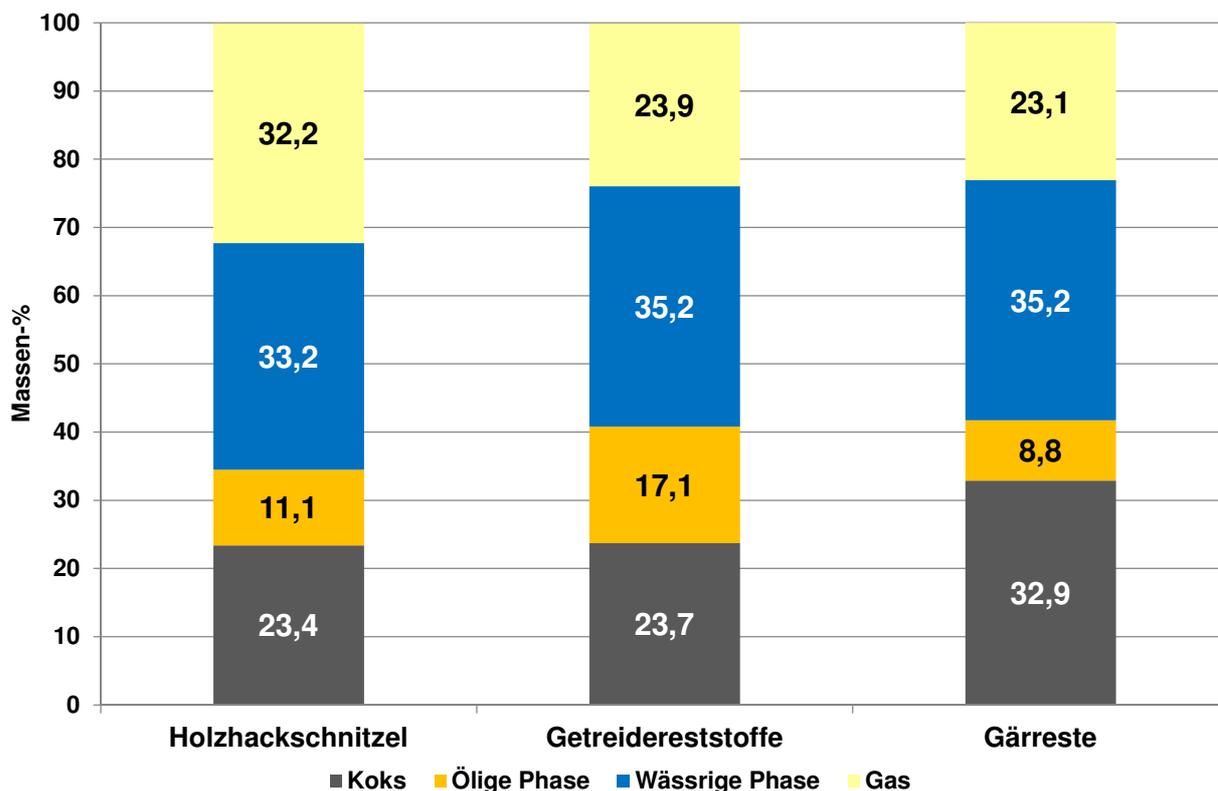


Abb. 6.6-16: Produktausbeuten der ausgewählten Biomassen (STYX)

Holzackschnitzel und Getreidereststoffe weisen ähnliche Koksausbeuten auf, während der Koksanteil bei den Gärresten deutlich höher ist, was u. a. auf unterschiedlich hohe Asche- und Restflüchtigengehalte in den Koksen zurückzuführen ist. Hingegen liegen die Ausbeuten des Permanentgases in einem engen Bereich mit Werten zwischen 26 % bis 29 %, während bei den Getreidereststoffen der Ölanteil im Kondensat dominiert (s. **Abb. 6.6-16**).

Die Enthalpieverteilung folgt nicht dem Trend der Massenverteilung. Die Energieausbeute des Pyrolyseöls ist bei jedem der hier eingesetzten Stoffe höher als der Anteil im Permanentgas.

Die festen Rückstände (Koks) weisen die höchsten Enthalpien von etwa 42 % für die Getreidereststoffe und bis zu 48 % für die Gärreste (s. **Abb. 6.6-17**) auf. Dies ist eine optimale Voraussetzung für die Mitverbrennung der Kokse in Kraftwerken zur energetischen Verwertung.

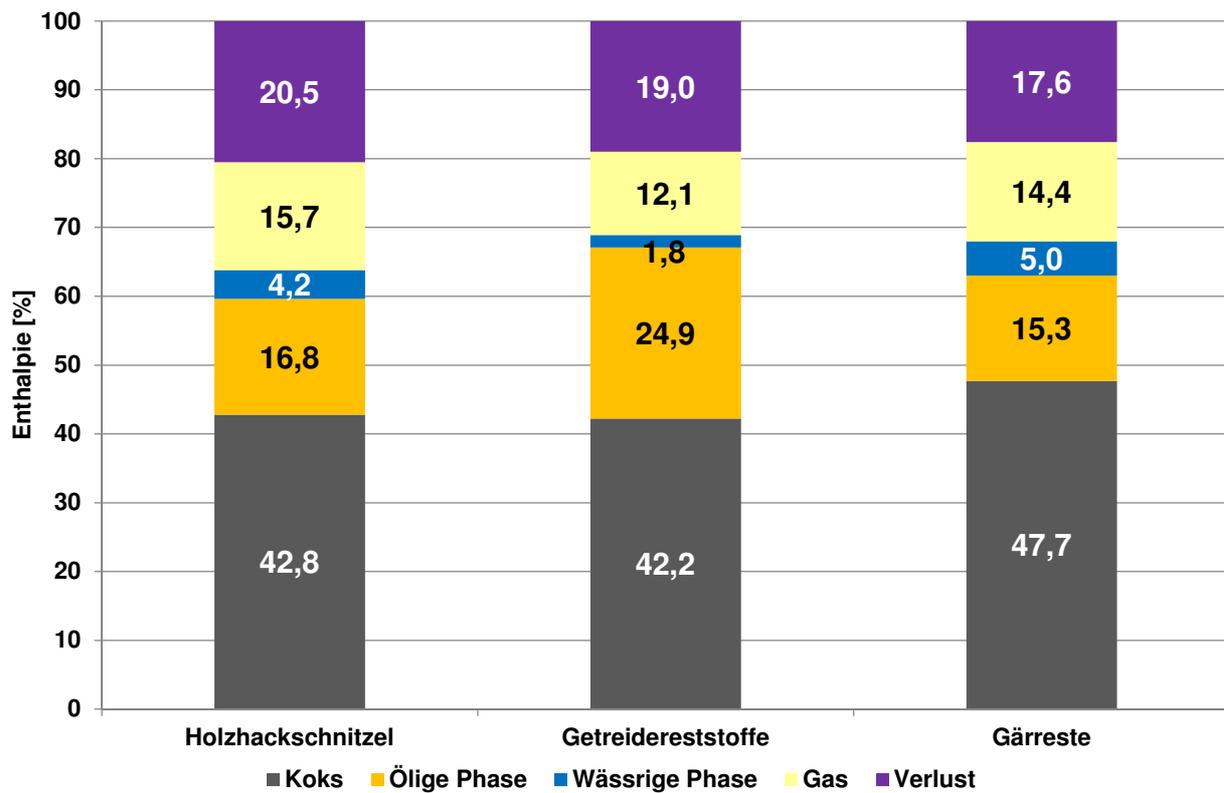


Abb. 6.6-17: Energieausbeuten der Produkte aus der Pyrolyse von Biomassen (STYX)

Die Gaszusammensetzung des Permanentgases wird online und offline gemessen. Die Kohlenoxide (CO₂ und CO) weisen in der Summe für jeden Einsatzstoff mit etwa 90 Ma-% den höchsten Anteil auf. Die verbleibenden 10 Ma.% teilen sich jeweils etwa zur Hälfte auf Methan und C₂₊ Kohlenwasserstoffe auf (s. **Abb. 6.6-18**). Der bei den Holzhackschnitteln höhere CO-Gehalt im Permanentgas führt zu einem höheren Heizwert von rund 9 MJ/kg im Vergleich zu Gärresten und Getreidereststoffen. Um das Zünd- und Verbrennungsverhalten der Pyrolysedämpfe insgesamt zu verbessern, empfiehlt es sich, die für die Verbrennung der Dämpfe notwendige Verbrennungsluft entsprechend vorzuheizen.

Die mittelschnelle Pyrolyse verschiedener Biomassen wurde im Schneckenreaktor bei einer Reaktortemperatur von 500°C durchgeführt. Holzhackschnittel, Getreidereststoffe und Gärreste wurden als Ausgangsmaterial genutzt. Bei der gewählten Betriebstemperatur enthält der Koks etwa 50% der Energie des Ausgangsmaterials, während die Restenergie zwischen der Kondensatphase und dem Permanent-Gas aufgeteilt ist. Der Koks kann als Produkt weiterverwertet werden, während die Pyrolysedämpfe, bestehend aus dem Pyrolyseöl, dem Pyrolysewasser und dem Permanent-Gas, zur Beheizung der Pyrolyse eingesetzt werden können.

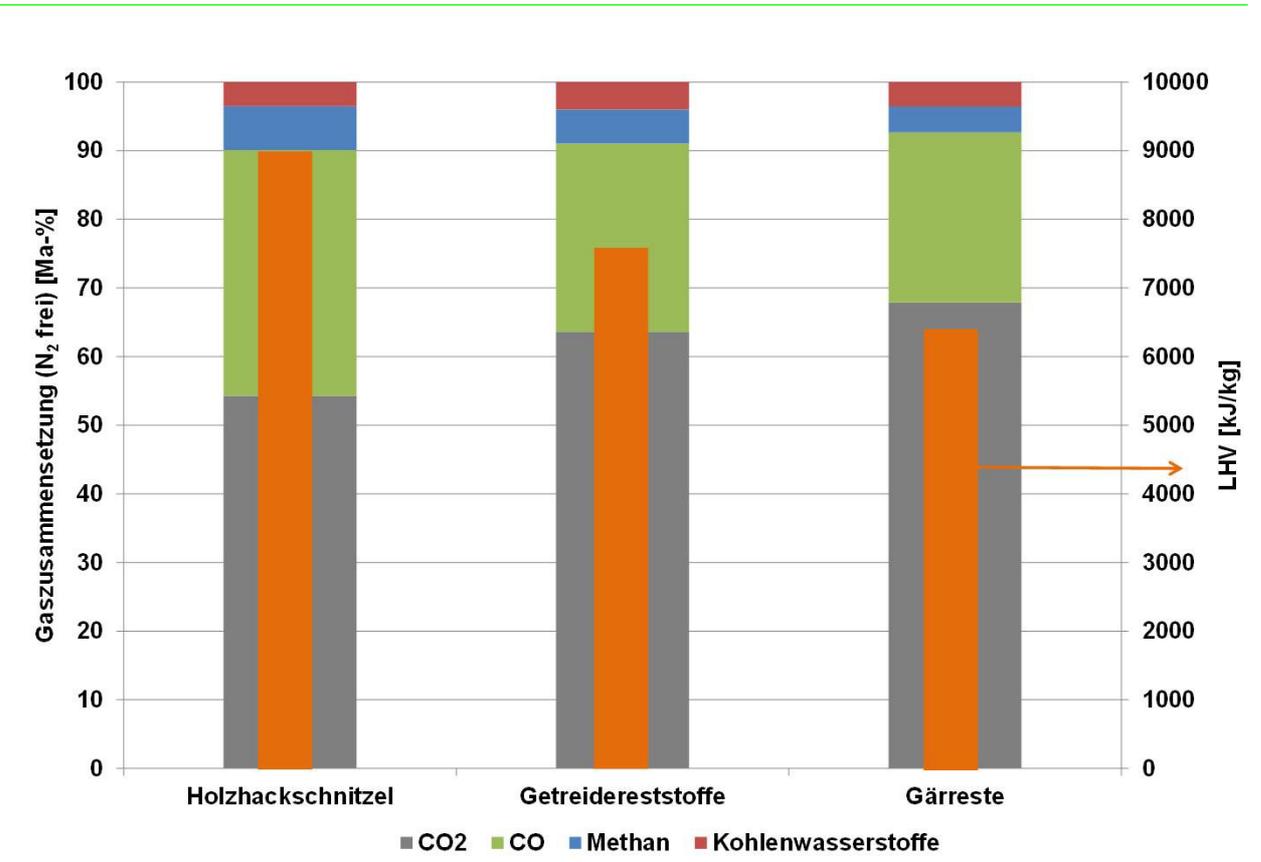


Abb. 6.6-18: Gaszusammensetzung und Heizwert von Permanentgas der ausgewählten Biomassen (STYX)

6.6.3 Zusammenfassung der Pyrolyseversuche

Die Pyrolyse im Drehrohr oder im Schneckenreaktor hat sich als sehr flexibles thermisches Verfahren zur Vorbehandlung von Biomassen erwiesen. Die Ansprüche an die Einsatzstoffe beschränken sich auf eine geeignete Stückigkeit und Rieselfähigkeit, um den Transport durch Ein- und Austragssysteme zu gewährleisten, eine Trocknung kann notfalls auch im Pyrolysereaktor stattfinden. Damit sind diese Ansprüche wesentlich geringer als beispielsweise in Wirbelschicht-, Flugstrom- oder Festbettreaktoren. Die erzeugten Pyrolyseprodukte weisen unabhängig von der eingesetzten Biomasse relativ einheitliche Eigenschaften auf, was deren Weiterverwendung in anderen Apparaten der Prozesskette wesentlich vereinfacht. Die Steuerung der Produkteigenschaften und -mengen erfolgt in erster Linie über die Prozesstemperatur, die Verweilzeit im Reaktor ist weniger entscheidend. Der Koks insbesondere von faserigen Biomassen wie Halmgütern oder Hölzern ist mit einem erheblich geringeren Energieaufwand und Mühlenverschleiß mahlbar als die Ausgangsstoffe. Die Pyrolyseprodukte Koks und Öl sind oft besser zu lagern und zu transportieren als die Biomassen, wobei als Einschränkung die Neigung einiger Pyrolysekokse zur Selbstentzündung erwähnt werden muss. Ob sich der Aufwand einer zusätzlichen Prozessstufe zur Pyrolyse für ein Biomassekraftwerk lohnt, muss im Einzelfall technisch und ökonomisch geprüft werden.

6.7 Erfahrungen zur Festbettvergasung

Insbesondere für die dezentrale Biomassenutzung in kleinen Anlagen mit einer Leistung bis 1 MW stellt die Festbettvergasung eine Möglichkeit zur Erzeugung eines Brenngases dar, welches z. B. in einem BHKW verbrannt und damit Strom und Wärme bereit gestellt wird (Kraft-Wärme-Kopplung). Eine wichtige Bedeutung für die Brenngasnutzung hat die Brenngasqualität. Je mehr energiereiche Komponenten im Brenngas enthalten sind umso höher ist der Heizwert des Gases. Nachteilig wirken sich dagegen Teere und andere Schadstoffe wie z. B. H₂S aus, da diese zu einer Beeinträchtigung des Motors führen und damit die Verfügbarkeit der Anlage verringern.

Prinzipiell werden Gleichstrom- und Gegenstromfestbettvergaser unterschieden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden Versuche in einem 160 kW (Brennstoffwärmeleistung) Gleichstromvergaser durchgeführt.

Ziel der Untersuchungen

Für die Bewertung der Eignungsfähigkeit verschiedener Biomassen in Festbettvergasern und die Qualität des Vergasungsprozesses ist die Zusammensetzung des erzeugten Brenngases sowie dessen Heizwert ein wichtiges Kriterium. Ziel war es daher den Vergasungsprozess für verschiedene Biomassen anhand der Brenngaszusammensetzung, d. h. die Konzentrationen der Permanentgase (CO, CO₂, CH₄, und H₂) sowie der Teerkonzentration und dem Heizwert des Brenngases zu bewerten.

Untersuchungsmethodik

Die Untersuchungen wurden in einer Versuchsanlage durchgeführt, dessen Verfahrensaufbau anhand eines Fließschemas in **Abb. 6.7-1** dargestellt ist. Den Kern der Versuchsanlage bildet ein Gleichstromvergaser mit einer Brennstoffwärmeleistung von 160 kW, der für Holzhackschnitzel ausgelegt ist. Die kontinuierliche Brennstoffzufuhr erfolgt von oben mit Hilfe von Transportschnecken und einer Zellenradschleuse. Das Brenngas wird am unteren Ende des Vergasers abgeführt und in einem Zyklon von mitgeführten Grobpartikeln gereinigt. Mit Hilfe von zwei mit Rapsöl durchströmten Kühlschnecken wird das Brenngas gekühlt und von Teer gereinigt. In einem nachgeschalteten Wärmeübertrager wird die Temperatur weiter gesenkt, so dass eine motorische Nutzung im BHKW erfolgen kann. Bei unzureichender Brenngasqualität bzw. im Störfall kann das Brenngas auch einer Fackel zugeführt werden.

Die Messung der Permanentgaszusammensetzung erfolgte mit einem Gasanalysator im Reingas. Der Teergehalt des Brenngases wurde im Roh- und Reingas nach TAR-Protokoll gemessen (siehe [23] und [24]). Die Messpositionen sind in Abb. 6.7-1 gekennzeichnet.

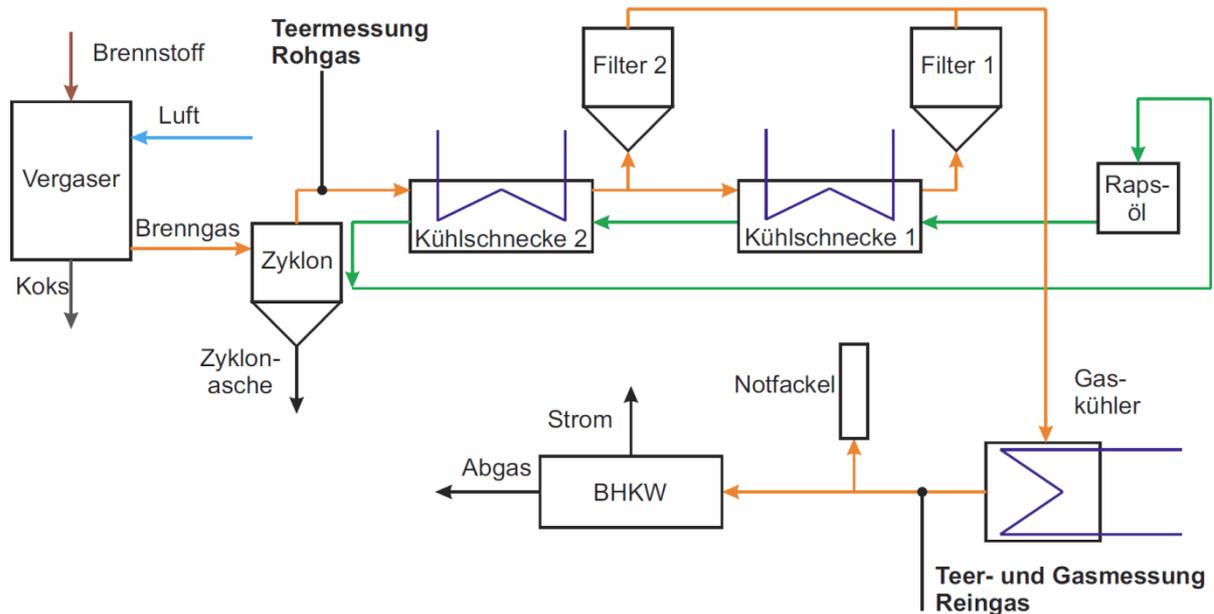


Abb. 6.7-1: Fließbildschema Versuchsanlage zur Gleichstromfestbettvergasung

Die Brennstoffeigenschaften der untersuchten Einsatzstoffe Mischholzhackschnitzel (MH), Pappelhackschnitzel, Gärreste, Switchgras und Getreidereststoffe sind in Anhang 14.8 aufgeführt. Im Vergleich zu den Mischholzhackschnitzeln war die Korngröße der Getreidereststoffe, Gärreste und des Switchgrases deutlich geringer. Um zu erwartende Probleme beim Fließverhalten (Verstopfungen durch Brennstoffbrücken), einer ungleichmäßigen Durchströmung des Festbettes (Druckverlust) sowie unzureichender Gasqualität (Teerkonzentration) vorzubeugen, wurden diese Einsatzstoffe zunächst in einer Mischung mit dem Referenzbrennstoff eingesetzt. Bei positiven Ergebnissen sollte der Zumischanteil schrittweise bis zur Monovergasung des Einsatzstoffes erhöht werden.

Untersuchungsergebnisse

In **Abb. 6.7-2** ist die Zusammensetzung und der daraus berechnete Heizwert des Permanentgases für die untersuchten Einsatzstoffe und Einsatzstoffmischungen dargestellt.

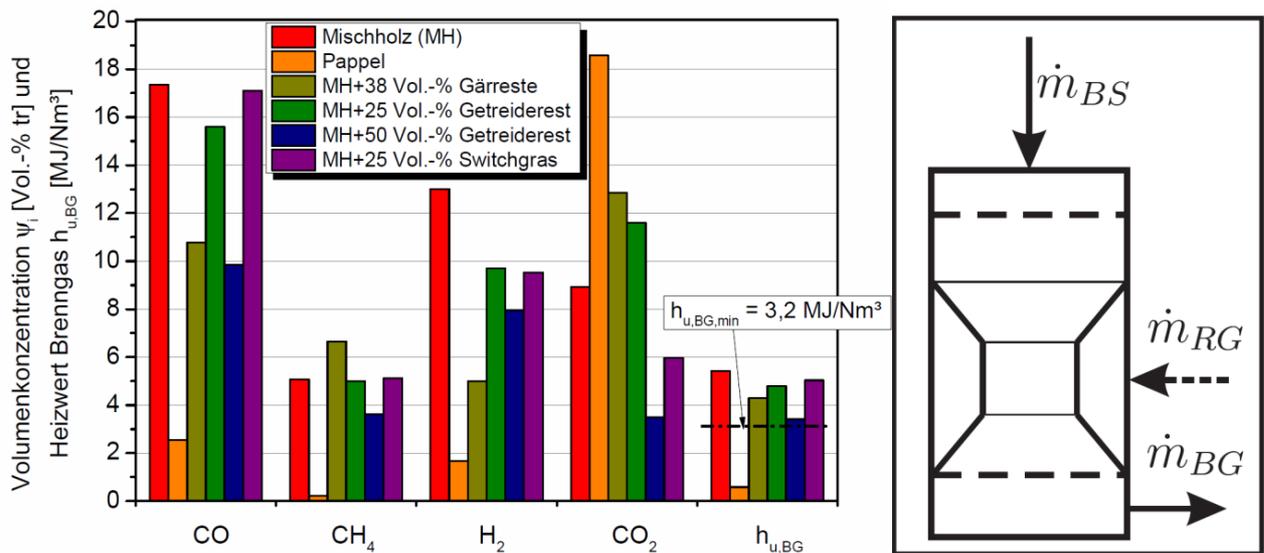


Abb. 6.7-2: Zusammensetzung und Heizwert des Permanentgases in Abhängigkeit der untersuchten Einsatzstoffe und Einsatzstoffmischungen

Wie die Permanentgaszusammensetzung und der zugehörige Heizwert zeigen, wurde für alle Brennstoffmischungen, mit Ausnahme der Pappelhackschnitzel, ein Brenngas erzeugt, welches den Mindestheizwert 3,2 MJ/Nm³ für eine motorische Nutzung erreicht. Der niedrige Heizwert des aus den Pappelhackschnitzeln erzeugten Brenngases ist auf die hohe CO₂-Konzentration zurückzuführen. Die Ursache dafür war eine Brückenbildung[‡] im Reaktor, die im Vergaserbetrieb auf Grund der lokalen Mengenverhältnisse von Luft zu brennbarer Substanz zur Verbrennung ($\lambda > 1$) der Hackschnitzel führte. In ähnlicher Weise trifft dies auch auf die Mischung MH+38 Vol.-% Gärreste zu. Durch eine sehr hohe Schüttdichte des Brennstoffgemisches wird eine optimale Einmischung des Reaktionsgases in das Festbett verhindert, das lokal zu Oxidationsreaktionen führt. Sowohl die Brückenbildung als auch die ungleichmäßige Verteilung des Reaktionsgases (Luft) verhinderten eine weitere Steigerung des Zumischanteils bis zur Monovergasung.

[‡] Die Brückenbildung bei Einsatz der Hackschnitzel resultiert aus der faserigen Struktur der Häckselkanten, die vermutlich durch unscharfe Messer verursacht wurden.

In **Abb. 6.7-3** sind die gemessenen Teerkonzentrationen im Roh- und Reingas für die untersuchten Einsatzstoffe dargestellt. In Bezug auf den Brennstoffvergleich ist jedoch nur die Teerkonzentration als Bewertungsgrundlage heranzuziehen, da die Reingaskonzentration durch die Effizienz der Gasreinigung bestimmt wird und nicht durch das thermische Verfahren.

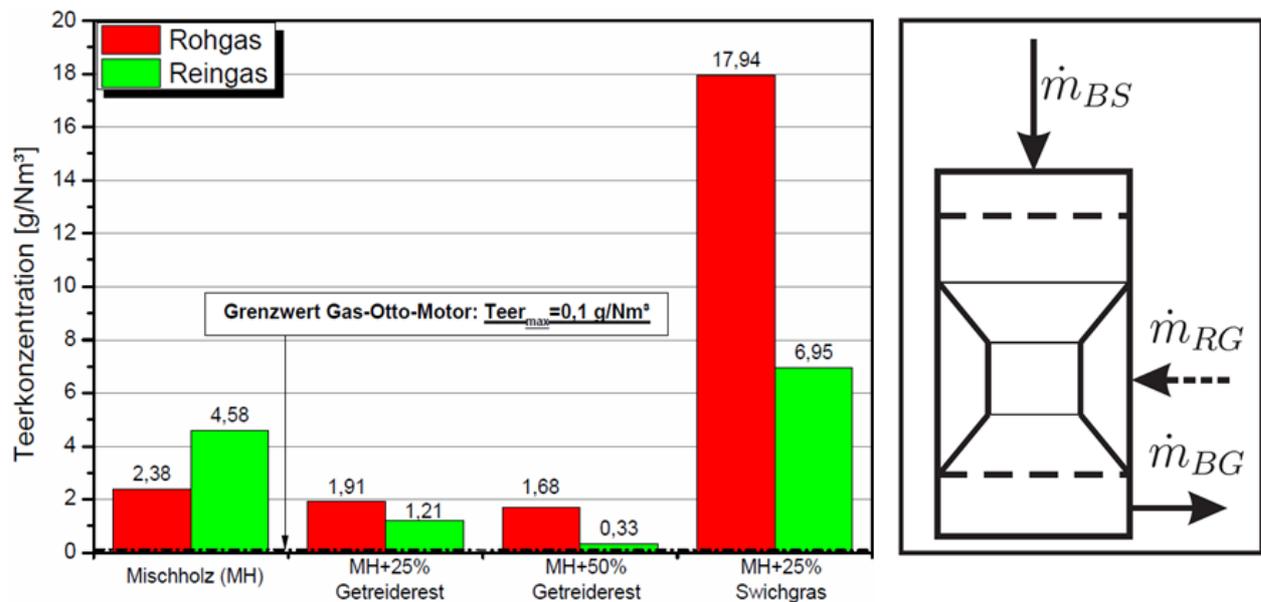


Abb. 6.7-3: Roh- und Reingasteerkonzentration im Vergleich zum zulässigen Grenzwert für die dauerhafte motorische Nutzung

Mit Ausnahme der Mischung MH+25Vol-% Swichgras unterscheiden sich die Rohgasteerkonzentrationen im Brenngas der untersuchten Einsatzstoffe geringfügig[§]. Dies entspricht der Erwartung, da der Anteil des Referenzbrennstoffes in der jeweiligen Mischung mindestens 50 % oder größer war. Die Ursache für die hohe Teerkonzentration beim Einsatz der Mischung MH+25Vol-% Swichgras ist auf vergleichsweise niedrige Temperaturen im Vergaser zurückzuführen, das die Geschwindigkeit von teerabbauenden Reaktionen vermindert.

In **Abb. 6.7-4** sind die gemessenen Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas für die untersuchten Einsatzstoffe dargestellt. Auch hier wird nur die Rohgaskonzentration für die Interpretation der Ergebnisse herangezogen.

[§] Die Erhöhung der Teerkonzentration bei den Mischholzhackschnitzeln (MH) im Reingas ist darauf zurückzuführen, dass bei der Messkampagne ein Austrag von bereits in der Gasreinigung abgelagertem Teer stattgefunden hat.

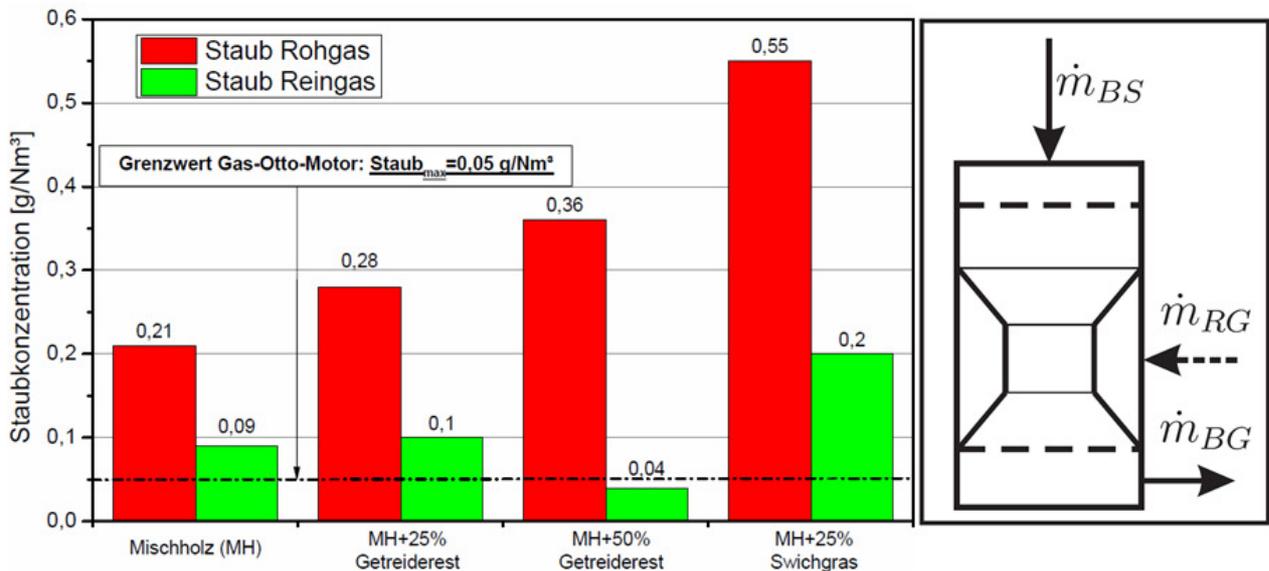


Abb. 6.7-4: Roh- und Reingasstaubkonzentration im Vergleich zum zulässigen Grenzwert für die dauerhafte motorische Nutzung

Es wird deutlich, dass beim Einsatz der Mischholzhackschnitzel die niedrigste Staubkonzentration gemessen wurde. Mit zunehmendem Zumischanteil der Getreidereststoffe steigt auch die Staubkonzentration im Brenngas. Die höchste Konzentration wurde im Vergasungsbetrieb mit der Mischung MH+25 Vol-% Swichgras festgestellt. Die Ursache für die höheren Staubkonzentrationen beim Einsatz der Mischungen mit den Substitutionsbrennstoffen ist vermutlich die geringere Partikelgröße der Substitutionsbrennstoffe (s. Anhang 14.8). Die Partikel wurden dabei leichter mit dem Gasstrom mitgerissen und vom nachgeschalteten Zyklon nicht vollständig abgeschieden.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Es wurde der Einfluss der brennstofftechnischen Eigenschaften von vier Biomassebrennstoffen im Vergleich zum Referenzbrennstoff bei der Gleichstromfestbettvergasung untersucht werden. Als Vergleichskriterien wurde die Permanentgaszusammensetzung, der Heizwert des Brenngases und die Teer- und Staubkonzentrationen herangezogen. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es wurde für alle untersuchten Biomassen und Mischungen von Mischholzhackschnitzeln (MH) mit Swichgras, Getreidereststoffen und Gärresten ein Brenngas erzeugt, welches im Hinblick auf die Permanentgaszusammensetzung und den Heizwert, die Mindestanforderungen für eine motorische Nutzung erreichten. Eine Ausnahme stellt Pappel dar.
- Eine Steigerung des Zumischanteils bis zur Monovergasung war aufgrund von Brückenbildung und ungleichmäßiger Verteilung des Reaktionsgases Luft nicht möglich.
- Die gemessenen Teer- und Staubkonzentrationen machen erwartungsgemäß eine Gasreinigung erforderlich um das Brenngas dauerhaft motorisch zu nutzen. Die im

Vergleich zum Referenzbrennstoff geringere Partikelgröße der Substitutionsbrennstoffe führt zu einer Erhöhung der Staubkonzentration im Rohgas.

Ob eine Biomasse in einem Festbettvergaser eingesetzt werden kann hängt in erster Linie von der Stückigkeit des Einsatzstoffes ab. Neben Problemen bei dem kontinuierlichen Brennstofftransport kann die Geometrie des Vergasers in Kombination mit den mechanischen Eigenschaften des Brennstoffes zur Brückenbildung im Reaktor führen. Die mechanischen Eigenschaften beeinflussen zusätzlich den Druckverlust über dem Festbett und damit die Verteilung des Reaktionsgases im Reaktor.

Im Hinblick auf die Brennstoffflexibilität der Gleichstrom-Festbettvergasung kann auf Basis der Versuchsergebnisse geschlossen werden, dass für einen stabilen Betrieb eine mechanische Aufbereitung der Einsatzstoffe und/oder eine Modifizierung der Anlagentechnik zwingend erforderlich ist. Dabei kann brennstoffseitig eine Verdichtung (Pelletierung, Brikettierung) in Betracht gezogen werden, die auf das Fließverhalten im Apparat abgestimmt sein muss. Apparateseitig ist der Einsatz bewegter Einbauten (Rührwerk, drehbares Rost) oder die Anpassung des Neigungswinkels im Bereich der Einziehung möglich.

6.8 Wirbelschichtvergasung: Gas- und Ascheeigenschaften, Bilanzierung

Versuche zur Vergasung fanden am CUTEC Institut an einer Anlage mit zirkulierender Wirbelschicht (ZWS) statt. Sie arbeitet mit einer Auslegungsleistung von 400 kW_{th}. Dies entspricht einem Brennstoffstrom von ca. 60 kg/h bis 100 kg/h. Der Wert ist heizwertabhängig. Der Reaktor arbeitet nach dem autothermen Prinzip. Die erforderliche Temperatur zur Zersetzung des Brennstoffs wird also innerhalb des Reaktors durch eine Teilverbrennung des Einsatzstoffes erzeugt. Die Anlage kann wahlweise mit Dampf- und Sauerstoff oder alternativ als Luftvergaser, evtl. mit Dampfeinsatz oder Sauerstoffanreicherung, gefahren werden.

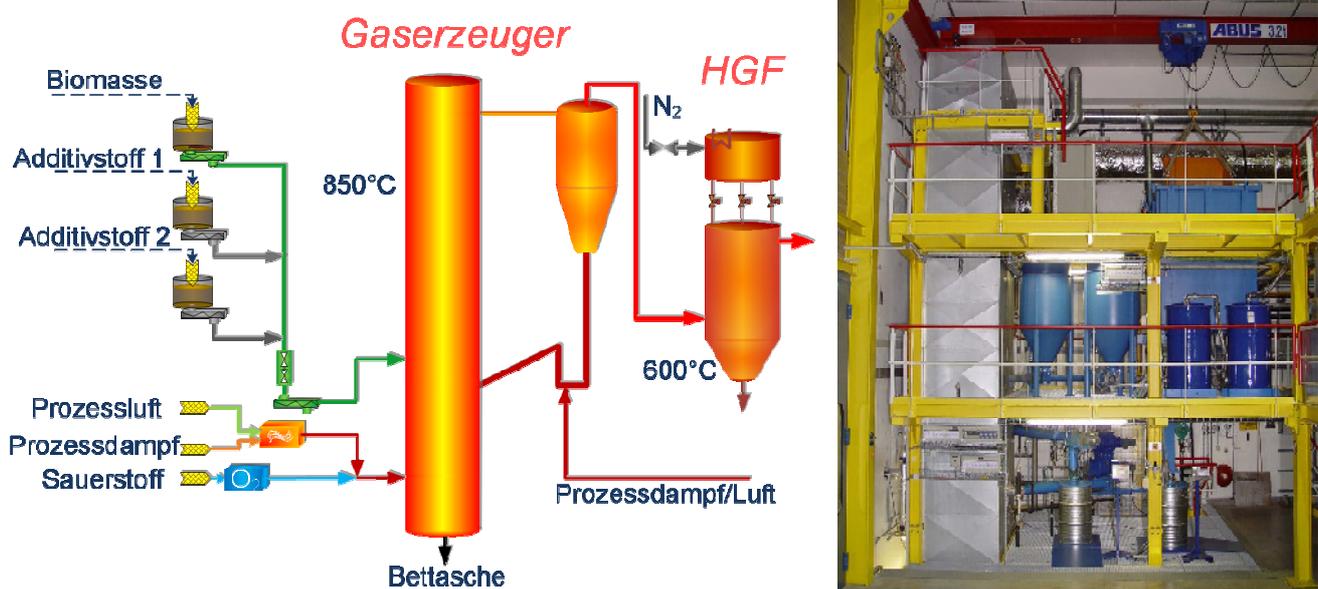


Abb. 6.8-1: Apparate-Grundfließbild der ZWS (HGF: Heißgasfilter)

Die Anlage wies ihre Leistungsfähigkeit schon vor Projektbeginn für einfache Biomassen wie Holz (eingesetzt als Späne, Span, Hackschnitzel und Pellets) nach ebenso wie für aschereiche Stoffe (z.B. Klärschlamm und Tiermehl) und für Biomassen mit niedrigem Ascheschmelzpunkt (z.B. Weizenstroh, getrocknete Silagen von Gras, Roggen und Mais). Für Halmgüter, welche in Ballen angeliefert werden, sind ein Häcksler und ein passender Brennstoffeintrag vorhanden. Für Biomassen mit niedrigem Ascheerweichungspunkt ist es möglich, Additive beizugeben.

Im Rahmen des Vorhabens wurde das Produktgas als Funktion der Biomasse und verfahrenstechnischer Einstellungen untersucht. Wichtige Kriterien, welche optimiert werden sollten, waren: Heizwert (→ maximal), Teergehalt (→ minimal) und chemische Energie des Synthesegases (→ maximal über Synthesegaszusammensetzung). Die Bett- und Filteraschen wurden mit Hilfe von REM und chemischen Analysen untersucht, um Prognosen zur Verwertbarkeit treffen zu können.

Im Rahmen des Projektes wurden in sechs Versuchswochen über 40 Versuchspunkte angefahren und ausgewertet. Variiert wurden neben den Biomassen die Additive, bei den Halmgütern teilweise die Häcksellänge, Vergasungsmedium (Luft oder Sauerstoff) und die Temperaturen im Reaktor (s. **Tab. 6.8-1**).

Tab. 6.8-1: Übersicht der durchgeführten Versuche

Biomasse		Holzartig		Halmgutartig			Reste aus landwirtschaftlicher Produktion	Reste aus anaerober und aerober Zersetzung
		Holzhack-schnitzel	Pappel/KUP	Stroh	Switchgrass	Miscanthus	Getreidereststoffe	Gärreste
Vergasungsmedium	Dampf/O2	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Luft	ja	nein	nein	ja	nein	nein	ja
Temperaturbereich [°C]	von	784	812	784	746	798	801	747
	bis	860	851	811	830	845	825	838
Anzahl Versuchspunkte		5	2	7	15	4	3	6
Versuchsparameter		Temperatur, Luft/Sauerstoff	Temperatur	Temperatur, Häcksellänge, Additiv	Temperatur, Häcksellänge, Additiv, Luft/Sauerstoff	Temperatur, Bettzusammensetzung	Temperatur, Additiv und Bettzusammensetzung	Temperatur, Luft/Sauerstoff

6.8.1 Errechnung der Enthalpiebilanz

Die über eine Versuchswoche an der Anlage gesammelten Daten werden über die stationären Versuchspunkte gemittelt (s. exemplarisch **Abb. 6.8-2**). Innerhalb einer Versuchswoche (ca. 100 Betriebsstunden) können üblicherweise 10 Versuchspunkte angefahren werden.

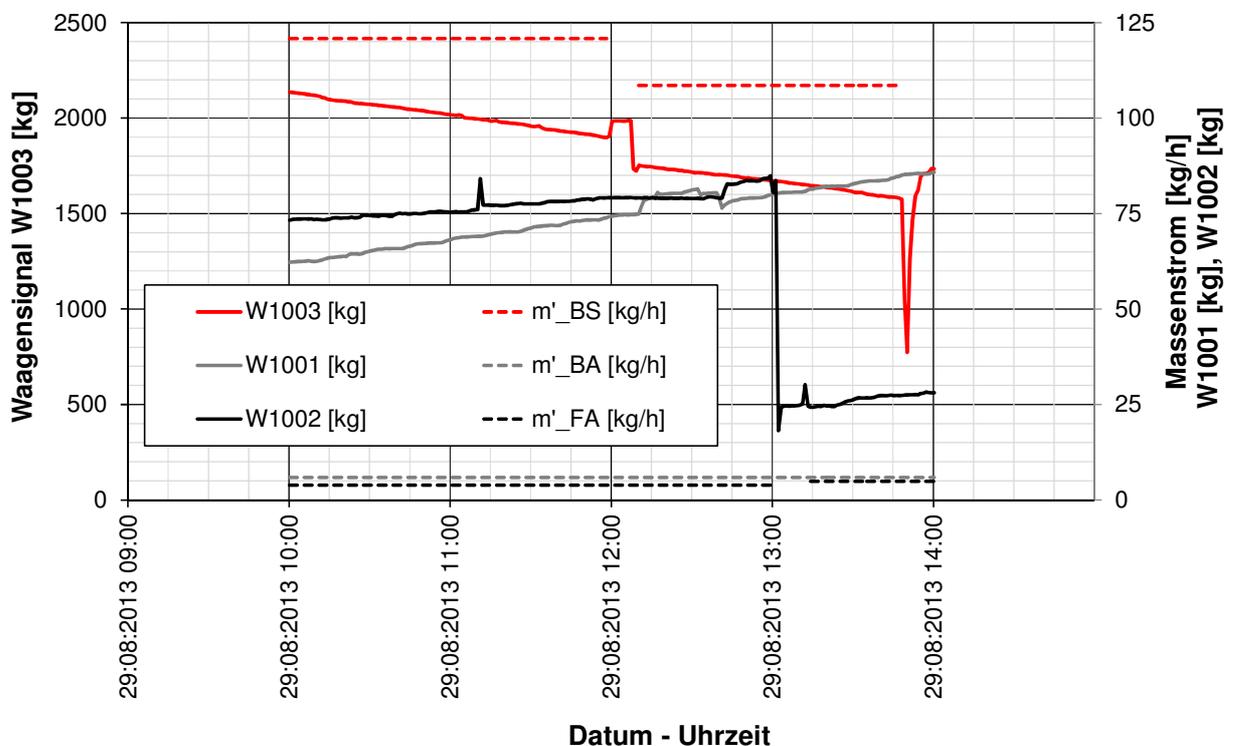


Abb. 6.8-2: Waagensignale W1001 (Bettasche), W1002 (Filterasche) und W1003 (Einsatz-/Brennstoff) und daraus ermittelte Massenströme m'_i

Um zu einer Enthalpiebilanz zu gelangen, mit der dann weitere Kenngrößen ermittelt werden können, müssen zunächst sämtliche ein- und ausgehenden Massenströme des Vergasers ermittelt werden. Zum einen fällt dabei auf, dass insgesamt gesehen sehr viele Massenströme zunächst unbekannt sind, jedoch gerade die eingehenden Massenströme recht gut miterfasst werden. Anders sieht es bei den ausgehenden Strömen aus. Lediglich die Bettasche- und Filterasche-Werte können über die entsprechenden Waagsignale gut nachverfolgt werden. Zum anderen besitzt die Anlage die Besonderheit, dass nur ein Teilstrom des den Vergaser verlassenden Rohgasstroms in die Gasreinigung gelangt und dokumentiert wird, der sogenannte Nebenstreckenstrom. Der Hauptstrom wird bis auf die ermittelte Gaszusammensetzung ungemessen direkt der Nachbrennkammer zugeführt. Die Aufteilung erfolgt direkt hinter dem Zyklon der Anlage. Hauptstrom und Rohgasstrom aus dem Vergaser sind unbekannt, gerade der Rohgasstrom wird jedoch für die Bilanzierung benötigt. Eine Lösung ergibt sich über die Kohlenstoff-Bilanz. Hierbei wird ermittelt, wieviel Kohlenstoff in die Anlage gelangt und wieder über die Bettasche und Nebenstrecke den Vergaser verlässt. Die Differenz aus dem eingehenden Strom und den Vergaser verlassenden Stoffströmen muss also in der Strecke zur Nachbrennkammer verbleiben. Nimmt man nun für Nebenstrecken- und Nachbrennkammerstrom die gleiche Zusammensetzung (Flugkoks, Gaszusammensetzung, Teergehalt, Wassergehalt, ggf. HCl-, Schwefel- und Ammoniak-Gehalt) an, lässt sich die Kohlenstoffbilanz schließen.

Massenbilanz

Aus der Kohlenstoffbilanz ergibt sich der Gesamtstrom, welcher die Vergasungsanlage am Zyklon verlässt. Die Massenbilanz soll klären, welche Massenströme in die Anlage eintreten und welche sie verlassen (s. **Abb. 6.8-3**).

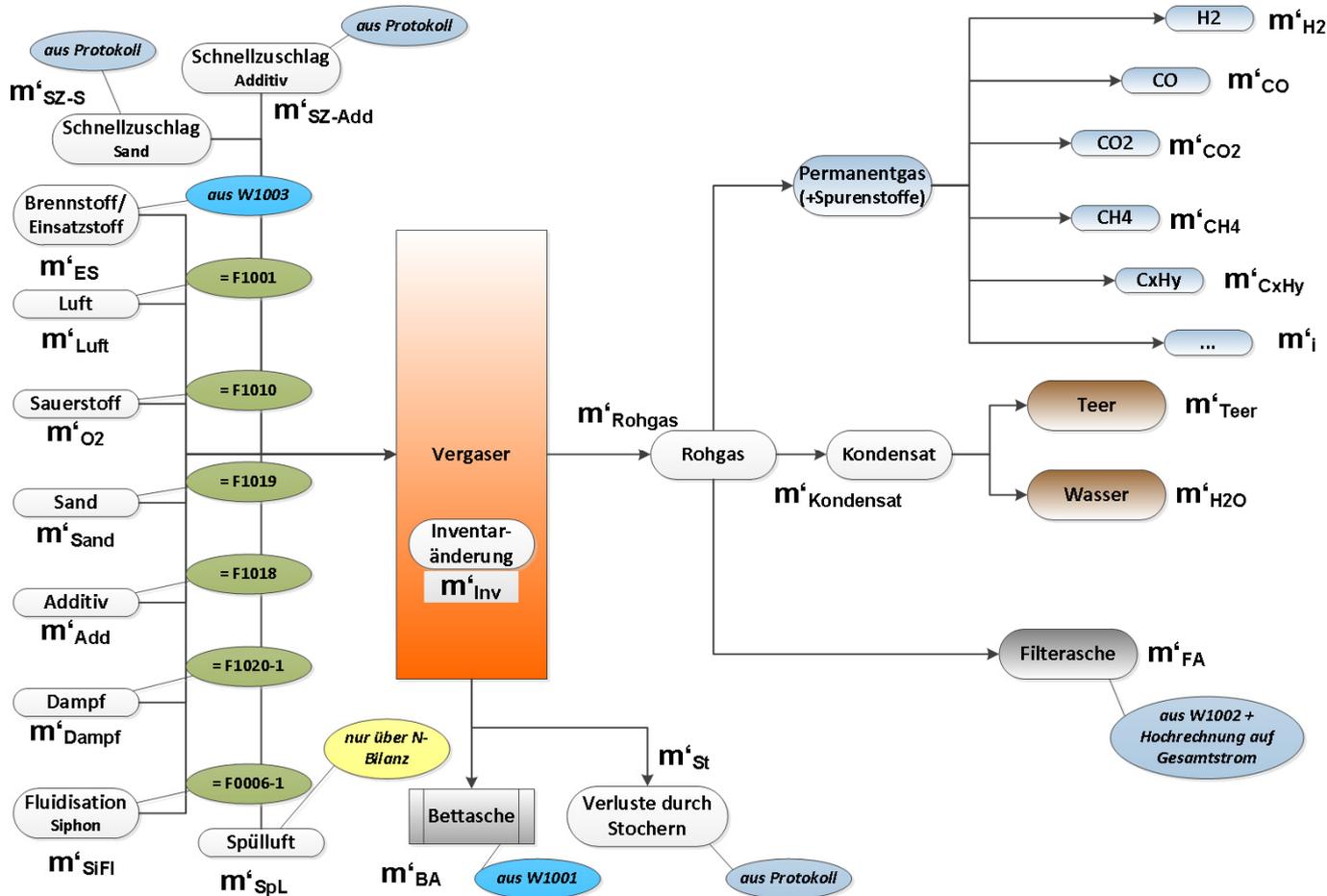


Abb. 6.8-3: Massenbilanz der ArtFuel-Anlage,

grün hinterlegt: mitgeschriebene Werte,

blau hinterlegt: über Waagensignal bestimmbare Werte,

blau-grau hinterlegt: teilweise aus Waagsignalen oder aus dem Protokoll bestimmbare Werte,

gelb hinterlegt: über Stoffbilanzen

Auf der linken Seite sind die *Eingangsmassenströme* E' aufgelistet. Nach unten und nach rechts gehen die *Ausgangsmassenströme* A' . Innerhalb der Anlage kann zudem Material gespeichert werden (Speicherung $S' = m'_{Inv}$). Dies hat dann eine Zunahme oder Abnahme des umlaufenden Bettmaterials zur Folge. Die Massenbilanz wird demnach zu:

$$E' = A' + S'$$

Gl. 1

Eingangsströme E' : Wie in der Abbildung zu den Massenströmen dargestellt, sind die eingehenden Massenströme recht einfach zu fassen. Größtenteils werden sie während der Versuche bereits mitgeschrieben. Andere Werte (Brennstoffmassenstrom m'_{ES} und Bettaschestrom m'_{BA}) lassen sich noch vergleichsweise einfach aus den Waagsignalen bestimmen. Weitere Werte sind erst über das Protokoll im Nachhinein zu bestimmen. Dabei handelt es sich um die eher im irregulären Betrieb der Anlage anfallenden Massenströme über den Schnellzuschlag (Sand m'_{SZ-S} , Additiv m'_{SZ-Add}) und dem beim Öffnen der Anlage (bspw. stochern zum Lösen von Verstopfungen in der Zyklonrückführung) herausrieselnden Bettmaterial (m'_{St}).

Die eingehenden Ströme sind:

m'_{ES} - Massenstrom Brennstoff/Einsatzstoff: Dieser Wert ist über das Bunkerwaagsignal bestimmbar.

m'_{Luft} - Massenstrom Luft: Wird die Vergasung mit Luft durchgeführt, wird Prozessluft über ein Gebläse in die Anlage gefördert. Der Massenstrom wird gemessen und protokolliert.

m'_{O_2} - Sauerstoff: Der Sauerstoffmassenstrom wird ebenfalls gemessen und mitgeschrieben. Soll bei einer Luftvergasung hohe Temperaturen gefahren werden, ist es möglich, Sauerstoff mit hinzugeben.

m'_{Sand} - Sand: Der Massenstrom an Sand wird über die Schneckendrehzahl bestimmt und dokumentiert.

m'_{Add} - Additive: Auch der Massenstrom an Additiven wird über die Schneckendrehzahl berechnet. Der Wert wird protokolliert.

m'_{Dampf} - Dampf: Der Dampfmassenstrom wird niedergeschrieben.

m'_{SiFl} - Siphonfluidisation: Dieser Wert wird protokolliert.

$m'_{SZ-Sand}$ - Schnellzuschlag Sand: Um in die Anlage möglichst zügig Bettmaterial zu geben, besteht die Möglichkeit, über einen Schnellzuschlag Sand oder Additive beizugeben. Den Massenstrom erhält man aus Eintragungen im Protokoll.

m'_{SZ-Add} - Massenstrom über Schnellzuschlag Additiv: Diesen Wert bekommt man durch Notierung im Protokoll.

m'_{SpL} - Spülluftmassenstrom: Das Eintragssystem wird zur Verhinderung von rückströmenden Synthesegas mit Luft (oder Stickstoff) gespült. Die Ermittlung dieses Massenstroms erfolgt über eine Stickstoffbilanz.

Ausgangsströme A': Die ausgehenden Ströme werden größtenteils nicht erfasst. Sie müssen über die diskontinuierlichen Gasproben (Teer, Wasser, HCl, NH₃, Schwefel...) und die Online-Analytik (H₂, CO, CO₂, CH₄, O₂) hergeleitet werden. Für die höheren Kohlenwasserstoffe (Ethan bis Propen) können Korrelationen zum CH₄ herangezogen werden.

Die ausgehenden Ströme sind:

Permanentgas: Über den Gesamtvolumenstrom aus dem Zyklon lassen sich mit den volumetrischen Werten der Gaszusammensetzung (Volumenanteil w_i) unter Berücksichtigung seiner Molmasse (M_i) die Massenströme der gasförmigen Komponenten bestimmen:

$$m'_i = \frac{V'_{N, \text{Ges}}}{V} * w_i * M_i, \quad \text{Gl. 2}$$

mit V'_N Normvolumenstrom und V_m Molvolumen mit 22,4 l/mol = 22,4 Nm³/kmol.

Nach dieser Formel können die Massenströme von Wasserstoff (H₂), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Ethan (C₂H₆), Ethen (C₂H₄), Ethin (C₂H₂), Propan (C₃H₈) und Propen (C₃H₆) errechnet werden.

m'_i - Spurenstoffe: Der Gehalt an Spurenstoffen (Schwefelwasserstoff H₂S, Chlorwasserstoff HCl, Cyanwasserstoff HCN und Ammoniak NH₃) wird üblicherweise diskontinuierlich ermittelt.

m'_{Teer} und m'_{H₂O} - Kondensatmassenstrom: Auch die beiden Kondensat-Komponenten Teer und Wasser werden diskontinuierlich durch die Analytik auf den Normvolumenstrom bezogen bestimmt

m'_{FA} - Massenstrom an Filterasche: Der Filteraschemassenstrom ergibt sich aus dem Signal der entsprechenden Fassaage. Der sich ergebene Massenstrom bezieht sich nur auf den Strom auf die Nebenstrecke und muss auf den Gesamtstrom hochgerechnet werden.

m'_{BA} - Massenstrom Bettasche: Die Bettasche ist im Gegensatz zum Filteraschemassenstrom auf den Gesamtstrom zu beziehen. Entsprechend entfällt hier eine Hochskalierung. Die Masse der ausgeschleusten Bettasche wird über das Signal der Bettaschenwaage registriert.

Speicherung S': Wird mehr Material in die Anlage hineingefördert als abgeführt, fungiert der Vergaser bis zu einem gewissen Maße als Speicher. Berücksichtigt werden soll hier nur der Feststoff. Jedoch auch die Gasphase kann sich durch ändernde Druckverhältnisse innerhalb der Anlage ändern. Die sich ändernde Feststoffmenge im Vergaser ist gleichbedeutend mit der Massenänderung des umlaufenden Bettmaterials.

Änderung Inventar m'_{Inv}: Die Änderung des umlaufenden Bettmaterials ist über eine Feststoffmassenbilanz zu ermitteln. Die Differenz aus zugeführtem, sich im Vergaser nicht umsetzenden Feststoff und dem abgeführten festen Material ist die Inventaränderung.

Enthalpiebilanz

Basierend auf der geschlossenen Massenbilanz lässt sich nun eine Enthalpiebilanz erstellen. Sind sämtliche ein- und ausgehenden Massenströme bekannt, lassen sich die über die Massenströme zu- und abgeführten Enthalpieströme berechnen. Zu diesen kommen weitere, über Heizungen zugeführte oder durch Verluste verursachte Wärme-/Enthalpieströme (s. **Abb. 6.8-4**).

