

**Eintrag von gehäckseltem Stroh in eine zirkulierende
Wirbelschicht**

Fördermittelgeber:
**BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz (Berlin) über FNR - Fachagentur
Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Gülzow)**

Projekt-Nr.: 2592

Förderkennzeichen: 220 118 08 (08NR118)

Berichtszeitraum: 1.10.2008 bis 31.05.2009

31. Oktober 2009



Inhaltsverzeichnis

1. AUFGABENSTELLUNG	- 3 -
2. PROJEKTDURCHFÜHRUNG	- 3 -
3. BRENNSTOFFANALYSEN	- 4 -
4. ANLAGENBESCHREIBUNG	- 6 -
4.1 ANLAGE ZUR SYNTHESGASERZEUGUNG	- 6 -
4.2 STROHHÄCKSLER	- 7 -
4.3 EINTRAGSSYSTEM	- 8 -
5. VERGASUNGSBETRIEB	- 14 -
6. VERSUCHSERGEBNISSE	- 17 -
6.1 PERMANENTGAS	- 17 -
6.2 TEERGEHALT	- 19 -
6.3 HEIZWERT	- 20 -
6.4 ZIRKULATIONSRATE, GAS AUSBEUTE, SPEZIFISCHER SAUERSTOFFEINSATZ UND H ₂ /CO- VERHÄLTNIS	- 22 -
6.5 VERGASUNGSVERHÄLTNIS UND DAMPF/BIOMASSE-VERHÄLTNIS	- 25 -
6.6 WIRKUNGSGRAD	- 26 -
6.7 ANALYTIK BETT-, SIPHON- UND FILTERASCHEN	- 27 -
6.7.1 KOHLENSTOFFGEHALTE	- 27 -
6.7.2 REM/EDX	- 29 -
6.8 VERGLEICH VON GUTER UND SCHLECHTER ZIRKULATION	- 37 -
6.9 KORNGRÖßENVERTEILUNG SIPHONASCHE	- 42 -
6.10 TEERANALYTIK	- 44 -
7. ZUSAMMENFASSUNG	- 47 -
8. VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	- 47 -
9. UNTERSCHRIFT	- 48 -
10. VERWENDETE UNTERLAGEN	- 49 -

11. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	- 50 -
----------------------------------	---------------

12. FORMELVERZEICHNIS	- 50 -
------------------------------	---------------

13. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	- 51 -
----------------------------------	---------------

14. TABELLENVERZEICHNIS	- 53 -
--------------------------------	---------------

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen **220 118 08 (08NR118)** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der CUTEC-Institut GmbH.

1. Aufgabenstellung

Dem CUTEC-Institut in Clausthal erteilte das Niedersächsische Umweltministerium im Dezember 2002 den Auftrag zur Entwicklung einer Verfahrenslinie, welche eine hohe Bandbreite an Biomassen zum Synthesegas thermisch zersetzen können sollte. Ziel war die Herstellung von synthetischem Diesel, dem sog. BtL [1]. Beim Apparat des Vergasers fiel die Wahl auf eine zirkulierende Wirbelschicht, die aus der Verbrennung und Trocknung bekannt ist. In bis zur Antragstellung des vorliegenden Vorhabens ca 1.700 Versuchsstunden wurden verschiedene Partikelformen und organische Stoffe getestet [2]. Haupteinsatzstoff bei den Forschungsarbeiten war Stroh in Pelletform. Die guten Ergebnisse führten zu dem Interesse von Institutionen im Landkreis Hildesheim, das dort beim Weizenanbau als Nebenprodukt anfallende Stroh im Vergaser in ein heizwertreiches Gas überführen zu lassen, welches im konventionellen Gasmotor zu Strom und Wärme umgesetzt wird. Zielgröße ist eine Einordnung in die 5 MW_{elektrisch} - Klasse gemäß EEG, was einem Input von ca 38.000 Jahrestonnen entspricht. Das Vorhaben besitzt wegen fehlender Referenzen Demonstrations-Charakter mit entsprechendem technischen und wirtschaftlichen Risiko für den Bauherren; daher ist ein Förderantrag beabsichtigt.