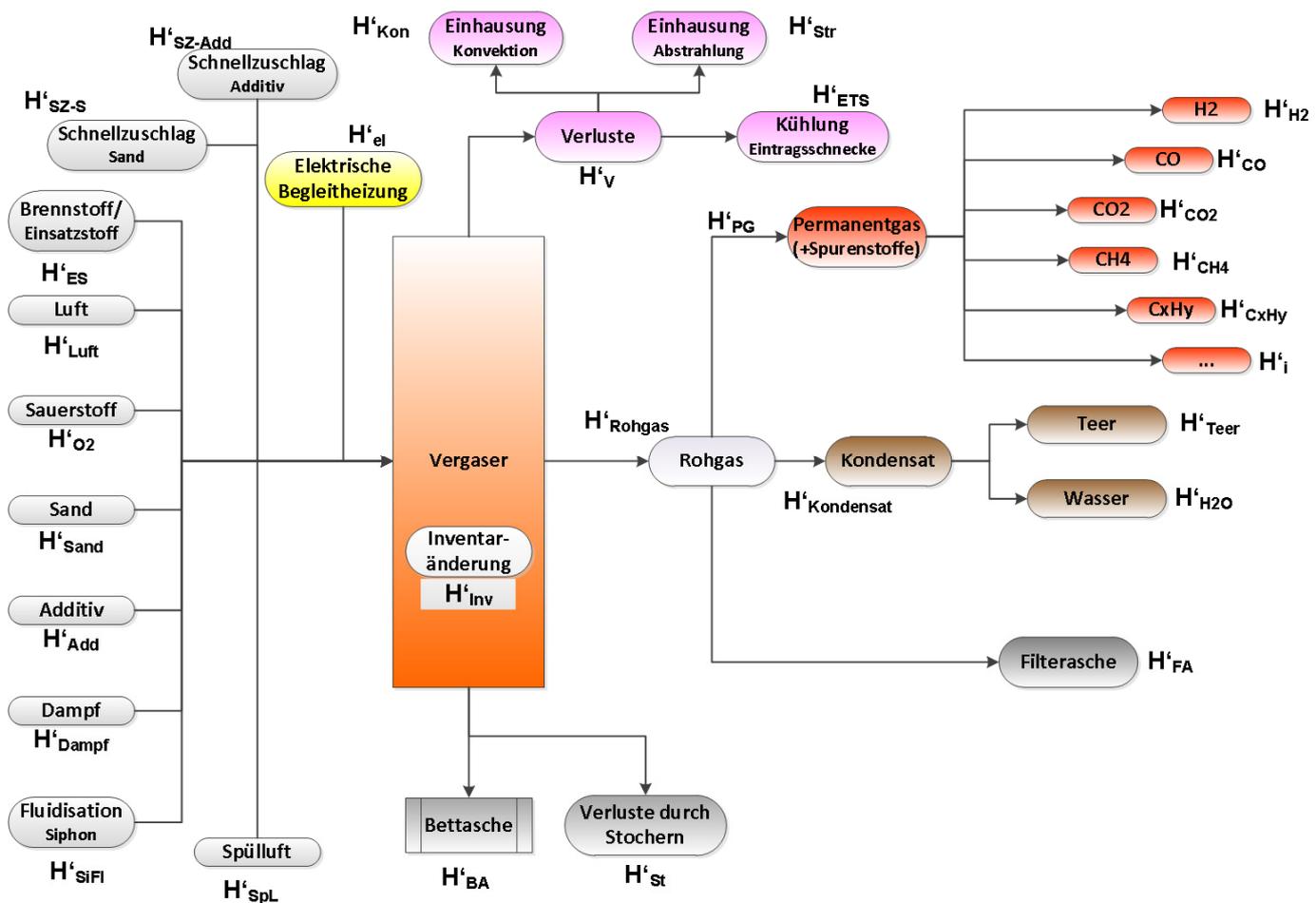


Abb. 6.8-4: Enthalpiebilanz der ArtFuel-Anlage

Der Enthalpiestrom H'_i berechnet sich allgemein nach der Formel:

$$H'_i = m'_i (h_{u,i} + c_{p,i} (T - T_0) + h_v). \quad \text{Gl. 3}$$

Darin ist m'_i der Massenstrom, $h_{u,i}$ der Heizwerte und $c_{p,i}$ die Wärmekapazität des betrachteten Stroms. Bei zu verdampfenden oder kondensierenden Strömen muss gegebenenfalls die Verdampfungsenthalpie h_v mit berücksichtigt werden.

Die in die Anlage gelangenden Enthalpien sind:

H'_{ES} - Brennstoffenthalpiestrom

H'_{Luft} - Enthalpiestrom der Prozessluft

H'_{O_2} - Enthalpiestrom des Prozesssauerstoffs

H'_{Sand} - Enthalpiestrom des zugeführten Bettmaterials/Sand

H'_{Add} - Enthalpie des zugeführten Additivs

H'_{Dampf} - Enthalpie des zugeführten Dampfes

H'_{SiFl} - Enthalpiestrom der zugeführten Luft oder des zugeführten Dampfes zur Siphonfluidisation: Bei der Berechnung der Enthalpie des zugeführten Mediums zur Siphonfluidisation ist eine Unterscheidung nötig, ob eine Dampf-Sauerstoff-Vergasung oder eine Luftvergasung stattfand. Bei einer Dampf-Sauerstoff-Vergasung erfolgt die Siphonfluidisation üblicherweise mit überhitztem Dampf, bei der Luftvergasung mit Luft.

H'_{SpL} - Enthalpie der Spülluft

H'_{SZ-S} - Enthalpie des über den Schnellzuschlag zugeführten Sandes

H'_{SZ-Add} - Enthalpie des über den Schnellzuschlag zugeführten Additivs

H'_{el} - zugeführte Wärme über elektrische Begleitheizungen: Zum Ausgleichen von Verlusten sind 4 elektrische Begleitheizungen am Wirbelschicht-Vergaser installiert. Drei Heizungen befinden sich am Vergaser und eine am Zyklon. Die Verluste ergeben sich aus dem Aufwand zur Kühlung der Brennstoff-Eintragsschnecke, der Absaugung der Wirbelschicht-Einhausung (konvektive Verluste) und durch die Abstrahlung dieser Einhausung von Wärme an die Umgebung.

Die Anlage verlassen Enthalpieströme als Verluste (H'_V), als Rohgas (H'_{Rohgas}) und über die verschiedenen Aschewege.

Die Verluste H'_V setzen sich zusammen aus:

H'_{ETS} - Kühlung der Eintragsschnecke: Da die Eintragsschnecke für den Brennstoff nahe an den heißen Reaktor reicht, muss diese gekühlt werden. Dazu wird mit Glykol angereichertes Wasser genutzt. Durch die durch die Kühlflüssigkeit aufgenommene Wärme lässt sich der Verlust berechnen.

H'_{Str} - Abstrahlung der Einhausung: Die Abstrahlleistung der Anlageneinhausung wird mit 5 kW angenommen. Zugrunde liegt dabei die Annahme eines 25°C warmen schwarzen Strahlers.

H'_{Kon} - Wärmeverluste über die Absaugung der Anlage (Konvektion): Aus Sicherheitsgründen ist die Vergasungsanlage eingehaust und die Einhausung wird abgesaugt. Der Luftmassenstrom wird direkt am Ausgang der Einhausung gemessen. Dort erfolgt zudem eine Ermittlung der Temperatur.

Das Rohgas besteht aus dem Permanentgas (H'_{PG} , z. B. Kohlenmonoxid, Wasserstoff, C_xH_y), dem Kondensat (wiederum bestehend aus Wasser und Teer) und der Filterasche.

Permanentgas: Das Permanentgas besteht aus Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO_2), Wasserstoff (H_2), Methan (CH_4), den höheren Kohlenwasserstoffen (C_xH_y), Stickstoff (N_2) und den Spurenstoffen Schwefelwasserstoff (H_2S), Chlorwasserstoff (HCl), Ammoniak (NH_3) und Cyanwasserstoff (HCN). Für alle diese Komponenten wird einzeln der Enthalpiestrom berechnet.

Kondensat: Beim Abkühlen des Synthesegases kondensieren Wasser und Teere aus. Für beide Stoffe werden einzeln die Enthalpieströme H'_{Teer} und $H'_{\text{H}_2\text{O}}$ berechnet, wobei beim Teer auf die Substanz Naphthalin (C_{10}H_8) als repräsentativen Vertreter zurückgegriffen wird.

H'_{FA} - Enthalpiestrom der Filterasche: Die Filterasche (Flugkoks) verlässt über das Rohgas den Bilanzraum. Die Filterasche kann einen Kohlenstoff-Anteil um 40 Ma.% und somit einen gewissen Heizwert besitzen.

Bettmaterial wird aus der Anlage regulär über den Bettascheaustrag abgeführt. Zum Freihalten der Zyklon-Rückführung und bei Arbeiten am Bettascheaustrag fällt zusätzlich Bettasche an.

H'_{BA} - Enthalpiestrom der Bettasche: Im Vergleich zur Filterasche ist der Kohlenstoff-Anteil in der Bettasche vergleichsweise gering. Trotzdem soll der Kohlenstoff-Anteil und der damit verbundene Heizwert der Bettasche bei der Berechnung der Enthalpie nicht vernachlässigt werden.

H'_{St} - Bettverluste durch Stochern: Je nach Fahrweise der Anlage kommt es vor, dass der Bettascheaustrag zuwächst. In Folge muss das Austragssystem auseinander gebaut werden und das dabei anfallende Material wird gesammelt und nach Versuchsende gewogen. Am Siphon wird in unregelmäßigen Abständen zur Vermeidung von Verstopfungen Material abgelassen. Auch dieses Material (üblicherweise Sand) wird dem Bettascheverlust zugerechnet.

Zu den ein- und austretenden Enthalpieströmen kommt wie bei den Masseströmen ein Speicherterm hinzu.

H'_{Inv} - Inventaränderung: Durch Änderung des umlaufenden Bettmaterials ändert sich die gespeicherte Enthalpie im Reaktor.

Ergebnisse

Trotz wechselnder Biomassen und Variation der verfahrenstechnischen Einstellungen war in den Versuchswochen eine kontinuierliche Fahrweise möglich. Ein Beispiel zeigt **Abb. 6.8-5**.

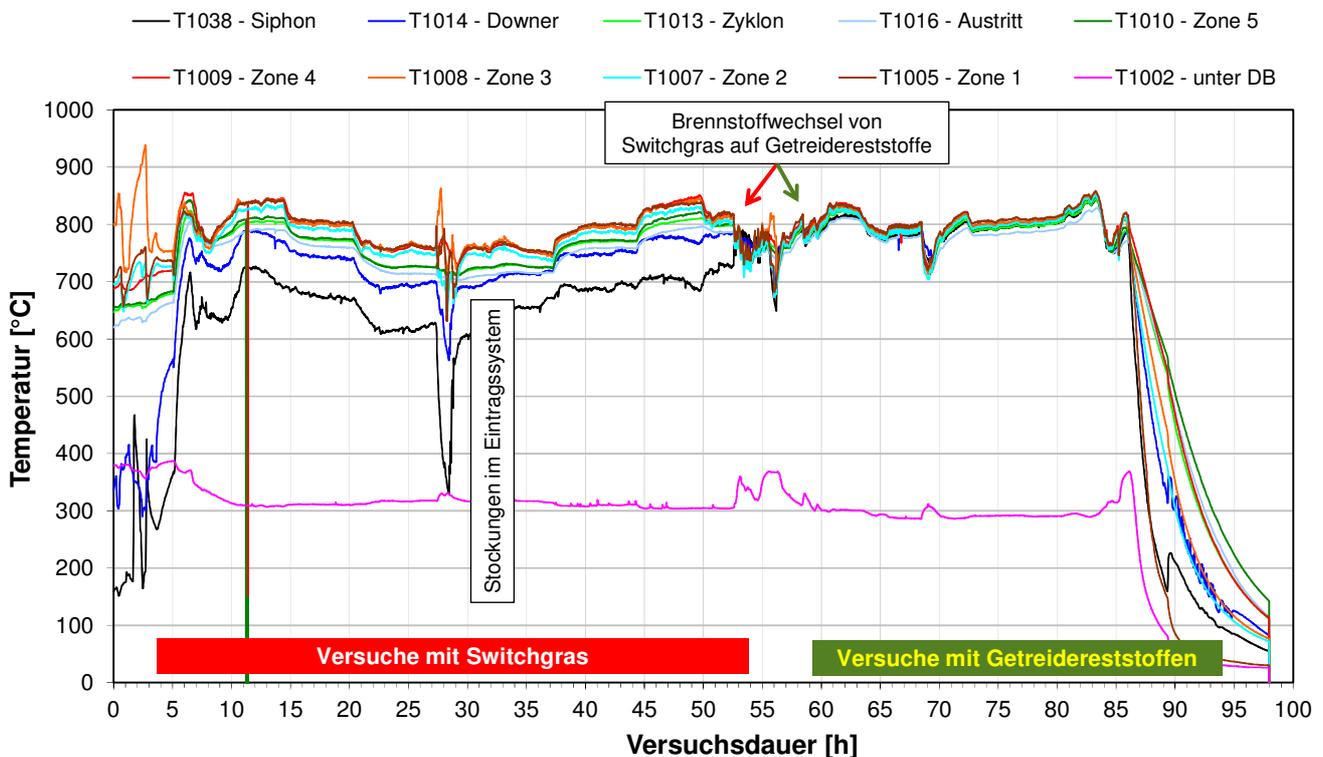


Abb. 6.8-5: Temperaturen im Vergaser über eine Versuchswoche, DB: Düsenboden

Im Bereich 28 bis 29 Betriebsstunden kam es zu Stockungen im Eintragungssystem. Die Folge war zunächst eine Zunahme der Temperatur im Reaktor (z. B. T1008 Zone 3 in **Abb. 6.8-5**), da durch Brennstoffmangel kurzzeitig ein Sauerstoffüberschuss im Reaktor herrschte und entsprechend in den Verbrennungsbetrieb übergegangen wird. Die Reduzierung der Sauerstoffzufuhr und der Mangel an Brennstoff führen in der Folge zum Abkühlen der Anlage. Solche Störungen im Betrieb lassen sich inzwischen zügig beheben. Brennstoffwechsel führen auf Grund unterschiedlicher Heizwerte, Fließeigenschaften und Stückigkeiten (anderes Wirbelverhalten im Reaktor) zu unruhigem Betrieb. Erkennbar ist dies in einem Bereich um die Betriebsstunde 55 in **Abb. 6.8-5**.

Als Ergebnisse erhält man Massen- und Enthalpiebilanzen (s. **Abbn. 6.8-6 – 6.8-9**). Aus diesen Werten können weitere Kenngrößen ermittelt werden. Allein schon aus der Kohlenstoffbilanz berechnet sich der Kohlenstoffumsatzgrad. Die Massenbilanz kombiniert mit Brennstoffanalysen gibt Rückschlüsse auf die gefahrene Luftzahl. Die Enthalpiebilanz liefert Größen zum Wirkungsgrad der Anlage, z. B. den Kaltgaswirkungsgrad oder den Vergaserwirkungsgrad. Mit Hilfe der Anlagenabmessungen lassen sich weitere Größen wie Gasverweilzeiten oder Leerrohrgeschwindigkeiten im Reaktor bestimmen (s. **Tab. 6.8-2**).

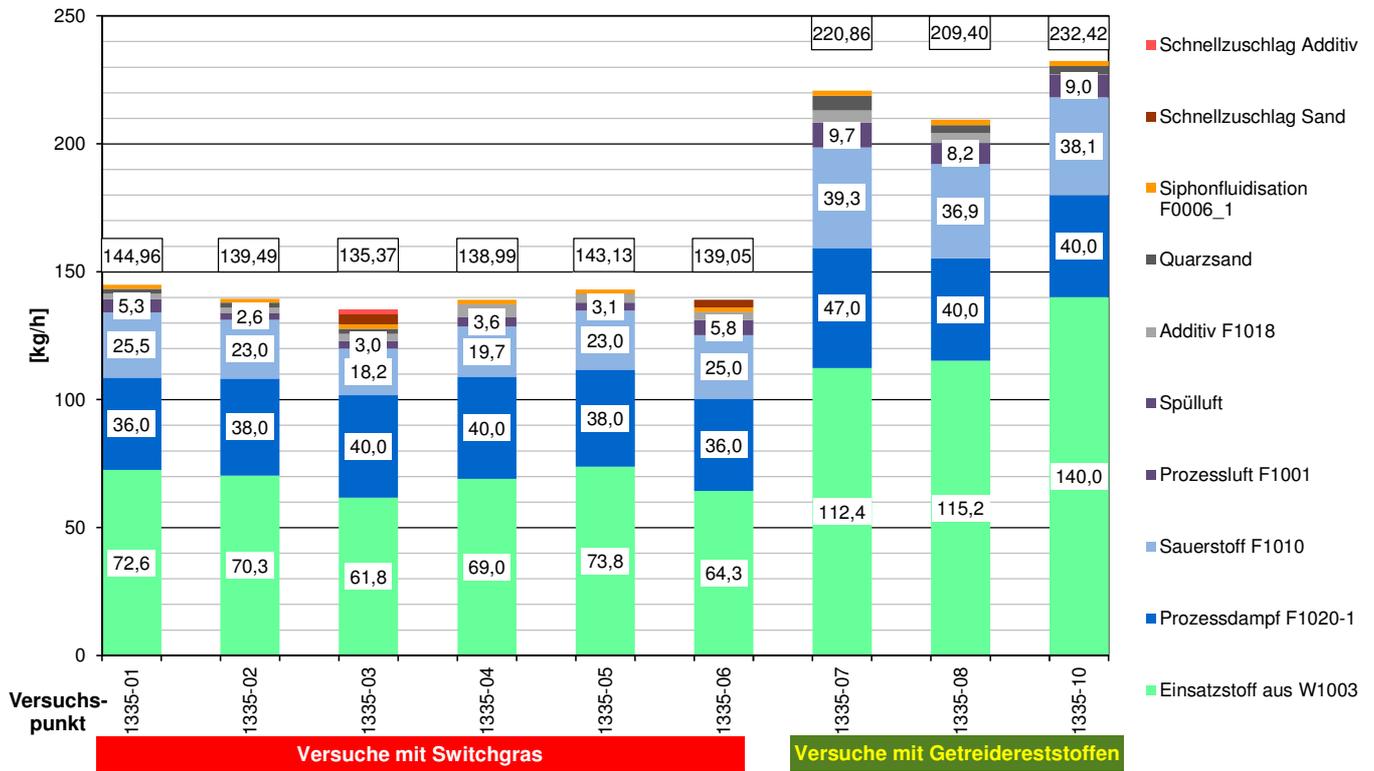


Abb. 6.8-6: Eingangsmassenströme einer Versuchswoche

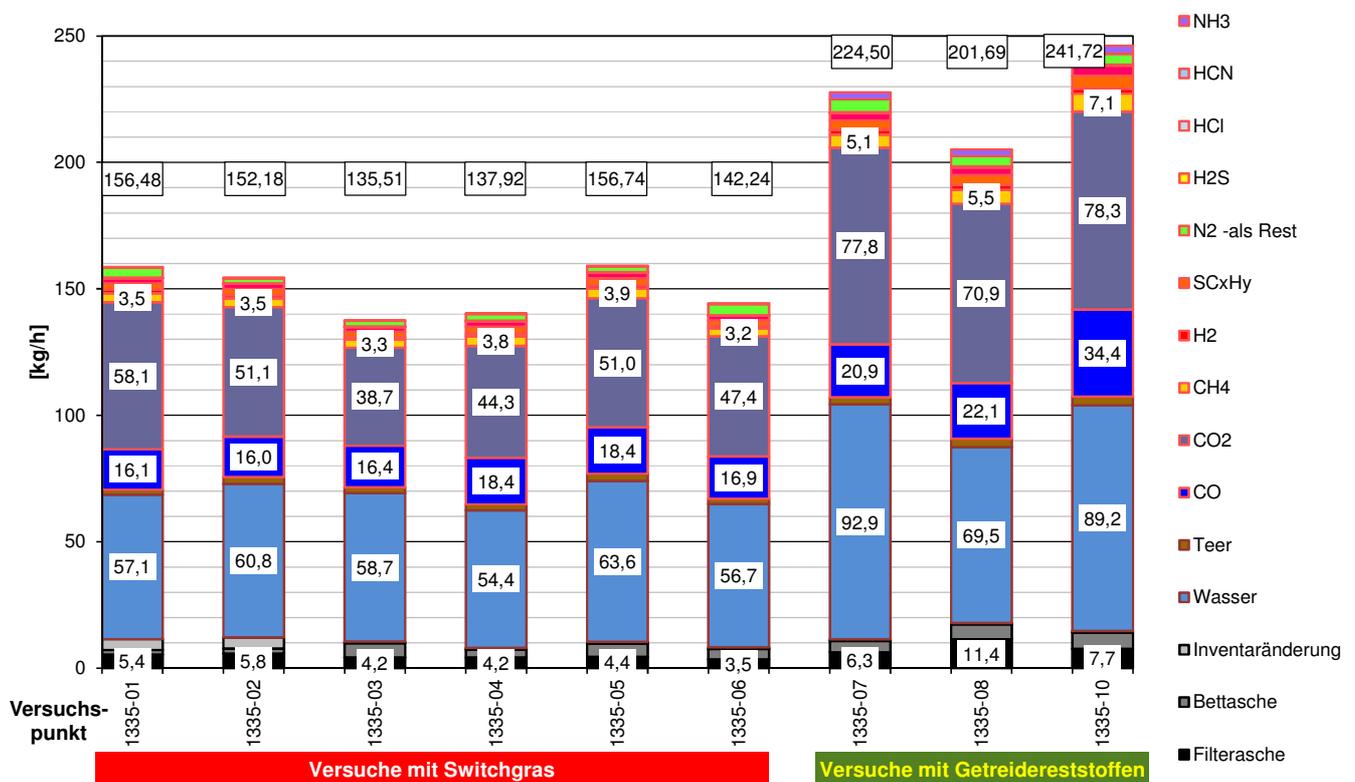


Abb. 6.8-7: Ausgangsmassenströme einer Versuchswoche

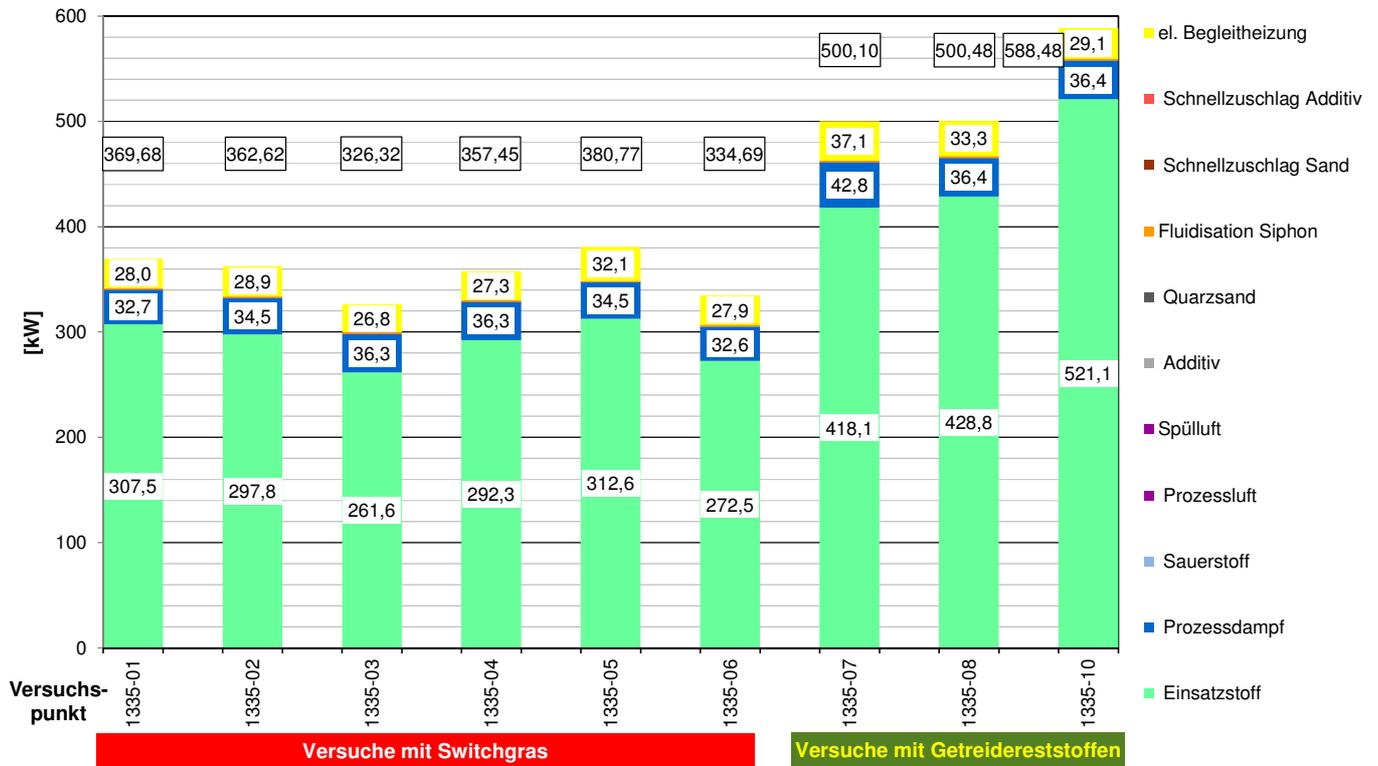


Abb. 6.8-8: Eingangs-Enthalpieströme beim Einsatz von Switchgras und Getreidereststoffen

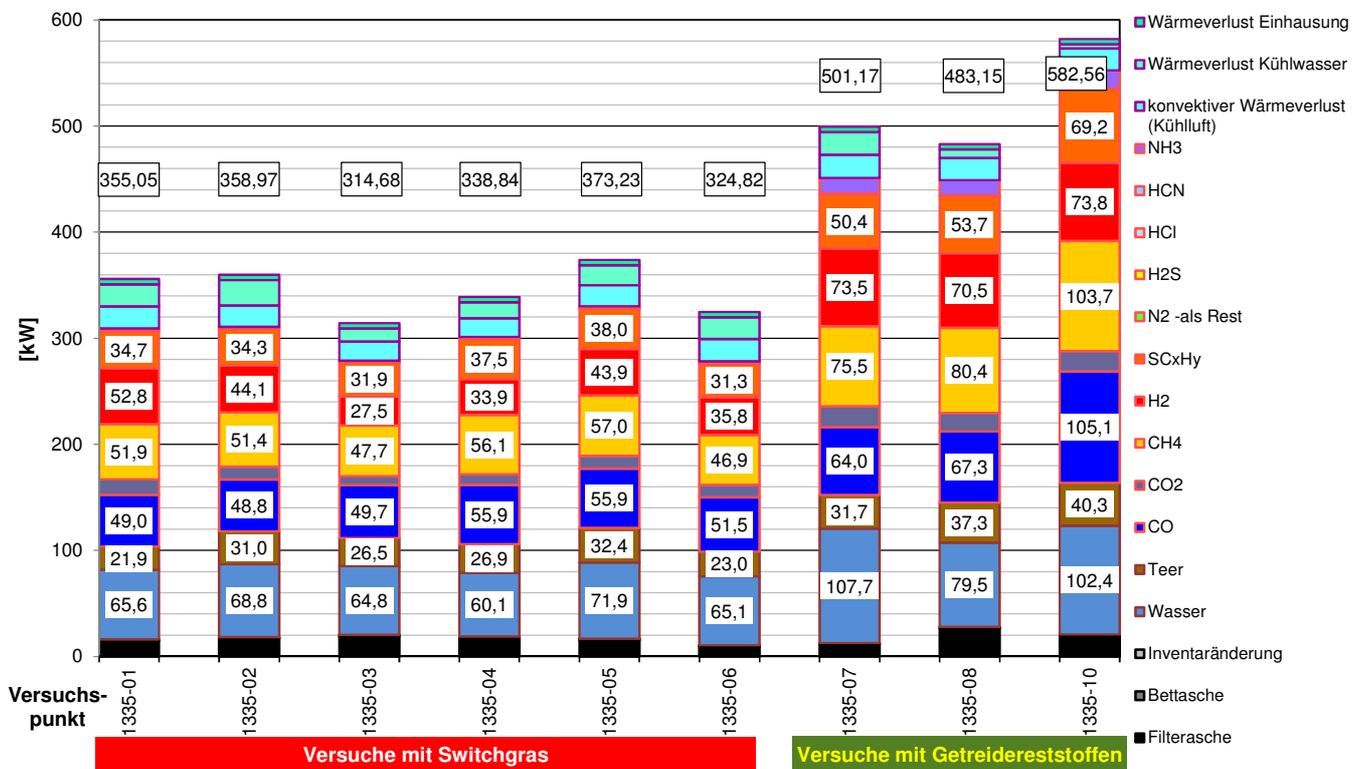


Abb. 6.8-9: Ausgangs-Enthalpieströme bei der Vergasung von Switchgras und Getreidereststoffen

Tab. 6.8-2: Kenngrößen zu den Versuchen mit Switchgras und Getreidereststoffen

Versuchspunkt		1335-01	1335-02	1335-03	1335-04	1335-05	1335-06	1335-07	1335-08	1335-10
Biomasse		Switchgras						Getreidereststoffe		
Vergasungstemperatur	[°C]	818,7	794,8	746,1	746,3	789,4	830,0	825,3	800,6	807,4
Teergehalt	[g/Nm ³]	28,1	45,0	47,3	41,4	45,0	34,8	30,0	36,8	33,1
Gasverweilzeit in der ZWS	[s]	3,7054	3,8890	4,5477	4,4344	3,7224	4,0094	2,4172	2,9271	2,3443
Leerrohrgeschwindigkeit	[m/s]	2,2984	2,1899	1,8727	1,9205	2,2879	2,1241	3,5233	2,9095	3,6330
Kohlenstoffumsatzgrad	[-]	0,8923	0,8560	0,8394	0,8591	0,8632	0,8954	0,9087	0,8636	0,8967
Kaltgaswirkungsgrad	[-]	0,5773	0,5662	0,5687	0,5954	0,5888	0,5722	0,6219	0,6249	0,6630
Vergaserwirkungsgrad	[-]	0,8576	0,8766	0,8626	0,8553	0,8990	0,8732	0,9468	0,9012	0,9505

Tendenziell nimmt der Teergehalt mit zunehmender Vergasungstemperatur ab. Unter 800°C lagen die Gehalte beim Switchgras bei den gefahrenen Versuchen über 40 g/Nm³. Bei über 800°C konnten unter 30 g/Nm³ erreicht werden. Bei den Versuchen mit Getreidereststoffen ergab sich ein ähnliches Bild. Die kurzen Gasverweilzeiten beim Einsatz dieses Brennstoffes resultierten aus dem hohen Eintragsmassenstrom (s. **Abbn. 6.8-6** und **6.8-8**). Der Biomassestrom konnte auf Grund des verwendeten Eintragsystems nicht weit genug hinuntergeregelt werden, um tatsächlich vergleichbare Werte zum Switchgras bei der Brennstoffleistung zu generieren. Im Umkehrschluss lag die Gasleerrohrgeschwindigkeit beim Getreidereststoff deutlich über den Werten aus der Switchgras-Vergasung. Steigende Vergasungstemperaturen bewirken eine Zunahme des Kohlenstoffumsatzgrades.

6.8.2 Abhängigkeit höhere Kohlenwasserstoffe von Methan

Für die Bestimmung der höheren Kohlenwasserstoffe wurden in vergangenen Vorhaben Gasproben in Gasbeutel abgefüllt und extern auf ihre Zusammensetzung untersucht.

Unter den höheren Kohlenwasserstoffen, abgekürzt C_xH_y genannt, werden hier die noch gasförmigen Kohlenwasserstoff-Ketten mit mehr als einem Kohlenstoff-Atom verstanden:

Tab. 6.8-3: Typische höhere Kohlenwasserstoffe im ArtFuel-Vergaser

Stoffbezeichnung		Summenformel
Ethan	Äthan	C ₂ H ₆
Ethen	Ethylen	C ₂ H ₄
Ethin	Azetylen	C ₂ H ₂
Propan		C ₃ H ₈
Propen	Propylen	C ₃ H ₆

Um die externen Analysen zu minimieren, wurde versucht, die Gehalte niederer Kohlenwasserstoffe im Synthesegas rechnerisch aus zur Verfügung stehenden Gaskomponenten zu ermitteln. Dabei könnte eine Abhängigkeit zum einfachsten Kohlenwasserstoff Methan (CH_4) möglich sein. Diese Synthesegaskomponente wird online gemessen und steht also über den gesamten Versuchszeitraum zur Verfügung. Könnten aus dessen Anteil am Synthesegas die anderen Kohlenwasserstoffe berechnet werden, stünden also quasi-kontinuierliche Werte über die gesamte Versuchszeit zur Verfügung.

Über mehrere Jahre ermittelte C_xH_y -Werte wurden zusammen getragen und in Diagrammen in Abhängigkeit zu Methan (CH_4) dargestellt. Mittels Ausgleichsgeraden konnte somit ein einfacher Zusammenhang zum Methan ermittelt werden (s. **Abbn. 6.8-10 - 6.8-15**).

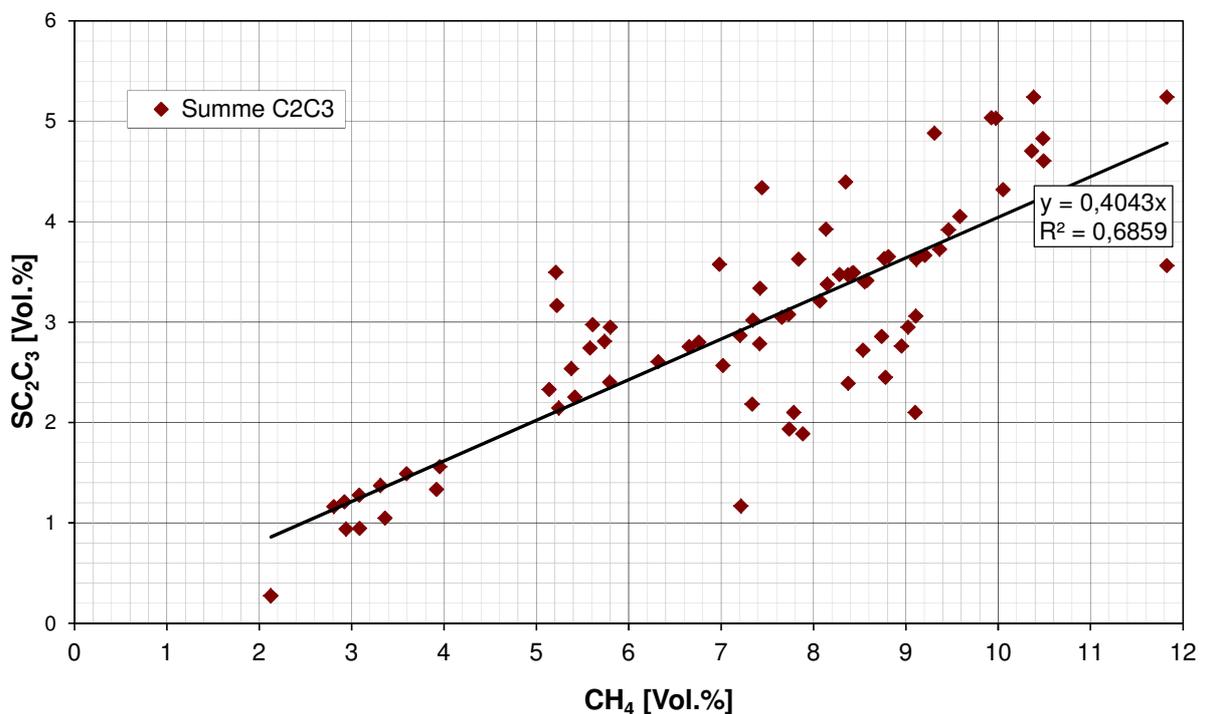


Abb. 6.8-10: Summe C_2C_3 in Abhängigkeit von CH_4 , Anm.: $\Sigma\text{C}_2\text{C}_3$ = Summe der entsprechenden gasförmigen Kohlenwasserstoffe

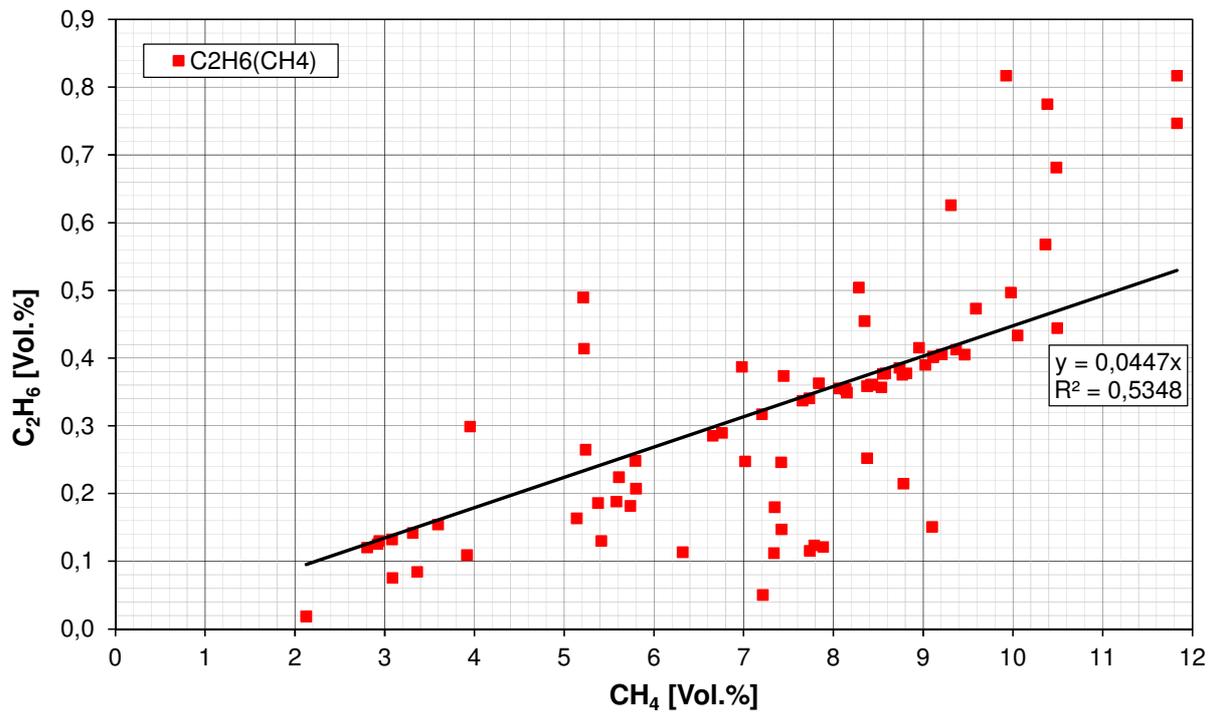


Abb. 6.8-11: Abhängigkeit von C_2H_6 von Methan (CH_4)

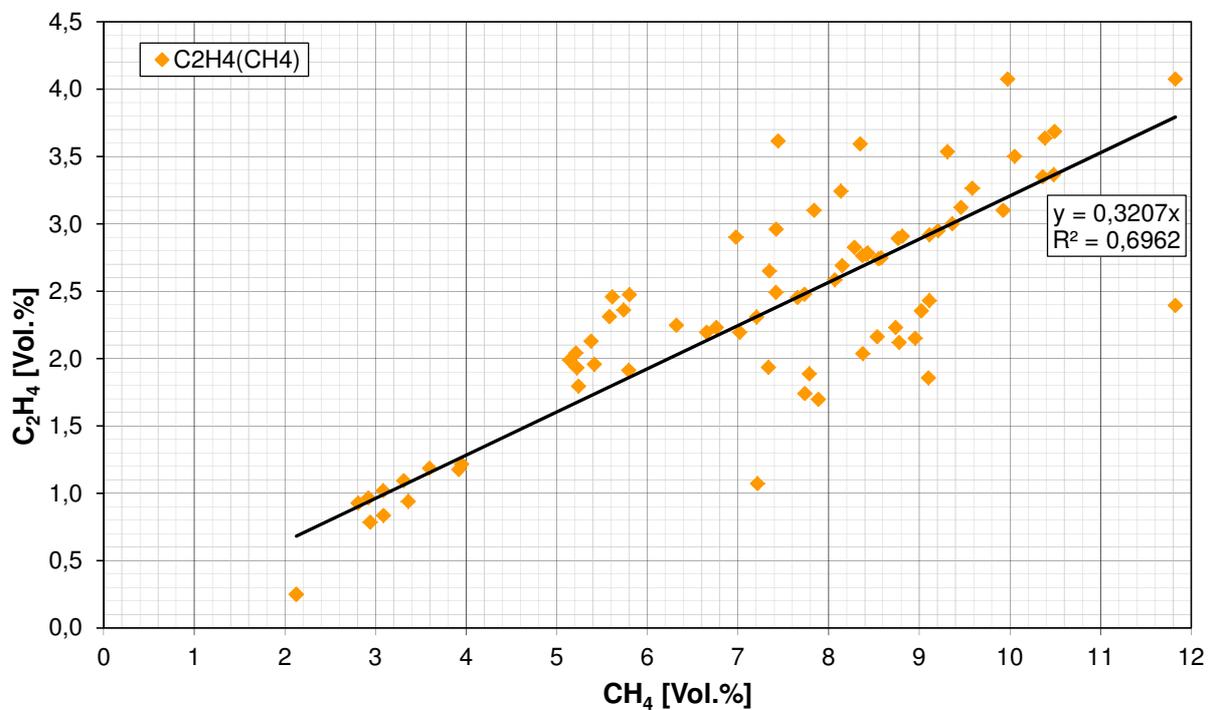


Abb. 6.8-12: C_2H_4 -Abhängigkeit von CH_4

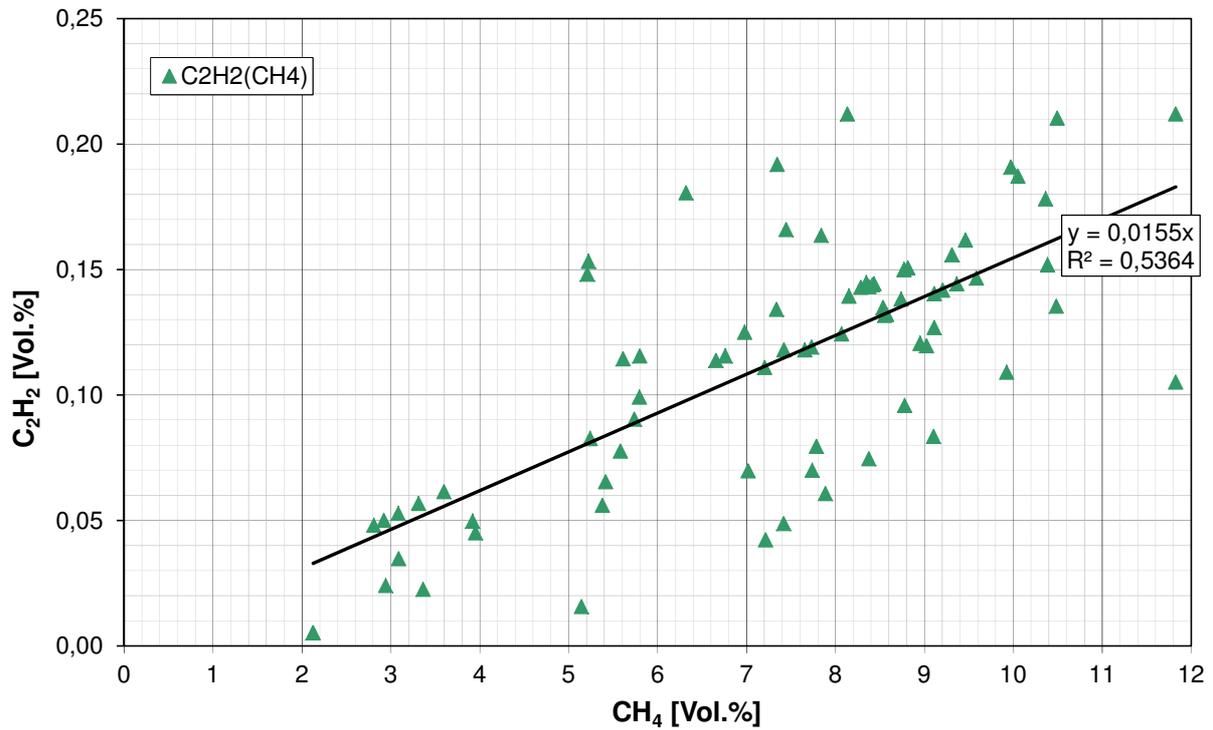


Abb. 6.8-13: C_2H_2 -Abhängigkeit von CH_4

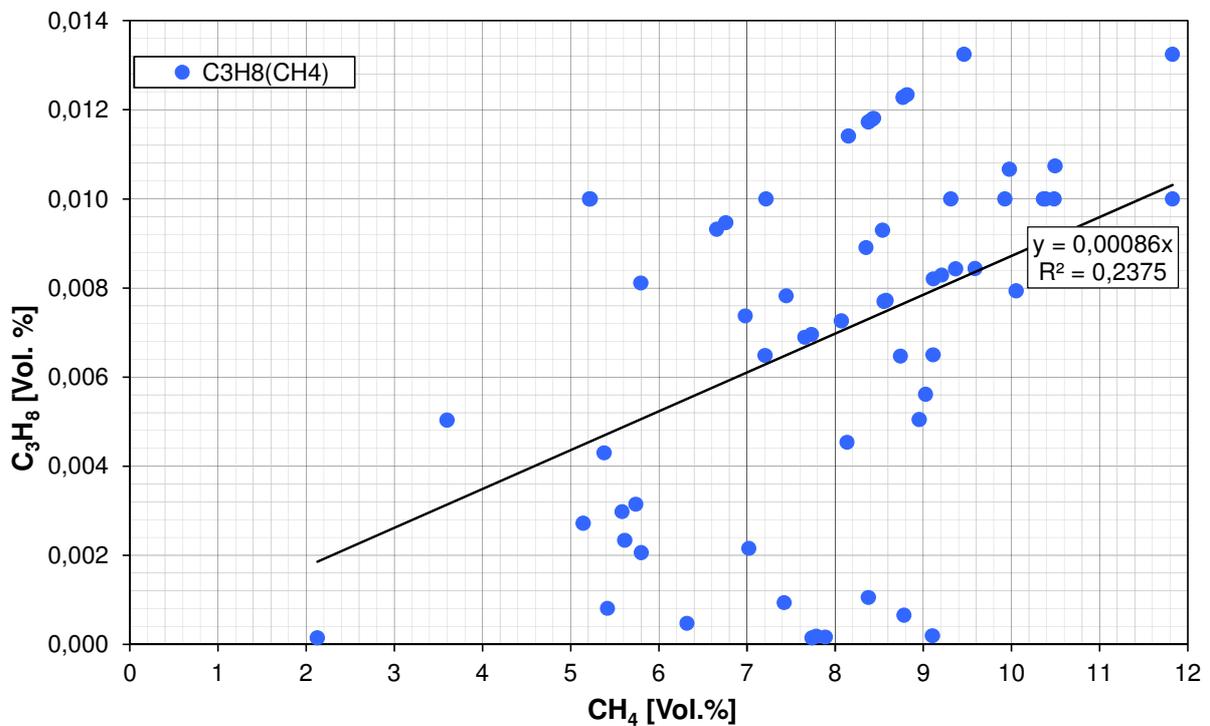


Abb. 6.8-14: C_3H_8 -Abhängigkeit von CH_4

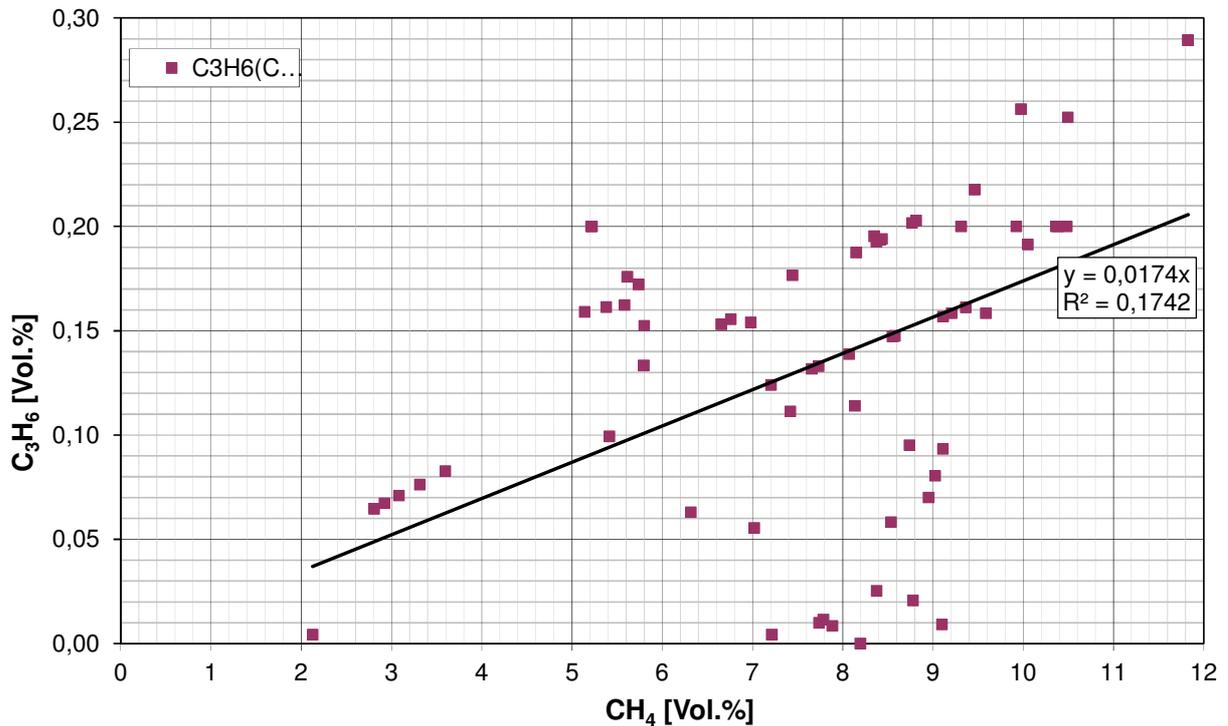


Abb. 6.8-15: C_3H_6 -Abhängigkeit von CH_4

Die Ausgleichsgeraden für die gering konzentrierten Kohlenwasserstoffe sind recht ungenau. Relativ gut können die Summe der C_2C_3 -Kohlenwasserstoffe sowie der Ethen-Gehalt mit einer Ursprungsgeraden angenähert werden. Vergleichsweise ungenau bildet hingegen eine Gerade die Kohlenwasserstoffe mit 3 Kohlenstoffatomen ab. Hier sind die Abweichungen erheblich. Gerade jedoch der Propan-Gehalt ist im Synthesegas mit meistens deutlich unter 0,014 Vol.-% so gering, dass eine ungenaue Berechnung des Propan-Anteils nur minimale Abweichungen in den Bilanzen bewirkt.

Zusammenfassend konnten folgende Zusammenhänge ermittelt werden:

- $C_2H_6 = 0,0447 * CH_4$ Gl. 4
- $C_2H_4 = 0,3207 * CH_4$ Gl. 5
- $C_2H_2 = 0,0155 * CH_4$ Gl. 6
- $C_3H_8 = 0,00086 * CH_4$ Gl. 7
- $C_3H_6 = 0,0174 * CH_4$ Gl. 8
- $\Sigma C_2C_3 = 0,4043 * CH_4$ Gl. 9

6.8.3 Stoffflussanalysen

Der Verbleib der über den Brennstoff zugeführten Elemente wurde über umfangreiche Stoffflussanalysen rekonstruiert. Mit diesen Analysen erhält man Auskunft über das Korrosionspotenzial des Gases und die mögliche Weiterverwendung der anfallenden Reststoffe. Hohe Chlorkonzentrationen im Synthesegas bewirken ein hohes Korrosionsrisiko für folgende Anlagenteile. Hohe Phosphor- oder Natrium-Gehalte in der Asche prädestinieren diese zum Einsatz als landwirtschaftlichen Dünger. Dem entgegenstehen würden jedoch hohe Schwermetall-Konzentrationen.

Es wurden auf der Eingangsseite Analysen von Brennstoff, Additiv und Sand (Bettmaterial) erstellt. Auf der Ausgangsseite wurden Filterasche, Bettasche, Synthesegas und das Kondensat (Teer und Wasser) untersucht.

Phosphor

Der Verbleib des über den Brennstoff zugeführten Phosphors gibt Hinweise darauf, ob und welche Aschen einem möglichen Phosphorreycling und der Düngemittelproduktion zugeführt werden können.

Phosphor gelangt fast ausschließlich über den Brennstoff in das System. In dem untersuchten exemplarischen Versuchspunkt mit Switchgras (s. **Abb. 6.8-16**) waren es über 99,9 %. Geringste Mengen an Phosphor konnten im Sand und im Kalk nachgewiesen werden.

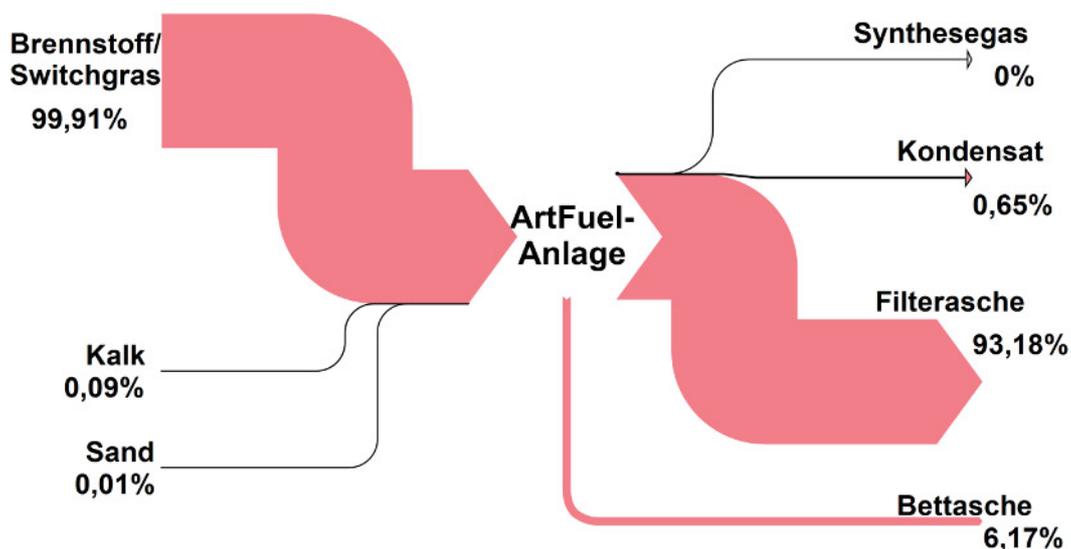


Abb. 6.8-16: Stoffflussanalyse für Phosphor und Einsatzstoff Switchgras

Ausgetragen wird der Phosphor zum überwiegenden Teil über die Filterasche. Im untersuchten Fall wurden in der Filterasche über 93 % des ausgehenden Phosphors nachgewiesen. In der Bettasche fanden sich lediglich knapp über 6 %. Bei dem im Kondensat gefundenen Phosphor wird es sich um solches aus Flugkoks (→ Filterasche) handeln. Bei der Kondensatprobenahme gelangt eine gewisse Menge an Staub in die Messapparatur.

Chlor

Sollte das aus dem Brennstoff zugeführte Chlor in die Gasphase gelangen, hätte das immense Auswirkungen auf die verwendete Anlagentechnik, da das Synthesegas ein hohes Korrosionspotenzial aufweisen würde.

Bereits die Brennstoffanalysen (siehe folgende **Tab. 6.8-4**) lassen jedoch vermuten, dass Chlor nur in geringen Mengen in die Gasphase gelangen dürfte, da der Großteil des Chlors anorganisch gebunden vorliegt. Bei den herrschenden Temperaturen von unter 900°C hat damit das Chlor keine Möglichkeit, in die Gasphase zu gelangen. Nur das organisch gebundene Chlor kann aus seiner Bindung gelöst werden und in die Gasphase als Chlorwasserstoff (HCl) entweichen.

Tab. 6.8-4: Brennstoffanalysen verschiedener Biomassen

		Weizenstroh	Zuckersilage	Hirschgras	Switchgras	Getreidereststoffe	Gärreste
Elementaranalyse							
Kohlenstoff	C	44,30	44,60	45,80	46,10	44,80	45,50
Wasserstoff	H	5,30	5,50	6,20	6,20	5,90	5,50
Sauerstoff	O	40,80	36,00	41,90	42,00	36,10	36,40
Stickstoff	N	0,65	1,83	0,29	0,31	2,27	1,86
Schwefel	S	0,09	0,15	0,05	0,04	0,22	0,21
Chlor (gesamt)	Cl	0,12	0,46	0,48	0,04	0,15	0,35
Chlor (anorg.)	Cl_{anorg}	0,11	0,37	0,45	0,03	0,14	0,27
Chlor (org.)	Cl_{org}	0,01	0,10	0,03	0,01	0,01	0,08
Fluor (gesamt)	Fl	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00

Tatsächlich werden die Annahmen durch die Stoffflussanalyse bestätigt (s. **Abb. 6.8-17**).

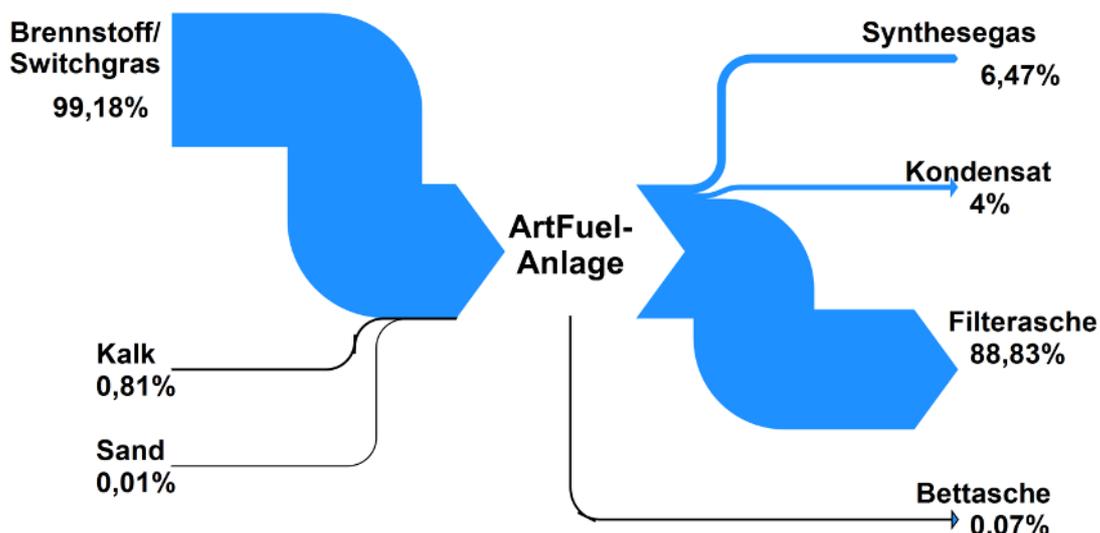


Abb. 6.8-17: Stoffflussanalyse für Chlor und Einsatzstoff Switchgras

Hauptsächlich über den Brennstoff gelangt Chlor in die Anlage. Das meiste Chlor mit über 88 % des ausgehenden Elements gelangt in die Filterasche. Nicht ganz frei sind Synthesegas und Kondensat. Beim Kondensat werden am Flugstaub anhaftende Chlorverbindungen die Messung verfälschen, da Staub in die Probennahme gelangt.

Schwefel

Über den Brennstoff wird Schwefel mitgeführt. Ein hoher Anteil an gasförmigen Schwefelverbindungen im Synthesegas macht eine aufwändige Gasreinigung erforderlich, wenn das Gas in einem Motor verbrannt oder in einer Synthese genutzt werden soll.

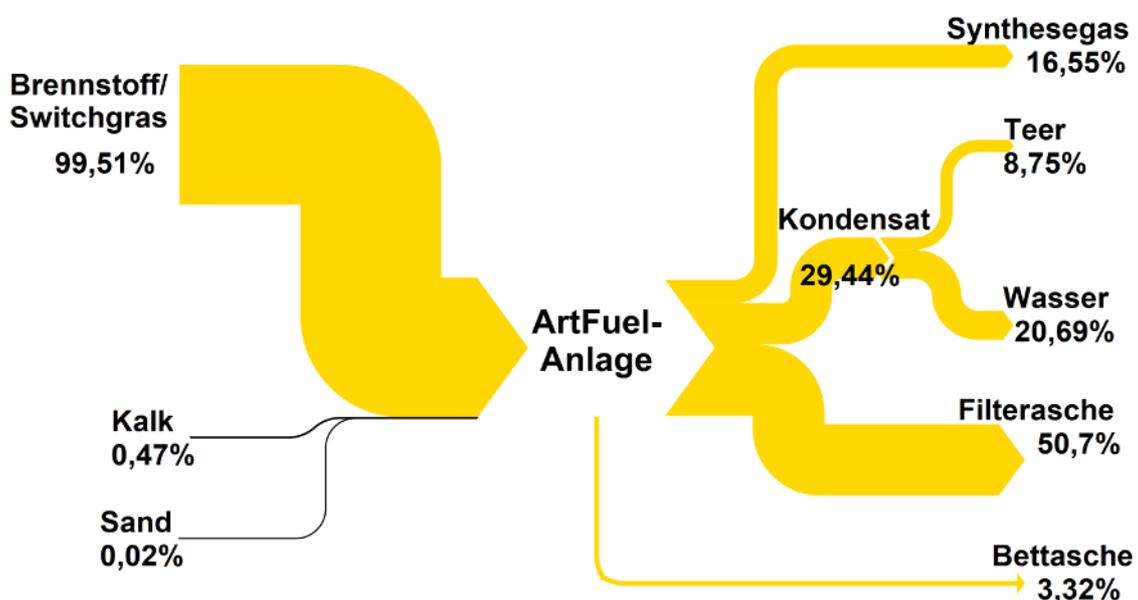


Abb. 6.8-18: Stoffflussanalyse für Schwefel und Einsatzstoff Switchgras

Schwefel verteilt sich mehr auf die einzelnen ausgehenden Ströme als Phosphor und Chlor (s. **Abb. 6.8-18**). Ein nicht unerheblicher Anteil gelangt ins Synthesegas (über 16 %). Dies hat Auswirkungen auf nachgeschaltete Prozesse und die erforderliche Reinigung des Synthesegases. Vor der Verwendung in Gasmotoren oder Synthesen müssen die Schwefelverbindungen aus dem Gas entfernt werden bei Einsatz schwefelreicher Biomassen in der Vergasung. Bei den gasförmigen Schwefelverbindungen handelt es sich um Schwefelwasserstoff (H_2S), Carbonylsulfid (COS), verschiedene kürzere Thiole sowie Kohlenstoffdisulfid (CS_2) und Thiophen (C_4H_4S).

Der größte Teil (über 50 %) des ausgehenden Schwefels gelangt jedoch in die Asche. Insbesondere über die Filterasche wird Schwefel ausgetragen.

Alkali-, Erdalkali- und Schwermetalle

Alkali- und Erdalkalimetalle gelangen nahezu vollständig in Filter- und Bettasche (s. **Tab. 6.8-5**). Die einzig gefundenen Schwermetalle sind Mangan und Zink, welche vollständig in die Aschen gelangen.

Tab. 6.8-5: Stoffflussanalyse der Alkali, Erdalkali- und Schwermetalle

Einsatzstoff: Switchgras					
	Eingang		Ausgang		
		[%]		[%]	
Calcium	Brennstoff	13,78	Filterasche	59,64	
	Sand	0,03	Bettasche	39,50	
	Kalk	86,19	Kondensat	Wasseranteil	0,00
				Teeranteil	0,87
			Synthesegas	0,00	
Kalium	Brennstoff	99,95	Filterasche	92,33	
	Sand	0,01	Bettasche	7,47	
	Kalk	0,04	Kondensat	Wasseranteil	0,00
				Teeranteil	0,20
			Synthesegas	0,00	
Magnesium	Brennstoff	24,31	Filterasche	56,49	
	Sand	0,01	Bettasche	43,32	
	Kalk	75,67	Kondensat	Wasseranteil	0,00
				Teeranteil	0,20
			Synthesegas	0,00	
Mangan	Brennstoff	98,31	Filterasche	88,64	
	Sand	0,00	Bettasche	11,36	
	Kalk	1,69	Kondensat	Wasseranteil	0,00
				Teeranteil	0,00
			Synthesegas	0,00	
Natrium	Brennstoff	87,34	Filterasche	82,24	
	Sand	0,64	Bettasche	11,74	
	Kalk	12,02	Kondensat	Wasseranteil	0,00
				Teeranteil	6,01
			Synthesegas	0,00	
Zink	Brennstoff	100,00	Filterasche	88,39	
	Sand	0,00	Bettasche	11,61	
	Kalk	0,00	Kondensat	Wasseranteil	0,00
				Teeranteil	0,00
			Synthesegas	0,00	

Dass Calcium, Kalium, Magnesium und Natrium sich in geringsten Anteilen im Kondensat (ausschließlich im Teeranteil) wiederfinden, wird der Tatsache geschuldet sein, dass bei der Kondensatprobennahme Flugkoks mit abgesaugt wird und in die Probennahmeapparatur gelangt und die Ergebnisse somit leicht verfälscht. In den Kondensatfallen werden dann die Metalle aus den Aschen gelöst und bei der Analyse dort gefunden. Es ist eher unwahrscheinlich, dass es sich um dampf- oder gasförmige metallhaltige Bestandteile handelt. Insgesamt gesehen sind die Anteile am Gesamtstrom gemessen äußerst gering. Der eindeutige Verbleib aller gefundenen Metalle liegt in den Aschen!

6.8.4 Enthalpiebilanz

Vergleich Vergasungstemperaturen

Gegenübergestellt werden sollen zwei Versuchspunkte, bei denen derselbe Einsatzstoff bei deutlich unterschiedlichen Temperaturen genutzt wurde. Bei der Vergasung von Switchgras wurde sowohl ein Versuchspunkt mit niedrigen 750°C als auch einer mit vergleichsweise hohen 830°C angefahren (s. **Abb. 6.8-19**).

Die höhere Temperatur wurde durch weniger Dampf und eine höhere Sauerstoffzugabe erreicht. Dampf geht mit etwa 400°C in die Wirbelschicht und wirkt entsprechend kühlend auf den Vergasungsprozess.

Ausgangsseitig bewirkte eine höhere Vergasungstemperatur weniger Teer und etwas weniger Wasser, höhere Verluste und weniger Enthalpie in der Filterasche.

Die höheren Temperaturen führten zu einer besseren Umsetzung der Biomasse in Synthesegas mit entsprechend niedrigeren Teergehalten. Der Kohlenstoffumsatzgrad liegt bei dem Versuchspunkt mit niedriger Temperatur bei 84 % und bei der höheren Temperatur bei 90 %.

Der Ausbrand war deutlich besser, was sich im signifikant niedrigeren Kohlenstoffgehalt in der Filterasche widerspiegelte. Bei 750°C enthielt die Filterasche 46 % Kohlenstoff, bei 830°C waren es nur noch 27,5 %. Entsprechend deutlich niedriger ist auch der über die Filterasche ausgetragene chemische Enthalpiestrom.

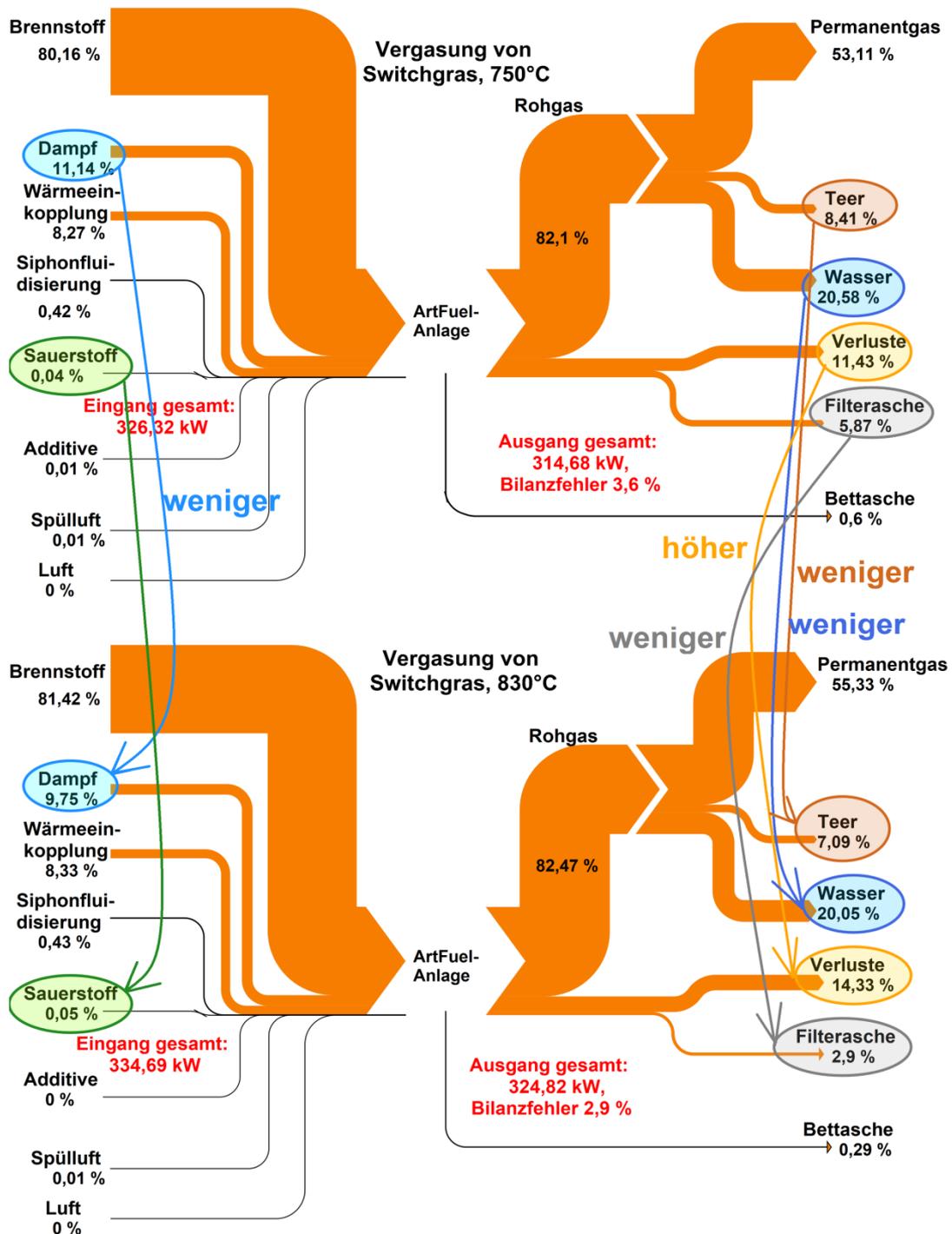


Abb. 6.8-19: Vergleich Enthalpiebilanz bei niedriger (oben, 750°C) und hoher (unten, 830°C) Vergasungstemperatur

Vergleich Sauerstoff-/Luftvergasung - Vergasungsmedium

Gärreste wurden bei gleichen Temperaturen einer Sauerstoff-/Dampf- und einer Luftvergasung unterzogen. Bei der Sauerstoff-/Dampfvergasung fungiert der Dampf als Fluidisations- und Sauerstoff als Reaktionsmedium. Bei einer Luftvergasung werden beide durch Luft ersetzt. Luft wird gleichzeitig sowohl zum Aufwirbeln des Reaktions- und Bettmaterials als auch als Reaktionsmedium genutzt.

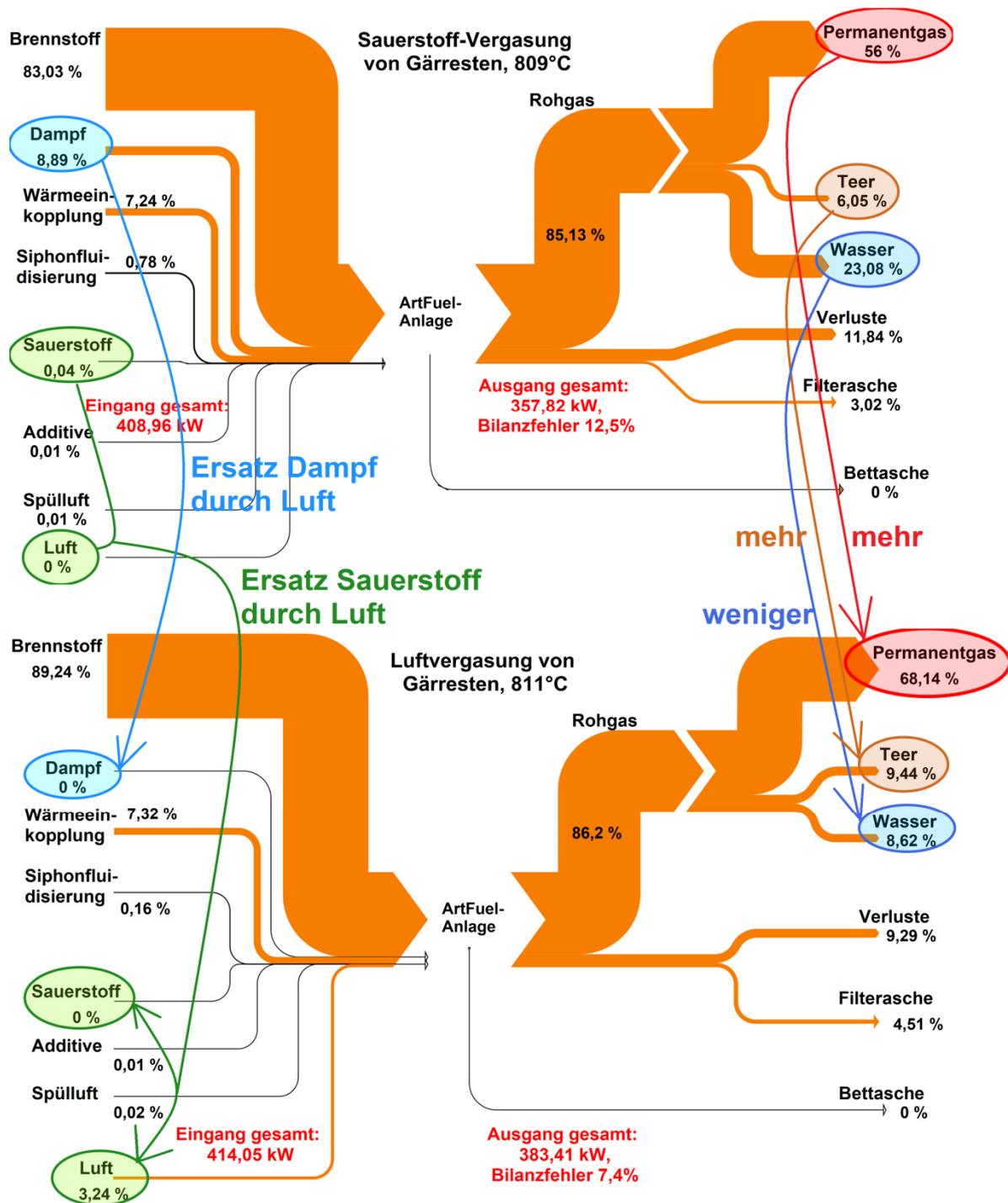


Abb. 6.8-20: Vergleich Enthalpiebilanz Sauerstoff-/Dampfvergasung und Luftvergasung

Eingangsseitig macht sich erwartungsgemäß der Ersatz von Dampf und Sauerstoff durch Luft bemerkbar.

Auf der Ausgangsseite fällt der deutlich höhere Anteil an Permanentgas auf. Bei der Sauerstoffvergasung liegt der Wert bei 56 % und bei der Luftvergasung bei über 68 %. Der Grund liegt im Vergasungsmedium. Durch die Zugabe von Luft wird eine große Menge inerten Stickstoffs in das System eingetragen. Dieses gelangt in das Synthesegas.

Tab. 6.8-6: Vergleich Sauerstoff-/Dampf-Vergasung und Luftvergasung

Vergasungsmedium		Dampf/O ₂	Luft
Massenstrom Permanentgas	[kg/h]	82,0	187,0
N ₂ -Gehalt PG	[Vol.%]	4,9	52,6
Heizwert PG	[kJ/kg]	7036,0	3736,0

Bei ähnlicher thermischer Leistung wurde bei der Luftvergasung deutlich mehr Permanentgas erzeugt. Der Stickstoffgehalt lag bei der Sauerstoffvergasung im Permanentgas bei unter 5 Vol.% und bei der Luftvergasung bei deutlich über 50 Vol.%. Der Heizwert des Permanentgases halbierte sich dabei nahezu von 7.036 kJ/kg auf 3.736 kJ/kg.

Der deutlich niedrigere Wasseranteil im Ausgang lässt sich dadurch erklären, dass als Fludisationsmedium kein Dampf hinzugegeben wurde. Auf der Ausgangsseite fehlt dann dieser Massenstrom an Wasser.

6.8.5 Ascheerweichung

Mittels Aufnahmen durch ein Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) wurden anfallende Filteraschen begutachtet. Festgestellt werden sollte, ab welchen Temperaturen erste Sintererscheinungen auftreten und es für einen Vergasungsprozess der entsprechenden Biomasse kritisch werden könnte.

Stroh

Untersucht wurden Aschen aus der Strohvergasung aus Versuchen bei bis zu 811°C.

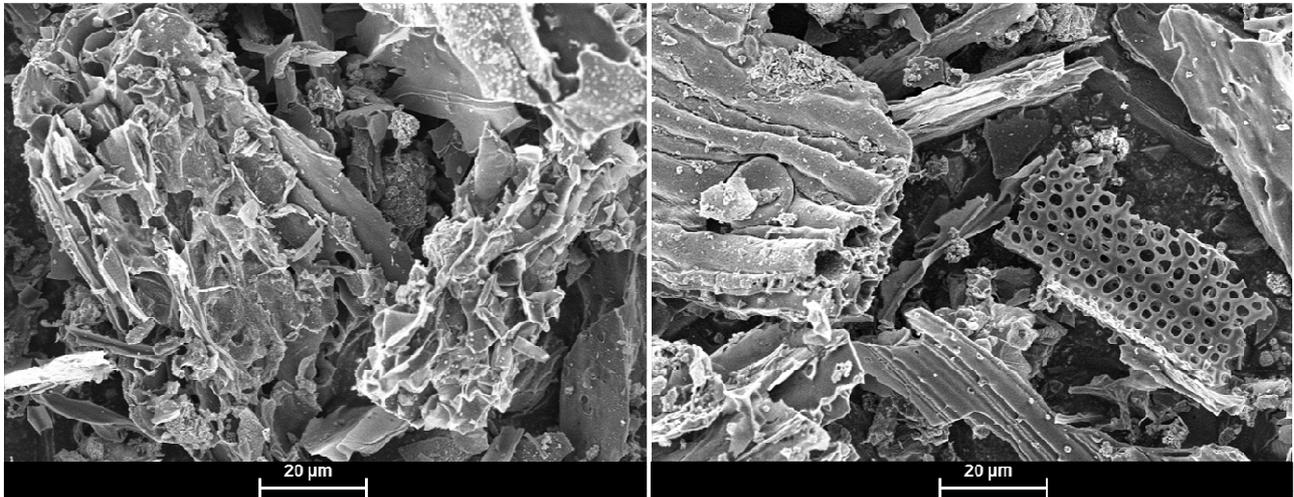


Abb. 6.8-21: REM-Aufnahmen von Filterasche aus der Strohvergasung, links 790°C, rechts 811°C

Die ursprüngliche Halmstruktur ist bei den Aschen aus den Versuchen mit 811°C noch zu erkennen. Sinter- oder Erweichungsvorgänge sind nicht zu sehen (s. **Abb. 6.8-21**).

Switchgras

Switchgras wurde in den Versuchen bei bis zu 811°C vergast.

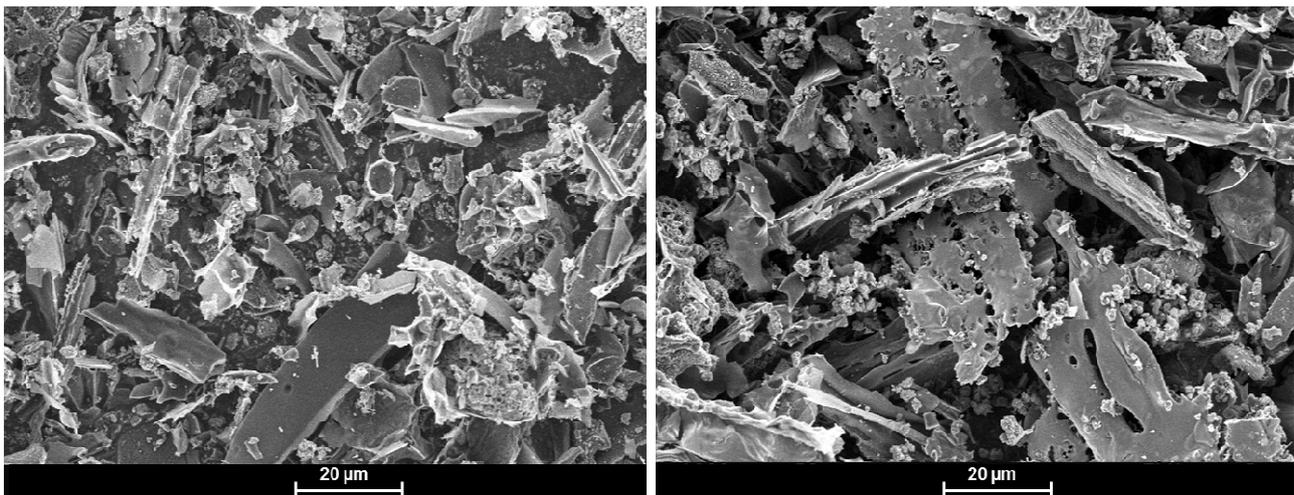


Abb. 6.8-22: REM-Aufnahmen von Filteraschen aus Vergasungsversuchen mit Switchgras bei 750°C (links) und 811°C (rechts)

Wie bei den Versuchen zur Strohvergasung ist bis 811°C die ursprüngliche Halmstruktur in den Filteraschen zu erkennen. Sinter- oder Erweichungsvorgänge fanden nicht statt (s. **Abb. 6.8-22**).

Gärreste

Gärreste wurden in der ArtFuel-Anlage bei bis zu 838°C vergast.

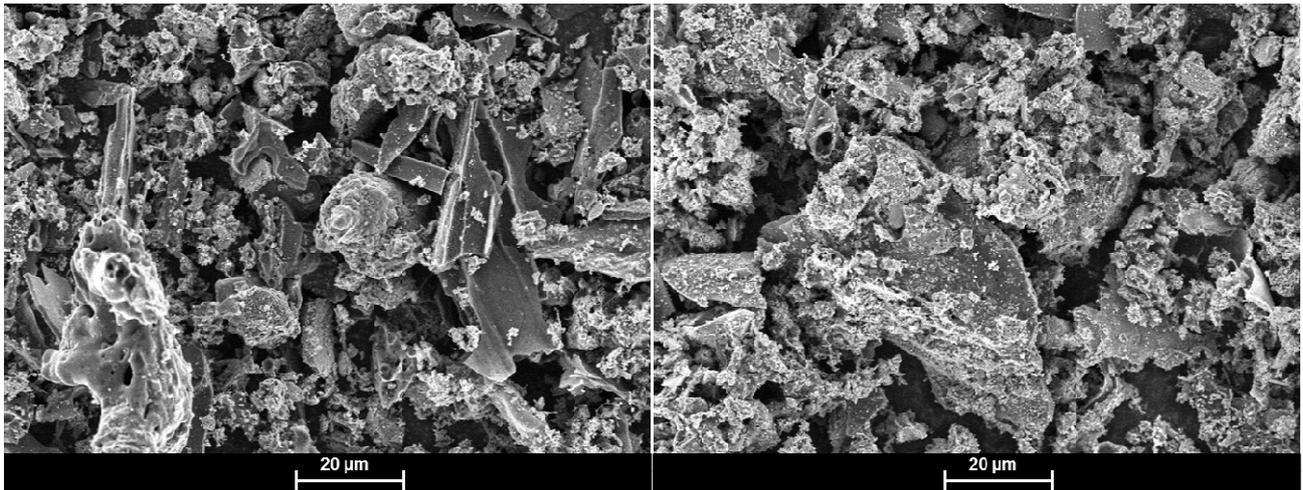


Abb. 6.8-23: REM-Aufnahmen der Filteraschen aus Versuchen zur Vergasung von Gärresten bei 747°C (links) und 838°C (rechts)

An den Filteraschen aus Gärresten sind erste leichte Sintererscheinungen bei den bei 838°C gelaufenen Versuchen erkennbar. In Betrieb erwies sich die gefahrene Temperatur jedoch noch unproblematisch (s. **Abb. 6.8-23**).

6.8.6 Simulierte Destillation

Zusätzlich zu der Teermessung wurden vier Kondensatproben mittels Simulierter Destillation analysiert. Die Simulierte Destillation erfolgt in einem Gas-Chromatographen. Die Probe wird dabei von einem Trägergasstrom in eine beheizte Säule geleitet und verdampft. Die einzelnen Komponenten verbleiben je nach ihrer Struktur unterschiedlich lang auf der Oberfläche dieser Säule. Es erfolgt eine Aufteilung der Probenkomponenten nach ihren Siedetemperaturen. Je später nun eine Komponente den Ausgang der Säule erreicht und dort detektiert wird, desto höher ist ihre Siedetemperatur. Der Detektor gibt ein Chromatogramm aus. Aus der Fläche unter dem entsprechenden Ausschlag (Peak) kann auf die Häufigkeit der entsprechenden Komponente in der Probe geschlossen werden. Die Komponenten können verschiedenen Siedebereichen zugeordnet werden. Die erhaltenen Siedelinien geben Aufschluss darüber, wie viel nieder- oder höhersiedende Teerkomponenten in der Probe vorhanden sind.

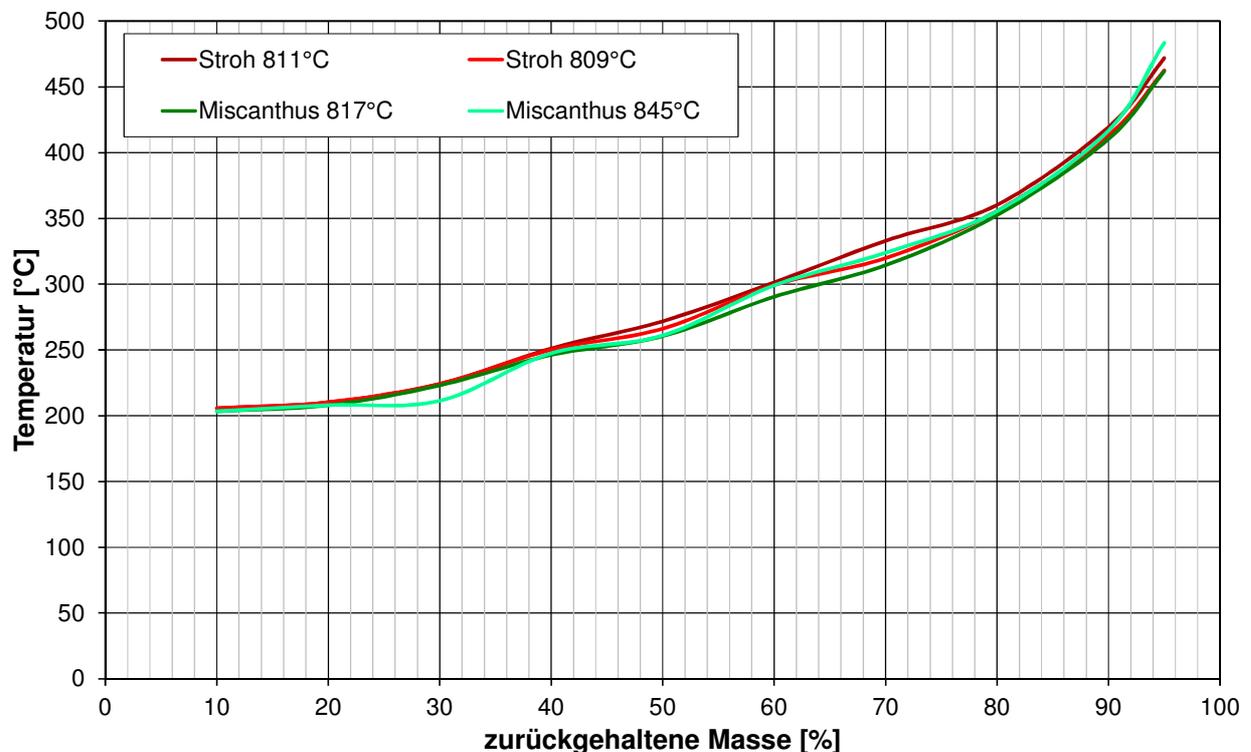


Abb. 6.8-24: Siedelinien von vier Kondensatproben

Die Siedelinien der untersuchten Teerproben liegen eng beieinander. Unterschiede zwischen den halmgutartigen Biomassen Stroh und Miscanthus sind nicht auszumachen. Auch unterschiedliche Vergasungstemperaturen im Bereich von 809 bis 845 °C haben demnach keine Auswirkungen auf die Siedeeigenschaften der entstehenden Teere (s. **Abb. 6.8-24**).

Deutlich abweichende Kurven lieferten ältere Teeranalysen. Hier lagen die Siedelinien unter den aktuell gemessenen.

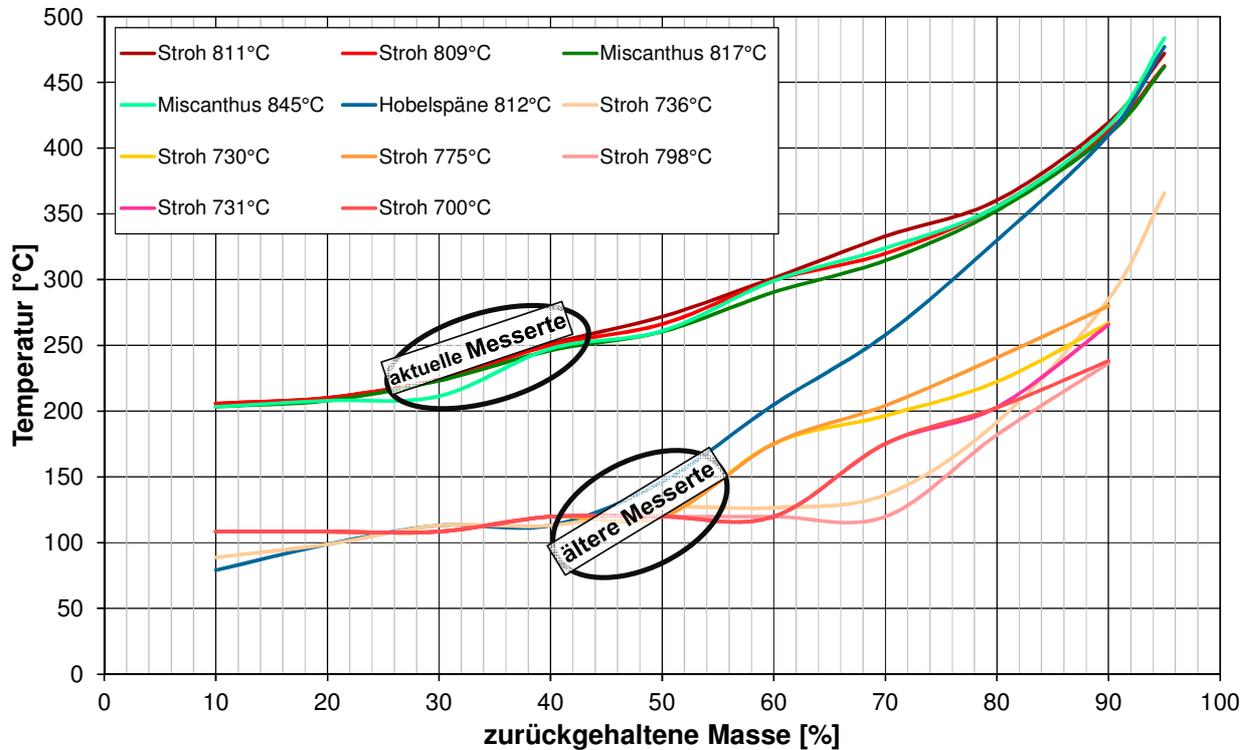


Abb. 6.8-25: Vergleich verschiedener Siedelinien, aktuelle und ältere Messungen

Jedoch ist auch hier keine Temperaturabhängigkeit zu erkennen (s. **Abb. 6.8-25**).

Unter den älteren Messwerten fällt die blaue Linie aus der Holzvergasung auf (Versuchspunkt mit Hobelspänen, Vergasungstemperatur 812°C). Im Vergleich zu den damaligen Versuchen mit Stroh, welche tendenziell ähnliche Tendenzen aufweisen, steigt diese Linie prägnant stärker an. Die Stroh-Linien verlaufen flacher. Das bedeutet, dass die Kondensate aus der Strohvergasung deutlich mehr höhersiedende Komponenten enthalten als das Kondensat aus der Holzvergasung.

Unter den älteren Messungen fällt die Varianz im oberen Bereich auf. Bei den aktuellen Analysen liegen die Kurven sehr eng beieinander, was vermutlich auf den inzwischen deutlich stabiler laufenden Vergasungsbetrieb zurückzuführen sein wird.

Zur Interpretation der Siedelinien im Jahresvergleich werden exemplarisch für zwei Einstellungen (Stroh, 811°C-blau und Switchgras, 808°C-schwarz) die Ergebnisse der GCMS-Analysen hinzugezogen (siehe folgende **Abb. 6.8-26**).

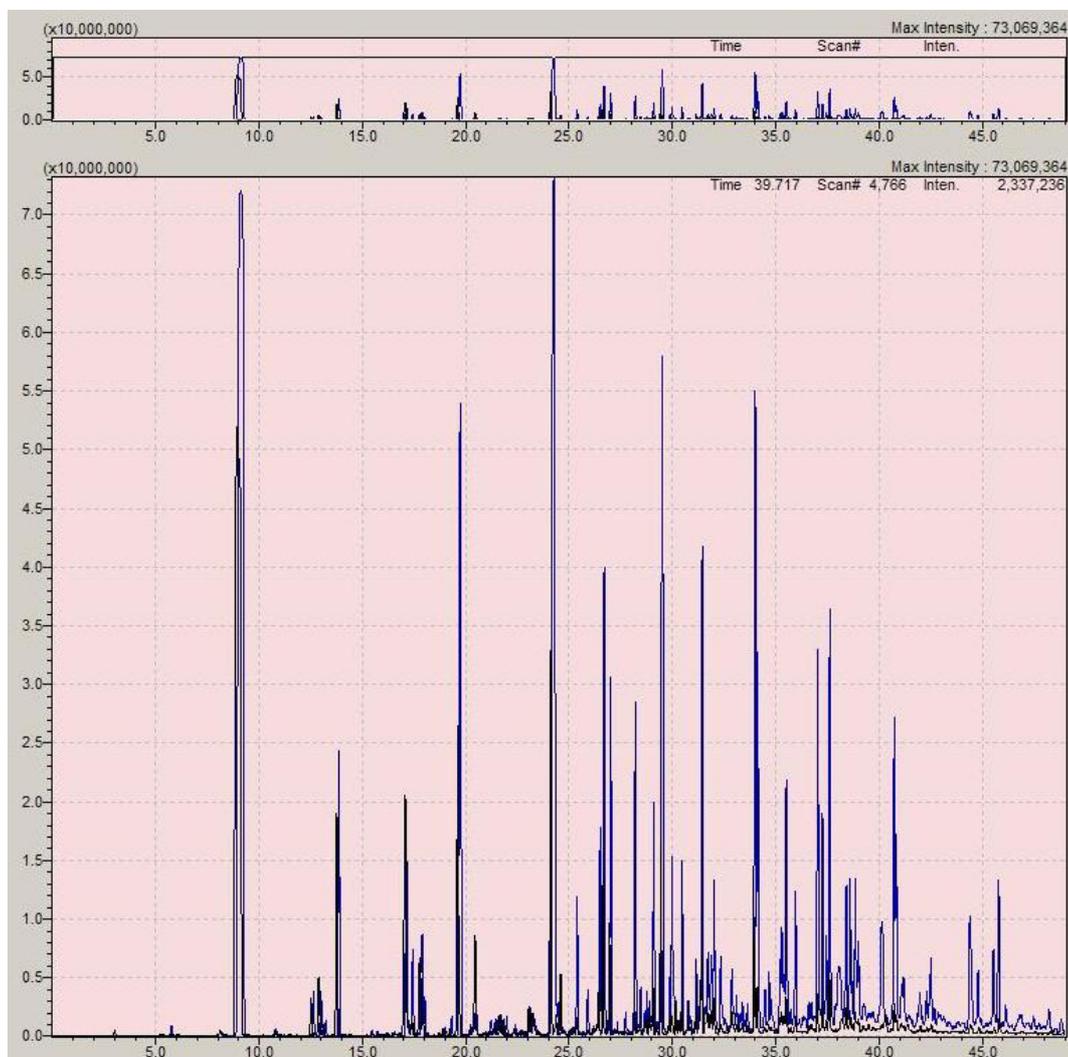


Abb. 6.8-26: GCMS-Ausdruck der Teerproben Stroh (blau) und Switchgras (schwarz)

Besonders im Bereich bis 30 Minuten liegen die beiden Graphen deutlich übereinander (folgende **Abb. 6.8-27**), was auf dieselben Komponenten im niedriger siedenden Bereich im Teer hinweist. Im Bereich höhersiedender Komponenten und Retentionszeiten zeigt sich eine Abweichung der Linien (s. **Abb. 6.8-28**). Die Versuchseinstellung mit Stroh weist deutlich mehr höhersiedende Komponenten auf. Hierin begründet liegt auch teilweise die Verschiebung der Summenkurve in **Abb. 6.8-25** für die Versuche aus 2012.

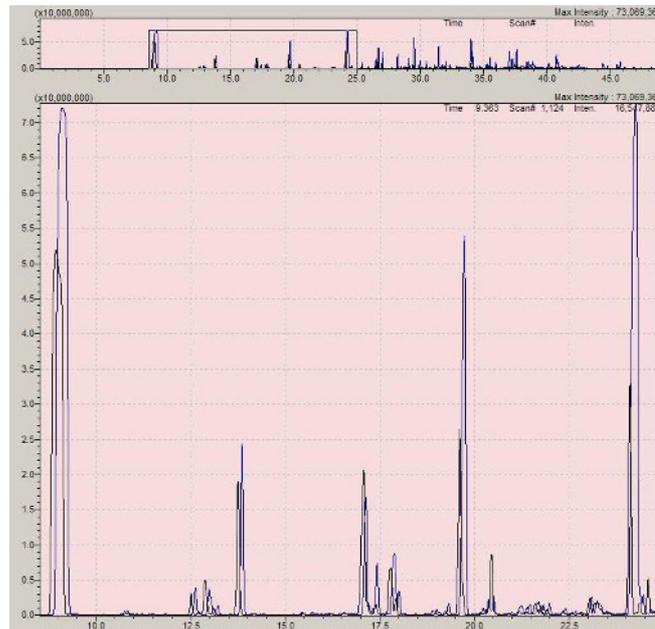


Abb. 6.8-27: GCMS-Ausdruck der Teerproben Stroh (blau) und Switchgras (schwarz), niedriger siedende Teercomponenten, Retentionszeit 8 bis 25 Minuten

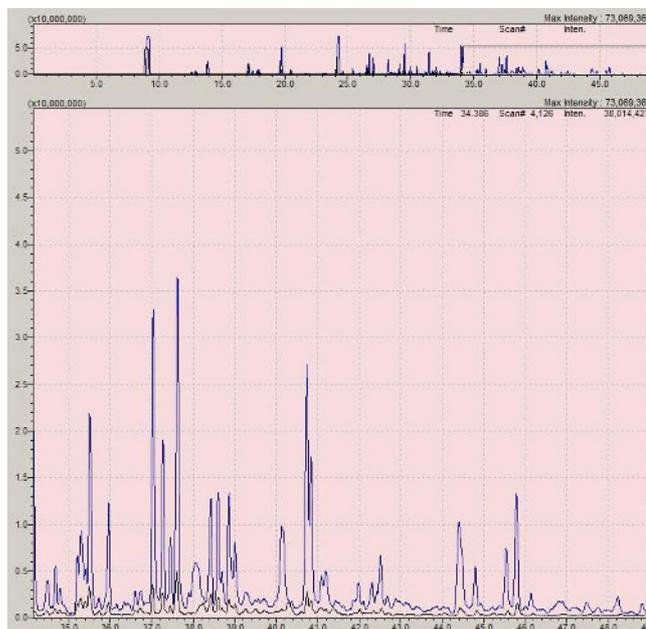


Abb. 6.8-28: GCMS-Ausdruck der Teerproben Stroh (blau) und Switchgras (schwarz), höher siedende Teercomponenten, Retentionszeiten 34 bis 49 Minuten

Zusammenfassend lässt sich eine Veränderung der Teere über die Betriebsjahre der Wirbelschicht feststellen. Die Spreizung der Siedelinien ist inzwischen unabhängig von Einsatzstoff und Vergasungstemperatur gering, was wahrscheinlich auf die deutlich verbesserte Zirkulation im Betrieb zurückgeführt werden kann.

6.9 Wirbelschichtverbrennung: Emissionen und Bilanzierung

Für Biomassen mit einer Korngröße, die für die Verbrennung auf dem Rost zu fein und für die Verbrennung in einer Staubfeuerung zu grob sind, ist die Wirbelschichtverbrennung empfehlenswert.

Die Verbrennung der Einsatzstoffe erfolgt in einem fluidisierten Feststoffbett. In Abhängigkeit von der Fluidisierungsgeschwindigkeit werden stationäre (SWSF) und zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen (ZWSF) unterschieden. Im Gegensatz zur SWSF erfolgt bei der ZWSF ein Austrag von Partikeln, die von einem Zyklon abgeschieden und der Brennkammer wieder zugeführt werden. Im Rahmen des Projektes wurde das Verbrennungsverhalten verschiedener Biomassen in einer 300 kW ZWSF untersucht.

Ziel der Untersuchungen

Es wurde der Einfluss der brennstofftechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Biomassen auf das Verbrennungsverhalten in einer ZWSF untersucht werden. Der Schwerpunkt der Versuche lag dabei auf dem Einfluss des Brennstoff-S- und -N-Gehaltes auf die Schadstoffemissionen SO_2 und NO_x .

Untersuchungsmethodik

Die in **Abb. 6.9-1** schematisch dargestellte ZWSF Versuchsanlage besteht aus einer 13 m hohen Brennkammer (BK) mit einem Innendurchmesser von 320 mm und einer thermischen Leistung von 300 kW_{therm}. Als Bettmaterial wurde Quarzsand mit einem mittleren Durchmesser von 320 µm verwendet. Das ausgetragene Bett- und Aschematerial wird im Zyklon 1 abgeschieden und über ein Fallrohr einem Fließbettkühler (FBK) zugeführt. Um das Bettmaterial der BK wieder zuzugeben, wird dieser mit Luft fluidisiert. Die noch im Abgas befindlichen Partikel werden vom Zyklon 2 und einem Gewebefilter abgeschieden. Die Hauptverbrennungsluftmenge wird über den Düsenboden (DB) zugeführt. Zur Beeinflussung der Prozessführung kann eine Zugabe von Sekundärluft in drei Höhen (S1-S3) erfolgen. Zur Charakterisierung der Verbrennung sind in verschiedenen Höhen im Reaktor Thermolemente und Drucksensoren installiert. Die Abgaszusammensetzung wird am Austritt der Brennkammer hinter dem Zyklon 1 erfasst.

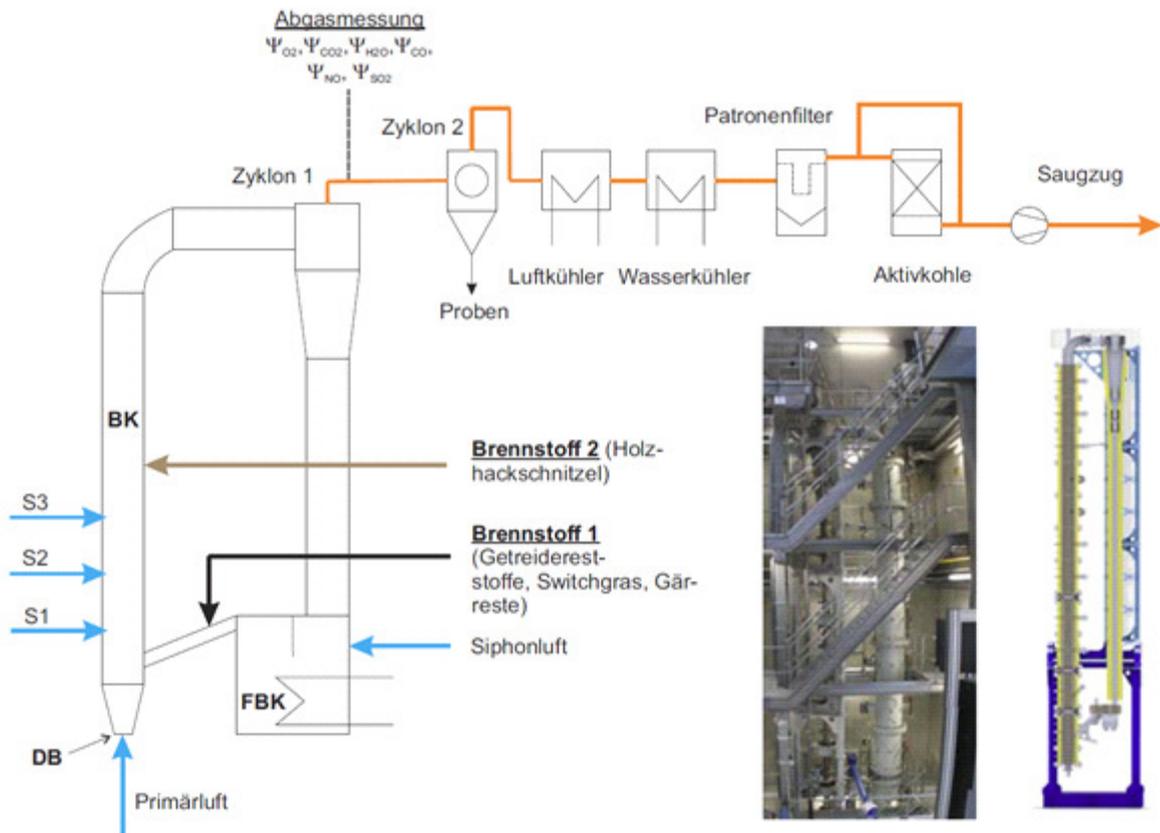


Abb. 6.9-1: Schematische Darstellung ZWSF-Versuchsanlage.

Die Ergebnisse der Brennstoffanalyse der Einsatzstoffe sind in Anhang 14.8 (Tabelle 2) zusammengefasst. Vor dem Hintergrund der SO_2 - und der NO_x -Emissionen sind vor allem der Brennstoff-S- und Brennstoff-N-Gehalt von Bedeutung. Der höchste Schwefelgehalt ist in den Gärresten enthalten. Den höchsten Stickstoffgehalt besitzen die Getreidereststoffe. Bei den Gärresten waren daher die höchsten SO_2 -Konzentrationen und bei den Getreidereststoffen die höchsten NO_x -Konzentrationen im Abgas zu erwarten.

Die Erweichungstemperaturen aller vier Brennstoffe liegen oberhalb des Arbeitsbereichs der ZWSF (800 - 900 °C), so dass von einem niedrigen Verschlackungsrisiko auszugehen war. Die mittlere Korngröße nimmt in der Reihenfolge Holzhackschnitzel, Getreidereststoffe, Gärreste und Switchgras ab. Darüber hinaus ist die minimale Partikelgröße der Getreidereststoffe, Gärreste und des Switchgrases kleiner als die der Holzhackschnitzel.

Für die Versuche wurde eine einstufige Prozessführung gewählt (keine Luftstufung), d.h. die gesamte Verbrennungsluft wurde unter Variation der Menge der Brennkammer über DB zugegeben. Die Brennstoffdosierung der Getreidereststoffe, des Switchgrases und der Gärreste erfolgte in die dichte Zone der Wirbelschicht oberhalb des Düsenbodens. Aus verfahrens- und apparatetechnischen Gründen erfolgte die Zufuhr der Holzhackschnitzel ca. in der Mitte der Brennkammer in die dünne Zone der Wirbelschicht.

Untersuchungsergebnisse

Zur Bewertung des Verbrennungsverhaltens wurden die Mittelwerte der im Abgas** gemessenen und auf 6 Vol.-% Restsauerstoff bezogenen CO-, SO₂- und NO_x-Konzentrationen heran gezogen.

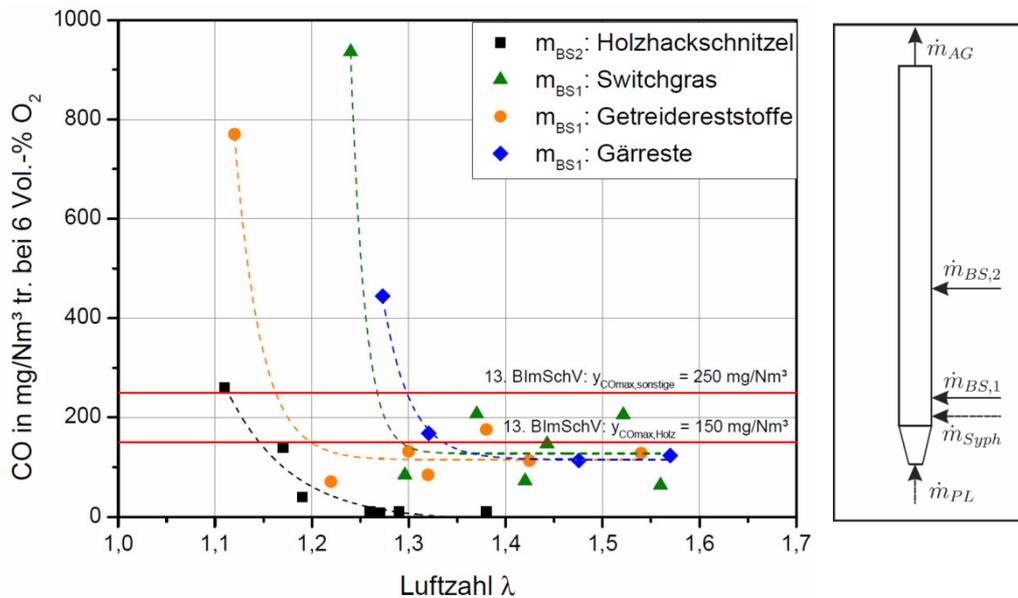


Abb. 6.9-2: CO-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftzahl λ

In **Abb. 6.9-2** ist der CO-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von der Luftzahl für die vier Brennstoffe dargestellt. Dabei nimmt erwartungsgemäß der CO-Gehalt mit abnehmender Verbrennungsluftmenge (Luftzahl) zu. Die niedrigsten CO-Gehalte wurden beim Einsatz des Referenzbrennstoffes gemessen. Es ist zu bemerken, dass eine Verbesserung des Ausbrandes und eine damit verbundene Senkung des CO-Gehaltes durch die Zugabe von Sekundärluft zu erreichen ist.

Eine Ursache für die höheren CO-Gehalte im Abgas beim Einsatz von Switchgras, Getreidereststoffen und Gärresten ist wahrscheinlich deren geringere Partikelgröße (siehe Anhang 14.8). Es erfolgt ein Partikelaustrag aus der Brennkammer bevor diese vollständig ausgebrannt sind. Dies führt zu einer Anreicherung von Kokspartikeln im Umlaufmaterial und damit einem erhöhten Luftbedarf. Die Zugabe von Sekundärluft würde zwar den Gasphasenausbrand verbessern (CO-Gehalt senken), in Abhängigkeit von der Verweilzeit könnten trotzdem unvollständig ausgebrannte Partikel ausgetragen werden. Hier müsste eine weitere Optimierung bezgl. Verweilzeit und Luftstufung erfolgen.

** Alle dargestellten Abgaskonzentrationen sind Rohgaskonzentrationen, die nach dem Zyklon gemessen wurden.

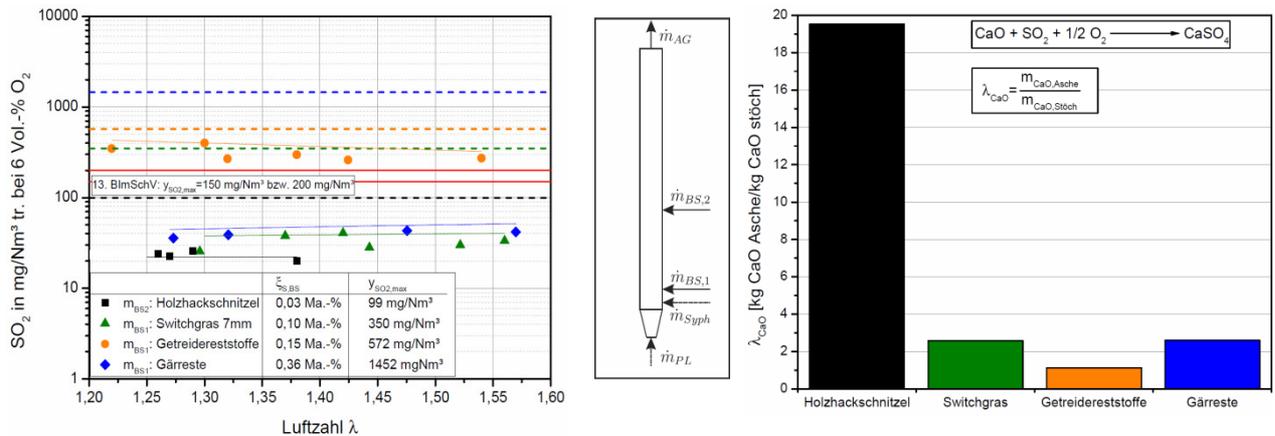


Abb. 6.9-3: SO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftzahl λ (links) und Verhältnis CaO-Gehalt in der Brennstoffasche zum stöchiometrischen Bedarf für die SO₂-Einbindung (rechts)

Wie **Abb. 6.9-3** (links) zeigt, sind die SO₂-Gehalte im Abgas bei den eingesetzten Biomassebrennstoffen, mit Ausnahme der Getreidereststoffe, geringer als 100 mg/Nm³. Der niedrigste SO₂-Gehalt wurde beim Einsatz von Holzhackschnitzeln festgestellt. Eine signifikante Abhängigkeit des SO₂-Gehaltes von der Luftzahl ist nicht feststellbar. Die SO₂-Gehalte im Abgas aller untersuchten Biomassen unterschreiten den theoretisch maximal möglichen SO₂-Gehalt (gestrichelte Linien SO_{2,max}). Besonders deutlich wird dies bei den Gärresten, die den höchsten Schwefelgehalt im Brennstoff aufweisen. Dieser Effekt ist wahrscheinlich auf die Selbstentschwefelung aufgrund des in der Brennstoffasche enthaltenen Calciumoxids CaO zurückzuführen. Das in **Abb. 6.9-3** (rechts) dargestellte Verhältnis des mit der Brennstoffasche zugeführten CaO zum für die Entschwefelung notwendigen stöchiometrischen CaO-Bedarf unterstützt diese Hypothese. Es zeigt einen CaO-Überschuss bei allen eingesetzten Brennstoffen. Der niedrigste CaO-Überschuss liegt bei den Getreidereststoffen vor. Darüber hinaus ergab die Analyse von zurückgeführtem Umlaufmaterial eine Anreicherung von Calcium und Schwefel. Dieses Ergebnis ist ein weiteres Indiz für den Effekt der Selbstentschwefelung.