Eine Machbarkeitsstudie [3] als Grundlage für eine Förderung prüfte die *Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe* (Abk.: FNR) im Jahr 2008. In der Stellungnahme [4] wird auf den Umstand hingewiesen, dass für den Eintrag von gehäckseltem Stroh in den avisierten Vergaser Klärungsbedarf bestehe. Die Fachagentur macht darauf aufmerksam, dass gemäß einer wirtschaftlichen Analyse die Anlage kritisch zu bewerten sei. Einschränkungen der Verfügbarkeit und Entwicklungsarbeiten noch während der Inbetriebnahmephase würden hohe Rückstellungen erfordern.

Die einleuchtene Argumentation erforderte Handlungsbedarf. Im Rahmen des vorliegenden Projektes waren Strohballen durch die oben erwähnte Technikumsanlage in ein heizwertreiches Synthesegas zu überführen. Dazu mußte ein Häcksler mit einem neu zu konzipierenden Eintragungssystem in Reihe geschaltet werden. Das alte Eintragungssystem wurde soweit als notwendig abgerissen.

Projektziele waren:

- I. Vergleich der Eigenschaften des Synthesegases gegenüber dem Betrieb mit Holzpellets (Heizwert, chemische Zusammensetzung)
- II. Nachweis der Funktionsfähigkeit im dreimal a 100 h Dauerbetrieb
- III. Bewertung der Filterasche (Ausbrand, Morphologie, Zusammensetzung).

2. Projektdurchführung

Das Projekt startete mit der Suche nach Apparatebauern für den Häcksler und das neue Eintragungssystem. Den Häcksler zeichneten die Anforderungen aus, dass er a) für den Hallenbetrieb geeignet sein mußte (→ elektrischer Antrieb anstatt eines Schleppers) sowie b) einen relativ geringen Durchsatz der Technikumsanlage von 60 bis 100 kg/h sicherzustellen hatte. Aus verschiedenen Anbietern wurde die Fa. KLE aus Groß-Rosenburg ausgewählt.

Einen Anlagenbauer für das Eintragungssystem zu finden gestaltete sich aufwändig, da gehäckseltes Stroh als sehr schwierig angesehen wird. Gefunden werden konnte die Fa. REW aus Quakenbrück, welche Spezialkenntnisse zur Förderung von Schüttgütern mittels Schnecken und thermochemischer Konversion besitzt.

Der Zeitbedarf des ursprünglichen Terminplanes umfaßte einen Bedarf von acht Monaten plus Berichtserstellung. Beabsichtigt waren drei Versuchswochen, wobei in den beiden Zwischenräumen Auswertung und Umbauarbeiten konzipiert waren. Durch die Rahmenbedingungen, in denen sich das Vorhaben bewegte, befand sich die Versuchsdurchführung unter hohem zeitlichen Druck. Die sechs bzw. vier Wochen für Umbauarbeiten standen nicht zur Verfügung. Die zeitlichen Möglichkeiten wurden ferner dadurch erschwert, dass die bewilligte Bearbeitungsdauer sehr kurz war und die Bestell- und Fertigungsphase in die Weihnachts- und Jahreswechselzeit fiel. Eine Fahrweise in dreimal 100 Versuchsbetrieb, wie ursprünglich beabsichtigt, war durch die äußeren Gegebenheiten somit nicht machbar. Das Forschungsinstitut war gezwungen, einen kontinuierlichen Versuchsbetrieb einschließlich Wochenenden und Feiertagen anzusetzen, um innerhalb eines kurzen Zeitraumes den Vergasungsbetrieb mit insgesamt 300 h zu absolvieren und gleichzeitig die Zuverlässigkeit der Kombination von Eintragungssystem und Vergaser nachzuweisen.

Alle Optimierungs-, Änderungs- und Reparaturarbeiten waren im laufenden Versuchsbetrieb durchzuführen. Dazu waren besonders zu Beginn häufige Ab- und Anfahrvorgänge notwendig.