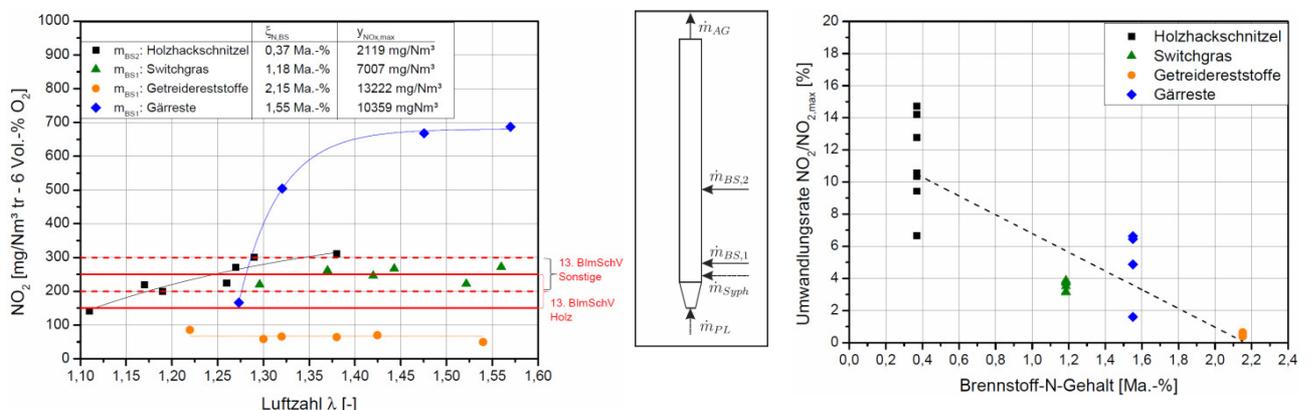


Abb. 6.9-4: NO_x-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftzahl λ (links) und Umwandlungsrate Brennstoff-N zu NO_x (rechts)

In **Abb. 6.9-4** (links) ist der NO_x -Gehalt im Abgas (gemessen als NO, angegeben als NO_2) in Abhängigkeit von der Luftzahl für die vier Brennstoffe dargestellt. Entgegen der Erwartung werden bei den Getreidereststoffen, die den höchsten Brennstoff-N-Gehalt besitzen, nicht die höchsten, sondern die niedrigsten NO_x -Gehalte gemessen. Die höchsten NO_x -Gehalte im Abgas treten bei den Gärresten auf, die den zweithöchsten Brennstoff-N-Gehalt aufweisen. Darüber hinaus ist für Gärreste und Holzhackschnitzel eine signifikante Abhängigkeit von der Luftzahl erkennbar. Es gilt der bekannte Zusammenhang, wonach (lokaler) Sauerstoffmangel die CO-Bildung begünstigt und unter diesen Bedingungen gebildetes NO zu N_2 reduziert wird. Die im Verhältnis zum Brennstoff-N-Gehalt niedrigen NO_x -Gehalte bei den Getreidereststoffen und dem Switchgras sind auf die komplexen Reaktionen der NO-Bildung und NO-Minderung in Kombination mit den Prozessbedingungen (Haupteinflussgrößen) zurückzuführen. Möglicherweise begünstigt die oben beschriebene Anreicherung von Kokspartikeln im Umlaufmaterial die NO-Reduktion ($NO+CO \rightarrow \frac{1}{2} N_2+CO_2$).

In Abb. 6.9-4 (rechts) wird weiterhin deutlich, dass der im Brennstoff enthaltene Stickstoff nur zu einem bestimmten Teil zu NO_x umgewandelt wird. Das Massenverhältnis von tatsächlich gebildeten NO_x zum theoretisch maximal möglichen $NO_{x,max}$ (Umwandlung des gesamten Brennstoff-N zu NO_2) wird als Umwandlungsrate bezeichnet. Demnach nimmt die Umwandlungsrate mit steigendem Brennstoff-N-Gehalt ab^{††}. Dieser Zusammenhang wurde bereits für Kohle, Öl und Gas umfassend festgestellt (z.B. [25]). Im Vergleich zu diesen fossilen Brennstoffen sind die Umwandlungsraten der untersuchten Biomassen jedoch deutlich geringer.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zur Untersuchung des Einflusses der brennstofftechnischen Brennstoffeigenschaften auf das Verbrennungsverhalten von Holzhackschnitzeln (Referenzbrennstoff), Getreidereststoffen, Switchgras und Gärresten wurden experimentelle Untersuchungen in einer 300 kW zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung bei einstufiger Prozessführung (ohne Luftstufung) durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Für alle Einsatzstoffe konnte ein stabiler Dauerbetrieb der Versuchsanlage realisiert werden.
- Die niedrigsten CO-Konzentrationen im Abgas wurden für Holzhackschnitzel erreicht, wobei erwartungsgemäß eine Abnahme mit zunehmender Luftzahl festgestellt wurde. Beim Einsatz von Getreidereststoffen, Switchgras und Gärresten wurden im Vergleich höhere CO-Konzentrationen gemessen. Eine Verbesserung des CO-Ausbrandes kann durch zusätzliche Sekundärluft erreicht werden.
- Eine Zunahme des Brennstoff-N- und -S-Gehaltes führt nicht zwangsläufig zu einer Erhöhung der NO_x - und SO_2 -Emissionen. Die Ursachen sind v. a. in der prozessinternen Gasreinigung in der ZWSF zu suchen (NO_x -Reduktion an zirkulierendem, unvollständig ausgebranntem Koks; in situ SO_2 -Abscheidung an Ca-haltigen Aschebestandteilen)

^{††} Der Schwankungsbereich bei den Holzhackschnitzeln und den Gärresten ist auf den Einfluss der Luftzahl zurückzuführen

In Bezug auf die Brennstoffflexibilität kann geschlussfolgert werden, dass die ZWSF für vielfältige Einsatzstoffe sehr gut geeignet ist. Hervorzuheben sind vor allem die vergleichsweise niedrigen Schadstoffemissionen. Neben der aufgeführten prozessinternen Schadstoffminderung besteht zusätzlich die Möglichkeit Additive (z. B. Kalk) dem Prozess zuzuführen, um eine weitere Schadstoffminderung zu erreichen und damit den Aufwand für eine nachgeschaltete Gasreinigung zu reduzieren. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen Feuerraumtemperaturen (ca. 800-950 °C) ist auch der Einsatz von Brennstoffen möglich, die niedrigere Ascheschmelztemperaturen aufweisen als Holz. Zusätzlich können Additive zur Minderung des Verschlackungsrisikos zugeführt werden.

6.10 Rostverbrennung: Emissionen und Bilanzierung

Für die prozesstechnische Bewertung bei Rostfeuerungsanlagen wurden vier Biomassen anhand der Ergebnisse aus den AP 2 und 4 ausgewählt und auf einem Vorschubrost mit einer thermischen Leistung von 100 kW hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit in industriellen Prozessen und insbesondere dem Emissionsverhalten und der damit verbundenen Investitions- und Betriebskosten untersucht.

Um das Verhalten der Biomassen auf dem Rost vergleichend bewerten zu können, wurde als Referenzbrennstoff Holzhackschnitzel eingesetzt. Bei den Versuchen mit Switchgras, Getreidereststoffen und Gärresten kam es zur Verschlackung der gesamten Rostoberfläche. Die Versuche mit dem Referenzbrennstoff Holzhackschnitzel (HHS) und Pappelholz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) zeigten ein demgegenüber „gutmütiges Verhalten“ der Brennstoffe im Feuerraum, Verschlackungserscheinungen wurden nicht beobachtet.

Bezüglich des Emissionsverhaltens war die Staubfracht bei den alternativen Brennstoffen im Vergleich zum Referenzbrennstoff erhöht.

Der Betrieb von Anlagen < 1 MW bis 50 MW wird von der TA Luft geregelt. Da die Versuche an einer 100 kW-Hackschnitzelfeuerung durchgeführt wurden, werden neben der 1. BImSchV auch die Grenzwerte der TA Luft hinzugezogen. Anlagen mit einer thermischen Leistung > 50 MW und dem Einsatz von Althölzern der Klasse A IV unterliegen den Anforderungen der IED (ehemals 17. BImSchV). Mit der Einführung des EEG von 2000 wurden viele Anlagen mit einer thermischen Gesamtleistung > 50 MW errichtet, um die maximale Vergütung für den Stromverkauf zu erzielen. Werden in diesen Anlagen Althölzer der Klasse A IV eingesetzt, dann sind die Anlagen nach 17. BImSchV auszulegen und liegen damit hinsichtlich der Abscheidungsleistung von Schadstoffen, die aus dem Einsatz eines weit gestreuten Brennstoffbandes stammen können, „auf der sicheren Seite“.

Die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse sind an dem 100 kW Vorschubrost der Firma HDG [26] ermittelt worden.

Die in der Anlage untersuchten Brennstoffe sind in der nachfolgenden **Tab. 6.10-1** kurz charakterisiert.

Tab. 6.10-1: Untersuchte Brennstoffe [27]

Bezeichnung	Abbildung	Beschreibung
Holz hackschnitzel (HHS) aus Nadel- und Laubhölzern		Referenzbrennstoff G30 Hackschnitzel
Holzpellets		Referenzbrennstoff Pellets, hohe Festigkeit
Energiegras/Switchgras Saarland 2009/2010		Halmartige Pellets, mittlere Festigkeit
Pappel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)		Holzartige Biomasse Sehr grobe Hackschnitzel
Gärreste aus Biogasanlagen		Reste aus anaerober Zersetzung Pellets, hohe Festigkeit
Getreidereststoffe		Reste aus landwirtsch. Produktion Pellets, geringe Festigkeit

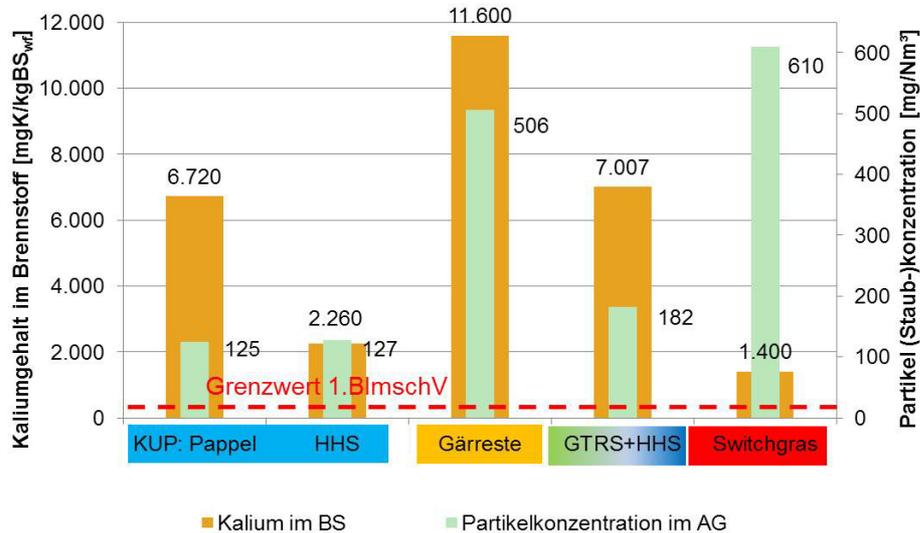
Zur besseren Handhabung liegen die Brennstoffe in Form von Pellets bzw. als Holz hackschnitzel vor. Das Pelletieren der Brennstoffe ermöglicht ein Höchstmaß an Homogenität bezüglich der physikalisch-mechanischen Eigenschaften. Es kann eine hohe volumetrische Energiedichte erzielt werden, die Fließ- und Dosiereigenschaften werden günstig beeinflusst und es kommt zu einer geringeren Staubentwicklung. Der Nachteil des Pelletierens sind jedoch die hohen Produktionskosten, die vor allem mit der Zerkleinerung des Ausgangsmaterials verbunden sind. Um die Bindungseigenschaften zu aktivieren, muss das Ausgangsmaterial „konditioniert“ werden, dies erfolgt durch Zugabe oder Entzug von Feuchtigkeit. Der Wassergehalt sollte für den Pelletierprozess zwischen 10 % und 15 % liegen [28]. Für die Aufbereitung der Gärreste muss daher ein zusätzlicher energetischer Aufwand für die Trocknung des Brennstoffs berücksichtigt werden, da dort sehr hohe Wasseranteile enthalten sind. Außerdem können bei der Konditionierung Zuschlagstoffe bzw. Bindemittel zugefügt werden, um die Bindungseigenschaften weiter zu verbessern. Als Zusatzstoffe sind z. B. Stärke, pflanzliches Paraffin und Melasse zugelassen [28]. Bei den hier untersuchten Brennstoffen wurde allerdings auf die Zugabe von Bindemittel verzichtet, damit die Messungen

nicht verfälscht werden. Zur Pelletierung kommen vor allem Kollergangpressen zum Einsatz, so wurden auch die Pellets für die Versuche an einer Ringmatrizenpresse mit drei Kollern hergestellt. Qualitätsmerkmale der Pellets sind vor allem Rohdichte, Schüttdichte und Abriebfestigkeit bzw. Feinanteil. Die Qualität der eingesetzten Pellets wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht quantitativ untersucht, jedoch lassen sich mit bloßem Auge Aussagen über die verschiedenen Brennstoffe machen. So weisen der Referenzbrennstoff Holzpellets und die Gärreste eine hohe Festigkeit und einen geringen Feinanteil auf, wohingegen bei Switchgras nur eine mäßige Festigkeit und bei den Getreidereststoffen sogar eine sehr schlechte Festigkeit und ein hoher Feinanteil erreicht werden. Die Qualität wird maßgeblich beeinflusst von dem Verdichtungsverfahren, der Konditionierung und dem Feinheitsgrad des Ausgangsmaterials [27].

Der energetische Aufwand und somit die Produktionskosten sind bei der Herstellung von Hackschnitzeln in der Regel geringer als bei Pellets. Dafür eignet sich die Aufbereitungsart mittels Hacker nur für holzartige Biomasse und zudem werden schlechtere physikalisch-mechanische Eigenschaften erreicht. Um dennoch gute Fließ- und Fördereigenschaften zu erreichen, bedarf es möglichst gleichmäßiger und kurzer Kantenlängen. Außerdem werden saubere Schnittstellen und geringe Faser- und Rindenbeschädigung gefordert, sowie die Vermeidung von Fremdstoffeinträgen. Mit Hilfe geeigneter Hackertechnik und einer angepassten Maschineneinstellung lassen sich diese Ziele erreichen [29]. Auch bei den Hackschnitzeln gibt es große Qualitätsunterschiede bezüglich der eingesetzten Brennstoffe. So weist auch hier der Referenzbrennstoff Holzhackschnitzel mit seinen gleichmäßigen Kantenlängen und dem geringen Anteil an Rinde eine sehr gute Qualität auf. Die ungleichmäßigen und langen Hackschnitzel aus Pappel können hingegen zu erheblichen Problemen bei der Dosierung führen. Grund für die ungleichmäßigen Pappelhackschnitzel ist die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials, dieses stammt aus Kurzumtriebsplantagen und weist dementsprechend viele Äste mit kleinen Durchmessern auf [27].

Auf Basis der nachfolgenden Abbildungen wird das Emissionsverhalten der Brennstoffe und die damit verbundenen Folgen für die Aufwendungen in der Abgasreinigung diskutiert.

Verbrennung auf einem 100 kW- Vorschubrost
Emissionswerte normiert auf 11 Vol.% O₂
Der Grenzwert von 20mg/Nm³ für Staubemissionen gemäß novellierter 1.BlmschV wird von keinem der untersuchten Brennstoffe eingehalten



Mit steigendem Kaliumgehalt im Brennstoff nimmt die Partikelkonzentration im Abgas zu (Ausnahmen: KUP, Switchgras).

Regressionsgleichung für 100 kW-Rost: Staubgehalt [mg/Nm³] = 0,0393 * Kaliumgehalt [mg/kgBS_{wrf}] R²=0,85

Abb. 6.10-1: Staubemissionen bei der Verbrennung von Biomassen auf dem HDG-Kessel

Besonders hohe Staubkonzentrationen wurden bei der Verbrennung von Switchgras und Gärresten beobachtet. Hier zeigte sich insbesondere der Einfluss von Kalium als Aerosolbildner. Der Staubgehalt kann für diesen Rost bei sonst konstanten Betriebsbedingungen über eine Regressionsgleichung abgeschätzt werden (s. **Abb. 6.10-1**).

Eine ähnliche Auswertung wie für Brennstoffstickstoff wurde auch für Staub, SO₂ und HCl erarbeitet.

Bei den Staubkonzentrationen kann neben dem Aschegehalt auch der Schwefelgehalt (bei höheren Konzentrationen) im Brennstoff eine Rolle spielen, da durch die Sulfatisierung das spezifische Gewicht der Flugaschen zunimmt. Bei der Auswertung für die Staubkonzentrationen gilt wie beim Brennstoffstickstoff, dass die Prozessführung, insbesondere die Primär- und Sekundärluftverteilung auf dem Rost sowie daran gekoppelt die Temperaturen und die Stöchiometrie eine wesentliche Rolle spielen.

Fasst man die ermittelten Staubkonzentrationen aus den Versuchen am HDG-Kessel, Versuchen an der Pilotanlage TAMARA am ITC aus anderen Projekten mit biomassestämmigen Brennstoffen und der Staubfeuerung BRENDA mit Mitverbrennungsversuchen in Abhängigkeit des Asche- und Schwefelgehaltes zusammen, so kann erwartungsgemäß trotz sehr unterschiedlicher Apparate und Betriebsbedingungen ein Anstieg der Staubkonzentrationen mit dem Aschegehalt nachgewiesen werden (s. **Abb. 6.10-2**).

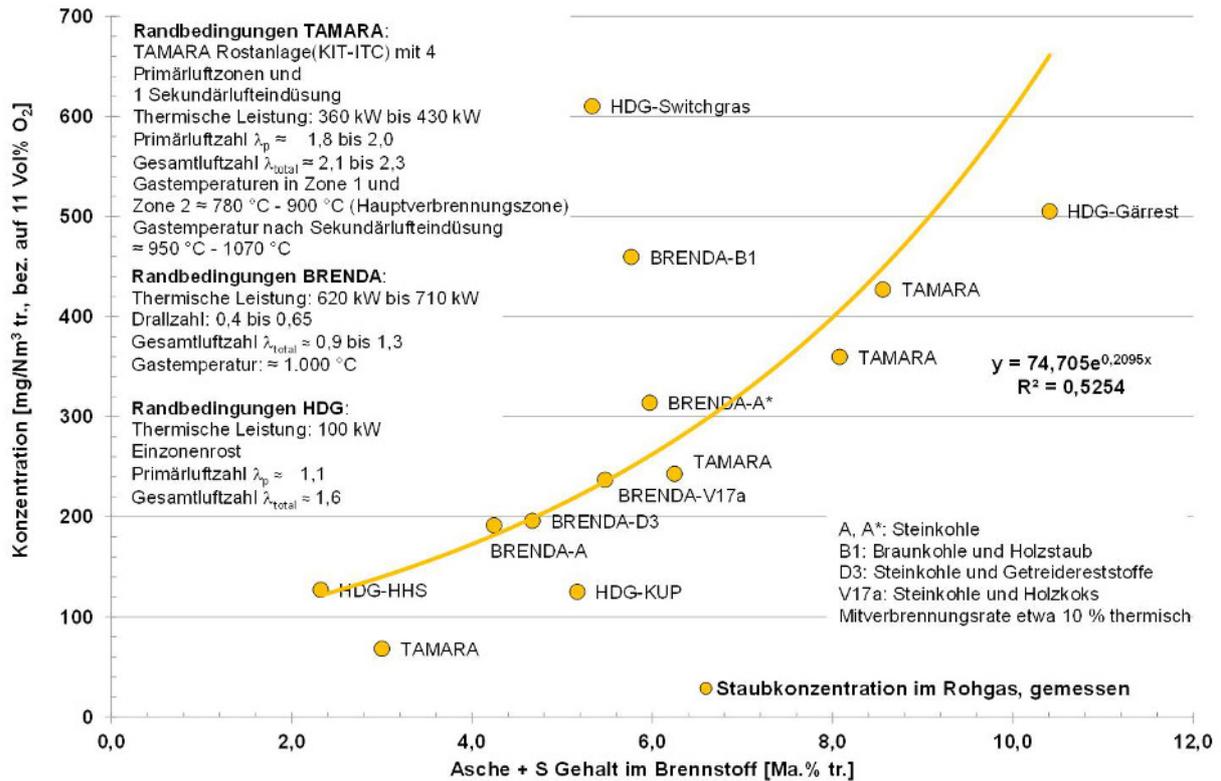


Abb. 6.10-2: Staub- Konzentration als Funktion des Asche- und Schwefelgehaltes für ausgewählte Versuchseinstellungen und Apparate

Erstaunlicherweise sind in der dargestellten Interpolation auch Versuche an der Staubfeuerung im Bereich der Interpolationskurve, während Versuche am HDG- Kessel mit KUP und Switchgras weit streuen. Hier müssten auf jeden Fall weitere Untersuchungen folgen, um die Datenlage für Auswertungen zu verbessern.

Verbrennung auf einem 100 kW- Vorschubrost

Emissionswerte normiert auf 11 Vol.% O₂

Der Grenzwert von 350mg/Nm³ für Schwefeldioxid gemäß TA-Luft wird von allen Brennstoffen mit Ausnahme der Gärreste, sicher eingehalten.

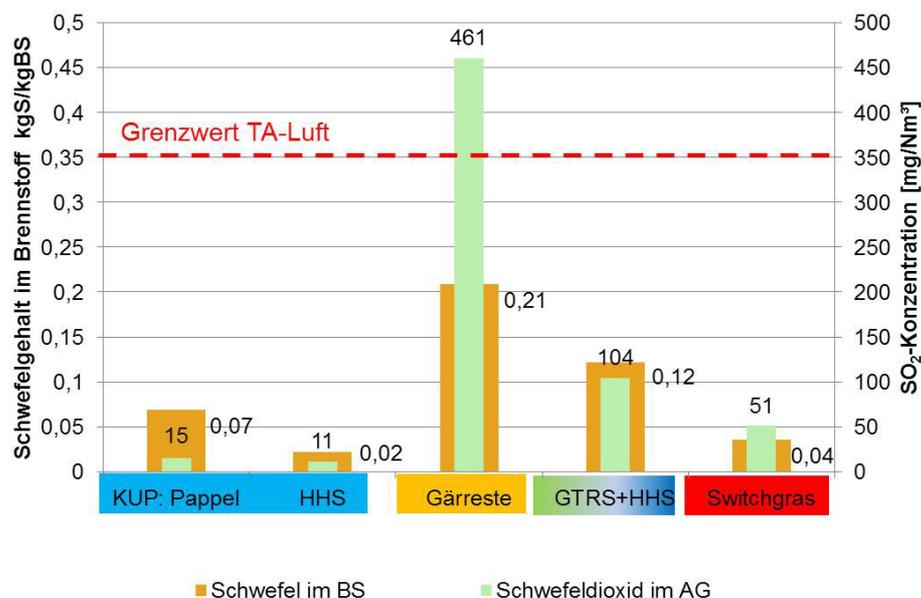


Abb. 6.10-3: SO₂-Emissionen bei der Verbrennung von Biomassen auf dem HDG-Kessel

Der Einsatz von Getreidereststoffen und Gärresten führte aufgrund des hohen Gehalts an Schwefel im Brennstoff zu starker Schwefeldioxidbildung, die bei den Gärresten so stark ausgeprägt war, dass auch die in der TA-Luft geforderten Grenzwerte ohne Abgasreinigung nicht mehr eingehalten werden können (s. **Abb. 6.10-3**).

Im Bereich der Chlorwasserstoffemissionen wurde der Grenzwert der TA-Luft ebenfalls bei der Verbrennung von Gärresten überschritten. Auch hier wäre je nach Anlagengröße eine Nachrüstung in der Abgasreinigung erforderlich (s. **Abb. 6.10-4**).

Verbrennung auf einem 100 kW- Vorschubrost

Emissionswerte normiert auf 11 Vol.% O₂

Der Grenzwert von 30mg/Nm³ für HCl gemäß TA-Luft wird von allen Brennstoffen mit Ausnahme der Gärreste, sicher eingehalten.

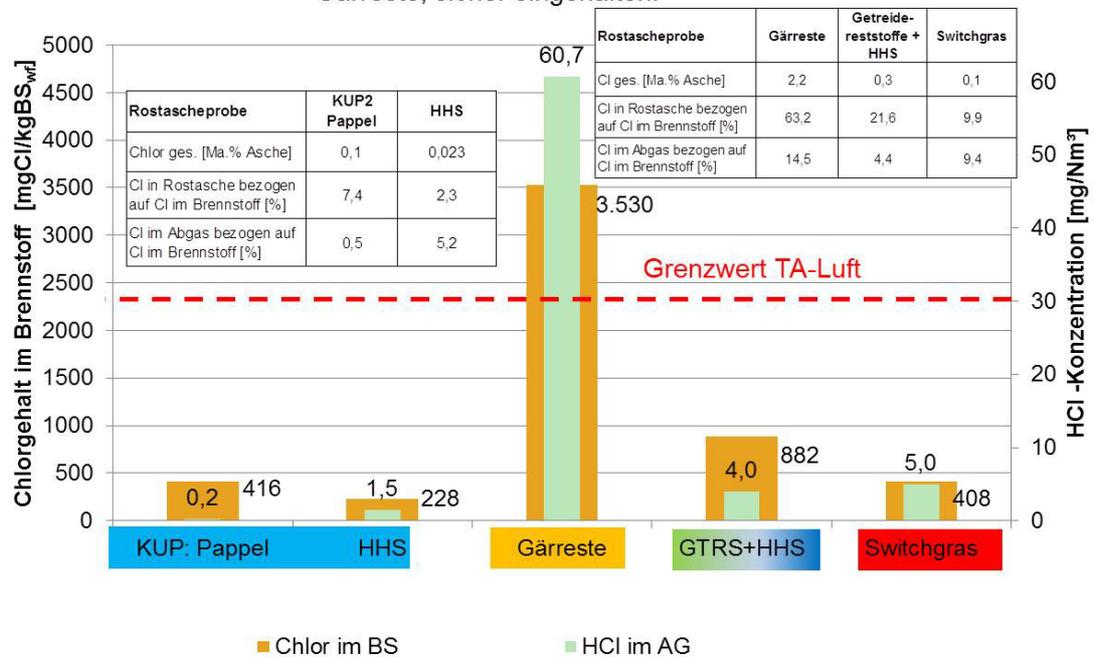


Abb. 6.10-4: HCl-Emissionen bei der Verbrennung von Biomassen auf dem HDG-Kessel

Bei den übrigen alternativen Brennstoffen Switchgras und Getreidereststoffen wurden zwar teilweise leicht erhöhte Chlorwasserstoffkonzentrationen beobachtet, diese bewegten sich allerdings noch weit unterhalb des geforderten Grenzwerts.

Der Grenzwert der Stickoxidemissionen konnte von allen Brennstoffen sicher eingehalten werden, wobei darauf hinzuweisen ist, dass alle Substitutbrennstoffe zu einer im Vergleich zum Referenzbrennstoff Holz erhöhten Stickoxidemission führten.

Ähnlich wie für die Staubkonzentrationen sind die Emissionen für HCl und SO₂ anlagenübergreifend in der **Abb. 6.10-5** zusammengefasst.

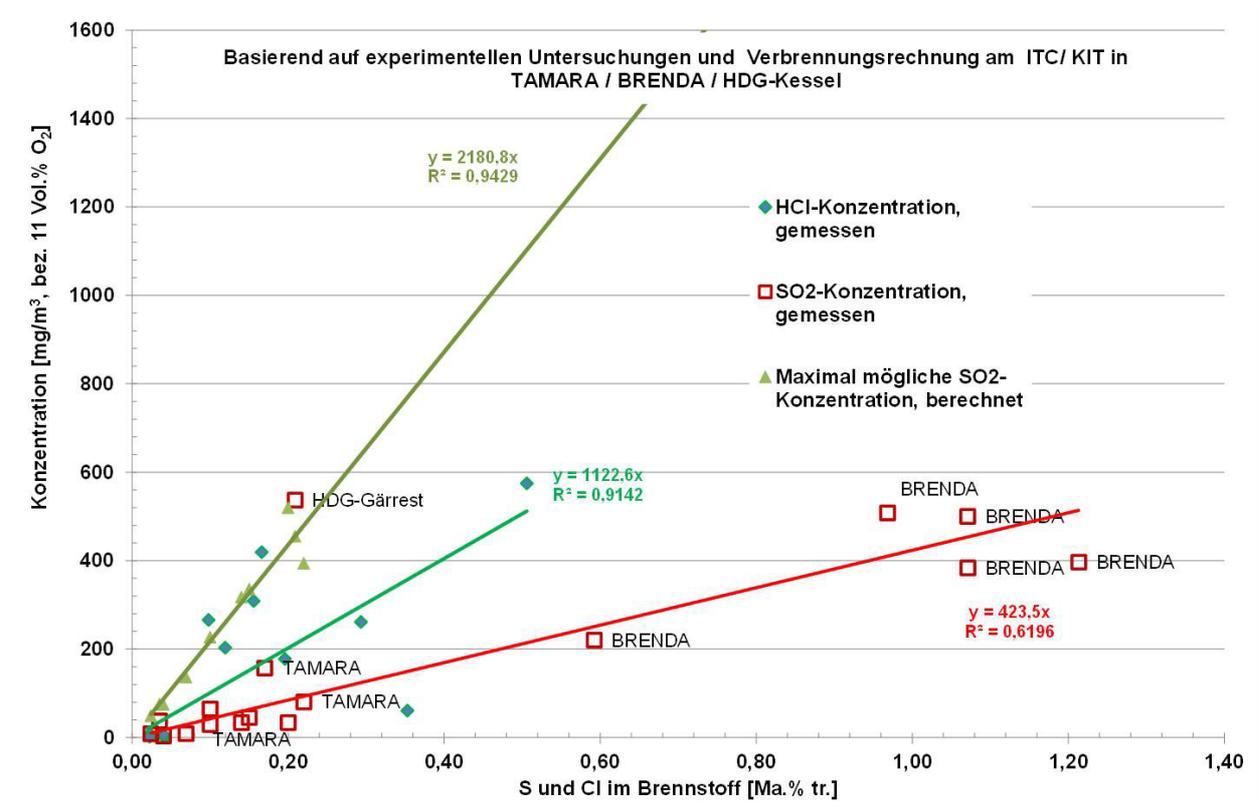


Abb. 6.10-5: HCl- und SO_2 -Konzentration als Funktion des Schwefel- bzw. Chlorgehaltes im Brennstoff für ausgewählte Versuchseinstellungen und Apparate

Die Konzentrationen sind alle im Rohgas nach dem Kessel ermittelt worden. Bei TAMARA handelt es sich um einen Rauchrohrkessel, bei BRENDA um einen Wasserrohrkessel, beim HDG- Kessel um einen Plattenwärmetauscher mit Lamellen.

Für die Verteilung von S und Cl auf Gas- und Feststoffphasen spielt die Bindungsform (organisch/anorganisch) eine wesentliche Rolle. Bei den SO_2 - Konzentrationen wird in maximal mögliche, d.h. der Brennstoff-S wird vollständig zu SO_2 umgewandelt, und in experimentell ermittelte Konzentrationen unterschieden. Die Differenz an Schwefel verbleibt daher in den Feststoffen. Beim Gärrest stimmt die maximal mögliche SO_2 - Konzentration mit dem Messwert nahezu überein. Bei der HCl-Freisetzung kann davon ausgegangen werden, dass bei Biomassen etwa 70 Ma.% bis 80 Ma.% des Chlors in Form von HCl freiwerden, 5 Ma.% verbleiben in der Rostasche, der Rest konzentriert sich in den Flugstäuben auf.

Die NO_x - Emissionen im Rohgas des HDG-Kessels liegen für den Leistungsbereich bis 1 MW_{th} unter dem Grenzwert der TA Luft mit $500 \text{ mg}/\text{m}^3$. Erwartungsgemäß steigen mit dem Brennstoffstickstoffgehalt die NO_x - Emissionen an (s. **Abb. 6.10-6**).

Verbrennung auf einem 100 kW- Vorschubrost
Emissionswerte normiert auf 11 Vol.% O₂
Grenzwert von 500 mg/Nm³ gemäß TA-Luft für Anlagen <1MW wird für alle Brennstoffe eingehalten

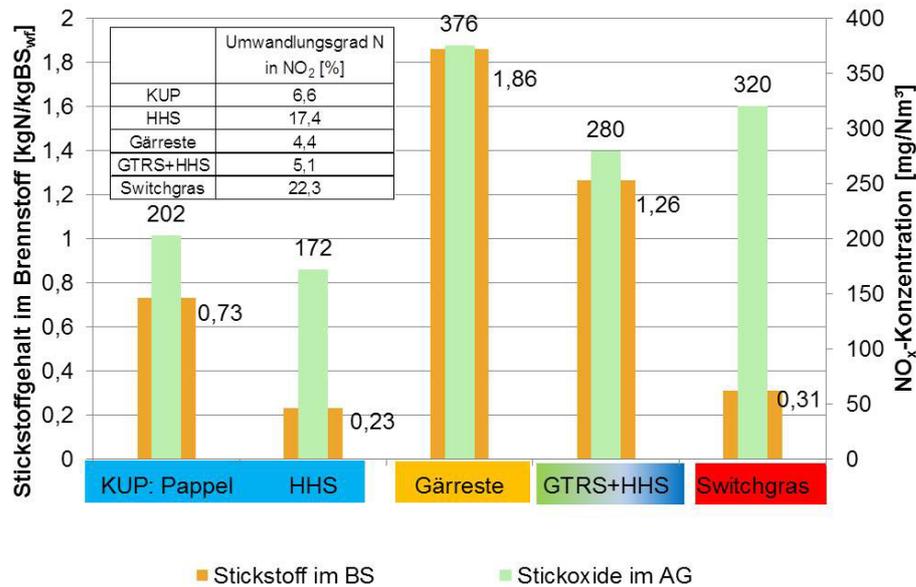


Abb. 6.10-6: NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Biomassen auf dem HDG-Rost

Aus den umfangreichen Untersuchungen zur Verbrennung von Biomassen in Rost- und Staubfeuerungen unter Einbeziehung von Daten auch außerhalb dieses Vorhabens, wurde die in **Abb. 6.10-7** dargestellte Fenimore-Kurve erstellt, die den Zusammenhang zwischen NO_x-Konzentrationen im Rohgas nach der letzten Sekundärluftzugabe als Funktion des Brennstoffstickstoffes zeigt. Dabei muss einschränkend bemerkt werden, dass neben dieser Abhängigkeit auch die Stöchiometrieverhältnisse im Apparat, die Luftstufung, die Vermischung von Rauchgas mit Reaktionsmitteln und die Verweilzeit sowie die Temperaturverteilung weitere wesentliche Einflussgrößen auf die NO_x-Konzentration sind.

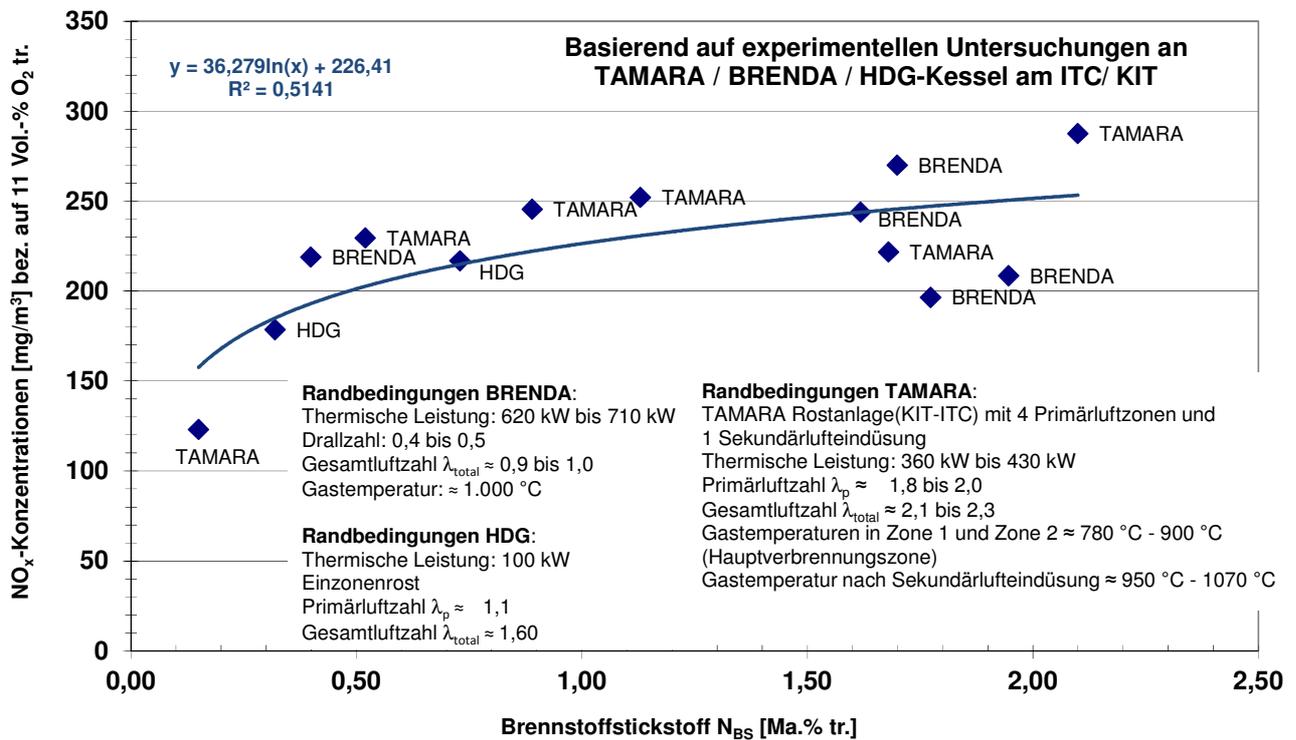


Abb. 6.10-7: NO_x - Konzentration als Funktion des Brennstoffstickstoff für ausgewählte Versuchseinstellungen und Apparate

Die Darstellung erlaubt keine Verallgemeinerung.

Zusammenfassende Beschreibung der Ergebnisse für die untersuchten Rostsysteme

Sowohl bei den Versuchen an KLEAA als auch an HDG Compact 100 wurden nach Durchführung der Versuche Ascheproben entnommen. Vom Aussehen der Asche lassen sich mehrere Rückschlüsse auf die Brennstoffeigenschaften und den Verbrennungsvorgang ziehen. Ein wichtiges Merkmal, um den Grad des Kohlenstoffumsatzes einschätzen zu können, ist die Farbe der Asche. Hat sie eine sehr dunkle Farbe, liegt eine unvollständige Verbrennung von Kohlenstoff nahe, welcher sich somit noch in der Asche befindet. Salze und Mineralien lassen sich zum Teil durch Buntfärbung der Asche erkennen. **Tab. 6.10-2** zeigt eine Gegenüberstellung der Aschen der verschiedenen Brennstoffe in beiden Verbrennungsanlagen. Die Aschen der verschiedenen Brennstoffe lassen sich optisch leicht unterscheiden. Zum Teil erkennt man in der Asche noch deutlich die Form des Brennstoffs.

Tab. 6.10-2: Gegenüberstellung der Aschen [27]

Bezeichnung	Asche KLEAA	Asche HDG Compact 100
Holzhackschnitzel (HHS) aus Nadel- und Laubhölzer		
Holzpellets		
Energiegras/Switchgras Saarland 2009/2010		
Pappel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)		
Gärreste aus Biogasanlagen		
Getreidereststoffe bzw. Getreidereststoffe + HHS als Mischung (HDG Compact 100)		

Bei den Temperaturen des Ascheschmelzverhaltens ist zu beobachten, dass die Switchgras-Asche schon bei 870 °C zu schrumpfen beginnt. Dieser Wert widerspricht zwar den Messergebnissen aus der Laboranalyse, die unter Normbedingungen ermittelt wurden, zeigt jedoch, warum es beim Einsatz dieses Brennstoffs zu Verschlackungen kommt.

Dies verdeutlicht wiederum die Bedeutung, dass eine Bewertung nicht allein auf Analysen basieren kann, sondern prozessorientiert betrachtet werden muss.

Laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) ist Asche rechtlich gesehen als Abfall einzuordnen, da bei der energetischen Verwendung von Biomasse die Energiegewinnung und nicht die Erzeugung von Asche im Vordergrund steht. Das Ziel einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft ist die Verwertung von Abfällen, sie ist der Beseitigung von Abfällen vorzuziehen, sofern es sich dabei um die umweltfreundlichere Lösung handelt.

Die Verwertung der Asche kann auf mehrere Arten geschehen. Eine Verwendung als Zusatz in Düngemitteln ist jedoch zu bevorzugen, da diese Art der Verwertung den Mineralienkreislauf schließt und somit nachhaltig ist. Es ist dabei darauf zu achten, dass eine Anreicherung von Schadstoffen im Wertstoffkreislauf ausgeschlossen ist. Die Düngemittelverordnung (DüMV) regelt, welche Aschen verwendet werden können, welche Mindestgehalte an Nährstoffen und welche Grenzwerte für Schadstoffe eingehalten werden müssen. Für die Nutzung als Dünger darf ausschließlich Brennräumeasche von chemisch unbehandelter Biomasse benutzt werden [27].

In **Tab. 6.10-3** sind die Grenzwerte der Düngemittelverordnung angegeben.

Tab. 6.10-3: Grenzwerte nach DüMV [30]

	Kennzeichnung ab ... mg/kg	Toleranz in % des gekennzeichneten Wertes	Grenzwert in mg/kg
Arsen	20	50 %	40
Blei	100	50 %	150
Cadmium	1	50 %	1,5
Chrom (ges.)	300	50 %	-
Nickel	40	50 %	80
Quecksilber	0,5	50 %	1
Thallium	0,5	50 %	1

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass keiner der Grenzwerte durch die Aschen aus den Versuchen überschritten wurde.

Zur qualitativen Auswertung der Kriterien für eine prozessorientierte Bewertung wurde versucht, die Merkmale in einem Punktesystem grafisch aufzuarbeiten.

In **Tab. 6.10-4** erfolgt eine Bewertung der untersuchten Brennstoffe in verschiedenen Kategorien. Die Wertung reicht von „+ +“, was der besten Wertung entspricht, bis „- -“, was der schlechtesten Wertung entspricht, wobei „o“ neutral ist. Die Punkte werden anschließend aufsummiert, um daran die Eignung der Brennstoffe bestimmen zu können. Die Brennstoffe werden bewertet nach Aschegehalt, Heizwert, den an KLEAA gebildeten verbrennungstechnischen Kennzahlen, Dosiereigenschaften, den im Rauchgas gebildeten Schadstoffen wie NO_x, SO₂ und HCl, Staubbildung, Verschlackungsneigung sowie der Schadstoffe in der Asche [27].

Tab. 6.10-4: Gesamtbewertung der Brennstoffe [27]

	HHS	Holzpellet	Switchgras-Pellet	KUP Pappel	Gärrest-Pellet	GRS-Pellet
Aschegehalt	++	++	0	+	-	-
Heizwert	++	++	0	+	-	--
verbrennungstechnische Kennzahlen	++	+	+	0	-	--
Brennstoffzufuhr / Dosiereigenschaften	0	++	++	--	++	0
Schadstoffe (NO _x , SO ₂ , HCl)	++	++	-	++	--	--
Staubbildung	+	++	--	+	--	-
Verschlackungsneigung	++	++	--	++	--	--
Schadstoffe in der Asche	0	keine Werte	++	++	--	-
Summe	11	13	0	7	-9	-11

HHS: Holzhackschnitzel; GRS: Getreidereststoffe

Die Tabelle zur Gesamtbewertung der Brennstoffe soll dazu dienen, die Stärken und Schwächen der einzelnen Brennstoffe hervorzuheben. Die Referenzbrennstoffe HHS und Holzpellets schneiden bei dem Vergleich mit den anderen Brennstoffen am besten ab, lediglich bei der Aschezusammensetzung weist HHS sehr hohe Werte an Blei auf. Pappel eignet sich ebenfalls sehr gut für die Verbrennung, die einzigen Probleme gab es bei der Brennstoffzufuhr. Aufgrund der langen, ungleichförmigen Hackschnitzel kam es zur Brückenbildung der Hackschnitzel und infolgedessen konnte der Brennstoff nicht in die Dosiereinrichtung nachrutschen. Die Brücken mussten mechanisch gelockert werden um eine konstante Brennstoffzufuhr gewährleisten zu können. Der Einsatz von Switchgras ist hingegen etwas kritischer, da es zu starker Staubbildung und zu Verschlackungen kommt. Außerdem waren die Schadstoffkonzentrationen im Vergleich zu den anderen holzartigen Brennstoffen etwas höher. Die Gärreste und Getreidereststoffe eignen sich mit Abstand am schlechtesten. Sie weisen jeweils recht hohe Anteile an Asche auf, was zu höheren Entsorgungskosten führt, außerdem kommt es zu einer erhöhten Schadstoff- und Staubbildung. Besonders kritisch ist auch hier wieder die Verschlackungsneigung der Brennstoffe [27].

Mit Hilfe umfangreicher Analysen (Elementaranalysen, Immediatanalysen, Analysen ausgewählter Spuren- und Hauptelemente sowie Charakterisierung des Ascheschmelzverhaltens) ließen sich erste Aussagen über die Eignung der Brennstoffe bezüglich der zu erwartenden Schadstoffbildung und Verschlackungsneigung treffen. Im Fall von Switchgras kam es bei der Untersuchung der Verschlackungsneigung jedoch zu einer großen Abweichung von etwa 200°C zwischen den im Labor ermittelten Erweichungstemperaturen und den Realwerten, weshalb anwendungsorientierte Versuche unumgänglich sind [27].

Am Batchrostofen KLEAA konnten unter definierten Versuchsbedingungen repräsentative Ergebnisse zur Ermittlung von verbrennungstechnischen Kenngrößen ermittelt werden. Die an

KLEAA gesammelten Informationen wurden durch Versuche am HDG Compact 100 erweitert. Dort ließen sich besonders die Anwendungseigenschaften der einzelnen Brennstoffe bewerten, wie Verschlackungsneigung sowie Fließ- und Dosiereigenschaften. Der Einsatz der untersuchten Brennstoffe Switchgras, Gärreste und Getreidereststoffe gestaltete sich kompliziert, da es zu Verschlackungen im Brennraum kam (sowohl an KLEAA als auch an HDG Compact 100).

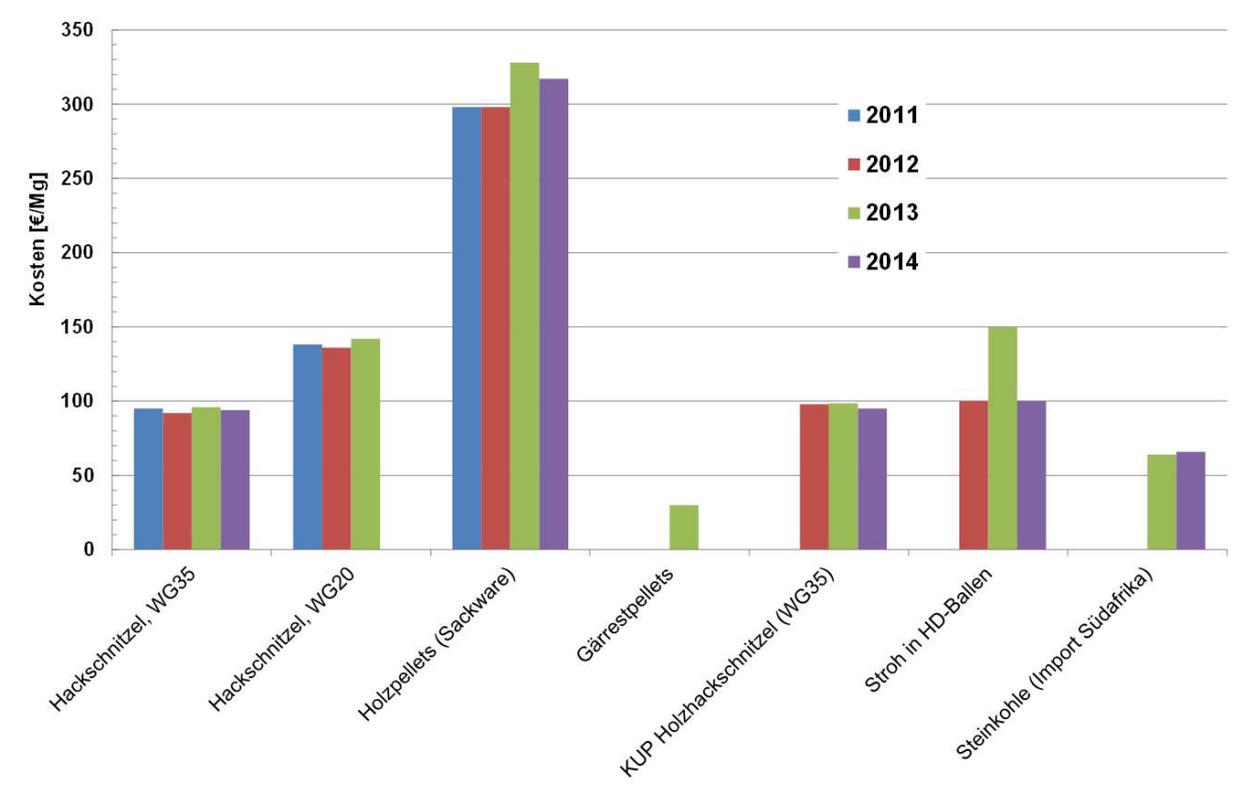
Mögliche Maßnahmen zur Minderung der Verschlackung sind die Zugabe von Additiven, wie z.B. Branntkalk oder Kalk zur Erhöhung des Ascheerweichungspunktes, das Mischen mit weniger kritischen Brennstoffen zur Verdünnung der Asche, z.B. mit Holzhackschnitzeln oder die Wahl eines anderen Rosttyps, wie z.B. einen Vibrationsrost, der zur Verbrennung von Kleie in Biowanze (Belgien) eingesetzt wird [31].

Der Vergleich der gemessenen Rauchgas- und Staubkonzentrationen mit den gesetzlichen Vorgaben konnte weitere Aufschlüsse über die Anwendbarkeit der Brennstoffe liefern. Die Einhaltung der Staubwerte, vor allem nach der Novellierung der 1. BImSchV, stellt für alle Brennstoffe ein Problem dar. Auch die Grenzwerte von SO₂ nach der 17. BImSchV wurden von Switchgras, Gärresten und Getreidereststoffen überschritten. Bei den Gärresten und dem Mischungsversuch mit Switchgras wurden zusätzlich zu hohe HCl-Konzentrationen gemessen. Die NO_x-Werte und die CO-Werte nach der 1. BImSchV und TA Luft konnten hingegen von allen Brennstoffen sicher eingehalten werden [27]. Der Einsatz in Anlagen mit einer Abgasreinigung nach 17. BImSchV, wie z.B. Altholzfeuerungen, würde sich hingegen anbieten, da diese Anlagen für den Einsatz dieser Brennstoffe konzipiert sind [27].

Es ist durchaus denkbar, das schnell nachwachsende Brennstoffe aus Kurzumtriebsplantagen, wie die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Pappelhackschnitzel, zur Substitution von konventionell erzeugten Holzhackschnitzeln eingesetzt werden können. Pappel eignet sich sowohl für den Einsatz in Feuerungsanlagen für den häuslichen Bereich (vgl. 1. BImSchV), als auch für große Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung > 1 MW (vgl. TA Luft). Die Dosiereigenschaften der Pappelhackschnitzel müssten allerdings durch eine sorgfältigere Zerkleinerung des Ausgangsmaterials verbessert werden, denn in der Beschickung kam es aufgrund ihrer langen und ungleichmäßigen Kantenlängen häufig zu Problemen bei der Brennstoffdosierung [27].

Hinsichtlich der **Wirtschaftlichkeit** gilt für Anlagen bis 1 MW sicherlich, dass Aufwendungen für die Abgasreinigung die Verfahren deutlich verteuern würden, insbesondere, wenn neben einer Entstaubung, die in der Regel zunächst über einen Zyklon und anschließend über einen Gewebefilter erfolgen kann, weitere Schadgase, wie beispielsweise für die Gärreste bei HCl oder SO₂ z.B. trockensorptiv abzuscheiden wären. Geht man für eine 100 kW- Feuerung davon aus, dass die Investition für den Kessel etwa 10 k€ kostet, so kann bei einer Abgasreinigung mit Entstaubung, Abtrennung von HCl und SO₂ mindestens mit einer Verdopplung der Kosten gerechnet werden. Größere Anlagen, die in Verbindung mit dem EEG in 2003 errichtet worden sind und hauptsächlich Altholz der Klassen I bis IV verbrennen, sind mit einer entsprechenden Abgasreinigung nach der 17. BImSchV ausgerüstet. Entscheidend für ihre Wirtschaftlichkeit sind hier die Preise für die Brennstoffe. Da es sich um Althölzer handelt, liegen die Aufwendungen derzeit (Stand 2014) für diese Brennstoffe im Mittel noch deutlich unter 10 €/Mg. Damit spielen Fragestellungen zur Brennstoffsubstitution, z.B. durch Gärrestpellets oder KUP aufgrund der Brennstoffkosten für diese Anlagen keine Rolle.

Abb. 6.10-8 zeigt beispielhaft einige Preise für ausgewählte Brennstoffe für 2011 bis 2014.



Quellen:

Gärreste: <http://www.biomasse-report.de/index.php/de/marktplatz/brennstoffe/gesuche/41-holz hackschnitzel>

Hackschnitzel WG20 und WG35, Holzpellets, KUP: <http://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/hackschnitzel/jahresmittelwerte>

Stroh: <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/360/article/24949.html>

Abb. 6.10-8: Brennstoffkostenentwicklung ausgewählter Brennstoffe

Mit Ausnahme von Stroh für das Jahr 2013 sind die Preise für die Brennstoffe weitestgehend stabil geblieben. Unter der Annahme, dass eine Anlage für Hackschnitzel mit einem Wassergehalt von 35 Ma.% (WG35) ausgelegt wurde, könnte hinsichtlich der Brennstoffflexibilität der Einsatz von Gärresten möglich sein. Allerdings besteht hier die Notwendigkeit, die Abgasreinigung entsprechend den gesetzlichen Vorgaben nachzurüsten und die Aschen einer Verwertung zuzuführen. Hier muss im Einzelfall geprüft werden, ob es durch diesen Brennstoffwechsel zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit kommen kann. Von einer Mischung von Gärresten und Hackschnitzeln ist aus Sicht der Rückgewinnung der Nährstoffe aus den Aschen abzuraten, weil je nach Massenanteil der Hackschnitzel und des jeweiligen Aschegehaltes (HHS 2 enthält fast 4 Ma.% Asche) es in der Mischung mit den Gärresten zu einer Verdünnung der Nährstoffe in der Asche kommen kann.

6.11 Staubfeuerung: Emissionen und Bilanzierung

Der Prozess Staubfeuerung wurde in vier verschiedenen Forschungsanlagen hinsichtlich der Mono- und Mitverbrennung halmartiger (Getreidereste, Switchgras) und holzartiger Biomassen (Holzstaub aus >80% Nadelholz und < 20% Laubholz) untersucht, vgl. **Tab. 6.11-1**.

Tab. 6.11-1: Versuchsanlagen und eingesetzte Brennstoffe

	Holzstaub	Getreidereste	Switchgras
Vertikale Drallbrennkammer (VWS), 50 kW	X	X	X
Vertikale Drallbrennkammer (IEVB), 260 kW	X, unverdrallt: -instabile Flamme -kein Dauerbetrieb möglich	X	-
Vertikale, unverdrallte Brennkammer (IEVB), 15 kW, beheizt	X	X	X
BRENDA (ITC) horizontal, verdrallt mit Grundströmung 1200 kW, Mehrstoffstaubbrenner 800 kW	X Mitverbrennung mit Steinkohle / Trockenbraunkohle	X Mitverbrennung mit Steinkohle	X Mitverbrennung mit Steinkohle

Die Brennstoffanalysen und Partikelgrößenverteilungen der eingesetzten Brennstoffe können Kap 6.1 entnommen werden und sind für die Staubfeuerung im Anhang 14.8, Tabelle 14-2 nochmals zusammenfassend aufgeführt. Die untersuchten Biomassen sind in ihren kalorischen und chemischen Eigenschaften relativ ähnlich, größere Unterschiede gibt es aber mitunter beim Asche-, Chlor- und Stickstoffgehalt.

Die große Feinheit der eingesetzten Stäube (< 1 mm), vgl. Anhang Tabelle 14-2, führte in Verbindung mit der Umgebungsfeuchte zu einem verschlechterten Förderungsverhalten bei der Brennstoffdosierung, so dass Apparate, wie Vorlagebehälter und Abscheidefilter, immer wieder verstopften. Eine vollautomatische Brennstoffdosierung war unter diesen Bedingungen nicht möglich, so dass immer wieder manuell eingegriffen werden musste.

Die Monoverbrennung wurde in vertikalen (Drall-)Brennkammern untersucht, die Mitverbrennung in einer Kraftwerksstaubfeuerung im Pilotmaßstab, bei der der Staubbrenner horizontal angebracht ist und vertikal eine Grundströmung von heißem Rauchgas durch eine vorgeschaltete Brennkammer erzeugt wird. In der Drallbrennkammer des VWS ist ein Drallbrenner für Trockenbraunkohle eingesetzt, in derjenigen des IEVB wurde ein up-scale des Brenners aus der unverdrallten Brennkammer („Verschlackungsreaktor“) durchgeführt. Die Dralleinstellung erfolgt sowohl beim VWS als auch beim IEVB über die Einstellung des Verhältnisses von Primärluft zu Sekundärluft, da letztere einen festen Drall erfährt. In BRENDA wird in einem Mehrstoffstaubbrenner über eine Zentrallanze die Biomasse, über einen umschließenden Ringspalt die Kohle eingedüst und dabei der Drall der Sekundärluft stufenlos über einen movable-block-swirler eingestellt.

Im Folgenden werden die Brennstoffe hinsichtlich **Zündung/Stabilität**, **Ausbrand** und **Emissionen** und für die Mitverbrennung bzgl. des **Verschlackungspotentials** beurteilt. Die Verschlackung bei der Monoverbrennung wird eingehend in Kapitel 6.12 behandelt.

Zündung und Stabilität

Wie die Ergebnisse der labortechnischen Brennstoffcharakterisierung gezeigt haben (siehe Abschnitt 6.1.1) existieren biomassespezifische Unterschiede in der Strukturzusammensetzung (Cellulose, Hemicellulose, Lignin, Extraktstoffe), die sich z. B. auf den Gehalt an flüchtigen Bestandteilen auswirken. Darüber hinaus unterscheidet sich auch die Geschwindigkeit der Flüchtigensfreisetzung (siehe Untersuchungsergebnisse im DTR, Abschnitt 6.4.1) und die Zusammensetzung der flüchtigen Bestandteile. Die Untersuchungen im Zündofen haben gezeigt (s. Abschnitt 6.2), dass diese Zusammenhänge die Zündverzugszeit beeinflussen. So bedeutet eine geringe Zündverzugszeit, dass das Brennstoff-Luft-Gemisch in der Nähe des Brenners zündet.

Die Auswirkungen dieser brennstoffspezifischen Unterschiede waren auch bei den Verbrennungsversuchen mit Switchgras- und Getreidereststoffstaub in der Brennkammer von VWS zu beobachten. Dies zeigen die Flammenbilder für die Einsatzstoffe Holzstaub, Switchgras und TBK über der Brennkammerhöhe (Port1 – erstes Sichtfenster in Brennernähe; Port 13 – letztes Sichtfenster am Brennkammeraustritt) in **Abb. 6.11-1**.