Der Arbeitsplan mußte gegenüber der Antragstellung geändert werden: Die Nichteinhaltung der ersten 100 h im Dauerbetrieb wurde dadurch kompensiert, dass anschließend nicht mehr nach jeweils 100 h abgestellt wurde, sondern die Anlage bis zum Erreichen der Vorgabe über Maifeiertag und Wochenende kontinuierlich durchfuhr. So konnte das letzte Stück mit 249 h erreicht werden (s. Kap. 5).

Nach Überschreiten der 300 h-Grenze_{ges} erfolgte noch eine Erhöhung der Vergasungstemperatur am letzten Tag, um Gaseigenschaften bei höheren Temperaturen zu ermitteln.

3. Brennstoffanalysen

Zu Beginn der Versuchswochen wurde eine umfassende Brennstoffanalyse des Häckselstrohs durchgeführt. Besonders auffällig ist der niedrige Sinter- und Erweichungsbeginn der Asche, der sich bei mehreren Nachbestimmungen festigte. Zum Vergleich sind frühere Analysenwerte von Weizenstrohpellets [5] mit angeführt. Bis auf das Ascheschmelzverhalten sind die Ergebnisse relativ gut vergleichbar.

Schaut man sich die geringen Unterschiede der Spurengehalte an, lässt sich der große Unterschied im Ascheschmelzverhalten nicht erklären. Im Gegenteil sind die Spurenelemente, denen eine Absenkung der Erweichungstemperatur nachgesagt wird (K, Na), zumindest im analysierten Fall von Kalium in dem Häckselstroh in geringeren Anteilen auffindbar. Bei den Spurenelementen, die eine Erhöhung der Erweichungstemperatur fördern (Ca, Mg), ist beim Häckselstroh weniger Ca enthalten, jedoch mehr Mg als bei den analysierten Pellets.

Tab. 3-1: Brennstoffanalyse Teil I für Weizenstrohpellets und Häckselstroh

Kurzanalyse	Weizenstrohpellets Februar 2006 Renew			Häckselstroh Februar 2009 Stroheintrag				
	Analysezustand (gemahlen)			Analysezustand geteilt, gemahlen				
	i. an.	wf	waf	i. an.	wf	waf		
Bezugszustand								
Wassergehalt	w	9,33	0,00	0,00	8,21	0,00	0,00	Ma.-%
Asche	a	7,03	7,75	0,00	8,43	9,19	0,00	Ma.-%
Flüchtige Bestandteile	V	65,5	72,2	78,3	66,7	72,7	80,1	Ma.-%
Tiegelkoks (C + Asche)	NV	25,18	27,77	21,70	25,05	27,29	19,94	Ma.-%
fixer Kohlenstoff	C _{fix}	18,15	20,02	21,70	16,62	18,11	19,94	Ma.-%
Summe		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	Ma.-%

Elementaranalyse

Kohlenstoff	C	41,7	46,0	49,8	40,4	44,0	48,5	Ma.-%
Wasserstoff	H	4,7	5,2	5,6	5,0	5,4	6,0	Ma.-%
Sauerstoff	O	36,2	40,0	43,3	37,2	40,5	44,6	Ma.-%
Stickstoff	N	0,695	0,766	0,831	0,430	0,468	0,516	Ma.-%
Schwefel	S	0,117	0,129	0,140	0,098	0,106	0,117	Ma.-%
Chlor	Cl	0,247	0,272	0,295	0,218	0,237	0,262	Ma.-%
Fluor	F	0,001	0,001	0,001		0,000	0,000	Ma.-%
Wasser	w	9,325	0,000	0,000	8,210	0,000	0,000	Ma.-%
Asche	a	7,027	7,750	0,000	8,431	9,185	0,000	Ma.-%
Summe		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	Ma.-%

Spurenanalyse

Natrium	Na	0,70	0,77	0,84				mg/g
Kalium	K	15,10	16,65	18,05	12,00	13,07	14,40	mg/g
Calcium	Ca	4,10	4,52	4,90	3,50	3,81	4,20	mg/g
Magnesium	Mg	0,85	0,94	1,02	0,90	0,98	1,08	mg/g
Phosphor	P	0,79	0,87	0,94				mg/g

Tab. 3-2: Brennstoffanalyse Teil II für Weizenstrohpellets und Häckselstroh

Kurzanalyse	Weizenstrohpellets Februar 2006 Renew			Häckselstroh Februar 2009 Stroheintrag				
	Analysezustand (gemahlen)			Analysezustand geteilt, gemahlen				
	i. an.	wf	waf	i. an.	wf	waf		
Bezugszustand								
Brennstoffkennwerte								
Mindestsauerstoffbedarf	O _{min}	0,79	0,87	0,94	0,77	0,84	0,93	m ³ /kg
Mindestluftmenge	I _{min}	3,75	4,13	4,48	3,69	4,02	4,43	m ³ /kg
Mindestluftmenge	I _{min}	4,85	5,34	5,79	4,77	5,20	5,72	kg/kg
Brennwert (Analyse)	H _o	16,39	18,08	19,60	16,35	17,81	19,62	MJ/kg
Heizwert (Analyse)	H _u	15,14	16,95	18,37	15,06	16,63	18,31	MJ/kg
Heizwert (Boje)	h _u	14,91	16,69	18,09	14,67	16,20	17,84	MJ/kg
Heizwert (Verbandsform)	h _u	14,09	15,79	17,11	13,93	15,39	16,95	MJ/kg

Ascheschmelzverhalten

Atmosphäre	oxidierend			oxidierend			
Sinterbeginn	T _S			740	737	°C	
Erweichungstemperatur	T _E	976		770	785	°C	
Halbkugeltemperatur	T _H	1025		1185	1174	°C	
Fließtemperatur	T _F	1036		1313	1295	°C	
		Bestimmung nach DIN 51730 (Veraschung bei 850°C)			Bestimmung nach CEN TC 335/WG4 N 43 (Veraschung bei 550°C)		

4. Anlagenbeschreibung

4.1 Anlage zur Synthesegaserzeugung

Für die Vergasung des gehäckselten Strohs kam eine zirkulierende **Wirbelschicht** (Abk.: ZWS) zum Einsatz. Die Anlage konnte ihre Eignung für verschiedene Biomassen bereits zeigen [z.B. 5,6]. Sie arbeitet bei Normaldruck nach dem autothermen Prinzip, wozu sie Dampf als Fluidisierungsmittel und Sauerstoff für die internen exothermen Reaktionen benötigt (**s. Abb. 4.1-1**).