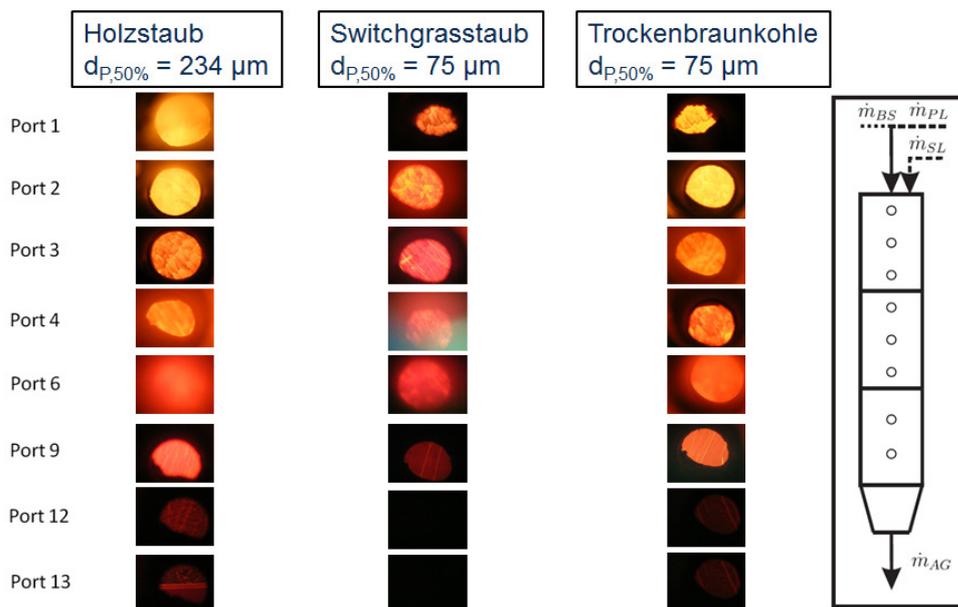


Abb. 6.11-1: Staubflamme unterschiedlicher Einsatzstoffe in Brennkammer

Für Switchgras- und Getreidereststoffstaub war im Vergleich zum Holzstaub und zur TBK (Auslegungsbrennstoff für die Versuchsanlage) keine deutlich sichtbare Flamme im 1. Sichtfenster (Port 1) erkennbar. Darüber hinaus war zu beobachten, dass am Ende der Brennkammer (Port 12 und 13) keine ausbrennenden Partikel vorhanden waren.

Diese Tendenz lässt sich auch bei den Mitverbrennungsversuchen erkennen. Dort kann mittels Kameraanalyse, vgl. **Abb. 6.11-2**, gezeigt werden, dass die Zumischung von Getreideresten

(D1, bzw. D3) zu Steinkohle (A) zu einer örtlich früheren Zündung führt und die Flamme mit zunehmendem Zumischgrad immer näher an den Brennermund heranrückt. Bei der Erhöhung des Zumischgrades an Holzstaub zu Braunkohle von 9% zu 23% (B1, B2) hingegen verändert sich der Zündort kaum, d.h. die Zumischung von Holzstaub führt nicht zu einer früheren Zündung, was mit den Ergebnissen aus dem Zündofen übereinstimmt.

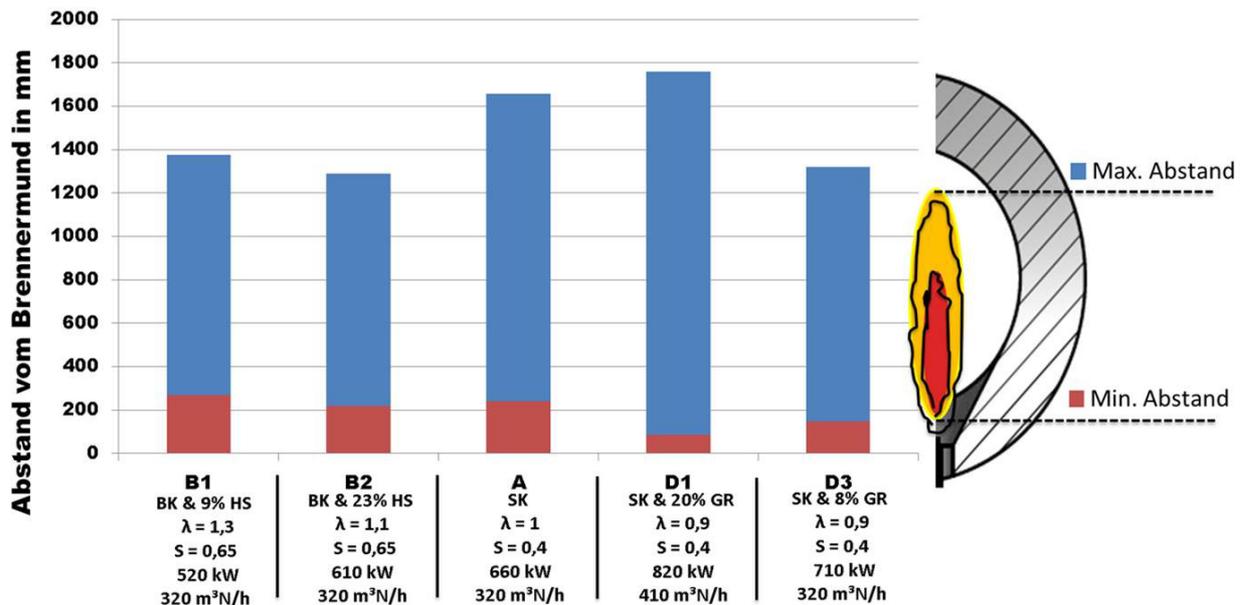


Abb. 6.11-2: Mindest- und Maximalabstand der Flamme vom Brennermund bei der Mitverbrennung (VIS-Kamera) [32,33]

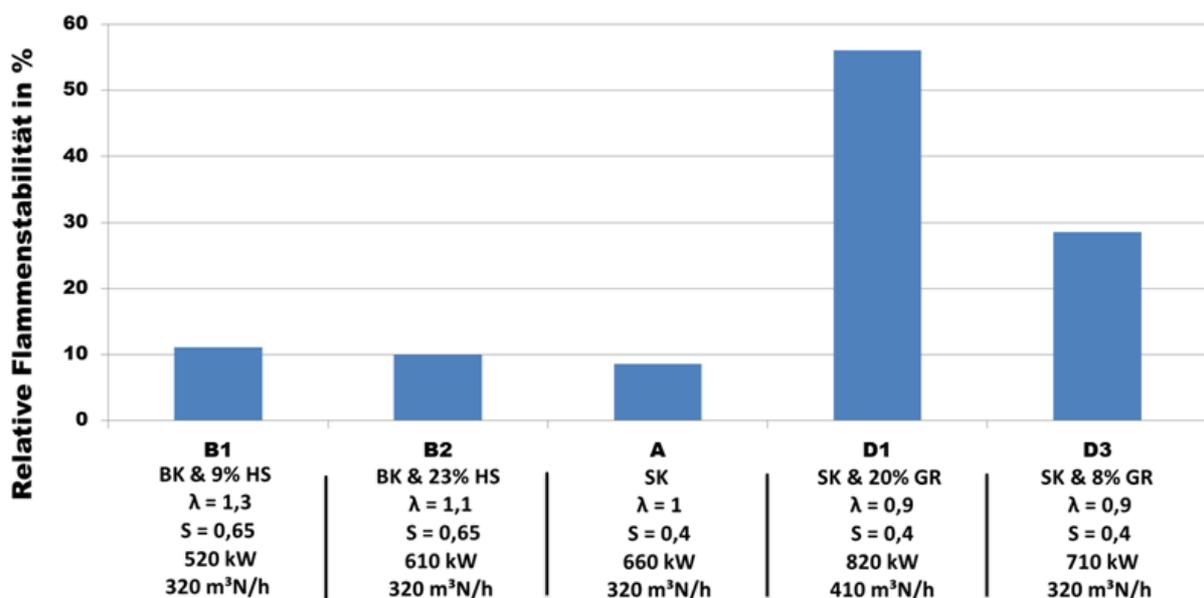


Abb. 6.11-3 Relative Flammenstabilität (= stabile Flammenfläche/gesamte Flammenfläche) bei der Mitverbrennung (VIS-Kamera) [32,33]

Es kann außerdem gezeigt werden, dass durch Zumischen von Getreideresten zu Steinkohle die Stabilität der Flamme positiv beeinflusst werden kann und mit steigendem Zumischgrad

zunimmt (Biomasse im Vgl. zu Steinkohle: erhöhter Anteil an flüchtigen Bestandteilen und frühere Freisetzung dieser), vgl. **Abb. 6.11-3**. Bei der Zumischung von Holzstaub zu Trockenbraunkohle, die den Biomassen chemisch ähnlicher ist, kann keine Verbesserung der Stabilität festgestellt werden.

Um das Zündverhalten genauer zu untersuchen, wurden erweiternde experimentelle Untersuchungen im Zündofen und der TGA von VWS sowie theoretische Betrachtungen zum Erwärmungsverhalten von Partikeln durchgeführt.

a) Zündofen- und TGA-Versuche

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 6.2 dargestellten Versuchen wurde der Brennstoff mit seiner ursprünglichen Korngrößenverteilung im Zündofen eingesetzt, um das Zünd- und Ausbrandverhalten des Partikelkollektivs zu untersuchen. Der Versuchsaufbau entspricht dem in Abschnitt 6.2 (Abb. 6.2-1) dargestellten Schema.

In **Abb. 6.11-4** ist die Zündverzugszeit in Abhängigkeit von der Ofentemperatur (links) und die Brenndauer bei 750 °C Ofentemperatur (rechts) dargestellt. Da Switchgras- und Getreidereststoffstaub im Vergleich zum Holzstaub bei niedrigen Temperaturen deutlich eher zünden, kann von einer Verschiebung des Zündortes am Brenner ausgegangen werden. Darüber hinaus ist die Brenndauer von Switchgras- und Getreidereststoffstaub geringer als die des Holzstaubes.

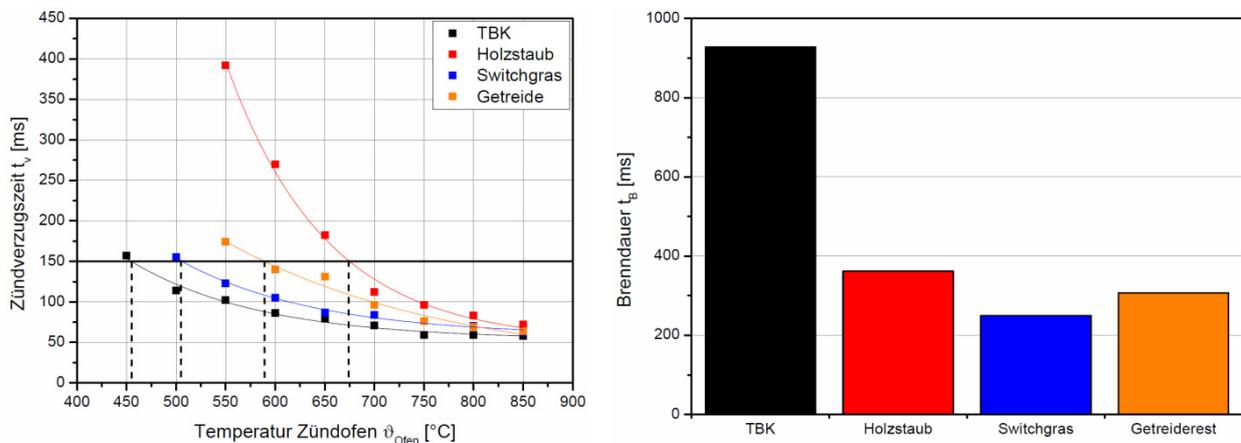


Abb. 6.11-4: Zündverzugszeit (links) und Brenndauer (rechts) der Einsatzstoffe im Zündofen

Voraussetzung für die Zündung des Brennstoffes ist u.a. die Freisetzung der flüchtigen Bestandteile (homogene Zündung). Um die Freisetzung der flüchtigen Bestandteile zu untersuchen, wurden Experimente in einer Labor-TGA durchgeführt. Zwar ist die gewählte maximale Aufheizrate von 100 K/min deutlich geringer als im Zündofen, jedoch sollten die Ergebnisse nur zum Brennstoffvergleich dienen und nicht für absolute Aussagen herangezogen werden. In **Tab. 6.11-2** ist die Temperatur des Entgasungsbeginns $\vartheta_{\text{Beginn}}$ sowie die Temperatur der maximalen Entgasungsgeschwindigkeit $\vartheta_{\text{DTG,max}}$ dargestellt.

Tab. 6.11-2: Aus Thermogramm abgeleitete charakteristische Temperaturen

Biomassestaub	$\vartheta_{\text{Beginn}}$	$\vartheta_{\text{DTG,max}}$
Nadel-Laub-Holz	284 °C	399 °C
Switchgras	196 °C	345 °C
Getreidereststoffe	204 °C	325 °C

Es wird deutlich, dass Switchgras- und Getreidereststoffstaub bei signifikant niedrigeren Temperaturen entgasen als Holzstaub. Dies wird auch durch den im drop tube reactor ermittelten Entgasungsverlauf bestätigt (s. auch Abb. 6.4-1). Dies kann als eine Ursache für die frühere Zündung angesehen werden.

b) Aufheizverhalten von Partikeln in einem Tägergasstrom

Einen weiteren Einfluss auf die Zündung hat die Partikelgröße. Diese beeinflusst die Flugzeit bzw. den Weg eines Partikels, um auf die Entgasungstemperatur erwärmt zu werden. Um die Flugzeit abzuschätzen wurde auf Basis einer Energiebilanz die Partikeltemperatur ϑ_p mit einer vorgegebenen Beladung L (Masse Luft / Masse Brennstoff), einer Partikelgeschwindigkeit c, einer Anfangstemperatur $\vartheta_{0,\text{Gas}}$ und einer Brennkammerwandtemperatur ϑ_{Wand} für verschiedene Partikelgrößen d_p nach dem Nusselt-Modell mit Gaserwärmung berechnet [34,35]. In **Abb. 6.11-5** (links) sind die Berechnungsergebnisse zusammen mit den zugehörigen Entgasungstemperaturen dargestellt. Darüber hinaus zeigt Abb. 6.11-5 (rechts) außerdem den Einfluss der Luftvorwärmung auf die Partikeltemperatur.

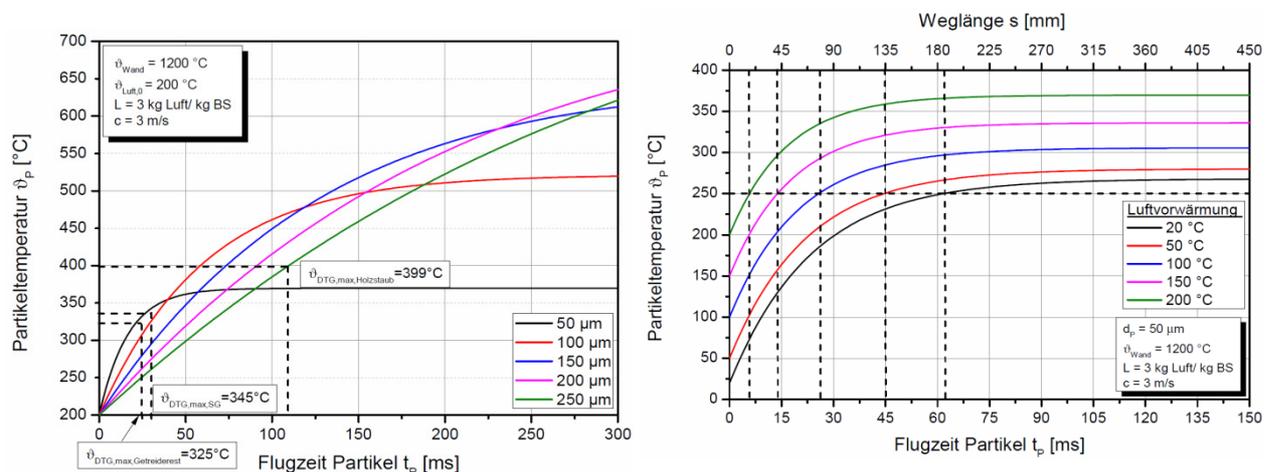


Abb. 6.11-5: Partikelerwärmung in Abhängigkeit von Partikelgröße (links) und Anfangstemperatur (rechts)

Es wird deutlich, dass die Flugzeit der Holzstaubpartikel mit der größeren Korngröße deutlich größer ist als die der feineren Switchgras- und Getreidereststoffpartikel um die entsprechende Entgasungstemperatur zu erreichen. Das heißt, sowohl die Entgasung als auch die Erwärmung der Partikel beeinflussen signifikant den Zündort.

Eine Möglichkeit den Zündort prozesstechnisch zu verändern ohne konstruktive Modifizierungen an der Brenner- und Brennkammergeometrie vorzunehmen, stellt die Luftvorwärmung dar. Wie in Abb. 6.11-5 (rechts) dargestellt ist, führt eine Absenkung der Vorwärmtemperatur zu einer Verlängerung der Flugzeit bzw. der Weglänge bis zum Zündort.

Ausbrand und Emissionen

In **Tab. 6.11-3** sind der Konversionsgrad des Kohlenstoffs zu CO sowie der Ausbrand in der Asche für die Gesamtheit aller Versuche in den verschiedenen Brennkammern zusammengefasst. Der Ausbrand ist sehr gut und der Konversionsgrad gut, wenn der Drall ausreichend hoch eingestellt ist.

Tab. 6.11-3: Ausbrand, Verweilzeit und Konversionsgrad des Kohlenstoffs zu CO

Brennkammer	Verweilzeit	CO/C _{Brennstoff} [kg C/kg C]	Ausbrand in Asche [TC]
Vertikale Drallbrennkammer (VWS)	ca. 2 s	0,01 – 0,08 % (niedriger Drall, niedrige Luftzahl: bis 0,27 %)	-
Vertikale Drallbrennkammer (IEVB)	0,5 - 1,5 s	≤ 0,02 (Niedriger Drall: bis 1,26 %)	> 98 %
Vertikalbrennkammer (unverdrallt, IEVB)	1,5 – 2 s	-	> 95 %
BRENDA (horizontal, verdrallt mit Grundströmung, ITC)	3 – 6 s	<< 0,01 %	> 99 %

Die in der 13. BImSchV festgelegten Grenzwerte für CO-Emissionen, vgl. **Tab. 6.11-4** werden in sämtlichen Brennkammern unterschritten, sofern der Verbrennungsluft ein ausreichend hoher Drehimpuls aufgeprägt wird (durch Erhöhung der Drallzahl oder des Sekundärluftdurchsatzes), vgl. auch **Tab. 6.11-5**.

Tab. 6.11-4: Emissionsgrenzwerte (Bezug: 6 Vol-% O₂) der eingesetzten Brennstoffe, sowie exemplarisch für zwei Brennstoffmischungen, nach 13. BImSchV für eine Feuerungswärmeleistung 50-100 MW

Brennstoff	Steinkohle	Braunkohle	naturbelassenes Holz	Biobrennstoffe (nicht holzartig)	Mischung aus 80%th Steinkohle, 20%th Holz	Mischung aus 80%th Braunkohle, 20%th Holz
Staub [mg/m ³]	10	10	10	10	10	10
CO [mg/m ³]	150	150	150	250	150	150
NO _x [mg/m ³]	300	400	250	250	290	370
SO _x [mg/m ³]	400	400	200	200	360	360

Um den Einfluss von Verbrennungsluftmenge (Luftzahl) und Drehimpuls (Drallzahl) zu untersuchen, wurden u.a. Versuche in einer 50 kW vertikalen Dralldrehkammer durchgeführt. Der Schwerpunkt der Experimente lag dabei auf dem Einfluss des Brennstoff- N-Gehaltes und der Prozessführung (Drallzahl) auf den Ausbrand (CO-Konzentration im Abgas) und die NO_x-Konzentration im Abgas.

Zur Bewertung des Verbrennungsverhaltens wurden die Mittelwerte der im Abgas^{##} gemessenen und auf 6 Vol.-% Restsauerstoff bezogenen CO- und NO_x-Konzentrationen (gemessen als NO, angegeben als NO₂) herangezogen.

Für den Einsatzstoff Holzstaub konnte eine stabile Monoverbrennung über mehrere Stunden für eine Drallzahl von Sn = 0,85 und 0,80 realisiert werden. Für die Drallzahlen Sn = 0,72 und 0,60 wurde ein instabiles Flammenbild beobachtet (siehe Zündung und Stabilität), so dass keine Variationen zu niedrigeren Luftzahlen realisiert werden konnten. In den **Abbn. 6.11-6** und **6.11-7** sind die im Abgas gemessenen CO- und NO_x-Konzentrationen dargestellt.

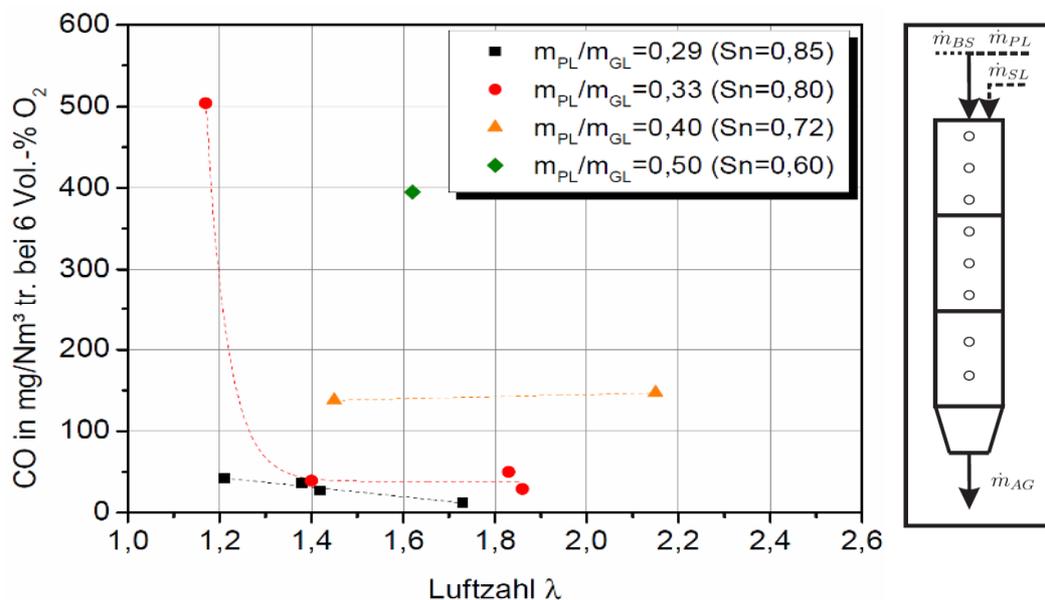


Abb. 6.11-6: CO-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Luftzahl und Drallzahl Sn für Holzstaub

^{##} Alle dargestellten Abgaskonzentrationen sind Rohgaskonzentrationen, die nach dem Zyklon gemessen wurden.

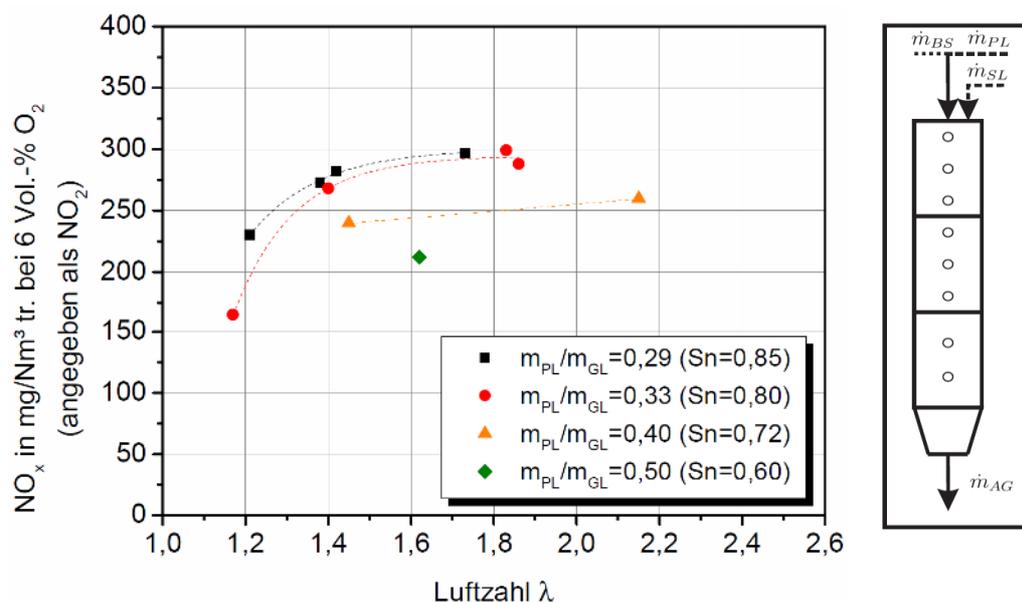


Abb. 6.11-7: NO_x-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Luftzahl und Drallzahl Sn für Holzstaub

Es werden die bekannten Zusammenhänge deutlich, wonach eine Absenkung der Luftzahl zu einer Verschlechterung des CO-Ausbrandes führt und aufgrund der lokal unterstöchiometrischen Bedingungen eine NO-Reduzierung eintritt. Darüber hinaus ist erkennbar, dass die Verringerung des Dralles erwartungsgemäß eine Verschlechterung des Ausbrandes und eine Verringerung der NO_x-Konzentration im Abgas zur Folge hat. Wie in **Tab. 6.11-5** deutlich wird, wurden diese Zusammenhänge auch bei größeren Brennstoffwärmeleistungen (130 – 260 kW) für die Monoverbrennung von Holzstaub und Getreidereststoffstaub ermittelt.

Eine Optimierung der Verbrennungsführung hinsichtlich der CO- und NO_x-Konzentrationen ist durch eine gestufte Verbrennung (Primärmaßnahme) möglich.

Tab. 6.11-5: Versuchseinstellungen und gemessene Emissionen (Bezug: 6 Vol-% O₂; SO_x als SO₂, NO_x als NO₂ berechnet). Grau unterlegt: Emissionsgrenzen überschritten (vgl. Tab. 6.11-3)

FWL in kW	Brennstoff I	Brennstoff II	Biomasseanteil in % _{th}	λ	Drallzahl	CO	NO _x	PMK	SO _x
						mg/m _N ³	mg/m _N ³	mg/m _N ³	mg/m _N ³
Vertikale Drallbrennkammer (VMS)									
50	Holzstaub	-	100	1.2	0.85	42	230		69
				1.4	0.85	36	273		37
				1.4	0.85	27	282		26
				1.7	0.85	12	297		34
				1.2	0.80	504	164		60
				1.4	0.80	39	268	-	32
				1.8	0.80	50	299		36
				1.9	0.80	29	288		35
				1.5	0.72	138	240		29
				2.2	0.72	147	260		41
				1.6	0.60	395	212		33
BRENDA									
660	SK Superfine	-	0	1.0	0.4	11	366	287	595
520	Trockenbraunkohle	Holzstaub	9	1.3	0.65	6	328	688	331
610			23	1.1	0.65	5	317	618	272
700	SK Superfine	Switchgras	6	0.9	0.4	7	377	318	611
820		Getreidereste	20	0.9	0.4	5	439	285	601
820			20	0.9	1	7	318	320	600
710			8	0.9	0.4	6	405	294	576
Vertikale Drallbrennkammer (IEVB)									
130	Holzstaub	-	100	1.2	2.06	3005	143		163
260				1.8	2.06	41	184		243
130	Getreidereststoffe	-	100	1.2	2.06	21	187		168
260				1.2	2.06	2224	911		163
260				1.8	2.06	1	996		244
				1.2	2.06	44	589		411
Unverdrallte vertikale Brennkammer (IEVB)									
FWL in kW	Brennstoff I	Wandtemperatur in °C	Biomasseanteil in % _{th}	λ	Drallzahl	CO mg/m _N ³	NO _x mg/m _N ³	PMK mg/m _N ³	SO _x mg/m _N ³
15	Holzstaub	1100	100	1.2	-	-	242		12
		900		1.8	-	-	158		116
	Getreidereststoffe	1100		1.2	-	-	1804		88
		900		1.8	-	-	1630		227
	Switchgras	900		1.8	-	-	804		115

Bei der Mitverbrennung wurden Switchgras, Holzstaub und Getreidereste mit einem Anteil von bis zu 20 %_{th} mit Steinkohle/Trockenbraunkohle mitverbrannt. Dabei zeigt sich, dass die Höhe der Emissionen im Wesentlichen vom Basisbrennstoff festgelegt wird, s. Anhang Tabelle 14.2. Sekundärmaßnahmen sind zur Reduzierung der Staub-, SO_x und NO_x-Emissionen bei der Mitverbrennung mit Steinkohlen zwingend erforderlich, bei Trockenbraunkohle sind Primärmaßnahmen zur Einhaltung der SO_x-, NO_x- und CO-Grenzwerte ausreichend.

Ablagerungen/Verschlackung

Neben dem Aufheiz- und Zündverhalten wirken sich auch Unterschiede im Aschegehalt und im Heizwert auf den Betrieb der Staubfeuerungsanlage aus. Im Vergleich zum Holzstaub ist der Aschegehalt vom Switchgras- und Getreidereststoffstaub deutlich größer ($\xi_{A,Holz,an} = 0,51$ Ma.-%; $\xi_{A,SG,an} = 7,62$ Ma.-%, $\xi_{A,Getreiderest,an} = 6,37$ Ma.-%) und der Heizwert geringer ($h_{u,Holz,an} = 18,48$ MJ/kg; $h_{u,SG,an} = 17,09$ MJ/kg; $h_{u,Getreiderest,an} = 16,78$ MJ/kg). Um die gleiche Brennstoffwärmeleistung zu erzielen, sind für Switchgras- und Getreidereststoffstaub entsprechend höhere Brennstoffmassenströme erforderlich, die zu höheren Aschemassenströmen führen (s. **Abb. 6.11-8** links). Darüber hinaus ist auch die theoretisch zu erwartende Aschefracht, die mit dem Abgas transportiert wird, größer (siehe Abb. 6.11-8 rechts).

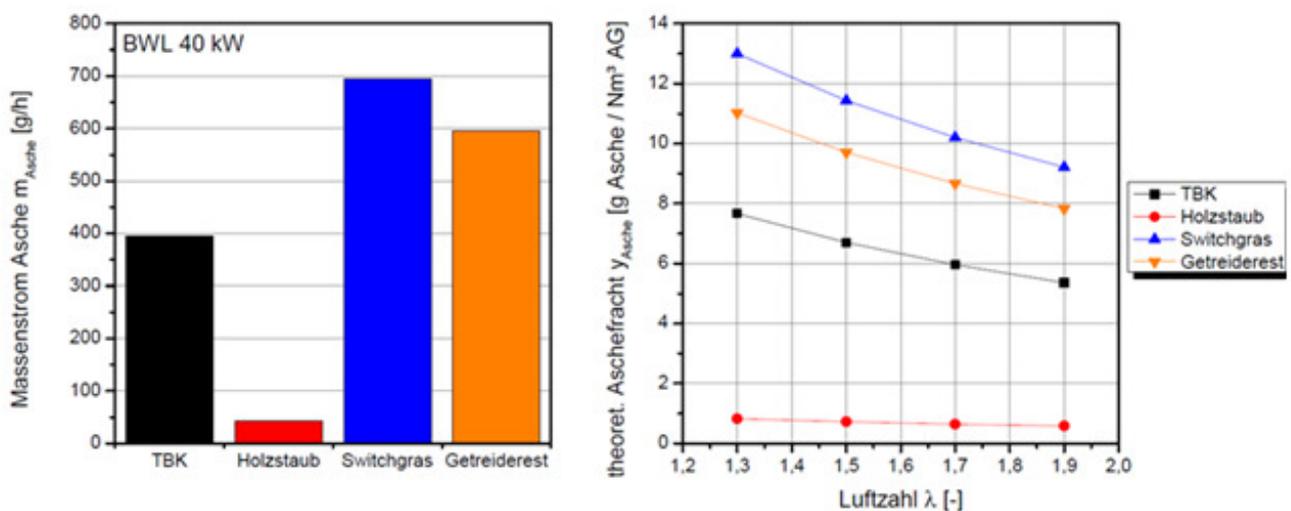


Abb. 6.11-8: Berechneter maximaler Aschenmassenstrom (links) und theoretisch maximale Aschefracht (rechts) in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftzahl für eine Brennstoffwärmeleistung (BWL) von 40 kW

Neben dem höheren Aschemassensstrom spielt auch die Konsistenz der Asche bzw. des Flugstaubes eine wichtige Rolle bei der Filterbeladung und -abreinigung. So führen Aschepartikel, die in der Brennkammer auf- oder angeschmolzen sind, zu einer stärkeren Verklebung des Filters, die nicht so einfach abgereinigt werden kann.

Die Auswirkungen veränderter Aschegehalte und Ascheeigenschaften auf den Betrieb der 50 kW_{therm} Staubfeuerungsanlage ist in **Abb. 6.11-9** anhand des Verlaufes des Brennkammerdruckes p_{BK} und des Druckverlustes über den Gewebefilter $\Delta p_{v,Filter}$ für einen Versuch mit Lausitzer Trockenbraunkohle und Getreidereststoffstaub dargestellt. Die Oszillationen in beiden Messsignalen werden durch die periodische Abreinigung des Gewebefilters hervorgerufen.

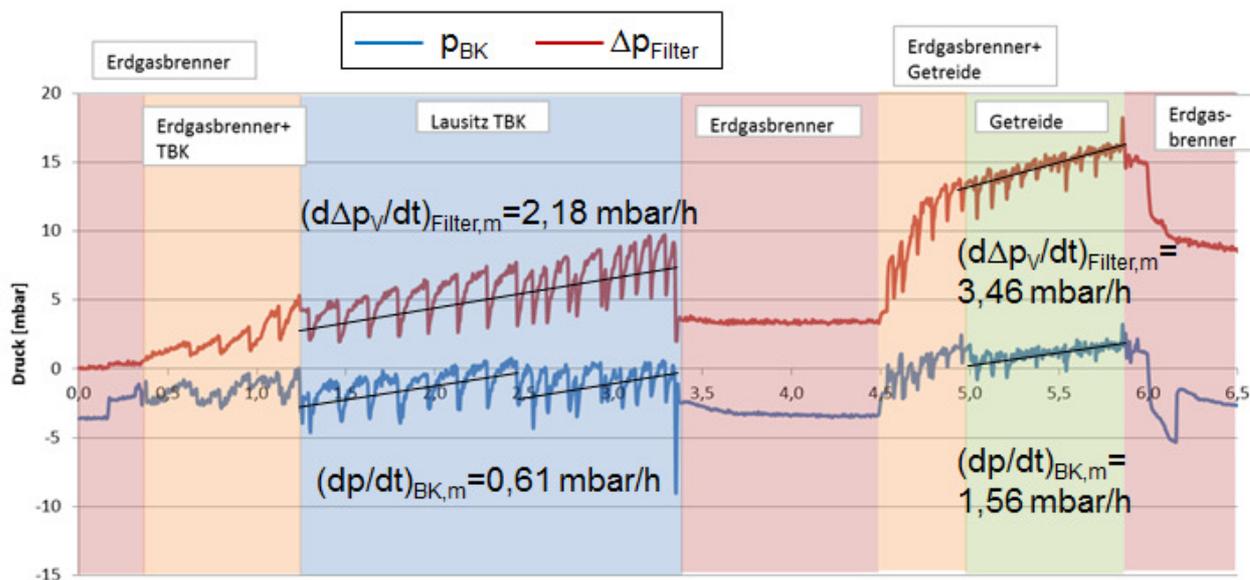


Abb. 6.11-9: Verlauf Brennkammerdruck und Druckverlust Gewebefilter während Versuch mit Getreidereststoffstaub

Es wird deutlich, dass sowohl der Druckverlust als auch der mittlere Anstieg des Druckverlustes über der Zeit $\Delta p_{v,Filter}/dt$ beim Einsatz des Getreidereststoffstaubes signifikant größer sind als beim Einsatz der TBK. Die Filterverschmutzung (Zunahme $\Delta p_{v,Filter}$) führt zu einem höheren p_{BK} und auch einer schnelleren Zunahme des Brennkammerdruckes p_{BK} / dt . Dies hat zur Folge, dass der pneumatisch transportierte Brennstoffmassenstromes aufgrund des höheren Gegen-druckes kontinuierlich abnimmt und irgendwann keine Brennstoffzufuhr mehr möglich ist.

Für die Mitverbrennung wurden am Eintritt des Abhitzekeessels bei 650 °C auf einer Lanze Beläge gesammelt und die mineralischen Phasen qualitativ mittels Röntgendiffraktometrie bestimmt. Die chemische Zusammensetzung der Ablagerungen ist in **Abb. 6.11-10** dargestellt. Es konnte dabei bei der Zumischung von Holzstaub und Switchgras zu Steinkohle eine verstärkte Bildung von Anhydrit festgestellt werden, d.h. es ist dann mit einer verstärkten Bildung von festen, sulfatischen Belägen zu rechnen. Erklärt werden kann dies durch einen verstärkten Eintrag von Calcium (Ca) durch die Biomassen, das mit dem freiem Schwefel (S) der Steinkohle binden kann ($S_{Steinkohle} = 1,18\%$, $S_{Biomasse} < 0,2\%$). Bei der Zumischung von Getreideresten ist eine verstärkte Anhydritbildung nicht erkennbar, eine RFA-Analyse der Aschen im Verschlackungsreaktor zeigt einen geringeren Gehalt an Ca-Verbindungen bei Getreideresten (Switchgras: 24,1%, Holzstaub: 18,4%, Getreidereste 8,08%). Im Vergleich zu Holzstaub konnte bei den Mitverbrennungsversuchen mit Getreideresten und Switchgras ein erhöhtes Verschlackungspotential festgestellt werden, da es hierbei zu einem häufigen Verstopfen von Messsonden kam.

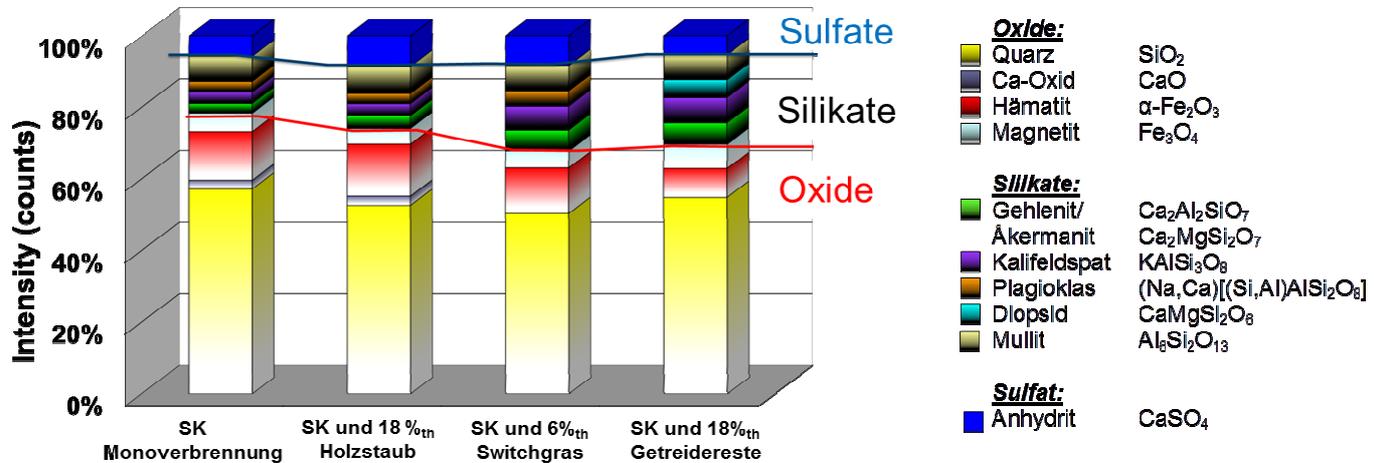


Abb. 6.11-10: Durch Röntgendiffraktometrie ermittelte mineralische Zusammensetzung von am Eingang des Abhitzekeessels (650 °C) gesammelten Ascheproben: für reine Steinkohle und Mitverbrennungsversuche

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Mono- und Coverbrennung von Holzstaub, Switchgras- und Getreidereststoffstaub wurde in vier verschiedenen Brennkammern mit unterschiedlichen Brennersystemen (horizontal und vertikal, mit und ohne Drall) sowie bei verschiedenen Feuerungswärmeleistungen (15 kW – 800 kW) untersucht. Bei der Monoverbrennung wurde außerdem der Einfluss prozesstechnischer Bedingungen (Luft- und Drallzahl) auf das Verbrennungsverhalten bestimmt. Die Versuchsergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die brennstofftechnischen Eigenschaften des Einsatzstoffes, d.h. die Korngröße, der Flüchtigengehalt und die Flüchtigenzusammensetzung sowie die Geschwindigkeit der Flüchtigenfreisetzung führen zu einer Beeinflussung des Aufheiz- und Zündverhaltens der Brennstoffpartikel. Für Switchgras und Getreidereststoffstaub führte dies bei der Monoverbrennung in einer 50 kW_{therm} Staubfeuerung aber auch bei der Co-verbrennung zu einer Verschiebung des Zündortes und einer Beeinflussung der Flammenstabilität.
- Bei allen durchgeführten Untersuchungen konnte ein guter Ausbrand festgestellt werden. Auch die Emissionsgrenzwerte (CO, NO_x, SO_x) der 13. BImSchV wurden bei Versuchen unterschritten. Im Hinblick auf den Einfluss der prozesstechnischen Bedingungen wurde festgestellt, dass die Zunahme der Luftzahl λ erwartungsgemäß zu einem verbesserten CO-Ausbrand und zu höheren NO_x-Gehalten im Abgas führt. Die Verringerung der Drallzahl S_n führt zu einer Zunahme der CO-Konzentration (aufgrund der ungünstigen Vermischung von Brennstoff und Luft) und einer Absenkung der NO_x-Konzentration im Abgas. Über eine gestufte Verbrennung ist eine Optimierung hinsichtlich CO-Ausbrand und NO_x-Emissionen möglich.

- Die im Vergleich zum Holzstaub niedrigeren Heizwerte sowie die höheren Aschegehalte und eine veränderte Aschekonsistenz führen bei der Monoverbrennung von Switchgras- und Getreidereststoffstaub in der 50 kW_{therm} Staubfeuerungsanlage zu einer stärkeren Beaufschlagung des Gewebefilters. Dies hat eine schnellere Zunahme des Brennkammerdruckes zur Folge, die Auswirkungen auf den kontinuierlichen Brennstofftransport hat. Die bei der Co-Verbrennung von Switchgrasstaub festgestellte verstärkte Anhydritbildung kann zu härteren Belägen am Kessel führen und damit die Kesselreinigung erschweren.

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, ist die Brennstoffflexibilität von Staubfeuerungsanlagen von Biomassen sehr stark davon abhängig, wie flexibel die Brennstoffförderung, der Brenner und die Abgasreinigung auf schwankende Brennstoffeigenschaften reagieren können.

So ist bei der pneumatischen Brennstoffförderung darauf zu achten, dass trotz eventuell höherer Brennstoffmassenströme ein kontinuierlicher Brennstofftransport aufrechterhalten werden kann (Grenzbeladung für Flugstromförderung nach Muschelknautz [36]). Eine weitere wichtige Bedeutung nimmt die technische Ausführung des Brenners ein. So konnte in den durchgeführten Untersuchungen zur Monoverbrennung in der 50 kW_{therm} Staubfeuerungsanlage die Verdrallung des Brennstoff-Luft-Gemisches nur über das Verhältnis von Trägergas- zu Gesamtluft verändert werden. Vorteilhaft wären bewegliche Einbauten (Leitbleche) um den Drall zu beeinflussen, wie sie z. B. im Brenner der BRENDA in Form eines movable block realisiert sind. Zur Beeinflussung des Zündortes kann neben einer Anpassung des Brenners auch die Verringerung der Luftvorwärmungstemperatur in Betracht gezogen werden (Verzögerung der Partikelerwärmung). In Hinblick auf die Rauchgasreinigung ist auch zu prüfen, in wie weit eine Erhöhung der Flugstaubbeladung im Abgas von der Abgasreinigung kompensiert werden kann.

6.12 Verschlackungs- und Korrosionsverhalten

Ziel der Untersuchungen

Zur Untersuchung des Verschlackungsverhaltens und der Neigung zur Bildung von Ablagerungen in technischen Feuerungen ist es sehr hilfreich, Proben der Ablagerungen von Biomassen, Kohlen, Kohlemischungen, Biomassen-Kohle Mischungen und Ersatzbrennstoffen unter definierten Bedingungen zu untersuchen. Um die Verschlackungsneigung der hier verwendeten Biomassen zu bestimmen, wurde die Verbrennung der Biomassen in unterschiedlichen Temperaturbereichen am Verschlackungsreaktor untersucht und Ablagerungsversuche durchgeführt. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen war die Ermittlung der Ablagerungseigenschaft der Biomassen. Hierzu werden die Ablagerungsgeschwindigkeit und die Struktur der Ablagerungen ermittelt. Das konkrete Korrosionsverhalten wurde nicht eingehend untersucht. Hierzu könnten Korrosionskennzahlen wie das Schwefel/Clor-Verhältnis und eine Chlorkorrosionskennzahl definiert werden. Zur Bewertung dieser Zahlen würden weitere langjährige Untersuchungen benötigt werden.

Versuchsaufbau

Die Verbrennungs- und Verschlackungsuntersuchungen wurden mit dem in der **Abb. 6.12-1** gezeigten Verschlackungsreaktor durchgeführt. Der Verschlackungsreaktor ist ein spezieller Reaktor, in dem entweder ungekühlte Keramik- oder luftgekühlte Metallsonden in verschiedenen Abständen (Verweilzeiten) zum Brenner eingesetzt werden, auf denen sich die bei der Verbrennung entstehende Asche ablagert. Die Aschebeläge werden physikalisch, stofflich und mineralogisch untersucht. Dem Brenner wird pneumatisch mit Transportluft die staubförmige Biomasse (oder Kohlestaub) zugeführt, welcher bei der Durchströmung des Reaktors abbrennt. Zur Untersuchung des Verbrennungsverhaltens (Emissionen, Abbrand, Temperaturverteilung) werden entlang der Brennkammer spezielle Sonden für die Messung der Abgaszusammensetzung, Abgastemperatur und Partikelentnahme (Abbrandbestimmung) eingesetzt.

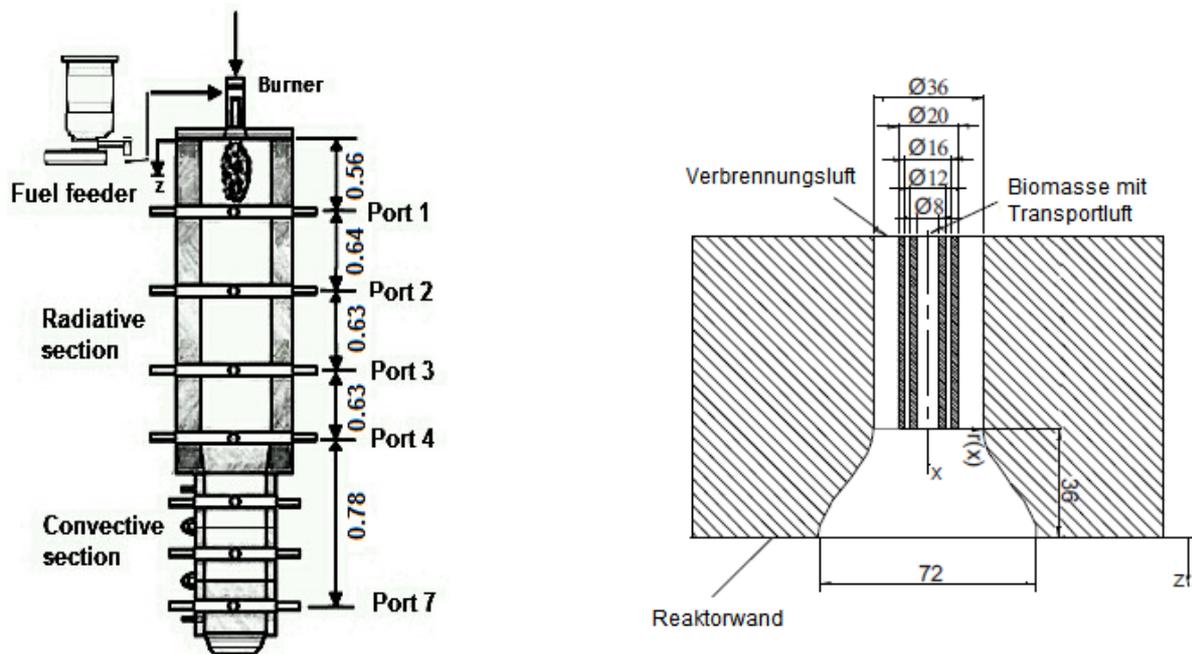


Abb. 6.12-1: Schematische Darstellung des Verschlackungsreaktors

Der wesentliche Teil der Anlage ist ein Ofen, der aus einem Abschnitt mit hoher Temperatur (Strahlungsteil) und einem Abschnitt mit niedriger Temperatur (Konvektiver Teil) besteht. Der Strahlungsteil ist mit Heizelementen ausgestattet, so dass seine Wandtemperatur auf einen gewünschten Temperaturwert eingestellt werden kann. Abb. 6.12-1 (rechts) zeigt die Konfiguration des Brenners, der für Biomassefeuerung verwendet wird. Er verfügt über eine zentrale Einspritzleitung, um eine reibungslose Brennstoffversorgung zu erleichtern. Der Brennerstein ist um das folgende Polynom: $r(x)=18 + 0,0414664x^2 - 0,0007716x^3$ geformt, wobei der Austrittsdurchmesser (72 mm) doppelt so groß wie der Einlassdurchmesser (36 mm) ist.

Die untersuchten Flammen sind unverdrallte Flammen von rund 15 kW Feuerungsleistung. Für jede Biomasse wurden zwei Flammen erzeugt. Bei den durchgeführten Versuchen wurden zum einen eine Wandtemperatur von 1100°C und Luftzahlen zwischen $\lambda=1,2$ und $\lambda=1,3$ eingestellt, während bei der zweiten Versuchseinstellung eine Wandtemperatur von 900°C und Luftzahlen $\lambda=1,8 \div 1,9$ eingestellt wurden, um die Verschlackungsneigung der Flugasche zu verringern. Bei den Versuchseinstellungen $T_w=1100^\circ\text{C}$ und $\lambda = 1,2$ wurden die Biomassen Holzhackschnitzel, Holzstaub, Grünschnitt, Gärreste, Getreidereststoffe, Pappel und Switchgras untersucht, während bei $T_w=900^\circ\text{C}$ und $\lambda = 1,2$ die holzartigen Biomassen Holzhackschnitzel und Holzstaub, die landwirtschaftliche Biomasse Getreidereststoffe und die Reste aus der Zersetzungsprodukt Gärreste eingesetzt wurde.

In den industriellen Anwendungen werden die Brennstoffe zu den Brennkammern mit Transportluft gefördert. In den Versuchen wurden die Transportluftgeschwindigkeiten mit $30 \div 40$ m/s und die Verbrennungsluftgeschwindigkeiten mit $3 \div 6$ m/s relativ niedrig eingestellt [5]. Die Flammentemperaturen wurden unter Verwendung eines Absaugpyrometers (Messbereich $900 - 1300^\circ\text{C}$), mit einer Genauigkeit um $\pm 25^\circ\text{C}$ gemessen.

Um die Verschlackungsneigung der Biomassen zu untersuchen, wurde eine ungekühlte keramische Ablagerungssonde im Messpunkt Port-3 des Reaktors eingeführt und für zwei Stunden dort belassen. Bei der Untersuchung des Holzstaubs wurde die Ablagerungssonde wegen seines geringen Aschegehalts für acht Stunden im Reaktor belassen. Der Messpunkt Port-3 befindet sich in einem Abstand 1,83 m vom Brenner und an diesem Punkt entspricht die Partikel-Verweilzeit etwa 1,1 – 1.8 Sekunden (auf der Basis von CFD-Berechnungen) [5]. Nach den Untersuchungen wurden die gesammelten Ablagerungen gewogen. Die Ablagerungssonde wurde auf eine bestimmte Länge abgeschnitten, in Harz eingebettet, poliert und mit dem Rasterelektronenmikroskop analysiert. Neben dieser Analyse wurden die Hauptbestandteile der Aschen identifiziert.

Versuchsergebnisse

Abb. 6.12-2 zeigt die gemessene Gastemperatur und die Sauerstoffkonzentration in verschiedenen Abständen vom Brenner an der Mittellinie des Reaktors. Die gemessenen Messdaten wurden mit den Ergebnissen von Middleburg-Steinkohle verglichen. An Messpunkt 1 (Port-1) wurde die Flammentemperatur der Kohleflamme, die bei einer Luftzahl $\lambda = 1,2$ gemessen wurden, um 100-130 °C höher als die Biomasseflammen gemessen. Die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen in Port-1 zeigen die niedrigsten Werte (im Bereich 6,6÷7,3 Vol.%) für die Middleburg-Kohleflammen. Somit tritt die Zündung der Kohleflammen näher an dem Brenner auf, während dies bei Biomasseflammen zwischen Port-2 und Port-3 gilt. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Mahlung der Kohle im Vergleich zu den Biomassen viel feiner war. Da die Biomasseteilchen wesentlich größer als Kohlepartikel sind, wird mehr Zeit benötigt, um sie bis zu einer Temperatur zu erhitzen. Folglich tritt die maximale Flammentemperatur für Kohleflammen in Port-1 auf, während dies bei Biomasseflammen zwischen Port-2 und Port-3 gilt. Die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen und Temperaturen zeigen in Port-1, dass relativ geringe Unterschiede bei der Zündung von Biomasse auftreten, obwohl die Flammen des Holzstaubs ein wenig schneller als die anderen Biomassen entzünden.

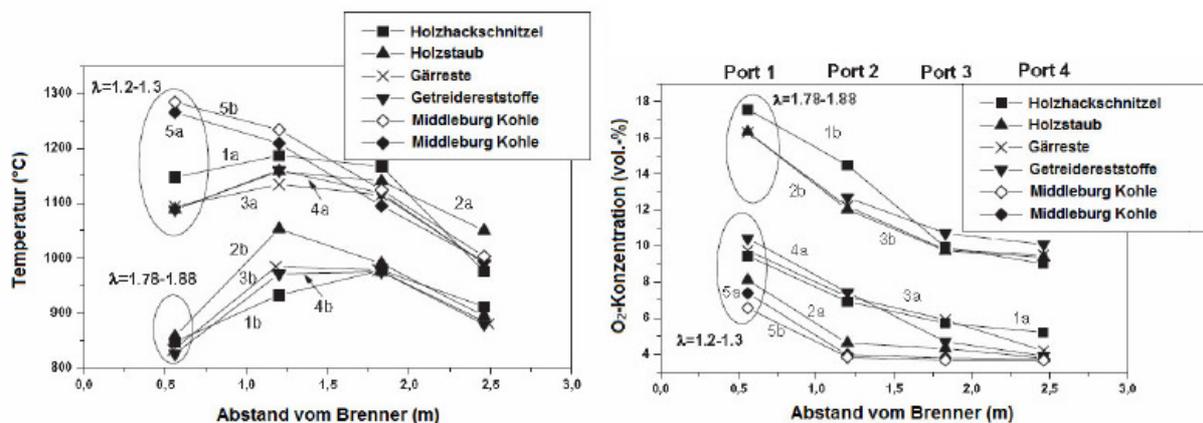


Abb. 6.12-2: Gemessene Gastemperatur und Sauerstoffkonzentration [5]

Die Ascheablagerungen werden auf Ablagerungssonden mit 22 mm Durchmesser gesammelt. Die Keramiksonde erreicht bei den Untersuchungen eine Oberflächentemperatur von ca. 950 °C. Diese Temperatur übersteigt die Kondensationstemperatur von Aluminosilikaten und

Alkalisalzen, so dass diese in diesem Temperaturbereich in der Gasphase vorliegen können. Somit ist die Ablagerung hauptsächlich durch einen direkten Aufprall von Aschepartikeln bedingt und die Kondensation von Alkalisalzen hat keine Rolle gespielt.

In der **Tab. 6.12-1** sind die gemessenen Ablagerungsmengen dargestellt. Es zeigt sich, dass einige Biomassen (Grünschnitt, Gärreste und Getreidereststoffe) aufgrund des größeren Aschegehaltes und bei hohen Temperaturen eine höhere Verschlackungsneigung aufweisen.

Tab. 6.12-1: Die gemessenen Ablagerungsmengen der Biomassen

Biomasse	Aschegehalt (i.an)	Ablagerungszeit [h]	Massenstrom [kg/h]	Ablagerungsmasse auf Keramikrohr [g], (T _w =1100°C, λ=1,2)	Ablagerungsmasse auf Keramik [g], (T _w =900°C, λ=1,8)	Ablagerungsmasse auf Keramik [g/m ² h*kg], (T _w =1100°C, λ=1,2)	Ablagerungsmasse auf Keramik [g/m ² h*kg], (T _w =900°C, λ=1,8)
Grünschnitt	12,43	2	3,18	13,972	0,591	106,13	4,49
Gärreste	7,25	2	3,72	8,227	1,049	53,42	6,81
Getreidereststoffe	6,2	2	3,64	6,129	1,634	40,67	10,84
Pappel	3,53	2	3,2	-	0,968	-	7,31
Holz hackschnitzel	1,74	2	3,19	2,553	0,558	19,33	4,23
Switchgras	1,35	2	3,36	-	0,481	-	3,46
Holzstaub	0,5	2 / 8	3,12	0,278 / 2,855	0,061	2,15 / 5,52	0,47

Bei der Versuchseinstellungen T_w = 1100 °C und λ = 1,2 wurden die abgelagerten Massen 2,553 g für Holz hackschnitzel, 2,855 g für Holzstaub (nach acht Stunden), 8,227 g für Gärreste und 6,129 g für Getreidereststoffe gewogen. Wenn diese Mengen mit den Ascheeinträgen in den Reaktor normalisiert werden, werden die Ablagerungsraten 2,35 %, 2,3 %, 1,5 % und 1,37 % für die Biomassen Holz hackschnitzel, Holzstaub, Gärreste und Getreidereststoffe bestimmt.