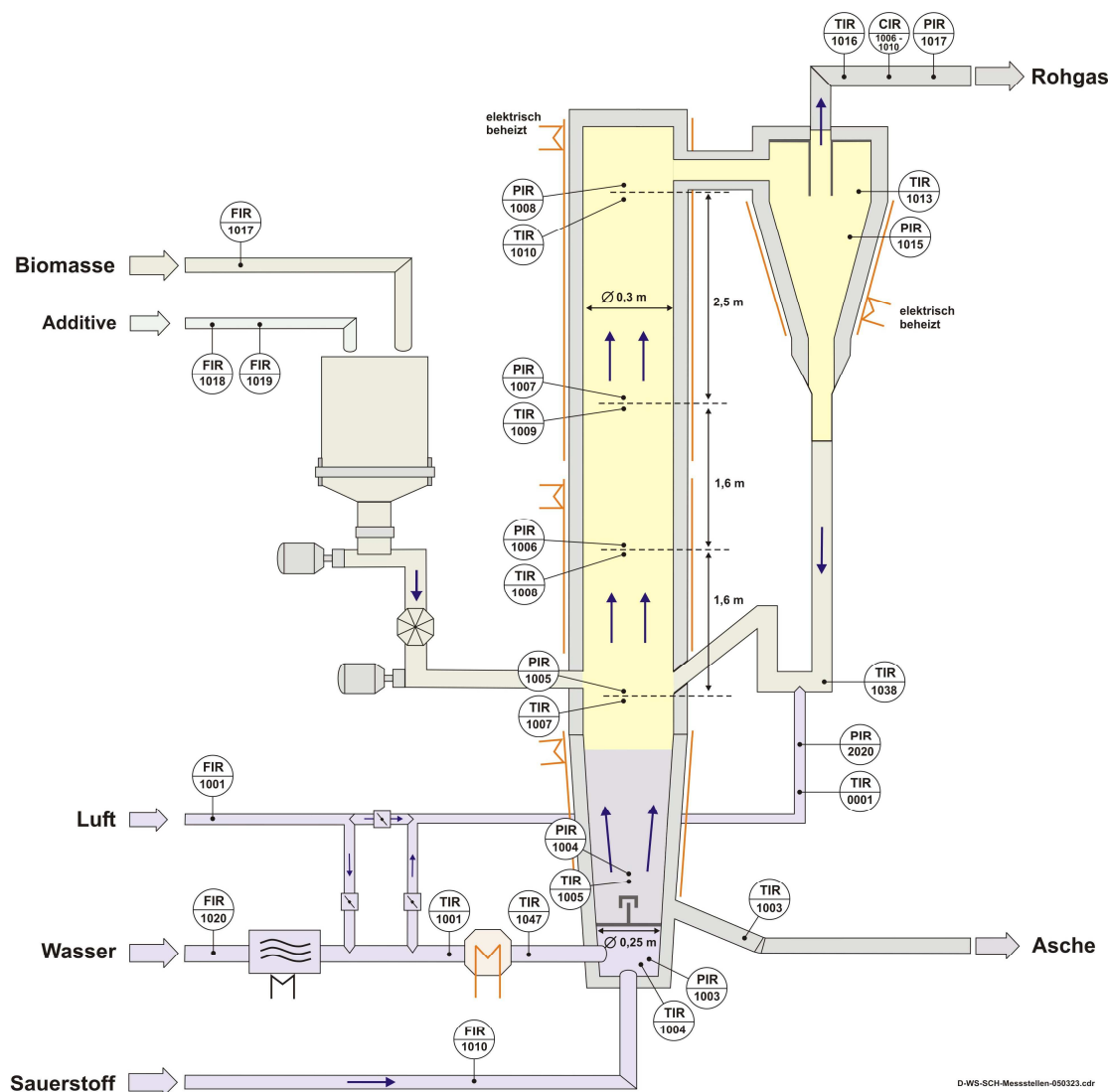


Abb. 4.1-1: Apparatefließbild des ArtFuel-Vergasers

Der Vergaser besitzt eine thermische Maximalleistung von 0,4 MW. Zur Heraufsetzung des Ascheschmelzpunktes beim Einsatz von Halmgut wird Branntkalk als Additiv hinzugegeben.

Da die Strecke der Synthesegasreinigung nur eine Inputkapazität von $60 \text{ Nm}^3/\text{h}$ besitzt, muss der Großteil des Gases in einer Nachbrennkammer verbrannt werden. Das zu verwertende Gas passiert im ersten Reinigungsschritt einen Heißgasfilter. Hier findet die Entstaubung bei einer Betriebstemperatur von 500 bis 600 °C statt. Die Asche wird bei Überschreitung eines gewissen

Differenzdruckes nach dem Impuls-Jet-Verfahren durch Stickstoff abgeblasen, ausgetragen und gesammelt. Die Reinigungsstufe stellt die Senke für die Erdalkali, Alkali und das Phosphor dar, welche mit der Biomasse und als Additiv in den Vergaser gelangen.

4.2 Strohhäcksler

Der Strohhäcksler (s. **Abb. 4.2-1**) und dessen Betrieb mit dem vorhandenen Filtersystem und dem Eintrag mittels Zyklon in den Biomassebunker der ArtFuel-Anlage konnte erfolgreich getestet werden. Geringe Umbaumaßnahmen verbesserten den Abscheidvorgang im Zyklon sowie den Materialaustrag im Bereich des Häckslers.

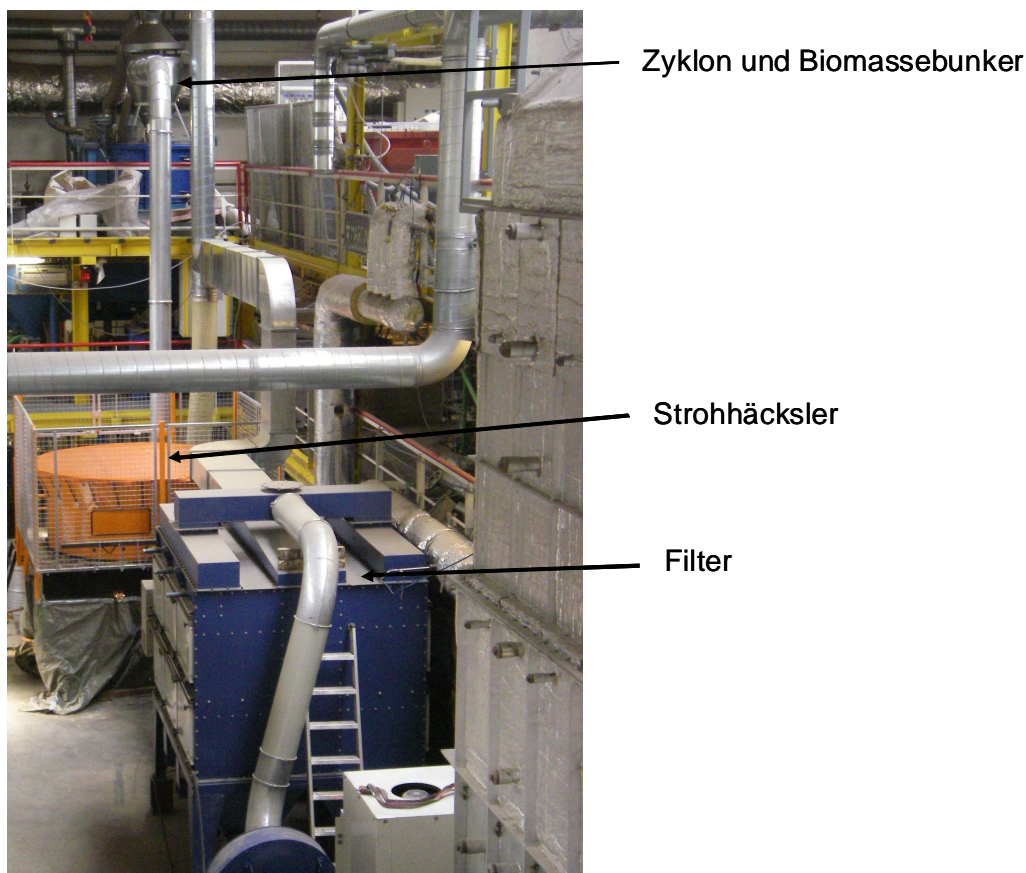


Abb. 4.2-1: Blick in Halle Nord

Änderungen wurden vorgenommen, um ein Zusetzen des Zyklons zu verhindern. Zum einen wurde eine Drucklufteinödusung im unteren Bereich installiert, um ggf. gebildete Brücken freipusten zu können (s. **Abb. 4.2-2**). Für ein besseres Absaugverhalten des Filters wurde der Zyklondeckel höher gesetzt. Während des Betriebes ist jedoch weiterhin auf die genaue Abstimmung zwischen dem Gebläse der Strohmühle und dem Filter zu achten, damit nicht das gehäckselte Stroh an das Sieb des Zyklons gesogen wird und diesen zusetzt.



Abb. 4.2-2: Zyklon mit installierter Absaugung, Druckluft zum Freipusten (blau) und höher gesetztem Deckel

4.3 Eintragssystem

Das geplante Eintragssystem der Fa. REW wurde Ende März installiert.

Bereits während der Kaltversuche kam es im Biomassebunker zu einer starken Brückenbildung des Strohs. Dies führte zu einem Hohlraum und zu einem Leerlaufen der Schnecken. Es wurde auf dem Drehteller im Bunker ein Mitnehmer mit Armen aus Flachstahl installiert, der für eine gute Durchmischung sorgen sollte. Dieser Mitnehmer konnte den entstehenden Kräften nicht standhalten, so dass eine zweite Version mit stärkerem Rundstahl angefertigt wurde (**s. Abb. 4.3-1**).