Diese Experimente wurde bei λ = 1,8 und bei einer Wandtemperatur 900 °C wiederholt, so dass die Temperatur der Sonde und der auftreffenden Teilchen auf etwa 970 °C verringert werden. Nach diesen Untersuchungen wurden die Ablagerungsraten für diese Biomassen 0,51 %, 0,19 % und 0,37 % gemessen. **Abb. 6.12-3** zeigt die gemessenen Ablagerungsraten in Abhängigkeit der Partikeltemperatur.

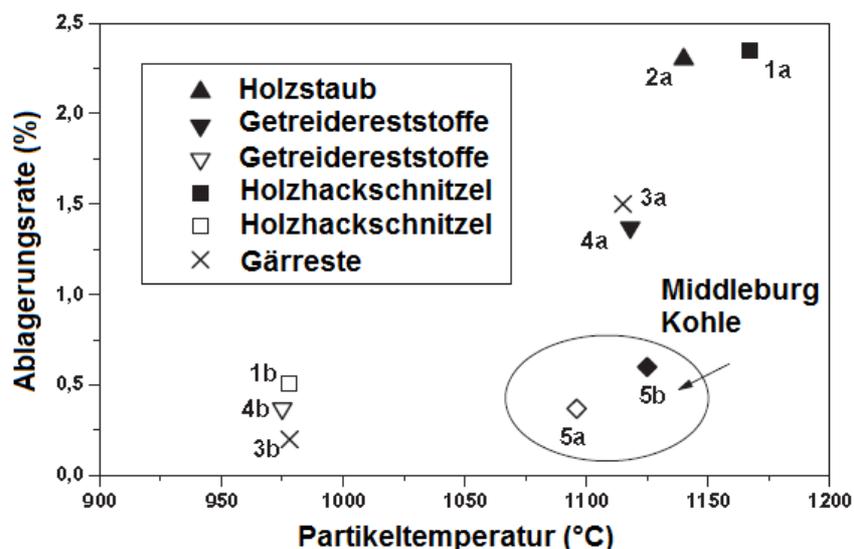


Abb. 6.12-3: Die gemessenen Ablagerungsraten als Funktion der Partikeltemperatur [5], (Die einzelnen Ergebnissen sind **Tab. 6.12-2** zu entnehmen)

Die Messungen haben gezeigt, dass die Flugaschen im Bereich Port-3 gleichmäßig über den Ofenquerschnitt verteilt sind [5]. Durch den gesamten Ascheeintrag in den Reaktor, das Verhältnis der Ablagerungsfläche zur Ofenquerschnittsfläche und durch die Menge an Asche, die in der Sammelzeit durch die projizierte Fläche der Ablagerungssonde (Durchmesser: 22 mm) fliegt, kann die Ablagerung für die gesamte Ofenfläche abgeschätzt werden. In unseren Experimenten ist das Flächenverhältnis ca. 0,093, somit kann auf der Ablagerungssonde nicht mehr als 9,3 % vom gesamten Ascheeintrag in den Reaktor gesammelt werden. Wie in **Tab. 6.12-2** bei $\lambda = 1,2$ gezeigt wird, beträgt die auf den Sonden gesammelte Aschemenge etwa 25 % der maximal möglichen Ablagerungsmenge für Holzhackschnitzel und Holzstaub. Die entsprechenden Werte für Gärreste und Getreidereste sind 16,3 % und 14,7 %, während dieser Wert für Middleburg-Steinkohle 4 % beträgt.

Tab. 6.12-2: Ascheablagerungsdaten

Flamme Nr.	Brennstoff	Ablagerungszeit [h]	Ascheeingang [g]	Partikeltemperatur [°C]	Ablagerungsmasse [g]	Ablagerungsrate [%]	Aschemenge in der Projektionsfläche [g]	Anteil der abgelagerten Asche an dieser Aschemenge [%]
1a	Holzhackschnitzel	2	108,8	1167	2,553	2,35	10,2	25,1
1b		2	108,8	978	0,558	0,51	10,2	5,5
2a	Sawdust	8	124	1140	2,855	2,30	11,6	24,7
3a	Gärreste	2	540,2	1115	8,227	1,52	50,4	16,3
3b		2	540,2	978	1,049	0,19	50,4	2,1
4a	Getreidereststoffe	2	446,4	1118	6,129	1,37	41,7	14,7
4b		2	446,4	975	1,634	0,37	41,7	3,9
5a	Middleburg Kohle	2	420	1096	1,552	0,37	39,2	4,0
5b		2	420	1125	2,539	0,60	39,2	6,5

Um die oben genannten Unterschiede zu erklären, soll zunächst die Strömung um die Ablagerungssonde untersucht werden. Die Reynoldszahl beschreibt die Strömung um die Ablagerungssonde und hat einen Wert von etwa 40 und 60 bei den Untersuchungen mit den Luftzahlen $\lambda = 1,2$ und $\lambda = 1,8$. Für die Strömung bei $Re=40$ wird der kritische Wert der Stokes-Zahl rund 0,4 und verringert sich für $Re=60$ leicht auf 0,38.

$$Re = \frac{\rho_p \cdot u_p \cdot D_{sonde}}{\eta_p} \quad St = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot u_p}{9 \cdot \eta_p \cdot D_{sonde}}$$

Unter den angenommenen Parametern ($\rho_p = 2000 \text{ kg/m}^3$, $u_p = 0,5 \text{ m/s}$, $\eta_g = 50 \cdot 10^{-6} \text{ kg/ms}$ und $D_{sonde} = 0.022 \text{ m}$) treffen die Partikel, die kleiner als $63 \mu\text{m}$ sind, nicht die Oberfläche der Sonde. Die Partikel, die größer als $63 \mu\text{m}$ sind, haben unterschiedliche Aufschlagswahrscheinlichkeiten. Diese Wahrscheinlichkeit liegt für die $77 \mu\text{m}$ - Partikel bei ca. 0,2 ($St = 0,6$) und für die $315 \mu\text{m}$ - Partikel bei 0,85 ($St = 10$). Falls die Partikeldurchmesser während des Verbrennungsprozesses konstant angenommen werden, liegt die Gesamtaufschlagswahrscheinlichkeit der Partikel, bei einem zulässigen maximalen Wert. In der Wirklichkeit nimmt der Partikeldurchmesser durch Schrumpfung und Bruch ab [5].

Mit den Experimenten wurden die Erhöhung der Klebeneigung und eine Korrelation mit der Partikeltemperatur festgestellt (s. **Abb. 6.12-4**). Allerdings wurde zwischen der Ablagerungs-

rate und der Ascheerweichungstemperatur keine Korrelation gefunden. Es ist hier zu beobachten, dass die Anhaftungswahrscheinlichkeit der Aschepartikel der Middleburg Kohle die der Biomassen übertrifft.

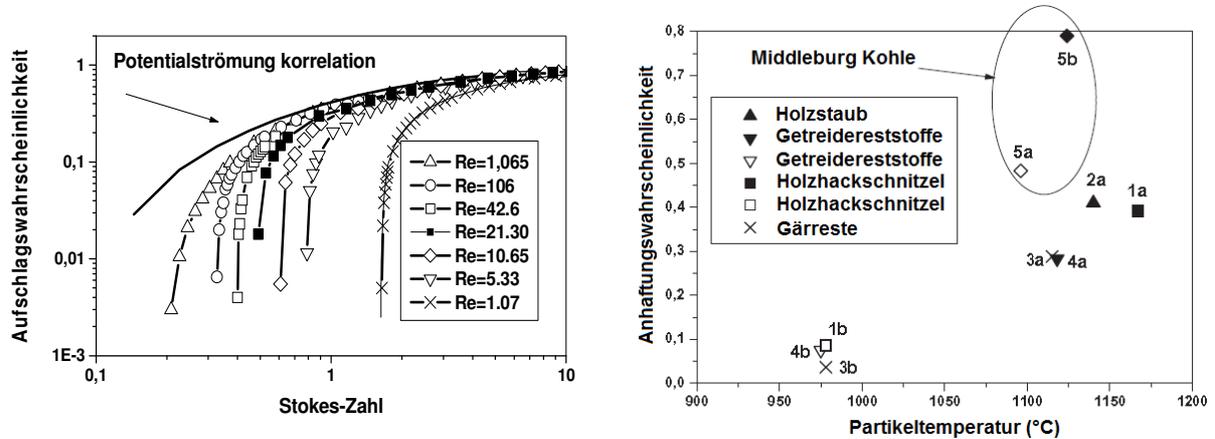


Abb.6.12-4: Die Aufschlags- und Anhaftungswahrscheinlichkeit [5], (Die einzelnen Ergebnissen sind Tab. 6.12-2 zu entnehmen)

Es hat sich herausgestellt, dass bei der Untersuchung mit der Luftzahl $\lambda = 1,2$ die Flammentemperatur der Kohle um 100 °C höher als die Flammentemperatur der Biomasseflammen liegt. Bei der Kohle wurde eine schnellere Zündung als bei der Biomasse beobachtet, wobei die Korngröße der Kohle feiner als die der Biomassen ist. Bei allen Biomassen wurden mit einem Mindestwert 94,2 % ein guter Ausbrandanteil erreicht.

Die Ablagerungsrate der Biomassen wurde bei 970 °C Partikeltemperatur zwischen 0,2 – 0,5 % gemessen. Diese erhöht sich bei 1170 °C Partikeltemperatur auf 1,4 bis 2,4 %. Die Ablagerungsrate der Biomassen wurde bei höheren Partikeltemperaturen bis zu drei Mal höher als bei Middleburg-Steinkohle gemessen. Dies zeigt eine größere Klebeigung der Aschepartikel von Biomassen gegenüber den Kohleaschepartikel.

Die Aschepartikel, die in den Untersuchungen mit $T_w = 1100$ °C abgelagert wurden, sind komplett geschmolzen, wobei die Aschepartikel, die mit $T_w = 900$ °C abgelagert wurden, lockerer waren, aber auch geschmolzen sind.

7 Bewertung und Vergleich

7.1 Stand der Technik deutscher Biomassekraftwerke

7.1.1 Datenbeschaffung und –auswertung

Um die durch die F&E-Arbeiten ermittelten Ergebnisse anwenden zu können ist es unabdingbar, sich einen Überblick über den Stand der Technik deutscher Biomassekraftwerke zu verschaffen. Als Datengrundlage dienten Referenzlisten von Anlagenbauern, Antworten von Betreibern auf schriftliche Anfragen, Homepages, einsehbare Genehmigungsunterlagen und Veröffentlichungen. Insgesamt konnten somit Daten von 303 Anlagen erfasst werden, wobei die Datensätze nicht immer vollständig sind. Berücksichtigt man, dass gemäß [2] in 2012 ca 550 Biomassekraftwerke in Betrieb waren, können die Ergebnisse aber als repräsentativ betrachtet werden.

Alle Informationen wurden in einer relationalen Datenbank, basierend auf MS Access, gespeichert und verarbeitet. Es erfolgte eine Strukturierung nach Betreiberdaten, Biomasse, thermochemischen Konversionsverfahren mit Apparatechnik, Gasreinigung, Stromerzeugung und Zusatzinformationen (s. **Abb. 7.1-1**)

Abb. 7.1-1: Formular mit Datensatz zu einer Anlage

7.1.2 Entwicklung der Technik

Biomassekraftwerke auf Basis Holz wurden in Deutschland vor Einführung der Förderung von Strom aus erneuerbaren Energien vereinzelt betrieben. Standardtechnologie war die

Rostfeuerung mit Wasser-Dampfkreislauf und Turbine. Mit der Einführung des ersten EEG in 2000 starteten etliche Planungen v.a. privater Investoren für die Errichtung neuer Anlagen. Nach der üblichen Genehmigungs-, Engineering- und Bauzeit von drei bis vier Jahren war ein Maximum an Inbetriebnahmen in den Jahren 2003 bis 2004 zu verzeichnen (s. **Abb. 7.1-2**). Der Wert von ca 13 Neuanlagen pro Jahr geht danach auf ein Niveau von ca 5 bis 7 bis 2012 zurück.

In der Graphik auch zu sehen ist der Anstieg der Zahl der ORC-Anlagen ab 2003. Die ORC-Technologie („Organic Rankine Cycle“) bietet die Möglichkeit, den Kessel bei niedrigen Temperaturen fahren zu können. Die Gefahr der Korrosion ist somit niedriger als bei Wasser-Dampf-Kreisläufen. Sofern eine hohe Wärmenutzung gegeben ist, kann der niedrige elektrische Wirkungsgrad von 12 bis 20 % (bezogen auf die Feuerungswärmeleistung) in Kauf genommen werden.

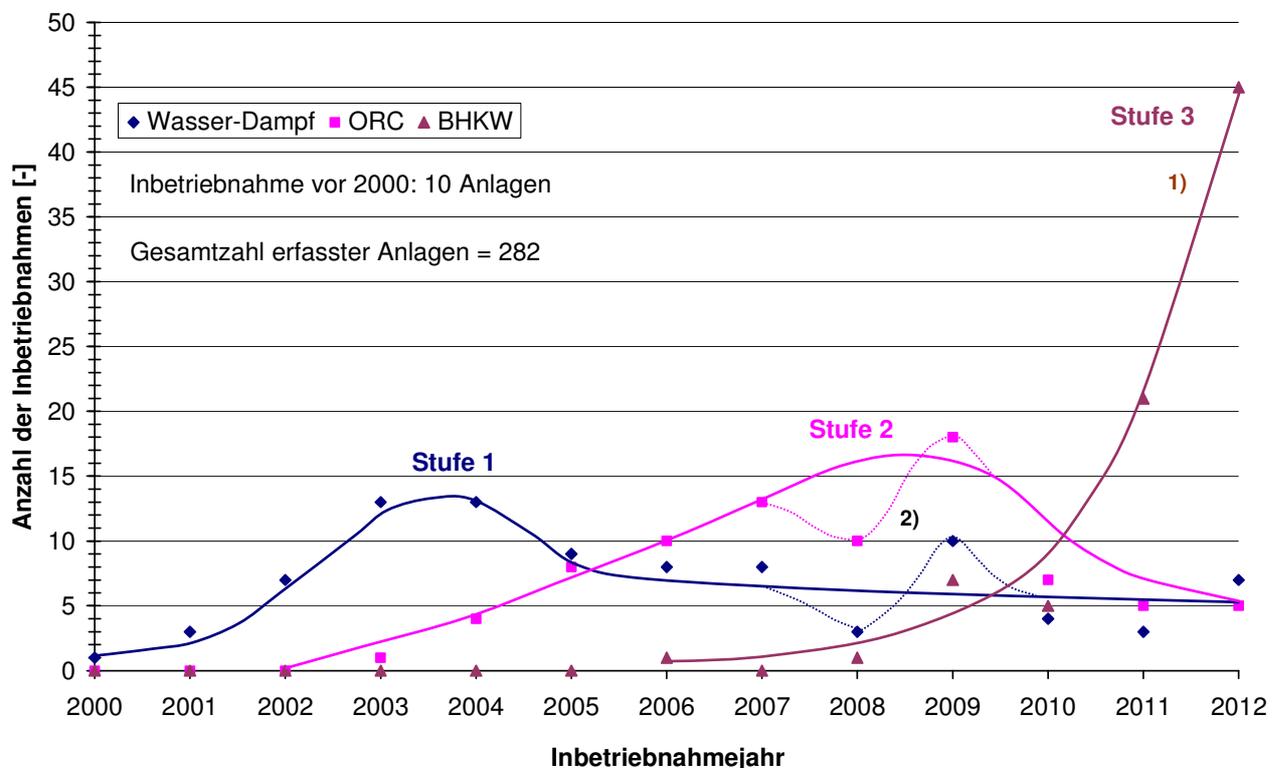


Abb. 7.1-2: Inbetriebnahmen von Biomassekraftwerken seit Einführung des EEG

Bem.: 1): Verteilung der Inbetriebnahmen bei den Vergasern in den Jahren 2011 u. 2012 geschätzt
 2) Nebenextremwerte, ausgelöst durch neues EEG in 2009

Zu erkennen ist ferner, dass Diskussionen des EEG wie im Jahr 2008 sofort zur Verschiebung von Investitionsentscheidungen führen.

Bezogen auf die Anlagenzahl sind 71 % für den Einsatz von maximal Frischholz zugelassen (s. **Abb. 7.1-3**). Bis zum Altholz der Klasse A III nimmt die Zahl der Zulassungen stetig ab. Erst beim A IV-Holz steigt der Wert auf 11 % wieder an.

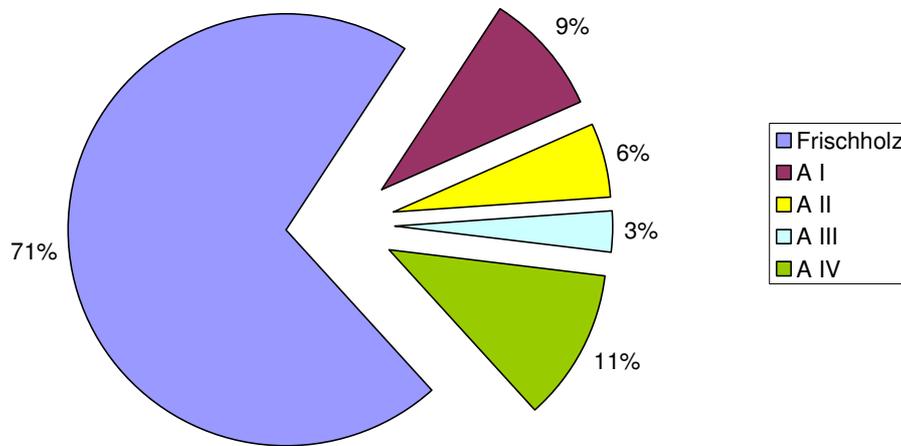


Abb. 7.1-3: Einsatz der Holzsorten in deutschen Biomassekraftwerken

Ordnet man den zulässigen Holzeinsatz den Anlagengrößen zu, ergeben sich interessante Zusammenhänge. So ist in **Abb. 7.1-4** in dreidimensionaler Darstellung zu erkennen, dass die Kleinanlagen ausschließlich mit Frischholz arbeiten. Mit zunehmender Anlagengröße läßt sich verfolgen, dass die Zulassung bis zum A IV-Holz stetig steigt. Im Bereich $5 \leq X \leq 10 \text{ MW}_{el}$ kommt es zum Zustand mit zwei Maxima.

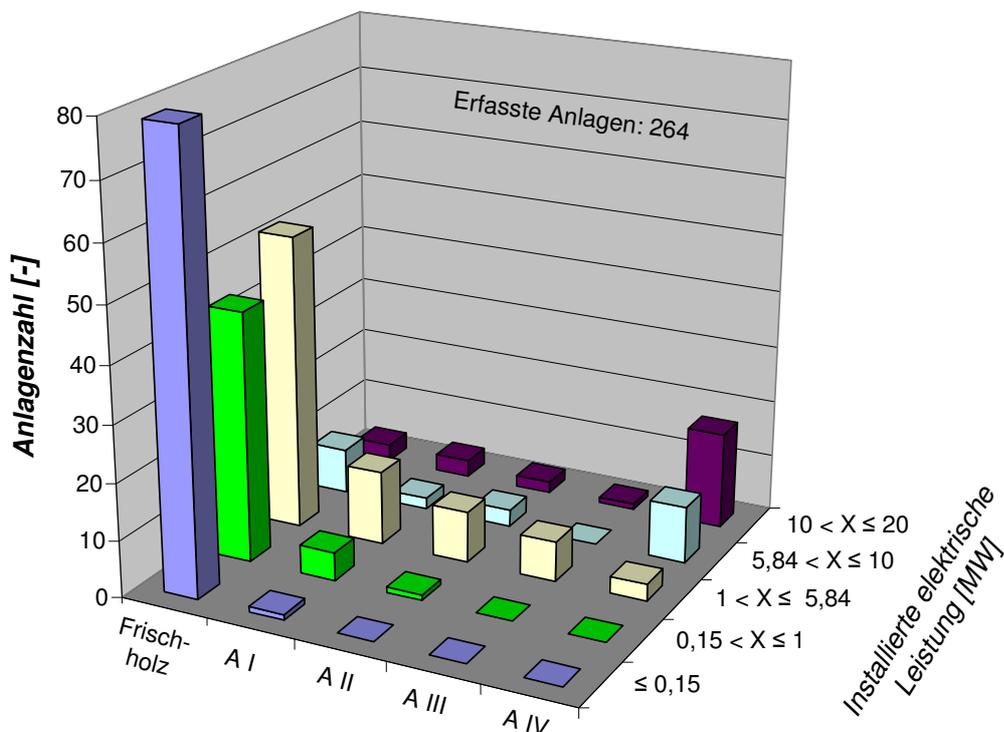


Abb. 7.1-4: Anzahlbezogene Aufteilung der Kraftwerke bezüglich der maximal zugelassenen Holzklasse

Bem.: Die Klasseneinteilung der installierten Leistung orientiert sich an den Einteilungen des EEG. Der Wert von 5,84 entsteht dadurch, dass die Zuordnung zu einer Klasse sich nach einer Revision des EEG nicht mehr nach der installierten Leistung, sondern nach der elektrischen Jahresarbeit dividiert durch die Jahresstundenzahl von 8.760 richtete. Für die Auswertung wurde eine fiktive Betriebsstundenzahl auf Volllast von 7500 Bh/a angesetzt, da die Auswertung eine auffällige Häufung von Anlagengrößen knapp über 5 MW_{el} ergab, welche offenkundig bei der Vergütung der genannten Klasse zuzuordnen waren.

Entweder sind diese Anlagen nur für Frischholz zugelassen oder gleich bis zum A IV-Holz. Die Biomassekraftwerke bis 20 MW_{el} sind vorzugsweise bis A IV zugelassen.

Wechselt man von der anzahlbezogenen Betrachtungsweise zur leistungsbezogenen Y-Achse, ergibt sich ein völlig anderes Bild. Deutlich in **Abb. 7.1-5** zu erkennen ist, dass der Großteil an elektrischer Energie mit Kraftwerken erzeugt wird, die bis zur höchsten Altholzkategorie zugelassen sind. Von der elektrischen Leistungsfähigkeit spielen die Kleinanlagen bis 150 kW_{el}, obwohl sie mengenmäßig die klare Mehrheit stellen, kaum eine Rolle.

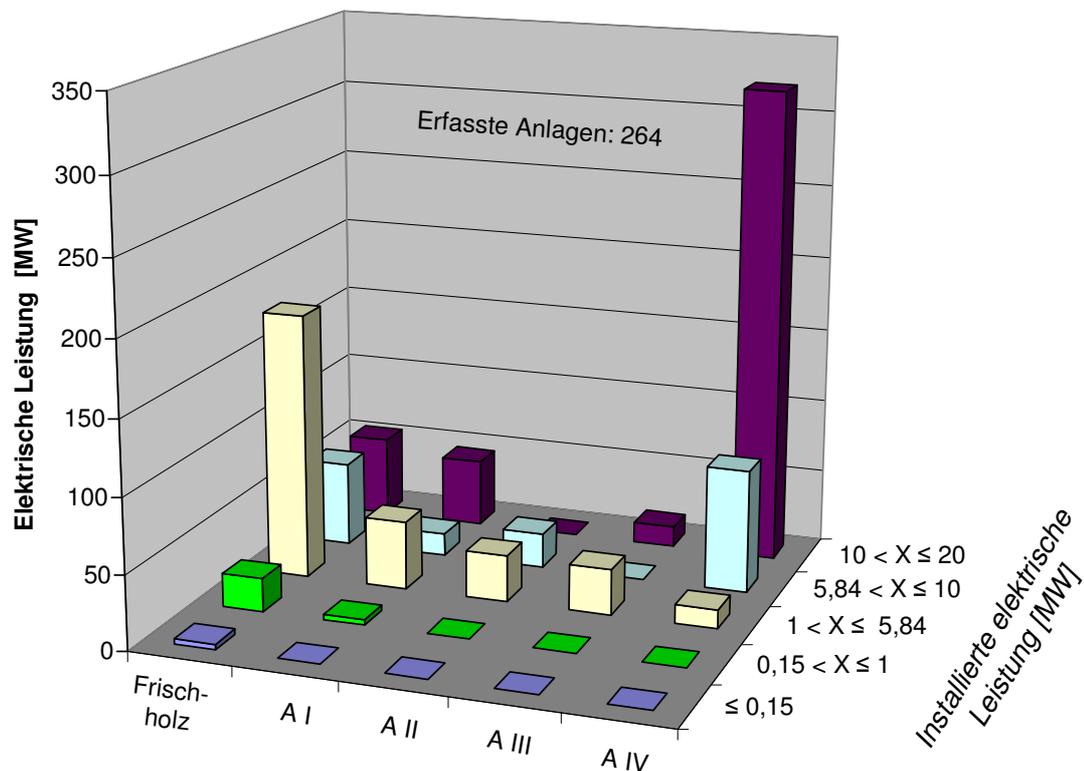


Abb. 7.1-5: Leistungsbezogene Aufteilung bezgl. der maximal zugelassenen Holzklasse

7.1.3 Thermochemische Reaktoren

Bei der thermochemischen Umsetzung des Holzes konnte man sich bis zum Jahr 2009 auf den Begriff der Feuerung beschränken. Danach überschritt die Vergasungstechnologie die Schwelle zur Marktreife. Zu nennen als Pioniere sind besonders die Firmen Spanner Re² (Neufahrn) und Burkhardt (Mühlhausen). Marktfähige Preise erreichen die genannten Firmen u.a. durch das Anbieten von Standardgrößen. 30 und 45 kW_{el} bei Spanner; 180 kW_{el} bei Burkhardt. Eingesetzt

wird immer naturbelassenes Holz; entweder als Hackschnitzel (Spanner) oder als Pellets (Burkhardt). Wünscht der Kunde größere Leistungen, sind mehrere Anlagen parallel zu betreiben.

Die Vergasungstechnologie füllt somit die bisher existierende Lücke kleiner Leistungen aus (s. **Abb. 7.1-6**). Ab der Leistungsklasse 150 kW_{el} beginnt schlagartig die Vorherrschaft der Verbrennungsroste, die sich bis 20 MW_{el} durchzieht. Ab 5 MW_{el} und besonders im Bereich 10 bis 20 MW_{el} treten Wirbelschichten als Konkurrenz hinzu.

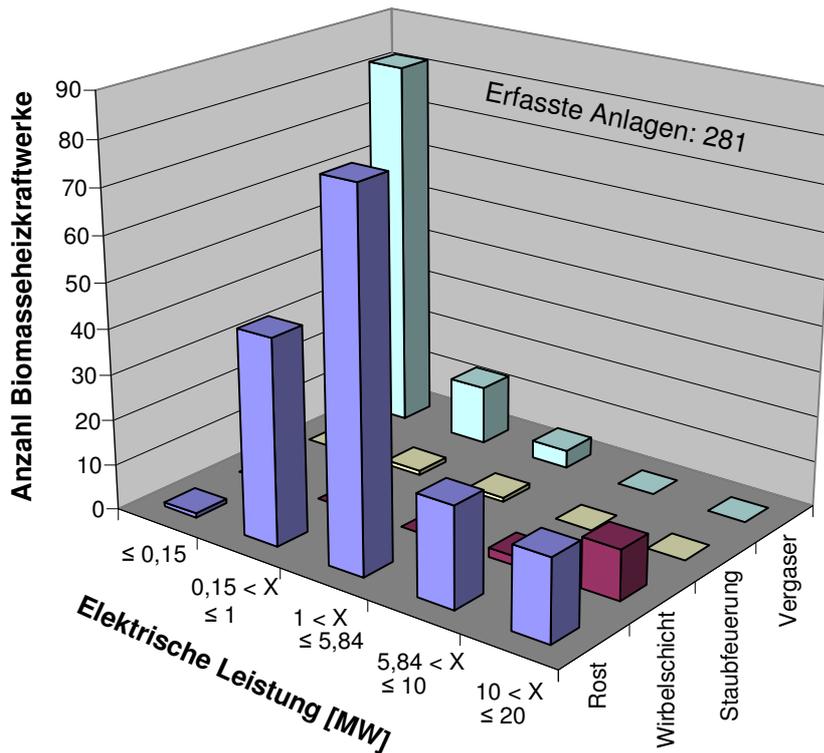


Abb. 7.1-6: Technologie der thermochemischen Konversion als Funktion der Anlagengröße
 Bem.: „Rost“ beinhaltet auch Wurfbeschicker und die Zusatzeindüsung von Sägespänen

Bei den Rosten dominieren die Vorschubroste. Kegelroste wurden von der Fa. PROLiGNIS (Ingolstadt) bei der Größe von 5 MW_{el} mehrfach gebaut. Ab ca 5 MW_{el} werden Wanderroste verstärkt wirtschaftlich. Reine Staubfeuerungen waren nur zwei Linien zu finden. In den meisten Anlagen wird der Staub bzw. die Sägespäne mitverbrannt.

Die Beschickung des Holzes erfolgt häufig mit sog. Wurfbeschickern („Spreader Stoker-Verfahren“).

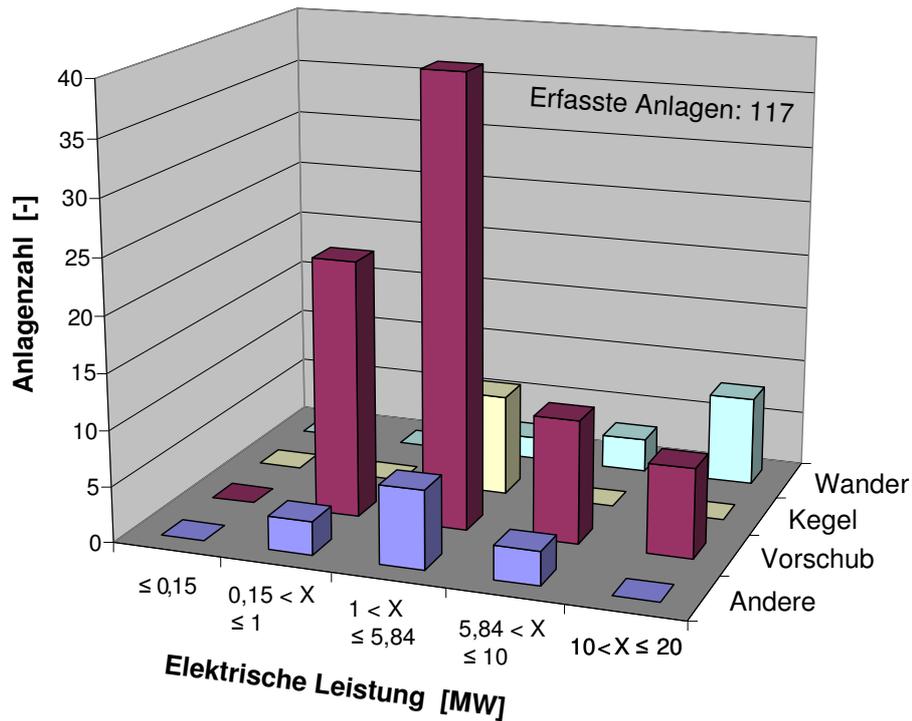


Abb. 7.1-7: Anwendungen verschiedener Roste als Funktion der Anlagengröße

7.1.4 Strom- und Wärmeerzeugung

Gemäß den Erläuterungen der vorherigen Kapitel ist zu erwarten, dass sich Zuordnungen der Stromerzeugungstechnologien zu den Anlagengrößen wiederfinden lassen. **Abb. 7.1-8** zeigt, dass dies auch der Fall ist.

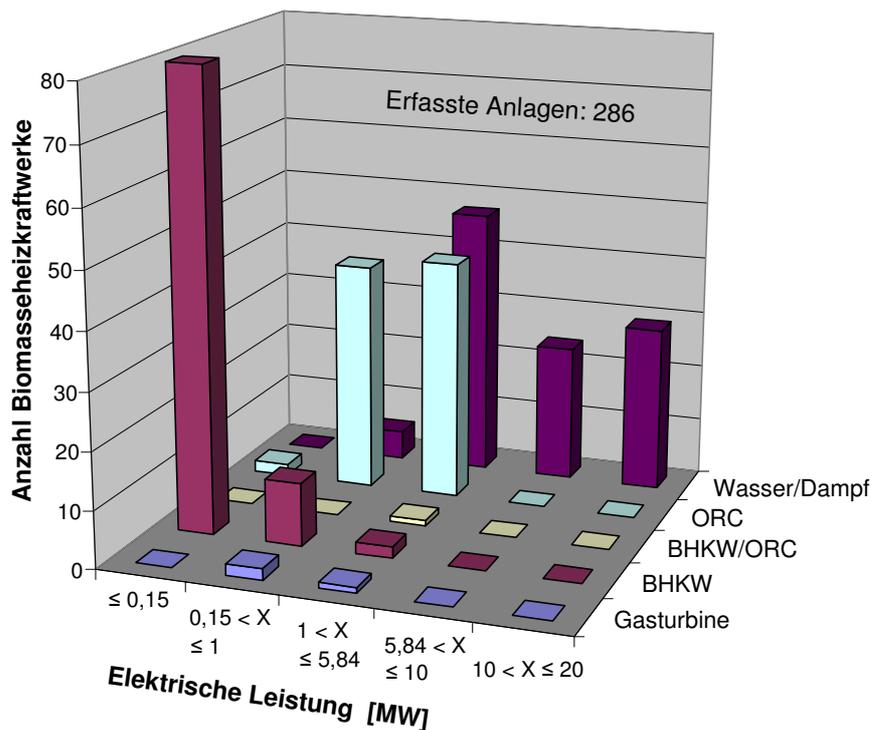


Abb. 7.1-8: Stromerzeugungstechnologien als Funktion der Anlagengröße

Bem.: „Wasser/Dampf“ ohne Dampfmotor, nur Turbine-Generator-Technik

Die den Vergasern zugehörigen Blockheizkraftwerke (BHKW) finden sich bis maximal 1 MW_{el}. Etwas überraschend bei der Erhebung war das Ergebnis, dass Wasser-Dampf-Kessel schon ab 150 kW_{el} im Einsatz sind. ORC-Anlagen sind ziemlich genau auf den Bereich von 0,15 bis 5 MW_{el} begrenzt. Gasturbinen und Dampfmotoren sind nur vereinzelt zu finden.

7.1.5 Gasreinigung

Gegenüber Kraftwerken mit fossilen Energieträgern und Abfallverbrennungsanlagen besitzen die Holzkraftwerke mit Feuerung überwiegend einen Zyklon als erste Stufe der Abgasreinigung. Er dient zur Grobentstaubung und besonders zur Abtrennung glimmender Partikel, welche nachfolgende Filter schädigen könnten. Bei den Vergasern findet die Entstaubung mit Gewebefiltern statt (s. **Abb. 7.1-9**). Diese sind auch in den anderen Leistungsklassen zu finden. Im Bereich 0,15 bis 5 MW_{el} überwiegen allerdings die Elektrofilter. Diese werden ab 10 MW_{el} nicht mehr eingesetzt. Vorhanden bei größeren Anlagen oberhalb 1 MW_{el} sind des öfteren Entstickungen mittels SNCR („Selective Non Catalytic Reduction“). Insgesamt sind die Gasreinigungen sehr genau auf die Holzart und die Genehmigungswerte abgestimmt.

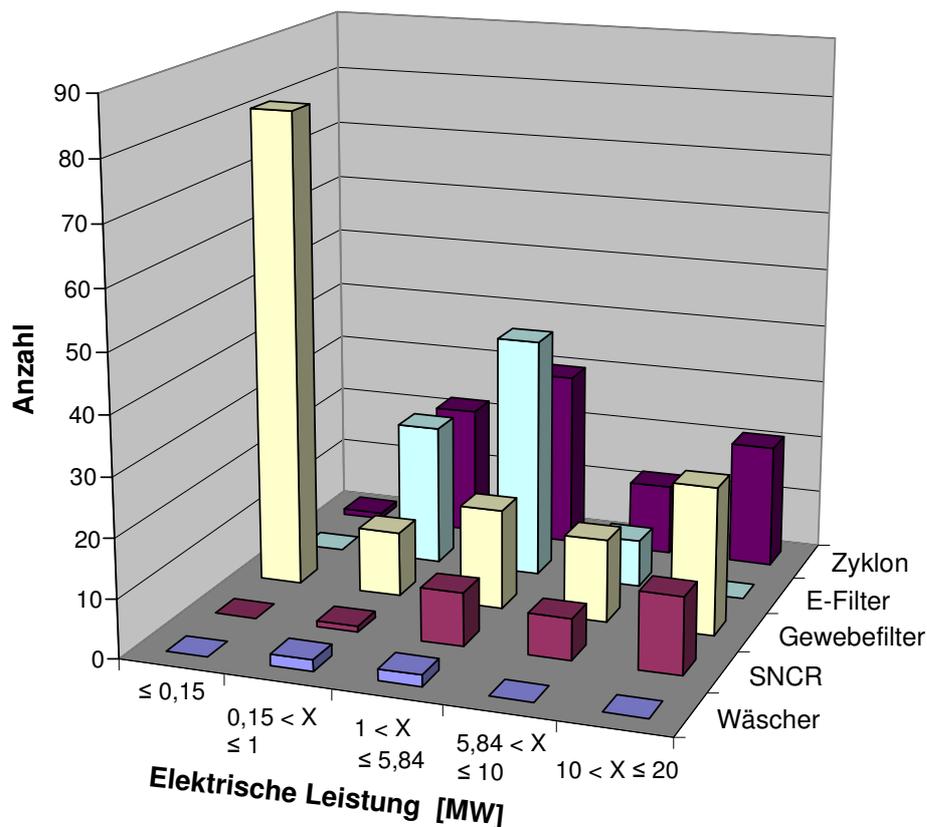


Abb. 7.1-9: Abgasreinigungstechnologien als Funktion der Anlagengröße

7.2 Ratgeber für Biomasseproduzenten, Ingenieurbüros u. Betreiber

Um die Erkenntnisse und Schlussfolgerungen aus den durchgeführten Untersuchungen in einer aufbereiteten Form für Anlagenbetreiber und Anlagenbauer sowie Biomasseproduzenten zusammenzufassen, wurde eine interaktive Informationsdatenbank auf Excelbasis erstellt.

In Anlehnung an die Projektstruktur ist die Datenbank in die vier Hauptpunkte:

1. Charakterisierung des Einsatzstoffspektrums
2. Verfahrensübersicht
3. Zusammenhänge Brennstoffeigenschaften und Prozesscharakteristika
4. Vergleich Prozessketten

gegliedert. Nachfolgend sind die wesentlichen Inhalte der Haupt- und Unterpunkte erläutert.

1. Charakterisierung des Einsatzstoffspektrums

Dieser Hauptpunkt enthält die Zusammenfassung der wesentlichen brennstofftechnischen Eigenschaften sowie daraus abgeleitete Kennzahlen und Berechnungsgleichungen. Der Hauptpunkt wurde in die nachfolgenden Unterpunkte weiter unterteilt.

1.1 Chemische, mechanische und kalorische Brennstoffeigenschaften

Der Unterpunkt enthält eine tabellarische Zusammenfassung der chemischen, mechanischen und kalorischen Brennstoffeigenschaften, die mit standardisierten Labormethoden ermittelt wurden (siehe Abschnitt 6.1). Für eine übersichtliche Darstellung wurden die Biomassen gemäß Tab. 5-1 unterteilt. Die in den Technikums- und Pilotanlagen eingesetzten Biomassen sind farblich hervorgehoben.

1.2 Reaktionstechnische Eigenschaften

Der Unterpunkt enthält eine grafische Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse zu den Untersuchungen in den Thermowaagen (Labor und Technikum), dem Batchrost-Reaktor (KLEAA) und dem Drop Tube Reactor. Die Ergebnisse der TGA-Untersuchungen enthalten einen Vergleich zwischen beiden Thermowaagen. Darüber hinaus sind reaktionskinetische Daten aufgeführt, die aus den Messergebnissen abgeleitet wurden. Diese stehen z. B. für Modellierungsaufgaben dem Anwender zur Verfügung.

1.3 Abgeleitete Kenngrößen und Zusammenhänge

Dieser Unterpunkt enthält u. a. Diagramme zur organischen und anorganischen Brennstoffsubstanz die zeigen, dass die ursprünglich verwendete *Klassifizierung*, die auf Herkunft und Ursprung beruht, nicht auf die brennstofftechnischen Eigenschaften übertragbar ist. Darüber hinaus ist die im Rahmen des Projektes abgeleitete *Korrelation* zur Berechnung der charakteristischen Temperaturen des *Ascheschmelzverhaltens* hinterlegt. Im Hinblick auf die kalorischen Brennstoffeigenschaften sind die im Projekt betrachteten *Gleichungen* zur Berechnung des *Heiz- und Brennwertes* sowie der Zusammenhang zwischen Heizwert und *trockenem Mindestluftbedarf* aufgeführt.

2. Verfahrensübersicht

Die Verfahrensübersicht enthält für die Biomassegruppen (holzartig, halmgutartig, R. LW. und R. A. Z.) eine Bewertungsmatrix mit einer Übersicht der untersuchten Verfahren (Pyrolyse, Vergasung, Verbrennung) und Apparate (Drehrohr, Festbett, Rost, Wirbelschicht, Brennkammer). Für die exemplarisch zugeordneten Biomassen Mischholz, Pappel, Switchgras, Getreidereststoffe und Gärreste wird eine Bewertung der Biomassen anhand der mechanischen (erforderliche Partikelgrößen), chemischen (Besonderheiten, wie Anhydrit-Bildung, Versinterung und Verschlackung) und energetischen Eigenschaften (Vortrocknung, Pelletierung, Zerkleinerung), und deren Einflüsse auf den Anlagenbetrieb sowie die Gasreinigung (SO₂-, NO_x-, HCl- und Staubemissionen) vorgenommen.

3. Zusammenhänge Brennstoffeigenschaften und Prozesscharakteristika

Dieser Hauptpunkt enthält die Zusammenstellung wesentlicher Zusammenhänge zwischen den Brennstoffeigenschaften und den prozessspezifischen Bedingungen in Form von Diagrammen und Tabellen. Entsprechend der Vorgehensweise bei den Technikums- und Pilotversuchen wurde eine weitere Unterteilung in die Verfahren Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung sowie die verwendeten Apparate (Schneckenreaktor, Drehrohrreaktor, Festbettvergaser, zirkulierende Wirbelschicht, Rost- und Staubfeuerung) vorgenommen.

4. Vergleich Prozessketten

In diesem Abschnitt wird ein Beispiel für eine prozessorientierte Bewertung gegeben. Dabei wurden auf Basis experimenteller Daten und Informationen aus dem Schrifttum zwei Prozessketten, bestehend aus einer thermischen Behandlung von konditionierten Biomassen durch Pyrolyse und zum Vergleich ohne Pyrolyse zur Verbrennung in einer Staubfeuerung bewertet. Die konditionierten Brennstoffe bzw. Biokohlen werden jeweils einer Staubfeuerung zugeführt, die mit Trockenbraunkohle betrieben wird.

Die einzelnen Haupt- und Unterpunkte sind im Hauptmenü durch Klicken auf die jeweiligen Überschriften zu erreichen. Die Navigation zurück zum Hauptmenü kann von jedem Haupt- und Unterpunkt durch Klicken auf den Knopf „Inhaltsverzeichnis“ erfolgen.

7.3 Prozessorientierte Biomassebewertung

Aus dem umfangreichen Untersuchungsprogramm soll hier exemplarisch die Prozesskette Trocknung mit Pyrolyse – Zerkleinerung- Verbrennung für die Brennstoffe Holz, Gärreste und Getreidereststoffe betrachtet werden. Als Vergleichsprozess dient die Prozesskette Trocknung mit Rostfeuerung – Zerkleinerung – Verbrennung (s. **Abb. 7.3-1**).

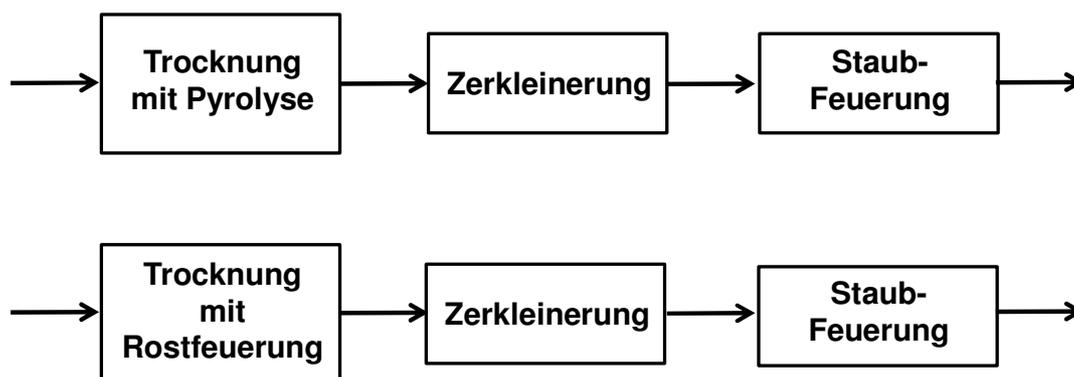


Abb. 7.3-1: ausgewählte Prozessketten

In der zweiten Prozesskette wird die für die Trocknung notwendige Energie durch eine Teilverbrennung beispielsweise der waldfrischen Holzhackschnitzel in einer Rostfeuerung mit Abwärmenutzung generiert. Hier fließen die Ergebnisse und Betriebserfahrungen aus den Versuchen am HDG- Kessel mit 100 kW thermischer Leistung ein. Die getrockneten Holzhackschnitzel gelangen dann nach der Zerkleinerung in die Staubfeuerung. Hier wiederum fließen für die Bewertung die Daten aus den Versuchen mit ein. Die Staubfeuerungen sind jeweils auf 10 MW_{thermisch} ausgelegt. Die eingesetzten Biobrennstoffe werden durch Trockenbraunkohle ergänzt, so dass die Feuerungsleistung von 10 MW erreicht wird. Es wird angenommen, dass die Trockenbraunkohle bereits staubförmig angeliefert wird.

Für die prozessorientierte Bewertung wird ein Scale-up der Pyrolyseanlage auf 1 MW auf Basis der experimentellen Daten und Bilanzierungen an der STYX-Anlage vorgenommen.

Die Brennstoffe werden in unterschiedlicher Weise geerntet und vorbehandelt, bevor sie in die erste Einheit gelangen. Der Bilanzraum wird hier so gesetzt, dass der Brennstoff Holz als waldfrische Hackschnitzel vorliegt, die Gärreste an der Biogasanlage vorgetrocknet sind und die Getreidereststoffe ebenfalls vorgetrocknet vorliegen.

Zur Trocknung wurden in dem Projekt keine Untersuchungen durchgeführt, daher werden Daten zur Trocknung auf einem Bandrockner aus dem Schriftum entnommen und angewendet [37]. Die direkte Trocknung der Brennstoffe mit auf 75 °C vorgewärmter Luft auf einen einheitlichen Wassergehalt von 10 Ma.- % beinhaltet auch eine Abluftreinigung mittels Wäscher. Für die Aufwendungen bei der Zerkleinerung wird auf Ergebnisse aus dem Schriftum von ECN [38] und der Universität Stuttgart zurückgegriffen.

Die Aufbereitung der Brennstoffe ist ein zentraler Baustein in jeder Prozesskette. Dabei ist die erforderliche Aufbereitungsgüte maßgeblich von den nachfolgenden Prozessen abhängig.

Wichtige Parameter sind die Stückigkeit für Förderaggregate, die Störstoffmenge oder auch der Energieinhalt.

Zur Ermittlung des elektrischen Energiebedarfes für die Zerkleinerung der Brennstoffe werden für einen einheitlichen Wassergehalt von 10 Ma.% Extrapolationen mit Hilfe der Daten aus dem Schriftum vorgenommen [38,22]. **Abb. 7.3-2** zeigt die Abhängigkeit der erforderlichen elektrischen Energie vom Zielpartikeldurchmesser für die hier betrachteten Brennstoffe und Stroh bzw. Gärreste.

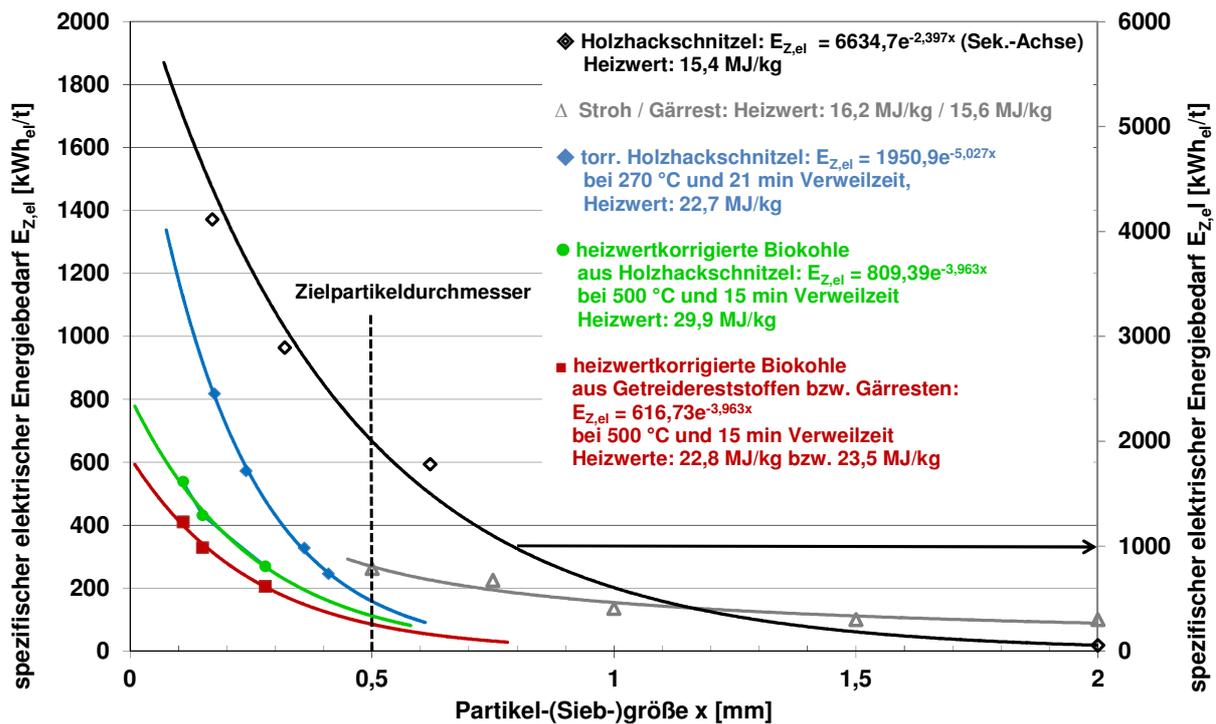


Abb. 7.3-2: elektrischer Energiebedarf bei der Zerkleinerung in Schneidmühlen

Für die Biokokse aus der Pyrolyse wurde der spezifische Energiebedarf in Abhängigkeit des Heizwertes der erzeugten Biokokse aus dem Schriftum für die 1 MW- Anlage berechnet. Der hier gewählte Zielpartikeldurchmesser liegt für alle betrachteten Brennstoffe bei d_p von 0,5 mm. Die entsprechende notwendige Energie zur Zerkleinerung von Getreideresten wurde anhand von Stroh abgeleitet [22], für getrocknete Gärreste wird ebenfalls dieser Ansatz gewählt, da – je nach Güte des Vergärungsprozesses- noch Hemicellulose und Lignin enthalten sind. Die Abbildung verdeutlicht den Vorteil einer thermischen Vorbehandlung durch Pyrolyse bzw. Torrefizierung: Bei einem Partikeldurchmesser von 0,5 mm beträgt die spezifische Zerkleinerungsarbeit für torrefizierte Holz hackschnitzel etwa 160 kWh/Mg, während sich für Holz hackschnitzel bei gleicher Partikelgröße auf der Sekundärachse ein Wert von 2000 kWh/Mg ergibt. Bei der Pyrolyse von cellulosehaltigen Biomassen werden die Cellulosefasern gebrochen, was die deutlich geringeren Aufwendungen in der Zerkleinerungsarbeit begründet.

Zur Wärmebereitstellung für die Trocknung in der Prozesskette ohne Pyrolyse mussten Gärreste und Getreidereststoffe pelletiert werden, um sie in der Rostfeuerung zu verfeuern. Je

nach Szenario kann eine Pelletierung sinnvoll sein, wenn größere Entfernungen bis zur Verwertung in der Staubfeuerung zu bewältigen sind.

Um insbesondere einer Selbstentzündung bei feuchten Brennstoffen vorzubeugen, den Transport von Wasser zu vermeiden und den energetischen Aufwand bei der Zerkleinerung zu senken, ist mindestens eine Trocknungsstufe für die meisten biogenen Brennstoffe erforderlich. Der Energieaufwand für die Trocknung beschränkt sich bei der prozessorientierten Bewertung auf den Bedarf an Verdampfungswärme und die für die Trocknung aufzubringende Gebläseleistung. Die notwendige Wärme für den Trocknungsprozess in der zweiten Prozesskette wird durch eine kleine 100 kW Hackschnitzelfeuerung dezentral bereitgestellt.

In Versuchen an einem 100 kW HDG- Kessel [26] am ITC wurden Holzhackschnitzel, Gärreste und Getreidereststoffe verbrannt. Da wegen der Verschlackungsneigung der Getreidereststoffe eine Verbrennung nur in der Mischung mit Holzhackschnitzel auf dem Vorschubrost möglich war, können die Ergebnisse zum Emissionsverhalten im Vergleich zu einer Monoverbrennung mit Getreideresten nicht verwertet werden. **Tab. 7.3-1** zeigt hier noch einmal einige Ergebnisse zum Emissionsverhalten und Verschlackungsverhalten bei der Monoverbrennung von Holzhackschnitzeln und Gärresten in dem HDG-Kessel.

Tab. 7.3-1: Emissions- und Verschlackungsverhalten bei der Monoverbrennung

Rostfeuerung	Holz- hackschnitzel	Gärreste
Messwerte	Rohgaskonzentrationen [mg/m ³], bez. auf 11 Vol.% O ₂	
NO _x	173	376
SO _x	11	460
HCl	2	61
Staub	127	505
	Sinterbeginn [°C]	
Laboranalyse	1.110	1.020
Rostasche	1.230	1.000
	Erweichungstemperatur [°C]	
Laboranalyse	1.340	1.090
Rostasche	1.280	1.050
	Halbkugeltemperatur [°C]	
Laboranalyse	1.490	1.130
Rostasche	1.330	1.120
	Fließtemperatur [°C]	
Laboranalyse	1.490	1.150
Rostasche	1.380	1.140

Die Emissionswerte sind auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 11 Vol.-% normiert. Für Anlagen mit thermischer Leistung > 100 kW und < 1 MW gilt die TA Luft mit den entsprechenden Grenzwerten. Der Grenzwert für NO_x liegt bei 500 mg/m³, er wird bei beiden Brennstoffen eingehalten. Für die Gärreste-Monoverbrennung müsste eine Gasreinigung für SO₂, HCl und

Staub vorgenommen werden, da hier die Grenzwerte von jeweils 350 mg/m^3 für SO_2 , 30 mg/m^3 für HCl und 50 mg/m^3 für Staub nicht eingehalten werden können. Eine Entstaubung muss auch bei Holzhackschnitzeln vorgesehen werden.

Ein Vergleich der im Labor ermittelten Ascheerweichungspunkte mit denen aus den Rostaschen der Versuche zeigt insbesondere bei dem Standardbrennstoff Holzhackschnitzel große Unterschiede. Daher empfiehlt es sich, bei einer prozessorientierten Bewertung des Verschlackungsverhaltens nicht allein auf die Aussagekraft von Laboranalysen zu vertrauen, sondern entsprechende Experimente an Versuchsanlagen zur Bewertung hinzuzuziehen.

In der ersten Prozesskette wird der Pyrolyseprozess als thermische Aufbereitungsstufe eingeordnet und dient einerseits zur Verringerung der spezifischen Zerkleinerungsarbeit, andererseits zur Erhöhung der spezifischen Energiedichte des erzeugten Biokokses. Ziel ist es dabei, sowohl einen autothermen Betrieb der Anlage zu gewährleisten als auch Wärme zur Trocknung bereitzustellen.

Dabei spielt die Betriebsweise des Pyrolyseverfahrens eine wesentliche Rolle, wenn es um Fragestellungen zur Koksenausbeute und dem Koksheizwert geht.

In **Abb. 7.3-3** ist dieser Einfluss für sieben verschiedene Endtemperaturen dargestellt, wobei für $300 \text{ }^\circ\text{C}$ der Heizwert extrapoliert wurde.

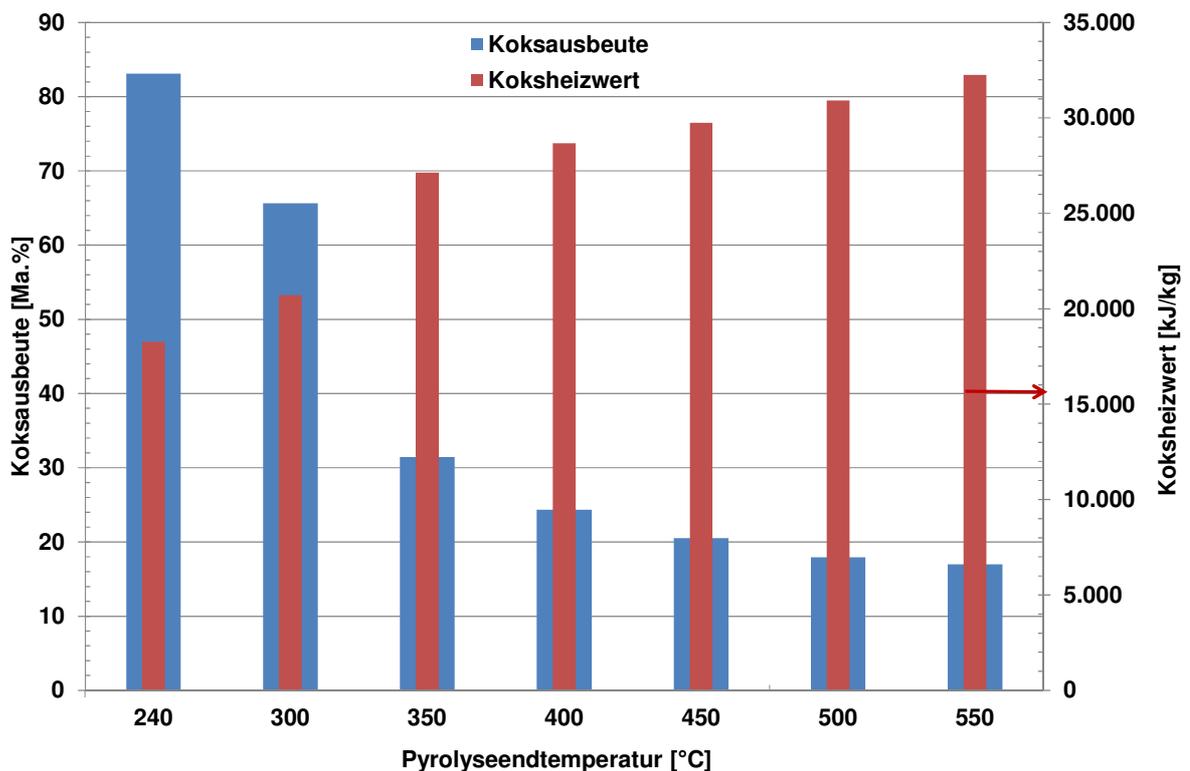


Abb. 7.3-3: Einfluss der Pyrolyseendtemperatur auf die Ausbeute und den Heizwert (Schneckenreaktor STYX)

Mit steigender Endtemperatur nimmt zwar der Heizwert deutlich zu, aber die Ausbeute sinkt gleichermaßen ab. Für die Bereitstellung einer Biokohle ist dieser Parameter damit eine wesentliche Prozessgröße zur Bewertung der Koksenthalpie.

Die maximale Koksenthalpie aus dem Produkt von Ausbeute und Heizwert ließe sich bei 240 °C als Pyrolyseendtemperatur generieren. Allerdings gibt es Untersuchungen [18], bei denen bei dieser Temperatur ein autothermer Betrieb der Pyrolyse mit den Pyrolysedämpfen nicht mehr möglich ist und Erdgas zugefeuert werden muss. Dies kann durch die eigenen Untersuchungen bei dieser Temperatur bestätigt werden: Der Pyrolysedampf besteht im Wesentlichen aus CO₂ und Wasserdampf, wobei keine Teere gemessen wurden. Dies ist ein Vorteil für die weitere Behandlung der Pyrolysedämpfe, da es bei gezielter Kondensation nicht zu den häufig üblichen Problemen durch Anbackungen und Verstopfungen führt.

Wesentlich für die nachfolgenden Ausführungen ist die chemische und kalorische Charakterisierung der Ausgangsstoffe.

Der Gehalt an Wasser entspricht den Ausgangsdaten für die Trocknung. Bei den Gärresten wird eine Vortrocknung an der Biogasanlage vorausgesetzt.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen an der STYX- Anlage wird ein Scale-up auf eine 1 MW- Pyrolyseanlage erarbeitet, um Biokohlen für die 10 MW Staubfeuerung bereitzustellen. Aufbauend auf den experimentellen Ergebnissen wird eine Pyrolyseanlage entworfen, die einen autothermen Betrieb gewährleistet und die Wärme für die Trocknung der Brennstoffe auf 10 Ma.% bereitstellen kann. Diese Anlage wird hinsichtlich Masse, Elemente und Energie bilanziert, wobei bei der Energiebilanz auch die Gebläseleistung der Ventilatoren einbezogen ist. Das Zielprodukt ist der Biokoks, der auf Umgebungstemperaturen abgekühlt, zur Zerkleinerung in die Staubfeuerung gelangt.

Die folgende **Tab. 7.3-2** beschränkt sich auf den Massenstrom von in der Pyrolyse eingesetzten Brennstoffen und Pyrolyseprodukten für eine 1 MW- Anlage sowie die Anteile von N, S und Cl in Massenströmen im Edukt und deren Verteilung in Ma.% in den Produkten Koks und Pyrolysedampf. Dabei werden die Anteile von Permanentgas, Pyrolysewasser und Pyrolyseöl zum Pyrolysedampf zusammengefasst. Des Weiteren werden Heizwerte und entsprechende Enthalpieströme angegeben.

Der Phosphoranteil beträgt bei den Gärresten in der Koksasche rund 6 Ma.%. Unter Berücksichtigung von Beprobungs- und Analyseunsicherheiten verbleibt damit der Phosphor erwartungsgemäß vollständig im Feststoff. Bedingt durch den etwas höheren Heizwert von rund 16,8 MJ/kg, ist der Massenstrom der Holzhackschnitzel etwas kleiner als der von Getreidereststoffen und Gärresten. Mit steigendem Gesamtchlorgehalt (s. Tab. 7.3-2) nimmt der Chloranteil im Koks allerdings überproportional von den Holzhackschnitzeln zu den Gärresten zu. Bei den Getreidereststoffen und Gärresten liegt das Chlor überwiegend anorganisch gebunden vor und wird bei 500 °C noch nicht aus dem Feststoff freigesetzt. Aus der Sicht des Kraftwerksbetreibers und abhängig vom Anteil der Mitverbrennung ist dies nicht erwünscht, da es zu verstärkter Kesselkorrosion kommen kann. Für die dezentralen Pyrolyseanlagen hingegen können möglicherweise -je nach Anlagengröße- zusätzliche Investitionen bei der Rauchgasreinigung vermieden werden.

Tab. 7.3-2: Bilanzierung des Pyrolyseprozesses für die Brennstoffe

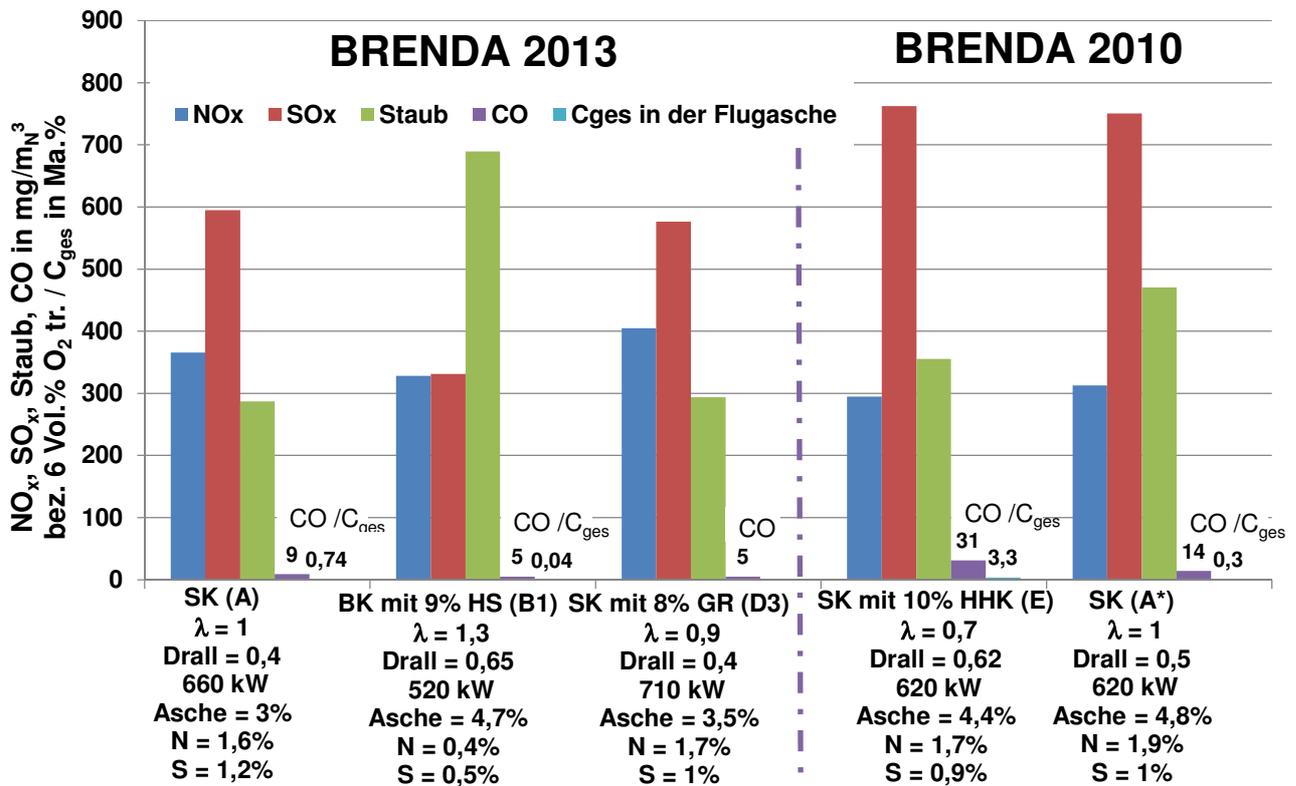
Pyrolyseanlage ohne Beheizung und wärmetechnische Verluste	Holz-hackschnitzel	Getreidereststoffe	Gärreste
	Brennstoff, auf 10 Ma.% Wasser getrocknet		
Massenstrom [kg/h]	227	245	245
N- Massenstrom [kg/h]	0,66	5,00	4,10
S- Massenstrom [kg/h]	0,05	0,48	0,46
Cl- Massenstrom [kg/h]	0,05	0,33	0,78
Heizwert [kJ/kg]	16.778	14.834	15.626
Enthalpiestrom [kW]	1.059	1.010	1.063
	Pyrolysekoks bei 25 °C		
Massenstrom [kg/h]	67	85	92
N- Anteil vom Brennstoff [Ma.%]	52	41	39
S- Anteil vom Brennstoff [Ma.%]	44	14	38
Cl- Anteil vom Brennstoff [Ma.%]	41	56	87
P- Anteil in der Asche [Ma.%]	1,4	5,1	5,7
Heizwert [kJ/kg]	29.932	22.763	23.390
Enthalpiestrom [kW]	550	530	600
	Pyrolysedampf (wässrige und ölige Phase mit Permanentgas) bei 500 °C		
Massenstrom [kg/h]	163	159	157
N- Anteil vom Brennstoff [Ma.%]	48	59	61
S- Anteil vom Brennstoff [Ma.%]	56	86	62
Cl- Anteil vom Brennstoff [Ma.%]	59	44	13
Heizwert [kJ/kg]	9.348	8.960	9.634
Enthalpiestrom [kW]	472	444	464

Ziel des Pyrolyseprozesses ist es- neben der Bereitstellung des Biokokes- einen autothermen Betrieb bei gleichzeitiger Nutzung der Abwärme zur Trocknung der Brennstoffe zu gewährleisten. Dazu wurde ein Konzept entworfen, das die bei der Verbrennung der Pyrolysedämpfe freiwerdende Wärme optimal nutzt, primär zur Beheizung des Pyrolysereaktors, Vorwärmung der Verbrennungsluft und zur Bereitstellung der Brennstofftrocknung. Darüber hinaus wird die Abwärme aus dem Trockner und aus der Abkühlung der Koks in einem ORC-Prozess verwertet. Eine entsprechende Verschaltung ist in **Abb. 7.3-4** dargestellt.

Inertisierung der Pyrolyse notwendige Stickstoffstrom wird im Gegenstrom zum heißen Koks erwärmt und gelangt in den Schneckenreaktor. Die Trocknungsluft für den Bandtrockner dient vor der Erwärmung zur Kondensation des Thermalöls im ORC- Prozess.

Die Flüsse werden in die einzelnen Elemente C, H, O, N, S und Cl aufgeteilt und bilanziert. Wärmetechnische Verluste und Wärmeübertragerverluste werden berücksichtigt genauso wie die benötigten elektrischen Leistungen für die Verdichter und Ventilatoren. Die Ergebnisse der energetischen Bewertung werden in Form von Massen- und Enthalpieströmen zusammen mit den Heizwerten sowie der Schwefel- und Chlorbilanz dargestellt. Bei den Gärresten werden zusätzlich die Phosphatkonzentrationen mit aufgeführt. Der in der Pyrolyse erzeugte Koks wird in der Kraftwerksanlage zerkleinert und zusammen mit der Trockenbraunkohle zur Bereitstellung von Strom und Wärme verbrannt. Handelt es sich um ein zentrales Kraftwerk, kann mit einem elektrischen Bruttowirkungsgrad von 42 % gerechnet werden. Wird in einer Prozessfeuerung hauptsächlich Wärme erzeugt, sinkt der elektrische Wirkungsgrad je nach Nutzungskonzept entsprechend ab. Für die prozessorientierte Bewertung wird zum einfacheren Vergleich mit dem hohen elektrischen Wirkungsgrad gerechnet, auch wenn es sich um eine dezentrale Anlage mit einer thermischen Leistung von 10 MW handelt. Diese Anlagengröße korreliert mit einer Pyrolyseanlage mit 1 MW. Um zentrale Staubfeuerungen mit mehreren 100 MW zu betrachten, muss die Anzahl der dezentralen Pyrolyseanlagen entsprechend linear hochskaliert werden. Der Kessel der Staubfeuerung wird bei 250 bar und 550°C betrieben.

Die Bewertung der Mitverbrennung der Biokohle aus Holzhackschnitzel wurde in einer Staubfeuerungskampagne am ITC in 2010 durchgeführt. Wesentliche Ergebnisse werden hier im Vergleich zu den in diesem Projekt generierten Ergebnissen diskutiert.



SK: Steinkohle; BK: Braunkohle; HS: Holzstaub; GR: Getreidereststoffe; HHK: Holzhackschnitzelkoks

Abb. 7.3-5: Vergleich von ausgewählten Emissionen bei der Mono- und Mitverbrennung biogener Brennstoffe

Mit steigendem Schwefel-Gehalt in der Brennstoffmischung steigen die SO_x- Konzentrationen ausgehend vom Versuch (B1) mit der Mischung aus Braunkohle (BK) und Holzstaub (HS) bei allen Versuchen mit Steinkohle SK (A, A*) und (D3) und (E) entsprechend an. Deutliche Unterschiede treten dabei allerdings zwischen den Kampagnen in 2013 und 2010 bei Steinkohle auf. Dies könnte auf einen erhöhten Schwefelgehalt in der Kohlecharge zurückzuführen sein, da der Biokoks selbst nur einen geringen Schwefelanteil mit 0,04 Ma.% aufweist. Bedingt durch den höheren Drall in den Versuchen (B1), (E) und (A*) lassen sich die NO_x-Konzentrationen durch den Reburn-Effekt gegenüber der weniger verdrallten Verbrennungsluft in den Versuchen (A) und (D3) leicht absenken. Die Staubkonzentrationen korrelieren mit dem Aschegehalt der Brennstoffmischungen: Die höchsten Staubkonzentrationen werden bei den Versuchen mit den maximalen Aschegehalten in den Versuchen (B1) und (A*) ermittelt. Bei der Biokoksmitverbrennung (E) konnte allerdings ein Anstieg des nicht umgesetzten Kohlenstoffes C_{ges} in den Kesselaschen von üblichen maximal 1 Ma.% auf 3 Ma.% sowie eine Zunahme des CO beobachtet werden. Zurückzuführen ist dies auf die deutliche breitere Partikelgrößenverteilung des Kokes im Vergleich zu den übrigen Brennstoffen (s. PGVT, Abbildung 14-3) und den hohen C_{fix}- Gehalt im Koks von rund 75 Ma.% im Vergleich zur Steinkohle von rund 60 Ma.%.

Die prozessorientierte Bewertung umfasst neben den experimentell ermittelten Ergebnissen zur Freisetzung von NO_x , SO_x und Staubkonzentrationen, zum Einfluss von Aufheizraten bei der Pyrolyse und der Pyrolyseendtemperatur auf die Produktverteilungen auch die energetische Betrachtung zum Vergleich von Optionen zum Einsatz der ausgewählten Biomassen.

Die Daten sind in der **Tab. 7.3-3** hinsichtlich ausgewählter Kriterien für beide Prozessketten zusammengestellt.

Eine Bedingung für eine Lagerfähigkeit (Punkt 2) zur Vermeidung von Selbstentzündung liegt bei Holzhackschnitzeln für beispielsweise eine Woche bei rund 35 Ma.% [39]. Für andere Brennstoffe, die darüber hinaus auch Stärke oder andere Nährstoffe enthalten, ist dieser Wert zu hoch. Daher empfiehlt es sich für eine stabile Lagerung, den Wassergehalt auf unter 15 Ma.% zu begrenzen. Zur Bereitstellung der Wärme für die Trocknung durch die Rostfeuerung zeigte sich, dass die Verbrennung von Holzhackschnitzeln hinsichtlich der Verschlackung (Punkt 3) kein Risiko aufweist, während hingegen bei Gärresten Anbackungen im Rost gefunden wurden. Hier gibt es jedoch durch die Wahl einer anderen Anlagentechnologie, z.B. einen Vibrationsrost oder der Einsatz von Additiven, die den Schmelzpunkt der Aschen erhöhen, Möglichkeiten, diese Brennstoffe zu verbrennen. Der Ausbrandgrad (Punkt 4 und 5) sowohl gasseitig als auch feststoffseitig ist unkritisch- legt man die Emissionsgrenzwerte der TA Luft für CO zu Grunde.

Eine Rauchgasreinigung für Staub ist bei allen Brennstoffen notwendig, bei den Gärresten müssen zusätzlich Maßnahmen zur Abtrennung von HCl und SO_x , z.B. durch eine Trockensorption mit anschließendem Gewebefilter, der ohnehin notwendig ist, vorgenommen werden.

Aus dem Vergleich des Stromeigenbedarfs (Punkt 7) erkennt man, dass der in der Pyrolyseanlage durch den ORC- Prozess bereitgestellte Strom nicht zur Deckung des Stromeigenbedarfs der Anlage ausreicht. Der elektrische Eigenbedarf der Pyrolyseanlage übersteigt den Eigenbedarf der Rostanlage, bedingt durch die Komplexizität der Verschaltung zur optimalen Nutzung von Abwärmen, wobei hier noch einmal erwähnt ist, dass nur Eigenverbräuche durch Ventilatoren und Saugzug berücksichtigt sind. Die zur Ableitung in Vorfluter vorgesehenen Abwässer (Punkt 8) sind bei der Rostfeuerung etwas kleiner, weil ein Teil des Wassers bei der Verbrennung der Rohbrennstoffe durch den Kamin entweicht. Man erkennt auch, dass der Mitverbrennungsanteil bei den Biokoksen (Punkt 12) immer kleiner ist als bei den getrockneten Biomassen, allerdings unterscheiden sich die Nettostromerzeugung mit Ausnahme bei den Holzhackschnitzeln für beide Prozessketten nur unwesentlich voneinander (Punkt 17).

Tab. 7.3-3: Vergleich der Prozessketten zur Bereitstellung von Brennstoffen für die Staubfeuerung

Prozessgrößen / Kriterien	autotherme Pyrolyseanlage mit Trocknung und ORC- Prozess			Rostfeuerung mit Trocknung		
	Holz-hackschnitzel	Getreidereststoffe	Gärreste	Holz-hackschnitzel	Getreidereststoffe	Gärreste
1 Enthalpiestrom unbehandelte Biomassen [kW]	1.000					
2 Lagerfähigkeit Brennstoffe	Bedingung < 15 Ma.% Wasser					
3 Verschlackungsrisiko	nicht relevant			gering	hoch	hoch
4 Ausbrandgrad (CO [mg/m ³ _N (11 Vol.% O ₂), C _{ges} [Ma.%])	nicht relevant			CO: 45 mg/m ³ _N ; C _{ges} : 0,9 Ma.%	nicht ermittelt	CO: 20 mg/m ³ _N ; C _{ges} : 0,5 Ma.%
5 Emissionen bei der Verbrennung von Teilströmen (Grenzwerte nach TA Luft eingehalten (Staub, HCl, SO _x , NO _x)?)	nicht ermittelt			ja, mit Ausnahme von Staub	nicht ermittelt	nur bei NO _x
6 Koksausbeute bei 500 °C [Ma.%]	29	34	37	nicht relevant		
7 Eigenbedarf elektrischer Strom (netto) [kW]	62	65	56	41	7	44
8 kg Abwasser/ kg Brennstoff	0,385	0,059	0,384	0,350	0,058	0,347
Zerkleinerung und Staubfeuerung						
9 Enthalpiestrom konditionierte Biomasse (bei der Pyrolyse: Biokohle) [kW]	550	530	600	970	990	960
10 Lagerfähigkeit	nicht bestimmt, aber relevant			nicht mehr relevant		
11 Zerkleinerungsleistung [kW]	7,4	7,2	7,8	414	63	58
12 Mitverbrennungsanteil [% der FWL]	5,5	5,3	6,0	9,7	9,9	9,6
13 Ausbrandgrad bei 10 % FWL (CO [mg/m ³ _N (6 Vol.% O ₂), C _{ges} [Ma.%])	CO: 31 mg/m ³ _N ; C _{ges} : 3,3 Ma.%	nicht durchgeführt		CO: 5 mg/m ³ _N ; C _{ges} : 0,04 Ma.%	CO: 5 mg/m ³ _N ; C _{ges} : n.b.	nicht durchgeführt
14 Emissionen Rohgas NO _x , SO _x [mg/m ³ _N (6 Vol.% O ₂)]	mit SK: NO _x : 295; SO _x : 762	nicht durchgeführt		mit TBK: NO _x : 328; SO _x : 331	mit SK: NO _x : 405; SO _x : 576	
15 Verschlackungsrisiko	nicht untersucht			gering	erhöht	
16 Anteil Strom für Eigenbedarf [%]	7,2	7,3	7,1	16,5	7,2	8,0
17 Nettostromerzeugung [kW]	3.900	3.900	3.910	3.510	3.900	3.870
18 g CO ₂ fossil/kWh _{el,brutto}	802	803	798	767	764	767

FWL: Feuerungswärmeleistung; SK: Steinkohle; TBK: Trockenbraunkohle

Da die spezifische Zerkleinerungsarbeit (Punkt 11) sowohl für die Getreidereststoffe als auch für die Gärreste nach Abb. 7.3-2 im Vergleich zu Holzhackschnitzeln deutlich kleiner ist, sind die Unterschiede in der Nettostromerzeugung im Vergleich zu der Mitverbrennung der entsprechenden Biokohlen entsprechend klein.

Daraus lässt sich unter den hier vorausgesetzten Bedingungen ableiten, dass eine vorgeschaltete Pyrolyse nur bei dem Referenzbrennstoff Holzhackschnitzel einen nennenswerten Vorteil aufweist, zumal in der Pyrolysedampfverbrennung auch mit höheren Emissionen an HCl und SO₂ für Gärreste und Getreidereststoffe wie bei der Holzpyrolyse zu rechnen ist. Die Staubfeuerung selbst zeigt sich hinsichtlich der Emissionen und dem Ausbrand

(Punkt 13 und 14) als robust an. Allerdings steigen die CO- und der Kohlenstoffgehalt in der Flugasche beim Einsatz eines Biokokes an. Hier könnte jedoch mit den entsprechenden Primärmaßnahmen, z.B. Drall und Luftstufung eine Verbesserung erzielt werden. Deutlich wird auch, dass die Szenarien mit der Biokoksmitverbrennung geringfügig höhere spezifischen fossile CO₂-Frachten je kWh_{el,brutto} aufweisen (Punkt 18). Hier muss ein Optimum beim Pyrolyseprozess gefunden werden: Auf der einen Seite sollte ein autothermer Betrieb mit Bereitstellung von Wärme für die Trocknung gewährleistet sein, auf der anderen Seite sollte die Koksenthalpie maximiert werden, damit der Mitverbrennungsanteil steigt und die fossilen spezifischen CO₂-Frachten in der Kombination mit einer Staubfeuerung gesenkt werden können. Exemplarisch wurde eine Abschätzung mit den Koksausbeuten bei 300 °C für Holzhackschnitzel durchgeführt. Die spezifischen CO₂-Emissionen lassen sich damit von 802 g CO₂/kWh_{el,brutto} auf 772 g CO₂/kWh_{el,brutto} absenken.

Eine Mitverbrennung von Gärresten in einer Staubfeuerung ist aus mehreren Gründen keine Option: Zum einen werden die Nährstoffe, wie beispielsweise Phosphor, durch die Asche der Braun- oder Steinkohle verdünnt und sind für einen wirtschaftlichen Aufbereitungsprozess „verloren“. Zum anderen zeigt sich, dass bei der Verbrennung sowohl der Pyrolysedämpfe aus der Gärrestpyrolyse als auch bei der Monoverbrennung auf dem Rost eine Rauchgasreinigung notwendig ist. Zur Reduktion des Gärrestvolumens sollte allerdings eine Trocknung vorgesehen werden, dies ist für viele Biogasanlagen mittlerweile zu einer tragfähigen Lösung geworden. Für die weitere Nutzung, insbesondere vor dem Hintergrund einer NPK-Düngerherstellung sollten thermische Optionen zur Aufkonzentration aber offen bleiben.

8 Industrielle Anwendbarkeit der Ergebnisse

Die Effizienz und die Nachhaltigkeit können aufgrund der verstärkten Nutzung der erneuerbaren Energieträgern bzw. erneuerbaren Rohstoffen lediglich durch neu entwickelte und erprobte Technologien erhalten bleiben. Die Biomasse ist der meist Präzente und weit über den ganzen Globus verteilte erneuerbare Energieträger und leistet einen wesentlichen Beitrag. Dabei wurde unter Berücksichtigung der genannten Punkte die Biomasse für die Steigerung der Wirtschaftlichkeit in den Vergasungs-, Pyrolyse – und Verbrennungsanlagen untersucht.

Im Projekt wurde gezeigt, dass die **Pyrolysereaktoren** keine apparatetechnischen Schwierigkeiten mit zerkleinerter Biomasse haben, wenn das Eintragsystem den kontinuierlichen Transport ermöglicht. In Abhängigkeit v.a. der Temperatur lassen sich die Ausbeuten an Koks, Permanentgas und Kondensaten steuern. Das Verfahren stellt somit eine einfache und robuste thermische Vorbehandlungsstufe dar. Alle drei Produktfraktionen können in nachfolgenden Prozessen zielgerichtet genutzt werden, z.B. der Koks in der Staubfeuerung, das Gas nach einer Reinigung im Gasmotor und das Kondensat zur Wärme- oder Dampfgewinnung.

Das Brennstoffband ist bei den **Festbettvergäsern** viel enger als bei Wirbelschichtvergäsern. Die Aufbereitung und die Qualität des angelieferten Brennstoffes sind sehr wichtig. Insbesondere die Stückigkeit spielt eine sehr große Rolle. Neben Problemen bei dem kontinuierlichen Brennstofftransport kann die Geometrie des Vergasers in Kombination mit den mechanischen Eigenschaften des Brennstoffes zur Brückenbildung im Reaktor führen. Die mechanischen Eigenschaften beeinflussen zusätzlich den Druckverlust über dem Festbett und damit die Verteilung des Reaktionsgases im Reaktor.

Aus diesem Grund kann eine Pelletierung oder Brikettierung zu einer Verbesserung des Fließverhaltens führen, was jedoch mit den Anforderungen des Vergasers korrespondieren muss. Bei den Untersuchungen im Festbettvergaser wurde ein Kaltgaswirkungsgrad im Rohgas von 85% und im Reingas von ca. 50% bestimmt, wobei bei den Untersuchungen im Wirbelschichtvergaser der Kaltgaswirkungsgrad in Reingas etwa 60% und der Vergaserwirkungsgrad 90% betrug.

Die thermochemische Konversion in autotherm betriebenen **Wirbelschichtvergäsern** wies eine hohe Flexibilität bezüglich der eingetragenen Biomasse auf. Anzupassen ist das Eintragsystem (z.B. Schneckenkennlinie für den Eintrag, Getriebe für die Antriebsmotoren) beim Wechsel der Biomasse. Die Gasreinigung ist auf die Inhaltsstoffe der beabsichtigten biogenen Materialien auszulegen. Notwendig ist immer eine Entstaubung. Nachfolgende Wäscher sind notwendig bei schwefelreichen biogenen Materialien; beim Einsatz von KUP entfällt die Anforderung. Das Reingas kann in einem Verbrennungskessel in Strom und Wärme umgesetzt oder im Blockheizkraftwerk genutzt werden. Dabei ist zu prüfen, ob bei der Luftvergasung der Heizwert über den minimal zulässigen Wert des BHKW-Lieferanten eingestellt werden kann.

Auch für die Kraftwerke sehr wichtig ist das Ascheschmelzverhalten der Biomassen. In den Vergäsern darf die Asche nicht flüssig werden, weil es zu Ablagerungen und Verschlackungen führt. Obwohl bei der Standardbiomasse Holzhackschnitzel dieser Punkt wenig kritisch ist, soll die Versinterung für die anderen untersuchten Biomassen berechnet werden. Um die Betriebsstörungen bei der energetischen Nutzung von mineralstoffreichen Biomassen mit niedrigen Ascheschmelzpunkten zu reduzieren, können entweder die Betriebsparameter dem Einsatzstoff angepasst werden (die Vergasungstemperatur muss mindestens 50 bis 100 °C unter dem Ascheerweichungspunkt liegen) oder entsprechende Bettmaterialien (ggf. als Additiv)

eingesetzt werden. Beide Optionen erfordern jedoch Kenntnisse über das Ascheerweichungsverhalten des eingesetzten Brennstoffes in Kombination mit den eingesetzten Bettmaterialien.

Ein wesentliches Kriterium für die Wahl des Feuerungssystems ist die Größe der zu errichtenden Anlage. So wird zwischen Kleinanlagen bis 15 kW thermischer Leistung, mittleren Anlagen bis 1 MW und Großanlagen unterschieden. Im Leistungsbereich von 1 MW_{th} und größer sind **Rostfeuerungen** die dominierende Technologie zur Verbrennung von Biomasse. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen am Batchrostofen KLEAA und den Versuchen an der Rostanlage HDG-Kessel lassen sich grundsätzlich auf industrielle Anlagen übertragen. Dabei müssen allerdings die Randbedingungen der Industrieanlage sehr genau bekannt sein und daran die Übertragbarkeit evaluiert werden. Dies gilt beispielsweise für die NO_x-Rohgaskonzentrationen, die abhängig von den Bedingungen in der Industrieanlage (Geometrie, Verweilzeit, Durchmischungsbedingungen, Primär- Sekundärluftverteilung) deutlich von denen der 100 kW- Rostfeuerung abweichen werden. Hinsichtlich der Verschlackungsneigung auf dem Rost können jedoch die Ergebnisse aus dem Vorhaben Anhaltspunkte für zu erwartende betriebliche Schwierigkeiten, z.B. beim Einsatz von Switchgras oder Getreidereststoffen, geben. Ebenfalls können HCl- und SO₂- Emissionen Hinweise zur Anpassung bestehender Rauchgasreinigungssysteme an die erforderlichen gesetzlichen Rahmenbedingungen aufzeigen.

Für die Staubfeuerung ist bezüglich der Mitverbrennungsversuche eine gute Übertragbarkeit auf Industrieanlagen zu erwarten, da diese im Pilotmaßstab durchgeführt wurden. Dabei zeigt sich, dass die NO_x- und SO_x-Emissionen bei moderaten Mitverbrennungsgraden (bis 20 %_{th}) im Wesentlichen vom Basisbrennstoff bestimmt werden. Werden die Partikel sehr fein gemahlen ($x < 0,5$ mm) ist ein vollständiger Ausbrand zu erwarten. Bei Steinkohlen kann die Mitverbrennung zu einer stabileren Verbrennung und besseren Zündfähigkeit der Brennstoffgemische führen. Inwieweit dies auch auf Biomassen mit den gröberen Partikelgrößenverteilungen zutrifft, muss allerdings noch überprüft werden. Als problematisch bei der Mitverbrennung kann ein erhöhter Eintrag an Calcium durch die Biomassen angesehen werden. Denn dieses kann mit freiem Schwefel aus dem fossilen Brennstoff die harten sulfatischen Beläge wie z.B. Anhydrit bilden (beobachtet mit Holzstaub, Switchgras). Die Versuche bei der Monoverbrennung zeigen, dass die Emissionsgrenzwerte für Holzstaub prinzipiell durch geeignete Primärmaßnahmen eingehalten werden können und dass ein Brennstoffwechsel von Holz zu einer anderen Biomasse möglich ist, aber mit einem höheren Aufwand für die Gasreinigung verbunden ist (höhere Aschefracht, Stickstoff- und Schwefelgehalt). Einige Biomassen (Grünschnitt, Getreidereststoffe und Gärreste) wiesen aufgrund des größeren Aschegehaltes bei hohen Temperaturen (größer als 1000°C) eine höhere Verschlackungsneigung auf, die aber durch eine darauf abgestimmte Prozessführung derart verringert werden kann, dass sie mit der Verschlackungsneigung von häufig in Kraftwerken eingesetzten Steinkohlen (z.B. Middelburg) vergleichbar ist.

Die Staubfeuerungen sind für Kohle die dominierende Feuerungstechnik, weil sie eine gute Leistungsdichte und einen vollständigen Ausbrand aufweisen. Bei Brennstoffen mit Fein- und Grobanteilen kann auch eine Kombination von Staub- und Rostfeuerung sinnvoll sein. Die Zufeuerung von Biomassen in Staubfeuerungskraftwerken kann mit tiefen Investitions- und Betriebsnebenkosten realisiert werden. Für die Staubfeuerung ist die Aufmahlung der

Biomassen erforderlich. In Frage kommt sowohl der Einsatz mit Staubbrennern als auch in solchen mit Wirbelschichtverbrennung.

In einer zirkulierenden **Wirbelschichtfeuerung** wurde das Verbrennungsverhalten von Holzhackschnitzeln, Getreidereststoffen, Switchgras und Gärresten untersucht. Trotz deutlicher Unterschiede in den Brennstoffeigenschaften der untersuchten Biomassen wie z.B. Korngrößenverteilung und Fließverhalten, Stickstoff und Schwefelgehalte kann ein stabiler Feuerungsbetrieb und für alle Biomassen abhängig ein guter Ausbrand realisiert werden. Bei den Untersuchungen wurden die niedrigsten CO-Konzentrationen im Abgas für Holzhackschnitzel erreicht, wobei erwartungsgemäß eine Abnahme mit zunehmender Luftzahl festgestellt wurde. Beim Einsatz von Getreidereststoffen, Switchgras und Gärresten wurden im Vergleich höhere CO-Konzentrationen gemessen. Eine Verbesserung des CO-Ausbrandes kann durch Luftstufung (zusätzliche Sekundärluftzugabe) erreicht werden. Es stellte sich heraus, dass die NO_x- und/oder SO₂-Minderung sowie Entstaubung für die untersuchten Biomassen notwendig ist, sofern hohe Gehalte schon im Brennstoff enthalten sind. Sofern die Brennstoffbeschickung für Schwankungen in mechanischen Eigenschaften geeignet ist, lassen sich die Ergebnisse übertragen, das die Wirbelschichtfeuerung Vorteile im Hinblick auf eine hohe Brennstoffflexibilität gegenüber anderen Prozessen und Apparaten hat.

9 Danksagung und Förderhinweis

Das Vorhaben wurde finanziert durch das **BMWi** - *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie* im Rahmen des Förderprogramms IGF - *Industrielle Gemeinschaftsforschung und -entwicklung*.

Organisatorisch lief es über die **AiF** - *Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V.* (Köln) unter dem Förderkennzeichen 17223 BG.

Als AiF-Mitgliedsvereinigung unterstützte die **GVT** – *Forschungs-Gesellschaft Verfahrenstechnik e.V.* (Frankfurt) das Zustandekommen des Vorhabens verwaltungstechnisch.

Der Erfolg des Vorhabens wäre ohne den fachlichen Input sowie die sachliche und finanzielle Unterstützung durch die beteiligten Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses nicht möglich gewesen.

Die Forschungsstellen danken allen genannten Institutionen und den beteiligten Personen.

10 Unterschriften

Forschungsstelle 1: Clausthaler Umwelttechnik-Institut GmbH

Clausthal-Zellerfeld, 30.09.2014

Ort, Datum

CUTEC-Institut GmbH
Leibnizstraße 23
38678 Clausthal-Zellerfeld


Dr.-Ing. Stefan Vodegel

Forschungsstelle 2: Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, Professur für Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung

Dresden, 30.09.2014

Ort, Datum

Institut für Energietechnik
Professur für Verbrennung, Wärme- und
Stoffübertragung
Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann


Prof. Dr.-Ing. Michael Beckmann

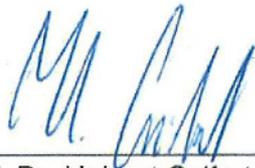
Forschungsstelle 3: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Chemie (ITC)

Karlsruhe, 30.09.2014

Ort, Datum



Karlsruher Institut für Technologie
Campus Nord
Institut für Technische Chemie (ITC)
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe


Prof. Dr. Helmut Seifert

Forschungsstelle 4: Technische Universität Clausthal, Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik, Abteilung Prozeßenergie und betriebliche Energiewirtschaft

Clausthal-Zellerfeld, 30.09.2014

Ort, Datum

Technische Universität Clausthal
Institut für Energieverfahrenstechnik
und Brennstofftechnik
Agricolastraße 4 (Feldgraben)
38678 Clausthal-Zellerfeld


Prof. Dr.-Ing. Roman Weber

11 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Tabelle 11-1: Maßnahmen zum Ergebnistransfer (Stand zum 30.09.2014)

Maßnahme	Ziel/Rahmen	Zeitraum
Wissenschaftliche Publikationen	Informationstag <i>Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Biomasseheizkraftwerken</i> , Veranstalter: GVT Forschungs-Gesellschaft Verfahrens-Technik e.V. (geplant)	26.11.'14 (Frankfurt)
	Gehrmann, H.J.; Tomasi-Morgano, M.; Leibold, H.; Scherrmann, A.; Seifert, H.; Davidovic, M.; Vodegel, S.: <i>Prozessorientierte Bewertung des Einsatzes von Biomassen in der Prozesskette Pyrolyse und Mitverbrennung in Staubfeuerungen</i> . In: Beckmann, M.; Hurtado, A.: Kraftwerkstechnik-Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014	14.+15.10.'14 (Dresden)
	Bernhardt, D.; Böhning D.; Cech, C.; Gebauer, K.; Beckmann, M.: <i>Steigerung der Brennstoffflexibilität in Wirbelschichtfeuerungen durch den Einsatz biogener Festbrennstoffe</i> . In: Beckmann, M.; Hurtado, A.: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 6. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014	14.+15.10.'14 (Dresden)
	Vodegel, S.: <i>Stand der Technik und Perspektiven deutscher Biomassekraftwerke unter Berücksichtigung der Novellierung des EEG</i> ; 20. Fachtagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe	4.+5.09.'14 (Dresden)
	Vodegel, S.: <i>Stand der Technik deutscher Biomassekraftwerke</i> , 7. Kolloquium BioEconomy	9.12.'13 (Karlsruhe)
	Vodegel, S.: <i>State of the Art of German Power Plants</i> ; International Conference on Resource Efficiency in International Networks - ResEff 2013	13.+14.11.'13 (Göttingen)
	Beckmann, M.; Bernhardt, D.; Böhning, D.; Seifert, H.; Gehrmann, H.-J., Weber, R.; Poyraz, Y.; Vodegel, S.; Grove, A.: <i>Gesamtenergetische Bewertung der energetischen Nutzung von Biomassen</i> ; Jahrestreffen der Fachgemeinschaft SuPER	5.+6.11.'13 (Frankfurt)
	Wen, T.; Bernhardt, D.; Gebauer, K.: <i>Zünd- und Abbrandverhalten von staubförmigen Brennstoffen</i> . In: Beckmann, M.; Hurtado, A.: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 913 - 939.	15.+16.10.'13 (Dresden)

	<p>ISBN 978-3-944310-04-06</p> <p>Vodegel, S; Bernhardt, D.; Gehrmann, H.-J.; Weber, R.: <i>Prozessorientierte Bewertung verschiedener Biomassen</i>. In: 26. Deutscher Flammentag. 11.-12.09.2013, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013. S. 343-352. ISBN: 978-3-18-092161-7</p> <p>Beckmann, M.; Bernhardt, D.; Gebauer, K.; Wen, T.; Pohl, M.: <i>Charakterisierung von Kohlen und Biomassen im Zusammenhang mit der Brennstoffflexibilität</i>. 3. VDI-Fachkonferenz Flexibilitäts- und Effizienzsteigerung von Bestandskraftwerken</p> <p>Fachbeitrag <i>Steigerung der Biomasseflexibilität in der Energietechnik</i> in <i>Chemie Ingenieur Technik</i>, Volume 84, Issue 11, S. 1948 – 1956</p> <p>Bernhardt, D.; Lyczkowska, A.; Gehrmann, H.-J.; Seufert, T.; Vodegel, S.: <i>Prozessorientierte Biomassebewertung</i>. Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 961 - 974. ISBN 978-3-935317-87-0</p>	<p>11.+12.09.´13 (Duisburg)</p> <p>03.+04.07.´13 (Stuttgart)</p> <p>Oktober ´12</p> <p>23.+24.10.´12 (Dresden)</p>
<p>Information der Mitgliedsunternehmen des PA</p>	<p>Kick Off mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA)</p> <p>Sitzung 2</p> <p>Sitzung 3</p> <p>Sitzung 4</p> <p>Sitzung 5</p> <p>Sitzung 6</p>	<p>20.09.´11 (Clausthal)</p> <p>13.03.´12 (Dresden)</p> <p>29.11.´12 (Clausthal)</p> <p>12.04.´13 (Karlsruhe)</p> <p>19.11.´13 (Goslar)</p> <p>02.04.´14 (Dresden)</p>

12 Verwendete Quellen

- [1] *Jahresprognose zur deutschlandweiten Stromerzeugung aus EEG geförderten Kraftwerken für das Kalenderjahr 2014*; erstellt durch r2b energy consulting GmbH (Köln), 11.10.2013
- [2] Lenz, U.; Naumann, K.; Kaltschmitt, M.; Janczik, S.: *Erneuerbare Energien*; BWK Nr. 4 2014, S. 61-80
- [3] Fahl, U.; Blesl, M.; Thöne, E.: *Energiewirtschaftliche Gesamtsituation*; BWK Nr. 4 2014, S. 22-38
- [4] *Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse*, erstellt durch DBFZ-Deutsches BiomasseForschungs Zentrum (Leipzig) und TLL-Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Dornburg), FKZ: 03MAP138, März 2012, S. 21, abgeleitet aus EUWID Neue Energien, 2012a
- [5] Weber, R., Poyraz, Y., Beckmann, A.M., Brinker, S.: *Combustion of biomass in jet flames*”, Proceedings of the Combustion Institute, xxx (2014) xxx–xxx, ISSN 1540-7489, Article in Press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.033>
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2004): *Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*; 75.160.10 DIN EN 14961-1. Berlin, Beuth Verlag
- [7] Vodegel, S.; Bernhardt, D.; Gehrman, H.-J.; Weber, R. (2013): *Prozessorientierte Bewertung verschiedener Biomassen*; 26. Deutscher Flammentag, Essen, S. 343–352
- [8] Bryers, R. W. (1996): *Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels*. Progress in Energy and Combustion Science 22(1), S. 29–120
- [9] Gumz, W.; Kirsch, H.; Mackowsky, M.-T.; Gumz-Kirsch-Mackowsky (1958): *Schlackenkunde. Untersuchungen über die Minerale im Brennstoff und ihre Auswirkungen im Kesselbetrieb*. Berlin, Springer
- [10] Zevenhoven-Onderwater, M. (2001): *Ash-forming matter in biomass fuels*; Dissertation. Turku, Åbo Akademi
- [11] Brandt, F. (1999): *Brennstoffe und Verbrennungsrechnung*. Essen, Vulkan-Verl, 3. Aufl
- [12] Boie, W. (1957): *Vom Brennstoff zum Rauchgas. Feuerungstechnisches Rechnen mit Brennstoffkenngrößen und seine Vereinfachung mit Mitteln der Statistik*. Leipzig, Teubner
- [13] Mott, R.; Spooner, C. E. (1940): *The calorific value of carbon in coal. The Dulong relationship*. Fuel 19, S. 226-231; 242-251
- [14] Yin, C.-Y. (2011): *Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses*. Fuel 90(3), S. 1128–1132
- [15] Zerkowski, J. (2004): *Kohlecharakterisierung und Kohleverbrennung*. Kohle als Brennstoff, Physik und Theorie der Kohleverbrennung, Technik. Essen, VGB TowerTech, 2. Ausg
- [16] Kupka, T. (2009): *Ascheablagerungsprobleme bei der Mitverbrennung von alternativen Brennstoffen in Steinkohlekraftwerken*. Dissertation, TU Clausthal, Clausthal
- [17] [Pohl, M.; Bernhardt, D.; Beckmann, M.; Spiegel, W. (2011): *Brennstoffcharakterisierung zur vorrausschauenden Bewertung des Korrosionsrisikos*. In: Dampferzeugerkorrosion

- 2011, Hg. Fritz, E., Freiberg, Saxonia Standortentwicklungs- und -verwaltungsges, 1. Aufl., Ms.-Dr
- [18] Mätzing, H.; Gehrman, H.J.; Merz, D.; Kolb, T.; Seifert, H. *A five step pyrolysis mechanism for wood burning models*. 19th European Biomass Conference and Exhibition, Berlin, June 6-10, 2011, Faulstich, M. [Hrsg.] 19th European Biomass Conf.: From Research to Industry and Markets; Proc. of the Internat. Conf. held in Berlin, June 6-10, 2011 DVD S.1341-1344 Firenze: ETA-Florence Renewable Energies, 2011, ISBN 978-88-89407-55-7
- [19] Kobayashi, H.; Howard, J. B.; Sarofim, A. F. (1977): *Coal devolatilization at high temperatures*. Symposium (International) on Combustion 16(1), S. 411–425
- [20] P. Nowak¹, H.-J. Gehrman¹, H. Seifert¹, T. Glorius²: „*Experimentelle und numerische Untersuchung des Abbrandverhaltens von Ersatzbrennstoffen mit Biomassen in Rostfeuerungen*“; ¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Chemie, ²REMONDIS GmbH; 1. Preis beim Ideenwettbewerb „EnergieCampus“ der Stiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg, November 2012
- [21] Mätzing, H.; Gehrman, H.-J.; Kolb, T.; Seifert, H.: *A numerical model for biomass and solid recovered fuel combustion on a traveling grate*; 33rd International Conference on Thermal Treatment Technologies & Hazardous Waste Combustors, October 13-15, 2014
- [22] Maier, J.; Vetter, R.; Siegle, V.; Spliethoff, H.: *Anbau von Energiepflanzen – Ganzpflanzen-gewinnung mit verschiedenen Beerntungsmethoden (ein- und mehrjährige Pflanzenarten); Schwachholzverwertung*; Universität Stuttgart, IVD, Abschlussbericht 1998
- [23] European Committee for Standardisation (CEN) (2004): *Biomass Gasification - Tar and Particles in Product Gases - Sampling and Analysis* TC BT/TF 143 WICSC 03002.4. http://www.eeci.net/results/pdf/CEN-Tar-Standard-draft-version-2_1-new-template-version-05-11-04.pdf, Zugriff am 20.08.2014
- [24] Good, J.; Ventress, L.; Knoef, H.; Zielke, U.; Hansen, P. L.; van de Kamp, W.; de Wild, P.; Coda, B.; van Paasen, S.; Kiel, J.; Sjöström, K.; Liliedahl, T.; Unger, C.; Neeft, J.; Suomalainen, M.; Simell, P. (2005): *Sampling and analysis of tar and particles in biomass producer gases*. Technical Report. CEN BT/TF 143, unveröffentlicht
- [25] Schulz, W.; Kremer, H. (1985): *Bildung von Stickstoffoxiden bei der Kohleverbrennung*. BWK 37(1/2), S. 29–35
- [26] <http://www.hdg-bavaria.com/produkte/hackschnitzel-und-pellet-heizung/>
- [27] Kohler, K.: *Charakterisierung des Abbrandverhaltens von biomassestämmigen Brennstoffen*, Bachelorarbeit an der DHBW / KIT 2013
- [28] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*, S.271, Berlin: Springer Verlag, 2000.
- [29] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, *Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren*, S.253, Berlin: Springer Verlag, 2000
- [30] „*Verordnung über das in Verkehr bringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung -DüMV)*“, 05.12.2013
- [31] http://www.volund.dk/en/Biomass_energy/References/Biowanze

- [32] A. Scherrmann¹, H.-J. Gehrman¹, W. Baumann¹, J. Hock², M. Hauser¹, J. Matthes², P. Waibel², H. Seifert¹, H.-R. Paur¹, H. Keller²: „*Characterization of Co-combustion of Biomass with Coal in a Pilot-scale Power Plant*“; ¹Karlsruhe Institute for Technology (KIT), Institute for Technical Chemistry, ²Karlsruhe Institute for Technology, Institute for Applied Computer Science; 32nd International Conference on Thermal Treatment Technologies (IT3) and Hazardous Waste Combustors, San Antonio, Texas, October 2013
- [33] A. Scherrmann¹, H.-J. Gehrman¹, W. Baumann¹, J. Hock², M. Hauser¹, J. Matthes², P. Waibel², H. Seifert¹, H.-R. Paur¹, H. Keller²: „*Charakterisierung der Mitverbrennung von Biomassen mit Kohle in einer Kraftwerksstaubfeuerung im Pilotmaßstab*“; ¹Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Technische Chemie, ²Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Informatik; 45. Kraftwerkstechnisches Kolloquium in Dresden Oktober 2013
- [34] Nusselt, W. (1916): *Die Verbrennung und Vergasung der Kohle auf dem Rost*. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 60(6), S. 102–107
- [35] Nusselt, W. (1923): *Der Verbrennungsvorgang in der Kohlenstaubfeuerung*. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 68(6)
- [36] Muschelknautz, E.; Krambrock, W. (1969): *Vereinfachte Berechnung horizontaler pneumatischer Förderleitungen bei hoher Gutbeladung mit feinkörnigen Produkten*. Chemie Ingenieur Technik 41(21), S. 1164–1172
- [37] Ferch, A.: *Gärresttrocknung mit dem Dorset Bandtrockner und nachgeschalteter Abluftreinigung*; Dorset Agrar- und Umwelttechnik GmbH
- [38] J. Kiel: Biomass co-firing in high percentages, ECN, slide 12
- [39] FNR Leitfaden Bioenergie

13 Projektspezifische Veröffentlichungen

- [1] Vodegel, S.; Gehrmann, H.-J.; Bernhardt, D.; Lyczkowska, A.: *Steigerung der Biomasseflexibilität in der Energietechnik*. In: Chemie Ingenieur Technik, Volume 84, Issue 11, S. 1948-1956. November 2012
- [2] Bernhardt, D.; Lyczkowska, A.; Gehrmann, H.-J.; Seufert, T.; Vodegel, S.: *Prozessorientierte Biomassebewertung*. In: Beckmann, M.; Hurtado, A. (Hrsg.): Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012, S. 961-974. ISBN 978-3-935317-87-0
- [3] Beckmann, M.; Bernhardt, D.; Gebauer, K.; Wen, T.; Pohl, M.: *Charakterisierung von Kohlen und Biomassen im Zusammenhang mit der Brennstoffflexibilität*. 3. VDI-Fachkonferenz Flexibilitäts- und Effizienzsteigerung von Bestandskraftwerken, 03.-04. Juli 2013, Stuttgart
- [4] Vodegel, S.; Bernhardt, D.; Gehrmann, H.-J.; Weber, R.: *Prozessorientierte Bewertung verschiedener Biomassen*. In: 26. Deutscher Flammentag. 11.09.-12.09.2013, Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013. S. 343-352. ISBN: 978-3-18-092161-7
- [5] Wen, T.; Bernhardt, D.; Gebauer, K.; Beckmann, M.: *Zünd- und Abbrandverhalten von staubförmigen Brennstoffen*. In: Beckmann, M.; Hurtado, A.: Kraftwerkstechnik - Sichere und nachhaltige Energieversorgung, Band 5. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 913-939. ISBN 978-3-944310-04 -06
- [6] Vodegel, S.: *State of the Art of German Biomass Power Plants*; International Conference on Resource Efficiency in International Networks – ResEff 2013, 13.+14.11.2013
- [7] Vodegel, S.: *Stand der Technik deutscher Biomassekraftwerke*; 7. Kolloquium Sustainable BioEconomy, Karlsruhe, 9.12.2013
- [8] Beckmann, M.; Bernhardt, D.; Gebauer, K.; Grahl, S.; Thiel, C.; Wen, T.: *Charakterisierung von Kohlen und Biomassen im Hinblick auf Zünd- und Verbrennungsverhalten in Staubfeuerungen*. 4. VDI-Fachkonferenz Flexibilitäts- und Effizienzsteigerung von Bestandskraftwerken, 01.-02. Juli 2014, Stuttgart
- [9] Bernhardt, D.; Böhning D.; Cech, C.; Gebauer, K.; Beckmann, M.: *Steigerung der Brennstoffflexibilität in Wirbelschichtfeuerungen durch den Einsatz biogener Festbrennstoffe*. 46. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, 14.-15. Oktober 2014, Beitrag eingereicht am 21.08.2014
- [10] Weber, R., Poyraz, Y., Beckmann, A.M., Brinker, S.: *Combustion of biomass in jet flames*”, Proceedings of the Combustion Institute, xxx (2014) xxx–xxx, ISSN 1540-7489, Article in Press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2014.06.033>
- [11] Vodegel, S.: *Stand der Technik und Perspektiven deutscher Biomassekraftwerke unter Berücksichtigung der Novellierung des EEG*; 20. Fachtagung Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, Dresden, 4.+5.09.2014
- [12] Gehrmann, H.-J.; Tomasi-Morgano, M.; Leibold, H.; Scherrmann, A.; Seifert, H.; Davidovic, M.; Vodegel, S.: *Prozessorientierte Bewertung des Einsatzes von Biomassen in der Prozesskette Pyrolyse und Mitverbrennung in Staubfeuerungen*. 46. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, 14.-15. Oktober 2014, Beitrag akzeptiert

14 Anhänge

14.1 Tabellenverzeichnis

Nr.	Bezeichnung	Seite
Tab. 2-1	<i>Prognostizierte installierte Leistungen regenerativer Energieträger in 2014</i>	8
Tab. 2-2	<i>Wärmebereitstellung erneuerbarer Energien in 2013</i>	8
Tab. 4.2-1	<i>Bezeichnung und Aufteilung der Arbeitspakete auf die Forschungsstellen</i>	15
Tab. 4.2-2	<i>Einteilung der Hauptverantwortlichkeiten für die Arbeitsschritte auf die Forschungsstellen in Arbeitspaket A2</i>	16
Tab. 5-1	<i>Eingeteilte Biomassegruppen und deren Vertreter</i>	21
Tab. 6.1-1	<i>Untersuchungsmethoden und Normen</i>	24
Tab. 6.1-2	<i>Schwankungsbereich Analyseergebnisse Kurzanalyse (Bezugszustand wf)</i>	25
Tab. 6.1-3	<i>Anzahl der Kennzahlen und Indices die ein niedriges, mittleres und hohes Verschlackungs- bzw. Korrosionsrisiko vorhersagen</i>	39
Tab. 6.1-4	<i>Aufteilung der Biomassen auf Labor- und Technikumsuntersuchungen</i>	41
Tab. 6.2-1	<i>Massenbilanz an der Technischen Thermowaage</i>	49
Tab. 6.2-2	<i>Ausgangsmasse, Anfangs- und Endtemperaturen der Biomassen bei der TGA</i>	50
Tab. 6.8-1	<i>Übersicht der durchgeführten Versuche</i>	98
Tab. 6.8-2	<i>Kenngößen zu den Versuchen mit Switchgras und Getreidereststoffen</i>	109
Tab. 6.8-3	<i>Typische höhere Kohlenwasserstoffe im ArtFuel-Vergaser</i>	109
Tab. 6.8-4	<i>Brennstoffanalysen verschiedener Biomassen</i>	115
Tab. 6.8-5	<i>Stoffflussanalyse der Alkali, Erdalkali- und Schwermetalle</i>	117
Tab. 6.8-6	<i>Vergleich Sauerstoff-/Dampf-Vergasung und Luftvergasung</i>	121
Tab. 6.10-1	<i>Untersuchte Brennstoffe</i>	135

Nr.	Bezeichnung	Seite
Tab. 6.10-2	<i>Gegenüberstellung der Aschen</i>	144
Tab. 6.10-3	<i>Grenzwerte nach DüMV</i>	145
Tab. 6.10-4	<i>Gesamtbewertung der Brennstoffe</i>	146
Tab. 6.11-1	<i>Versuchsanlagen und eingesetzte Brennstoffe</i>	149
Tab. 6.11-2	<i>Aus Thermogramm abgeleitete charakteristische Temperaturen</i>	153
Tab. 6.11-3	<i>Ausbrand, Verweilzeit und Konversionsgrad des Kohlenstoffs zu CO</i>	154
Tab. 6.11-4	<i>Emissionsgrenzwerte (Bezug: 6 Vol-% O₂) der eingesetzten Brennstoffe, sowie exemplarisch für zwei Brennstoffmischungen, nach 13. BImSchV für eine Feuerungswärmeleistung 50-100 MW</i>	155
Tab. 6.11-5	<i>Versuchseinstellungen und gemessene Emissionen (Bezug: 6 Vol-% O₂; SO_x als SO₂, NO_x als NO₂ berechnet). Grau unterlegt: Emissionsgrenzen überschritten</i>	157
Tab. 6.12-1	<i>Die gemessenen Ablagerungsmengen der Biomassen</i>	165
Tab. 6.12-2	<i>Ascheablagerungsdaten</i>	166
Tab. 7.3-1	<i>Emissions- und Verschlackungsverhalten bei der Mono-verbrennung</i>	179
Tab. 7.3-2	<i>Bilanzierung des Pyrolyseprozesses für die Brennstoffe</i>	182
Tab. 7.3-3	<i>Vergleich der Prozessketten zur Bereitstellung von Brennstoffen für die Staubfeuerung</i>	187
Tab. 11-1	<i>Maßnahmen zum Ergebnistransfer (Stand zum 30.09.2014)</i>	194

14.2 Abbildungsverzeichnis

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 2-1	<i>Preisentwicklung der Durchschnittspreise von Altholzsortimenten</i>	9
Abb. 6.1-1	<i>Zusammensetzung fester Biomassen und Bezugszustände</i>	23
Abb. 6.1-2	<i>Analysenergebnisse Kurzanalyse.</i>	25
Abb. 6.1-3	<i>Molekulare Zusammensetzung ausgewählter Biomassen</i>	26
Abb. 6.1-4	<i>Eigenschaften der organischen Brennstoffsubstanz biogener Festbrennstoffe im Vergleich zu Kohlen und Ersatzbrennstoffen</i>	27
Abb. 6.1-5	<i>Schwefel- und Stickstoffanteil im Brennstoff</i>	28
Abb. 6.1-6	<i>Elementverteilung der mineralischen Brennstoffsubstanz</i>	29
Abb. 6.1-7	<i>Matrix-Streudiagramm der Elemente der mineralischen Substanz (grüner Rahmen: $1/3 \leq R^2 < 2/3$, roter Rahmen: $2/3 \leq R^2 < 1$)</i>	30
Abb. 6.1-8	<i>Ascheschmelzverhalten der Brennstoffasche nach Standardmethode (oxidierend verascht bei 550 °C und unter oxidierender Atmosphäre erhitzt)</i>	31
Abb. 6.1-9	<i>Heizwerte im Liefer- (LF) und wasseraschenfreien (waf) Zustand</i>	32
Abb. 6.1-10	<i>Heizwert waf in Abhängigkeit des Holocellulose- und Ligninanteils.</i>	33
Abb. 6.1-11	<i>Korngrößenverteilungen ausgewählter staubförmiger (links) und stückiger Biomassen (rechts)</i>	34
Abb. 6.1-12	<i>Gegenüberstellung von Reindichte (links) und Schüttdichte (rechts) ausgewählter Biomassen</i>	34
Abb. 6.1-13	<i>Trockener Mindestluftbedarf $L_{min,tr}$ in Abhängigkeit vom Heizwert und adiabate Verbrennungstemperatur ϑ_{Ad}</i>	35
Abb. 6.1-14	<i>Mittelwert der relativen Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Heiz- und Brennwerten</i>	37
Abb. 6.2-1	<i>Prinzipieller Aufbau des Zündreaktors</i>	42

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 6.2-2	<i>Zündverzögerung am Zündreaktor über Ofentemperatur für die untersuchten Biomassen</i>	43
Abb. 6.2-3	<i>Zündverzögerung am Zündreaktor über flüchtige Bestandteile (FB)</i>	43
Abb. 6.2-4	<i>Schematische Darstellung der Thermowaage des IEVB</i>	45
Abb. 6.2-5	<i>Massenänderungen [%] als Funktion der Proben temperatur [°C]</i>	46
Abb. 6.2-6	<i>CO-Konzentrationen</i>	47
Abb. 6.2-7	<i>CO₂-Konzentrationen</i>	48
Abb. 6.2-8	<i>CH₄-Konzentrationen</i>	48
Abb. 6.2-9	<i>H₂-Konzentrationen</i>	49
Abb. 6.2-10	<i>Auswertung einer Messkurve mit einstufiger Massenabnahme</i>	50
Abb. 6.2-11	<i>Holz hackschnitzel (HHS) in Luft und N₂, TG und DTG-Daten, Labor-TG am ITC</i>	51
Abb. 6.2-12	<i>Freisetzung von NH₃ bei Gärresten bei niedrigen Temperaturen, Labor-TG am ITC</i>	52
Abb. 6.2-13	<i>Holz hackschnitzel (HHS), Gärreste und Getreidereststoffe in N₂, DTG-Daten, unterschiedliche Reaktoren</i>	53
Abb. 6.2-14	<i>Massenabnahme als Funktion der Temperatur für HHS in unterschiedlichen Apparaten</i>	54
Abb. 6.2-15	<i>Kinetisches Modell zur mathematischen Beschreibung der Zersetzung von HHS</i>	55
Abb. 6.3-1	<i>Sinterbeginn ausgewählter Biomassen in Abhängigkeit der Randbedingungen</i>	57
Abb. 6.3-2	<i>Erweichungspunkt ausgewählter Biomassen in Abhängigkeit der Randbedingungen</i>	58
Abb. 6.3-3	<i>Röhrenofen mit Quarzrohr und Glühziegeln (Mitte); Getreidereststoffe bei 400°C pyrolysiert (oben) und bei 815°C mit Wasserdampf vergast (unten)</i>	59

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 6.3-4	<i>Erweichungstemperaturen diverser Biomasseaschen, die unter oxidierenden und reduzierenden Bedingungen verascht bzw. geschmolzen wurden</i>	60
Abb. 6.3-5	<i>Ascheanalysen auf wesentliche Alkali- und Erdalkalielemente, die das Schmelzverhalten beeinflussen</i>	61
Abb. 6.4-1	<i>Fließbild Versuchsanlage drop tube reactor</i>	62
Abb. 6.4-2	<i>Vergleich des Entgasungsverhaltens von Mischholz, Switchgras und Trockenbraunkohle (TBK) (N_2 / 700 °C / 63 - 80 μm)</i>	64
Abb. 6.4-3	<i>Batchrostofen und Rostanlage</i>	65
Abb. 6.4-4	<i>Vergleich der Reaktionsfrontgeschwindigkeiten unterschiedlicher Brennstoffe in einem Batchrostofen KLEAA</i>	66
Abb. 6.4-5	<i>Vergleich der Reaktionsfrontgeschwindigkeiten pelletierter und nicht pelletierter Brennstoffe in einem Batchrostofen KLEAA</i>	67
Abb. 6.4-6	<i>Vergleich der Kennzahlen Zündrate und Massenumsatzrate pelletierter und nicht pelletierter Brennstoffe in einem Batchrostofen KLEAA</i>	68
Abb. 6.5-1	<i>Verwendeter Halmgut-Häcksler, bestehend aus Ballenauflöser und Strohmühle</i>	71
Abb. 6.5-2	<i>Unterschiede zwischen zwei Lieferungen von Switchgras</i>	71
Abb. 6.5-3	<i>Schüttdichte von gehäckseltem Switchgras und Weizenstroh (locker)</i>	72
Abb. 6.5-4	<i>Partikelgrößenverteilungen von Switchgras (SG) mit unterschiedlichen Häcksellängen sowie nach Vorzerkleinerung im Ballenauflöser (BA)</i>	73
Abb. 6.5-5	<i>Massenstrom einer Förderschnecke als Beispiel für die Auswirkungen verschiedener Schüttdichten der geförderten Materialien</i>	74
Abb. 6.5-6	<i>Literaturangaben zur spezifischen Zerkleinerungsarbeit in Abhängigkeit der angestrebten Partikelgröße</i>	75
Abb. 6.5-7	<i>Spezifischer Energieverbrauch von Ballenauflöser (BA) und Strohmühle (SM) bei der Zerkleinerung von Switchgras auf verschiedene Häcksellängen</i>	76

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 6.6-1	<i>Schema desCUTEC-Pyrolysedrehrohres</i>	78
Abb. 6.6-2	<i>Produkt-Massenverteilung für die Gärrest-Pyrolyse</i>	78
Abb. 6.6-3	<i>Produkt-Energieverteilung für die Gärrest-Pyrolyse</i>	79
Abb. 6.6-4	<i>Vergleich der Massen-Produktverteilungen nach Pyrolyse für verschiedene Biomassen und zwei Prozesstemperaturen</i>	80
Abb. 6.6-5	<i>Temperaturabhängigkeit der Koks zusammensetzung nach Pyrolyse: Asche bzw. Glührückstand und Restflüchtige</i>	81
Abb. 6.6-6	<i>Restflüchtigengehalt der Kokse aus verschiedenen Biomassen in Abhängigkeit der Prozesstemperatur</i>	81
Abb. 6.6-7	<i>Heizwert der Kokse aus verschiedenen Biomassen in Abhängigkeit der Prozesstemperatur</i>	82
Abb. 6.6-8	<i>Partikelgrößenverteilungen von Gärresten und daraus erzeugten Pyrolysekoks</i>	82
Abb. 6.6-9	<i>Zusammensetzung, Heizwert und Volumenstrom des Permanentgases bei der Getreidereststoffpyrolyse</i>	83
Abb. 6.6-10	<i>Verteilungsmuster der höheren Kohlenwasserstoffe C₂/C₃ in Abhängigkeit der Prozesstemperatur bei der Pyrolyse von Gärresten</i>	84
Abb. 6.6-11	<i>Verteilungsmuster der Teer Inhaltsstoffe nach Organikgruppen in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur bei der Pyrolyse von Gärresten</i>	84
Abb. 6.6-12	<i>Ergebnisse von Stoffflussanalysen für Chlor bei der Pyrolyse von Biomassen</i>	85
Abb. 6.6-13	<i>Ergebnisse von Stoffflussanalysen für Schwefel bei der Pyrolyse von Biomassen</i>	86
Abb. 6.6-14	<i>Ergebnisse von Stoffflussanalysen für Stickstoff bei der Pyrolyse von Biomassen</i>	86
Abb. 6.6-15	<i>Schema der Pyrolyseanlage STYX</i>	87
Abb. 6.6-16	<i>Produktausbeuten der ausgewählten Biomassen (STYX)</i>	88
Abb. 6.6-17	<i>Energieausbeuten der Produkte aus der Pyrolyse von Biomassen (STYX)</i>	89

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 6.6-18	<i>Gaszusammensetzung und Heizwert von Permanentgas der ausgewählten Biomassen (STYX)</i>	90
Abb. 6.7-1	<i>Fließbildschema Versuchsanlage zur Gleichstromfestbettvergasung</i>	92
Abb. 6.7-2	<i>Zusammensetzung und Heizwert des Permanentgases in Abhängigkeit der untersuchten Einsatzstoffe und Einsatzstoffmischungen</i>	93
Abb. 6.7-3	<i>Roh- und Reingasteerkonzentration im Vergleich zum zulässigen Grenzwert für die dauerhafte motorische Nutzung</i>	94
Abb. 6.7-4	<i>Roh- und Reingasstaubkonzentration im Vergleich zum zulässigen Grenzwert für die dauerhafte motorische Nutzung</i>	95
Abb. 6.8-1	<i>Apparate-Grundfließbild der ZWS (HGF: Heißgasfilter)</i>	97
Abb. 6.8-2	<i>Waagensignale W1001 (Bettasche), W1002 (Filterasche) und W1003 (Einsatz-/ Brennstoff) und daraus ermittelte Massenströme \dot{M}</i>	98
Abb. 6.8-3	<i>Massenbilanz der ArtFuel-Anlage</i>	100
Abb. 6.8-4	<i>Enthalpiebilanz der ArtFuel-Anlage</i>	103
Abb. 6.8-5	<i>Temperaturen im Vergaser über eine Versuchswoche</i>	106
Abb. 6.8-6	<i>Eingangsmassenströme einer Versuchswoche</i>	107
Abb. 6.8-7	<i>Ausgangsmassenströme einer Versuchswoche</i>	107
Abb. 6.8-8	<i>Eingangs-Enthalpieströme beim Einsatz von Switchgras und Getreidereststoffen</i>	108
Abb. 6.8-9	<i>Ausgangs-Enthalpieströme bei der Vergasung von Switchgras und Getreidereststoffen</i>	108
Abb. 6.8-10	<i>Summe C_2C_3 in Abhängigkeit von CH_4</i>	110
Abb. 6.8-11	<i>Abhängigkeit von C_2H_6 von Methan (CH_4)</i>	111
Abb. 6.8-12	<i>C_2H_4-Abhängigkeit von CH_4</i>	111
Abb. 6.8-13	<i>C_2H_2-Abhängigkeit von CH_4</i>	112
Abb. 6.8-14	<i>C_3H_8-Abhängigkeit von CH_4</i>	112
Abb. 6.8-15	<i>C_3H_6-Abhängigkeit von CH_4</i>	113

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 6.8-16	<i>Stoffflussanalyse für Phosphor und Einsatzstoff Switchgras</i>	114
Abb. 6.8-17	<i>Stoffflussanalyse für Chlor und Einsatzstoff Switchgras</i>	115
Abb. 6.8-18	<i>Stoffflussanalyse für Schwefel und Einsatzstoff Switchgras</i>	116
Abb. 6.8-19	<i>Vergleich Enthalpiebilanz bei niedriger (oben, 750°C) und hoher (unten, 830°C) Vergasungstemperatur</i>	119
Abb. 6.8-20	<i>Vergleich Enthalpiebilanz Sauerstoff-/Dampfvergasung und Luftvergasung</i>	120
Abb. 6.8-21	<i>REM-Aufnahmen von Filterasche aus der Strohvergasung, links 790°C, rechts 811°C</i>	122
Abb. 6.8-22	<i>REM-Aufnahmen von Filteraschen aus Vergasungsversuchen mit Switchgras bei 750°C (links) und 811°C (rechts)</i>	122
Abb. 6.8-23	<i>REM-Aufnahmen der Filteraschen aus Versuchen zur Vergasung von Gärresten bei 747°C (links) und 838°C (rechts)</i>	123
Abb. 6.8-24	<i>Siedelinien von vier Kondensatproben</i>	124
Abb. 6.8-25	<i>Vergleich verschiedener Siedelinien, aktuelle und ältere Messungen</i>	125
Abb. 6.8-26	<i>GCMS-Ausdruck der Teerproben Stroh (blau) und Switchgras (schwarz)</i>	126
Abb. 6.8-27	<i>GCMS-Ausdruck der Teerproben Stroh (blau) und Switchgras (schwarz), niedriger siedende Teerkomponenten, Retentionszeit 8 Minuten bis 25 Minuten</i>	127
Abb. 6.8-28	<i>GCMS-Ausdruck der Teerproben Stroh (blau) und Switchgras (schwarz), höher siedende Teerkomponenten, Retentionszeiten 34 Minuten bis 49 Minuten</i>	127
Abb. 6.9-1	<i>Schematische Darstellung ZWSF Versuchsanlage</i>	129
Abb. 6.9-2	<i>CO-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftzahl λ</i>	130
Abb. 6.9-3	<i>SO₂-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftzahl λ (links) und Verhältnis CaO-Gehalt in der Brennstoffasche zum stöchiometrischen Bedarf für die SO₂-Einbindung (rechts)</i>	131

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 6.9-4	<i>NO_x-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftzahl λ (links) und Umwandlungsrate Brennstoff-N zu NO_x (rechts)</i>	131
Abb. 6.10-1	<i>Staubemissionen bei der Verbrennung von Biomassen auf dem HDG-Kessel</i>	137
Abb. 6.10-2	<i>Staub- Konzentration als Funktion des Asche- und Schwefelgehaltes für ausgewählte Versuchseinstellungen und Apparate</i>	138
Abb. 6.10-3	<i>SO₂-Emissionen bei der Verbrennung von Biomassen auf dem HDG-Kessel</i>	139
Abb. 6.10-4	<i>HCl-Emissionen bei der Verbrennung von Biomassen auf dem HDG-Kessel</i>	140
Abb. 6.10-5	<i>HCl- und SO₂- Konzentration als Funktion des Schwefel- bzw. Chlorgehaltes im Brennstoff für ausgewählte Versuchseinstellungen und Apparate</i>	141
Abb. 6.10-6	<i>NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Biomassen auf dem HDG-Kessel</i>	142
Abb. 6.10-7	<i>NO_x- Konzentration als Funktion des Brennstoffstickstoff für ausgewählte Versuchseinstellungen und Apparate</i>	143
Abb. 6.10-8	<i>Brennstoffkostenentwicklung ausgewählter Brennstoffe</i>	148
Abb. 6.11-1	<i>Staubflamme unterschiedlicher Einsatzstoffe in Brennkammer</i>	150
Abb. 6.11-2	<i>Mindest- und Maximalabstand der Flamme vom Brennermund bei der Mitverbrennung (VIS-Kamera)</i>	151
Abb. 6.11-3	<i>Relative Flammenstabilität (= stabile Flammenfläche/gesamte Flammenfläche) bei der Mitverbrennung (VIS-Kamera)</i>	151
Abb. 6.11-4	<i>Zündverzugszeit (links) und Brenndauer (rechts) der Einsatzstoffe im Zündofen</i>	152
Abb. 6.11-5	<i>Partikelerwärmung in Abhängigkeit von Partikelgröße (links) und Anfangstemperatur (rechts)</i>	153
Abb. 6.11-6	<i>CO-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Luftzahl und Drallzahl Sn für Holzstaub</i>	155
Abb. 6.11-7	<i>NO_x-Gehalt im Abgas in Abhängigkeit von Luftzahl und Drallzahl Sn für Holzstaub</i>	156

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 6.11-8	<i>Berechneter maximaler Aschenmassenstrom (links) und theoretisch maximale Aschefracht (rechts) in Abhängigkeit von Brennstoff und Luftzahl für eine Brennstoffwärmeleistung (BWL) von 40 kW</i>	158
Abb. 6.11-9	<i>Verlauf Brennkammerdruck und Druckverlust Gewebefilter während Versuch mit Getreidereststoffstaub</i>	159
Abb. 6.11-10	<i>Durch Röntgendiffraktometrie ermittelte mineralische Zusammensetzung von am Eingang des Abhitzekessels (650 °C) gesammelten Ascheproben: für reine Steinkohle und Mitverbrennungsversuche</i>	160
Abb. 6.12-1	<i>Schematische Darstellung des Verschlackungsreaktors</i>	163
Abb. 6.12-2	<i>Gemessene Gastemperatur und Sauerstoffkonzentration</i>	164
Abb. 6.12-3	<i>Die gemessenen Ablagerungsraten als Funktion der Partikeltemperatur</i>	165
Abb. 6.12-4	<i>Die Aufschlags- und Anhaftungswahrscheinlichkeit</i>	167
Abb. 7.1-1	<i>Formular mit Datensatz zu einer Anlage</i>	168
Abb. 7.1-2	<i>Inbetriebnahmen von Biomassekraftwerken seit Einführung des EEG</i>	169
Abb. 7.1-3	<i>Einsatz der Holzsorten in deutschen Biomassekraftwerken</i>	170
Abb. 7.1-4	<i>Anzahlbezogene Aufteilung der Kraftwerke bezüglich der maximal zugelassenen Holzklasse</i>	170
Abb. 7.1-5	<i>Leistungsbezogene Aufteilung bezgl. der maximal zugelassenen Holzklasse</i>	171
Abb. 7.1-6	<i>Technologie der thermochemischen Konversion als Funktion der Anlagengröße</i>	172
Abb. 7.1-7	<i>Anwendungen verschiedener Roste als Funktion der Anlagengröße</i>	173
Abb. 7.1-8	<i>Stromerzeugungstechnologien als Funktion der Anlagengröße</i>	173
Abb. 7.1-9	<i>Abgasreinigungstechnologien als Funktion der Anlagengröße</i>	174
Abb. 7.3-1	<i>ausgewählte Prozessketten</i>	177

Nr.	Bezeichnung	Seite
Abb. 7.3-2	<i>elektrischer Energiebedarf bei der Zerkleinerung in Schneidmühlen</i>	178
Abb. 7.3-3	<i>Einfluss der Pyrolyseendtemperatur auf die Ausbeute und den Heizwert (Schneckenreaktor STYX)</i>	180
Abb. 7.3-4	<i>Massenflussdiagramm autotherme Pyrolyseanlage mit integrierter Abwärmenutzung</i>	183
Abb. 7.3-5	<i>Vergleich von ausgewählten Emissionen bei der Mono- und Mitverbrennung biogener Brennstoffe</i>	185

14.3 Symbolverzeichnis

Zeichen/Symbol	Dimension	Erläuterung
a	Ma. %	Ascheanteil
A'	kg/h	Ausgangsmassenströme
Al	-	Alkali-Index
c	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
c	Ma. %	Kohlenstoffgehalt
$c_{p,i}$	kJ/kgK	Wärmekapazität der Komponente i
d_3	mm	Partikeldurchmesser aus Siebanalyse
$d_{50,3}$	mm	Medianwert der Korngrößenverteilung aus Siebanalyse
$d_{max,3}$	mm	maximaler Partikeldurchmesser aus Siebanalyse
$d_{min,3}$	mm	minimaler Partikeldurchmesser aus Siebanalyse
E'	kg/h	Eingangsmassenströme
$E_{A,1}; E_{A,2}$	kJ/mol	Aktivierungsenergien Reaktionen 1 und 2
f_{rel}	-	relative Abweichung
h_o	MJ/kg	Brennwert
h_u	MJ/kg	Heizwert
$h_{u,BG}$	MJ/kg	Heizwert Brenngas
$h_{u,i}$	kJ/kg	Heizwert der Komponente i
h_v	kJ/kg	Verdampfungsenthalpie
H'_{Add}	kW	Enthalpiestrom Additiv
H'_{BA}	kW	Enthalpiestrom Bettasche
H'_{CH4}	kW	Enthalpiestrom Methan
H'_{CO}	kW	Enthalpiestrom Kohlenmonoxid
H'_{CO2}	kW	Enthalpiestrom Kohlendioxid
$H'_{C_xH_y}$	kW	Enthalpiestrom höhere Kohlenwasserstoffe
H'_{Dampf}	kW	Enthalpiestrom Prozessdampf
H'_{el}	kW	Enthalpiestrom elektrische Begleitheizung
H'_{ES}	kW	Enthalpiestrom Einsatzstoff (Brennstoff)
H'_{ETS}	kW	Enthalpiestrom Kühlung Eintragssystem
H'_{FA}	kW	Enthalpiestrom Filterasche
H'_{Kon}	kW	Enthalpiestrom konvektive Verluste
H'_{Luft}	kW	Enthalpiestrom Prozessluft

H'_{H_2}	kW	Enthalpiestrom Wasserstoff
H'_{H_2O}	kW	Enthalpiestrom Wasser
H'_i	kW	Enthalpiestrom der Komponente i
H'_{Inv}	kW	Enthalpiestrom Änderung Inventar
$H'_{Kondensat}$	kW	Enthalpiestrom Kondensat (Teer und Wasser)
H'_{O_2}	kW	Enthalpiestrom Prozesssauerstoff
H'_{PG}	kW	Enthalpiestrom im Permanentgas
H'_{Sand}	kW	Enthalpiestrom Sand (Bettmaterial)
H'_{SiFI}	kW	Enthalpiestrom Siphonfluidisation
H'_{SpL}	kW	Enthalpiestrom Spülluft
H'_{St}	kW	Enthalpiestrom durch Verluste beim Stochern/ beim Ablassen von Bettmaterial
H'_{Str}	kW	Enthalpiestrom Strahlungsverluste
H'_{SZ-Add}	kW	Enthalpiestrom über den Schnellzuschlag bei der Zugabe von Additiv
H'_{SZ-S}	kW	Enthalpiestrom über den Schnellzuschlag beim Zugeben von Sand (Bettmaterial)
H'_{Teer}	kW	Enthalpiestrom Teer
H'_V	kW	Enthalpiestrom Verluste
$k_1; k_2$	1/s	Frequenzfaktor Reaktionen 1 und 2
K_{Cl}	-	Chlorkorrosionskennzahl
L	kg Luft / kg BS	Beladung Trägergasstrom
$L_{min,tr}$	kg Luft /kg BS	trockener Mindestluftbedarf
m_{AG}	kg/s	Massenstrom Abgas
m_{BG}	kg/s	Massenstrom Brenngas
m_{BS}	kg/s	Massenstrom Brennstoff
m_{GL}	kg/s	Massenstrom Gesamtluft
m_i	-	Koeffizienten in Gl. zur Berechnung des ASV
m_{PL}	kg/s	Massenstrom Primärluft
m_{RG}	kg/s	Massenstrom Reaktionsgas
m_{SL}	kg/s	Massenstrom Sekundärluft
m_{Syph}	kg/s	Massenstrom Syphon
M_i	kg/kmol	Molekülmasse der Komponente i
m'_{Add}	kg/h	Massenstrom Additiv
m'_{BA}	kg/h	Massenstrom Bettasche
m'_{BS}	kg/h	Massenstrom Brennstoff
m'_{CH_4}	kg/h	Massenstrom Methan
m'_{CO}	kg/h	Massenstrom Kohlenmonoxid

m'_{CO_2}	kg/h	Massenstrom Kohlendioxid
$m'_{C_xH_y}$	kg/h	Massenstrom höhere Kohlenwasserstoffe
m'_{Dampf}	kg/h	Massenstrom Prozessdampf
m'_{ES}	kg/h	Massenstrom Einsatzstoff/Brennstoff
m'_{FA}	kg/h	Massenstrom Filterasche
m'_{H_2}	kg/h	Massenstrom Wasserstoff
m'_{H_2O}	kg/h	Massenstrom Wasser
m'_i	kg/h	Massenstrom der Komponente i
m'_{Inv}	kg/h	Massenstrom Inventaränderung
$m'_{Kondensat}$	kg/h	Massenstrom Kondensat (Wasser und Teer)
m'_{Luft}	kg/h	Massenstrom Prozessluft
m'_{O_2}	kg/h	Massenstrom Sauerstoff
m'_{Rohgas}	kg/h	Massenstrom Rohgas
m'_{Sand}	kg/h	Massenstrom Sand (Bettmaterial)
m'_{SiFI}	kg/h	Massenstrom Siphonfluidisation
m'_{SpL}	kg/h	Massenstrom Spülluft
m'_{St}	kg/h	Massenstrom durch Stochern, Verluste beim Öffnen der Anlage
m'_{SZ-Add}	kg/h	Massenstrom Additiv über Schnellzuschlag
m'_{SZ-S}	kg/h	Massenstrom Sand über Schnellzuschlag
m'_{Teer}	kg/h	Massenstrom Teer
p_{BK}	Pa	Brennkammerdruck
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
$R_{B/S}$	-	Säure-Base-Index
S'	kg/h	Massenänderung innerhalb der Anlage (Speicherterm)
T	°C	Temperatur
V_m	l/mol, Nm ³ /kmol	Molvolumen
V'_N	Nm ³ /h	Normvolumenstrom
w_i	-	Volumenanteil der Komponente i
w	Ma.-%	Wassergehalt (bezogen auf Feuchtmasse)
x	mm	Partikelgröße (Siebmaschenweite)
Griechische Symbole		
α_1, α_2	kg/kg	Massenanteile der schwer und leicht entgasbaren flüchtigen Best
Δp_F	Pa	Druckverlust Gewebefilter

ϑ	°C	Temperatur
ϑ_{ad}	°C	adiabate Verbrennungstemperatur
λ	kg/kg	Luftzahl
ξ	kg/kg	Massenanteil
ρ_p	kg/m ³	Reindichte
ρ_{Sch}	kg/m ³	Schüttdichte
τ_{vWZ}	s	Verweilzeit
ψ	m ³ /m ³	Volumenanteil
T_{Z150}	ms	charakteristische Zündtemperatur
λ	-	Luftzahl
Re	-	Reynoldszahl
St	-	Stokes-Zahl
ρ_p	kg/m ³	Dichte der Luft
u_p	m/s	Geschwindigkeit der Partikel im Verschlackungsreaktor
η_g	kg / m*s	Viskosität der Luft
D_{Sonde}	m	Durchmesser der Ablagerungssonde
T_w	°C	Wandtemperatur des Reaktors

14.4 Abkürzungsverzeichnis

Indizes / Abkürzung	Erläuterung
AG	Abgas
an	Analysenzustand
ASV	Ascheschmelzverhalten
ASV	Ascheschmelzverhalten
BHKW	Blockheizkraftwerk
BK	Brennkammer
BR	Brenner
BS	Brennstoff
BWL	Brennstoffwärmeleistung
CFix	Fixer Kohlenstoff
DB	Düsenboden
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie (engl. differential scanning calorimetry)
DTA	Differentialthermoanalyse
EBS	Ersatzbrennstoff
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ET	Erweichungstemperatur
FBK	Fließbettkühler
FT	Fließtemperatur
FWL	Feuerungswärmeleistung
GCMS	Gas-Chromatographie mit Massenspektrometrie
GF	Gewebefilter
HGF	Heißgasfilter
HT	Halbkugeltemperatur
IEVB	Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik
ITC	Institut für Technische Chemie
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
LF	Lieferzustand (lieferfeucht)
MH	Mischholz
NBK	Nachbrennkammer
PG	Permanentgas
R. A. Z.	Reste aus aerober und anaerober Zersetzung
R. LH.	Reste der Lebensmittelherstellung

R. LW.	Reste aus der landwirtschaftlichen Produktion
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RG	Rauchgas
Sn	Drallzahl (engl. Swirlnumber)
ST	Sintertemperatur
SWSF	Stationäre Wirbelschichtfeuerung
TBK	Trockenbraunkohle
TGA	Thermogravimetrische Analyse
VWS	Lehrstuhl für Verbrennung, Wärme- und Stoffübertragung
waf	wasser- und aschefrei
wf	wasserfrei
WÜ	Wärmeübertrager
XRD	Röntgendiffraktometrie (engl. X-ray diffraction)
ZWSF	Zirkulierende Wirbelschichtfeuerung
TGA	Thermogravimetrie
DTG	Die Differenz-Thermoanalyse
XRD	Röntgendiffraktion
REM	Rasterelektronmikroskop

14.5 Analysenwerte der Brennstoffcharakterisierung nach Standardmethoden

			Holzartig					
			Holzhackschnittel HHS 1 (Mischholz)	Mischholzhackschnittel (Nadel-Laub-Holz) HHS 2 (Mischholz)	Mischholzstaub (Nadel-Laub-Holz) Holzstaub (Mischholz)	Kup 1 - Weide	Kup 2 - Pappel	Kup 3 - Robinie
1. Chemische Eigenschaften								
Wassergehalt	W	Ma.-% LF	7,1	9,18	7,98	12,98	5,06	21,83
Aschegehalt 550 °C	A ₅₅₀	Ma.-% wf	2,18	3,83	0,55	4,03	5,54	5,39
Aschegehalt 815 °C	A ₈₁₅		1,94	3,25	0,47	3,06	3,96	3,88
Flüchtige Bestandteile	f. B.		79,91	78,80	83,43	77,25	75,01	76,68
Fixer Kohlenstoff	C _{Fix}		18,14	17,95	16,11	19,69	21,03	19,44
Kohlenstoff	C		49,93	49,09	50,75	49,51	49,96	49,18
Wasserstoff	H		5,93	5,75	5,78	5,56	5,70	5,71
Sauerstoff	O		41,54	40,89	42,64	40,02	37,89	38,34
Stickstoff	N		0,40	0,41	0,26	0,81	0,87	1,31
Schwefel	S	0,02	0,03	0,02	0,07	0,04	0,07	
Mineralische Brennstoffsubstanz (Elementverteilung)								
Silicium	Si	g/kg BS wf	2,77	4,85	0,60	0,96	1,26	1,57
Aluminium	Al		0,64	0,97	0,15	0,41	0,40	0,38
Eisen	Fe		0,36	1,90	0,17	0,48	0,26	1,01
Calcium	Ca		4,57	5,57	1,18	11,57	16,22	15,57
Magnesium	Mg		0,84	1,05	0,62	1,73	2,52	1,52
Natrium	Na		0,71	0,73	0,67	0,92	0,87	0,88
Kalium	K		1,85	2,00	0,56	4,94	7,05	4,45
Phosphor	P		0,42	0,40	0,20	1,38	1,96	1,06
Chlor	Cl		0,21	1,19	0,44	0,33	0,11	0,44
Ascheschmelzverhalten								
Sintertemperatur	ϑ _{ST}	°C	1032	1120	1159	1025	1002	999
Erweichungstemperatur	ϑ _{ET}		1159	1168	1217	1171	1335	1337
Halbkugeltemperatur	ϑ _{HT}		1224	1185	1375	1335	1335	1337
Fließtemperatur	ϑ _{FT}		1237	1196	1400	1335	1335	1337
2. Mechanische Eigenschaften								
minimale Korngröße	d _{P,min}	mm	0,100	0,200	0,032	0,200	0,200	0,200
maximal Korngröße	d _{P,max}		25,000	25,000	0,500	50,000	50,000	50,000
Medianwert	d _{P,50%}		8,700	7,950	0,234	9,760	9,360	8,700
mittlere Korngröße	d _{P,m}		9,548	8,771	0,235	13,720	12,632	14,915
Schüttdichte	ρ _{Sh}	kg/m³	199	189	149	165	170	179
Reindichte	ρ _P		1503	n. b.	n. b.	1479	1471	1472
3. Kalorische Eigenschaften								
Heizwert	h _{u,roh}	MJ/kg roh	16,88	16,27	17,13	15,05	17,66	13,82
Heizwert	h _{u,waf}	MJ/kg waf	18,77	18,88	18,93	18,40	19,83	19,41
Mindestluftbedarf	L _{min}	kg Luft / kg BS	5,97	5,84	5,96	5,86	6,05	5,94
Adiabate Verbrennungstemperatur	ϑ _{Ad}	°C	1960	1952	1993	1871	1994	1835

			Halmgutartig						
			Weizenstroh (Ernte 2011)	Energiegras (Szarvasi/Hirschgras)	Zuckerhirse-Silage	Switchgras Saarland 2009/2010	Switchgras 20 mm	Switchgras 7 / 40 mm	Switchgras gemahlen
			Weizenstroh	Hirschgras	Zuckerhirse	Switchgras 1	Switchgras 2	Switchgras 3	Switchgras 4
1. Chemische Eigenschaften									
Wassergehalt	W	Ma.-% LF	12,89	7,74	9,32	7,12	10,62	7,75	5,5
Aschegehalt 550 °C	A ₅₅₀	Ma.-% wf	9,74	5,97	9,93	3,69	1,95	4,56	8,06
Aschegehalt 815 °C	A ₈₁₅		9,77	5,42	8,38	3,66	1,69	4,20	7,29
Flüchtige Bestandteile	f. B.		72,62	74,95	70,63	80,77	82,47	76,17	73,40
Fixer Kohlenstoff	C _{Fix}		17,61	19,62	20,99	15,57	15,84	19,63	19,31
Kohlenstoff	C		44,55	46,42	47,03	47,84	48,98	47,16	45,19
Wasserstoff	H		5,41	5,38	5,31	5,76	5,94	5,62	5,77
Sauerstoff	O		39,52	41,64	35,77	42,20	42,71	41,27	39,28
Stickstoff	N		0,69	0,52	1,80	0,46	0,38	1,28	1,58
Schwefel	S		0,09	0,07	0,16	0,05	0,04	0,11	0,13
Mineralische Brennstoffsubstanz (Elementverteilung)									
Silicium	Si	g/kg BS wf	61,52	31,98	9,61	21,99	6,15	9,20	15,04
Aluminium	Al		0,04	0,07	0,06	0,03	0,17	0,06	0,32
Eisen	Fe		0,13	0,29	3,71	0,51	0,28	0,24	2,03
Calcium	Ca		4,24	1,90	4,32	1,89	3,23	3,68	3,89
Magnesium	Mg		1,76	0,95	3,99	1,07	2,00	3,12	2,90
Natrium	Na		0,96	1,28	1,42	0,85	0,74	1,16	1,27
Kalium	K		9,15	8,82	19,25	1,53	1,50	9,88	14,42
Phosphor	P		1,02	1,03	3,63	0,69	0,55	2,20	3,00
Chlor	Cl		1,43	5,45	5,57	0,33	0,33	3,75	4,26
Ascheschmelzverhalten									
Sintertemperatur	ϑ _{ST}	°C	660	623	684	965	1120	873	657
Erweichungstemperatur	ϑ _{ET}		845	737	990	1332	1130	953	930
Halbkugeltemperatur	ϑ _{HT}		1351	1048	1113	1332	1183	1051	1223
Fließtemperatur	ϑ _{FT}		1436	1188	1233	1332	1218	1145	1305
2. Mechanische Eigenschaften									
minimale Korngröße	d _{P,min}	mm	0,20	n. b.	0,08	n. b.	0,10	0,03	0,03
maximal Korngröße	d _{P,max}		12,50	n. b.	12,50	n. b.	3,15	0,50	0,20
Medianwert	d _{P,50%}		7,12	n. b.	3,24	n. b.	1,63	0,09	0,08
mittlere Korngröße	d _{P,m}		6,90	n. b.	3,78	n. b.	1,59	0,16	0,09
Schüttdichte	ρ _{Sch}	kg/m³	19	12	63	n. b.	118	118	254
Reindichte	ρ _P		1522	1509	1502	1518	1500	1500	1500
3. Kalorische Eigenschaften									
Heizwert	h _{u,roh}	MJ/kg roh	14,01	15,62	15,32	16,22	15,89	15,96	15,77
Heizwert	h _{u,waf}	MJ/kg waf	18,21	18,22	19,03	18,32	18,43	18,35	18,31
Mindestluftbedarf	L _{min}	kg Luft / kg BS	5,27	5,38	5,68	5,64	5,81	5,56	5,47
Adiabate Verbrennungstemperatur	ϑ _{Ad}	°C	1896	1985	1905	1966	1932	1970	1942

			Fruchtartig		Reste der Landwirtschaftlichen Produktion R. LW.							
			Haselnusschalen	Kirschkerne	Grünschnitt	Grünschnitt 2. Charge	Getreidereststoffe	Getreidereststoffe (Gesamtfraktion)	Getreidereststoffe (gemahlen)	Reisspelzen	Baumwollreste	
			Haselnusschalen	Kirschkerne	Grünschnitt 1	Grünschnitt 2	Getreidereststoffe 1	Getreidereststoffe 2	Getreidereststoffe 3	Reisspelzen	Baumwollreste	
1. Chemische Eigenschaften												
Wassergehalt	W	Ma.-% LF	10,78	17,29	0,68	9,1	9,63	6,42	7,63	7,81	11,29	
Aschegehalt 550 °C	A ₅₅₀	Ma.-% wf	0,96	1,28	10,32	11,30	10,27	6,60	6,90	15,26	6,69	
Aschegehalt 815 °C	A ₈₁₅		0,77	1,13	9,31	10,10	9,86	6,56	6,82	14,84	5,49	
Flüchtige Bestandteile	f. B.		76,54	80,13	71,86	71,41	73,23	76,39	77,31	68,71	72,68	
Fixer Kohlenstoff	C _{Fix}		22,69	18,74	18,84	18,49	16,91	17,05	15,87	16,45	21,83	
Kohlenstoff	C		53,02	53,86	45,40	45,91	44,23	45,12	44,93	42,49	47,02	
Wasserstoff	H		4,96	6,02	5,27	5,36	5,64	5,30	5,92	4,90	5,54	
Sauerstoff	O		40,67	36,93	38,38	36,75	36,95	40,51	39,78	36,79	39,77	
Stickstoff	N		0,35	1,84	0,57	0,63	2,73	2,30	2,30	0,50	0,89	
Schwefel	S		0,03	0,07	0,05	0,05	0,17	0,16	0,18	0,05	0,09	
Mineralische Brennstoffsubstanz (Elementverteilung)												
Silicium	Si	g/kg BS wf	0,24	0,59	22,50	17,00	32,24	22,19	19,14	75,68	4,21	
Aluminium	Al		0,07	0,29	5,64	3,15	2,15	0,50	0,58	0,05	0,95	
Eisen	Fe		0,12	0,13	2,80	3,38	1,19	1,02	1,33	0,28	0,85	
Calcium	Ca		1,96	2,15	10,92	13,38	5,56	2,38	2,53	1,43	10,59	
Magnesium	Mg		0,43	1,96	3,35	2,32	3,48	1,87	1,99	0,44	7,53	
Natrium	Na		0,74	0,96	0,95	0,97	1,19	1,09	1,08	1,00	0,98	
Kalium	K		2,40	2,97	5,77	4,77	12,47	8,21	7,68	2,21	11,11	
Phosphor	P		0,26	2,47	1,03	0,83	4,14	3,56	3,82	0,98	1,58	
Chlor	Cl		0,11	0,33	0,69	1,43	3,25	2,10	1,86	0,38	1,72	
Ascheschmelzverhalten												
Sintertemperatur	g _{ST}	°C	683	960	1091	1169	852	712	741	824	825	
Erweichungstemperatur	g _{ET}		702	1045	1160	1187	1063	1067	999	1369	908	
Halbkugeltemperatur	g _{HT}		1437	1422	1242	1232	1278	1286	1323	1369	1438	
Fließtemperatur	g _{FT}		1437	1438	1268	1288	1373	1423	1435	1369	1438	
2. Mechanische Eigenschaften												
minimale Korngröße	d _{p,min}	mm	0,800	0,080	0,200	0,500	0,032	0,032	0,032	0,063	0,500	
maximal Korngröße	d _{p,max}		25,00	12,50	50,00	50,00	6,30	3,15	0,32	6,30	50,00	
Medianwert	d _{p,50%}		13,55	6,30	19,60	11,06	1,66	2,37	0,08	2,54	10,28	
mittlere Korngröße	d _{p,m}		13,90	6,42	25,371	13,771	2,193	2,107	0,124	2,512	14,784	
Schüttdichte	ρ _{Sch}	kg/m³	269	548	75	75	293	170	340	113	39	
Reindichte	ρ _P		1440	1350	1491	n. b.	1528	n. b.	n. b.	1540	n. b.	
3. Kalorische Eigenschaften												
Heizwert	h _{u,roh}	MJ/kg roh	17,20	16,90	16,92	15,17	14,89	15,72	15,40	14,36	14,96	
Heizwert	h _{u,waf}	MJ/kg waf	19,76	21,21	19,01	19,09	18,66	18,17	18,13	18,63	18,40	
Mindestluftbedarf	L _{min}	kg Luft / kg BS	6,03	6,65	5,36	5,52	5,42	5,25	5,48	4,97	5,58	
Adiabate Verbrennungstemperatur	g _{Ad}	°C	2044	1952	2048	1922	1915	2014	1925	1967	1904	

			Reste der Lebensmittelherstellung (R. LH.)				R. A. Z.	
			Rohkaffeestäube	Röstkaffeestäube	Rohkaffee	Biertreber	Gärreste	Gärreste
			Rohkaffeestäube	Röstkaffeestäube	Rohkaffeeschalen	Biertreber	Gärreste 1	Gärreste 2
1. Chemische Eigenschaften								
Wassergehalt	W	Ma.-% roh	8,12	3,81	5,04	4,41	15,86	18,81
Aschegehalt 550 °C	A ₅₅₀	Ma.-% wf	13,40	7,71	5,76	4,82	10,26	11,65
Aschegehalt 815 °C	A ₈₁₅		13,00	6,44	5,03	4,25	9,63	10,95
Flüchtige Bestandteile	f. B.		69,84	73,54	77,56	79,44	70,40	67,11
Fixer Kohlenstoff	C _{Fix}		17,17	20,02	17,41	16,30	19,98	21,93
Kohlenstoff	C		46,99	49,86	49,20	50,08	47,24	46,92
Wasserstoff	H		5,71	5,83	5,56	6,56	5,28	4,90
Sauerstoff	O		30,29	33,59	37,42	35,12	35,16	34,19
Stickstoff	N		3,36	2,81	1,88	3,10	1,75	1,91
Schwefel	S		0,24	0,19	0,17	0,32	0,31	0,44
Mineralische Brennstoffsubstanz (Elementverteilung)								
Silicium	Si	g/kg BS wf	16,94	1,59	3,89	15,23	11,42	9,58
Aluminium	Al		13,42	0,96	2,27	0,04	0,06	0,32
Eisen	Fe		15,70	1,49	2,42	0,24	3,66	3,66
Calcium	Ca		8,78	10,14	3,13	5,77	11,51	13,09
Magnesium	Mg		4,33	4,35	3,61	2,71	10,18	11,35
Natrium	Na		1,09	1,06	0,97	1,20	1,50	1,66
Kalium	K		17,40	19,10	18,06	0,66	12,74	18,54
Phosphor	P		2,40	0,96	1,63	6,75	9,92	11,66
Chlor	Cl		0,50	0,57	1,26	0,22	3,97	3,89
Ascheschmelzverhalten								
Sintertemperatur	ϑ _{ST}	°C	1002	695	1235	799	880	989
Erweichungstemperatur	ϑ _{ET}		1303	735	1281	1439	1023	1076
Halbkugeltemperatur	ϑ _{HT}		1416	1438	1374	1439	1141	1118
Fließtemperatur	ϑ _{FT}		1423	1438	1419	1439	1205	1134
2. Mechanische Eigenschaften								
minimale Korngröße	d _{P,min}	mm	0,032	0,080	0,080	0,080	0,080	0,032
maximal Korngröße	d _{P,max}		3,15	12,50	6,30	3,15	12,500	6,300
Medianwert	d _{P,50%}		0,05	7,92	2,88	2,29	2,780	1,060
mittlere Korngröße	d _{P,m}		0,065	6,839	3,138	2,097	3,628	1,638
Schüttdichte	ρ _{sch}	kg/m³	327	402	520	165	76	110
Reindichte	ρ _P		1481	1436	n. b.	1374	1512	n. b.
3. Kalorische Eigenschaften								
Heizwert	h _{u,roh}	MJ/kg roh	16,53	18,19	18,38	18,83	14,14	13,67
Heizwert	h _{u,waf}	MJ/kg waf	21,03	20,60	20,68	20,81	19,24	19,69
Mindestluftbedarf	L _{min}	kg Luft / kg BS	6,05	6,28	5,94	6,49	5,72	5,60
Adiabate Verbrennungstemperatur	ϑ _{Ad}	°C	1931	1979	1983	1983	1850	1871

14.6 Koeffizienten zur Berechnung des Ascheschmelzverhaltens

Tabelle 1: Koeffizienten m_1 - m_6 und Bestimmtheitsmaß R^2 zur Berechnung der charakteristischen Ascheschmelztemperaturen

Temperatur	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9	b	R^2
ϑ_{ST}	-1180,44	29123,22	-5671,25	6994,64	16589,96	-876919,98	-4620,44	35587,24	33296,56	1602,71	0,5210
ϑ_{ET}	1430,61	-3933,03	25581,12	12257,33	-38205,60	-239024,06	-6131,95	52502,34	-33319,29	1289,59	0,4736
ϑ_{HT}	-45,95	-939,28	-4639,72	-5487,57	-797,22	268918,60	8164,89	-8333,90	-93474,17	1165,63	0,7080
ϑ_{FT}	340,67	8547,24	-12780,45	-6011,74	-12227,24	126503,32	11020,53	4377,01	-61722,18	1282,03	0,5455

14.7 Vergleich Heiz- und Brennwertwertkorrelationen

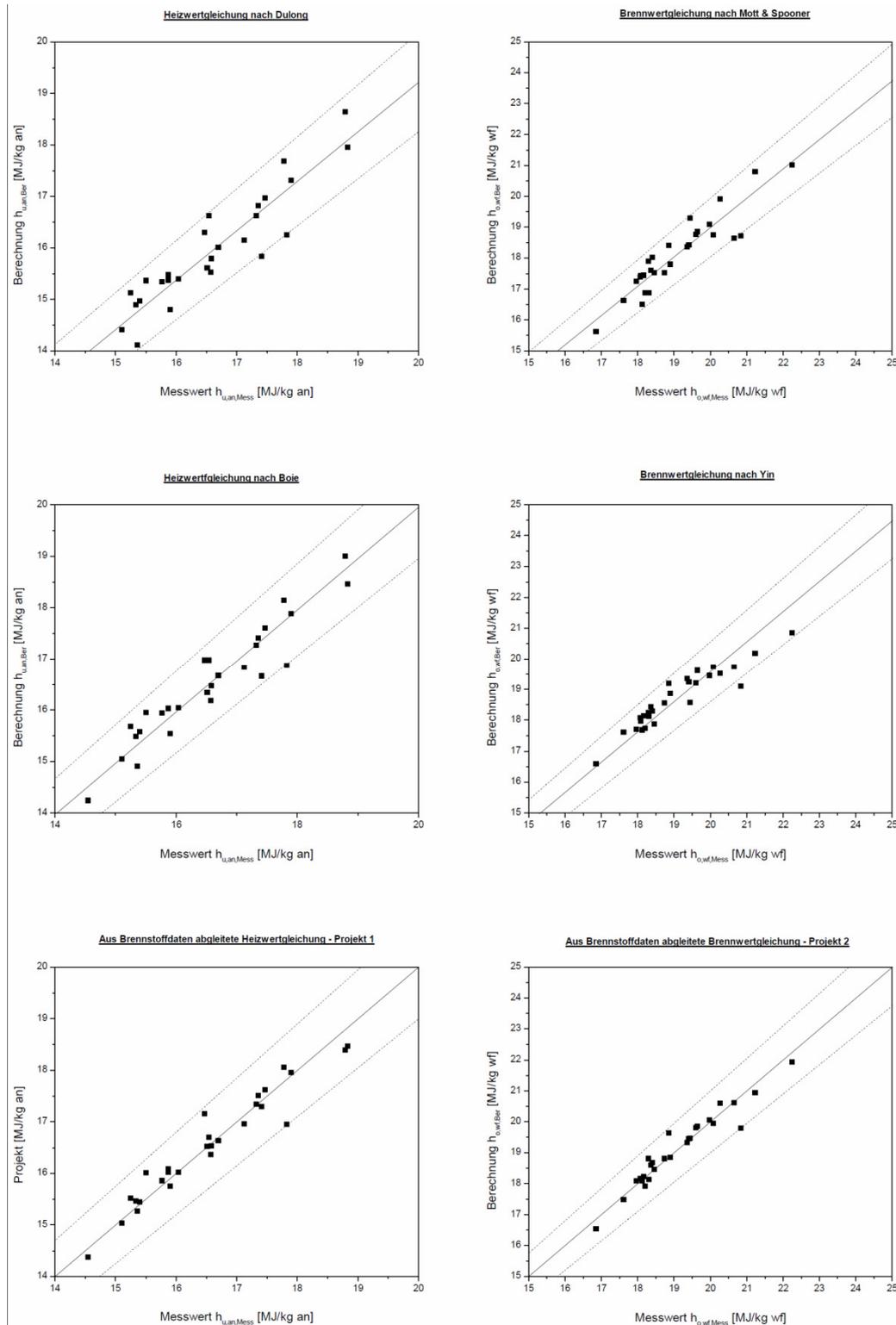


Abbildung 1: Vergleich der mit den angegebenen Gleichungen berechneten und gemessenen Heiz- bzw. Brennwerten (gestrichelte Linien repräsentieren $\pm 5\%$ rel. Fehler).

14.8 Eigenschaften Einsatzstoffe im Festbettvergaser und ZWSF

Tabelle 2: Brennstofftechnische Eigenschaften Einsatzstoffe im Gleichstromfestbettvergaser und der ZWSF

Bezeichnung			Holz- (hackschnitzel)	Switchgras	Getreide- reststoffe	Gärrest- stoffe
Biomassegruppe			Holzartig	Halmgutartig	R. LW.	R. A. Z.
Abbildungen des Einsatzmaterials						
Zusätzliche Beschreibung			Mischung aus Nadel- und Laubholz mit Rinde	7 mm Häcksellänge	Mischung aus Spelzen, Körnern & Halmen	Ausgangssubstrat: Zuckerhirse+ Hühner-trockenkot
1. Chemische Eigenschaften						
Wassergehalt	W	Ma.-% roh	9,18	10,62	6,42	9,46
Aschegehalt 550 °C	A ₅₅₀	Ma.-% wf	3,83	1,95	6,60	11,65
Aschegehalt 815 °C	A ₈₁₅		3,25	1,69	6,56	10,95
Flüchtige Bestandteile	f. B.		78,80	82,47	76,39	67,11
Fixer Kohlenstoff	C _{Fix}		17,95	15,84	17,05	21,93
Kohlenstoff	C		49,09	48,98	45,12	46,92
Wasserstoff	H		5,75	5,94	5,30	4,90
Sauerstoff	O		40,89	42,71	40,51	34,19
Stickstoff	N		0,41	0,38	2,30	1,91
Schwefel	S		0,04	0,04	0,17	0,37
Chlor	Cl		0,11	0,03	0,20	0,34
Aschebildende Elemente						
Silicium	Si	g/kg BS wf	4,85	6,15	22,19	9,58
Aluminium	Al		0,97	0,17	0,50	0,32
Eisen	Fe		1,90	0,28	1,02	3,66
Calcium	Ca		5,57	3,23	2,38	13,09
Magnesium	Mg		1,05	2,00	1,87	11,35
Natrium	Na		0,43	0,71	2,46	6,85
Kalium	K		0,73	0,74	1,09	1,66
Phosphor	P		0,40	0,55	3,56	11,66
Chlor	Cl		1,15	0,32	1,96	3,44
Ascheschmelzverhalten						
Sintertemperatur	ϑ _{ST}	°C	1120	1120	712	989
Erweichungstemperatur	ϑ_{ET}		1168	1130	1067	1076
Halbkugeltemperatur	ϑ _{HT}		1185	1183	1286	1118
Fließtemperatur	ϑ _{FT}		1196	1218	1423	1134
2. Mechanische Eigenschaften						
minimale Korngröße	d _{P,min}	mm	0,20	0,100	0,032	0,032
maximal Korngröße	d _{P,max}		25	3,15	3,15	6,3
Medianwert	d_{P,50%}		7,95	1,63	2,37	1,06
mittlere Korngröße	d_{P,m}		8,77	1,59	2,11	1,64
Schüttdichte	ρ _{sch}	kg/m ³	189	118	170	110
Reindichte	ρ _P		1503	1518	1528	1512
3. Kalorische Eigenschaften						
Heizwert	h _{u,roh}	MJ/kg roh	16,27	15,89	15,72	13,67
Heizwert	h _{u,waf}	MJ/kg waf	18,88	18,43	18,17	19,69
Mindestluftbedarf	L _{min}	m ³ Luft / kg BS	4,20	4,12	3,89	3,60
Mindestabgasvolumen	AG _{min}	m ³ AG / kg BS	4,87	4,82	4,53	4,26
Adiabate Verbrennungstemperatur	ϑ _{Ad}	°C	1952	1932	2014	1871

Tabelle 14-2:: Elementaranalyse, Immediatanalyse und kalorische Daten der staubförmigen Brennstoffe

		Switchgras			Getreidereste	Holzstaub	Trockenbraunkohle	Steinkohle UK Superfine
		ITC	IEVB	VWS				
Wasserfrei:								
C	[Ma.-%]	46.3	45.1	45.2	44.9	50.7	62.9	83.7
O (Differenz)	[Ma.-%]	41.5	47.2	39.3	39.8	42.6	25.5	5.0
H	[Ma.-%]	5.9	5.7	5.8	5.9	5.8	4.7	5.3
N	[Ma.-%]	0.9	0.4	1.6	2.3	0.3	0.5	1.7
S	[Ma.-%]	0.13	0.04	0.13	0.18	0.02	0.66	1.18
Cl	[Ma.-%]	0.35	0.03	0.39	0.19	0.04	0.02	0.18
Asche (815 °C, ox)	[Ma.-%]	4.9	1.5	7.3	6.8	0.5	5.8	3.0
Flüchtige	[Ma.-%]	76.3	77.4	73.4	77.3	83.4	52.0	34.9
C_{fix}	[Ma.-%]	18.8	21.1	19.3	15.9	16.1	42.2	62.1
Analysenfeucht:								
Heizwert	[MJ/kg]	15.8	16.1	15.8	15.4	17.1	21.2	33.0
Wassergehalt	[Ma.-%]	7.1	9.0	5.5	7.6	8.0	9.6	1.1

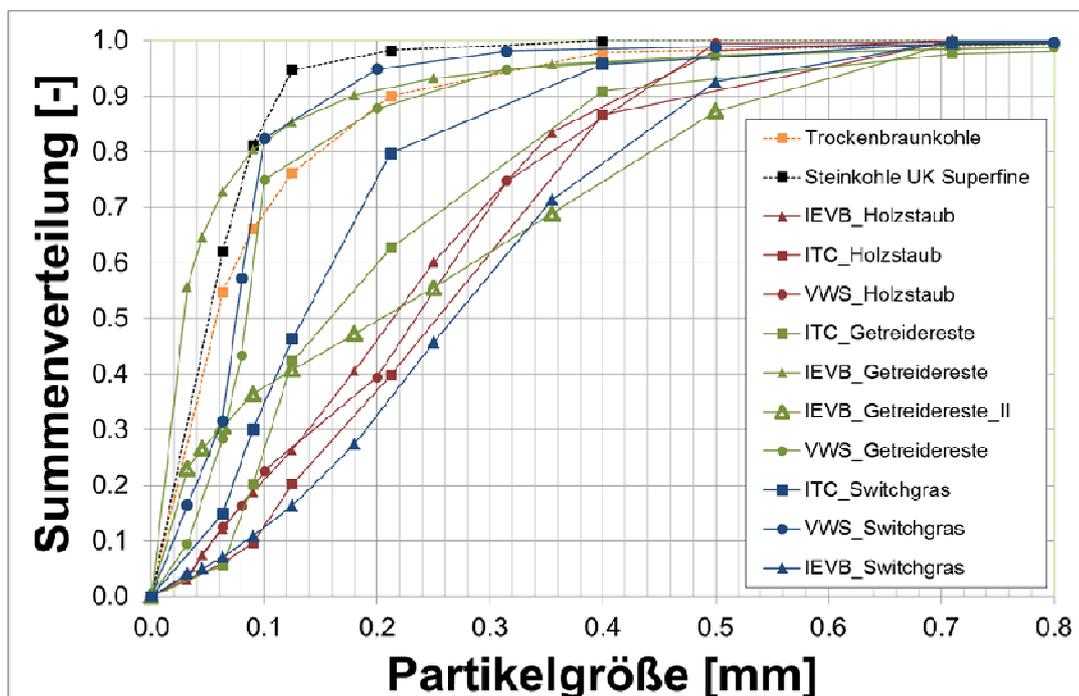


Abbildung 14-3: Partikelgrößenverteilungen der eingesetzten Biomassen, unterschieden nach Brennstoff und Forschungsstelle. IEVB_Getreidereste: Verdrallte Brennkammer, IEVB_Getreidereste_II: Unverdrallte Brennkammer