Abb. 4.3-1: Brückenbildung im Biomassebunker; verbogene Mitnehmer, neuer Mitnehmer

Da der gewünschte Massenstrom der Eintragungsschnecke nicht erzielt werden konnte, wurde die Übersetzung des Motors durch die Wahl anderer Ritzel geändert. Dadurch konnte der Massenstrom auf $110 \text{ kg}_{\text{Stroh}}/\text{h}$ erhöht werden. Jedoch zeigte sich im längeren Versuchsbetrieb, dass der Leistungsverlust des Motors zu groß ist und es bereits bei einer Leistung von 50% zu einer Motorüberlastung kommen kann. Diese führt zu einem Ausfall des gesamten Eintragssystems, was wiederum den Betrieb der Wirbelschicht, aufgrund des Übergangs vom Vergasungs- in den Verbrennungsbetrieb, gefährdet. Ein stärkerer Motor wurde bestellt.

Bereits im Kaltbetrieb zeigte sich, dass die gewählten Flügelsensoren für die Füllstandmessung nur bedingt geeignet sind. Die installierten Flügelsensoren im Biomassebunker (s. **Abb. 4.3-2**) melden sowohl den Vollstand als auch den Leerstand zuverlässig. Der Leerstandssensor meldet aufgrund seiner hohen Lage relativ früh, gekoppelt mit der Gewichtsmessung lässt sich diese Meldung jedoch entsprechend beurteilen.

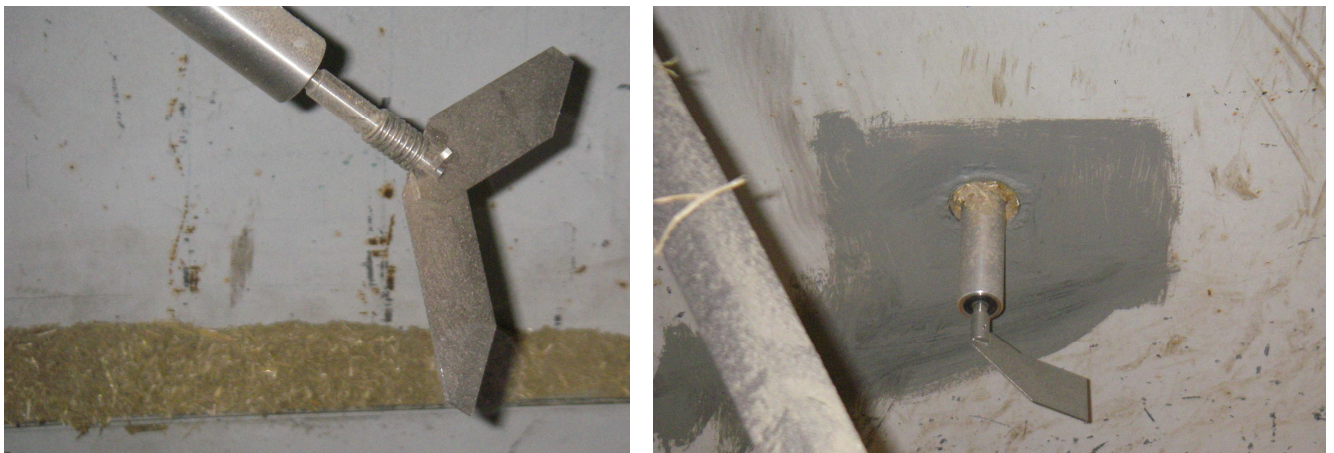


Abb. 4.3-2: Füllstandssensoren im Biomassebunker; Vollstand oben; Leerstand unten

Besonders der Füllstandssensor im Bereich der Eintragungsschnecke bereitete Probleme (s. **Abb. 4.3-3**). Das Stroh bildete Brücken, welche den Flügel stoppten. Angezeigt wurde in diesem Fall „Vollstand“, obwohl der Zuführkanal leer war. Über den Sensor wird der Zyklus der Doppelklappen gesteuert. Falls keine zuverlässige Meldung stattfindet, kann es entweder zum Leerlaufen der Eintragungsschnecke kommen oder zum vermehrten Verdichten des zugeführten Materials. Nach wiederholtem Auftreten dieser Problematik wurde der entsprechende Sensor durch ein optisches System ersetzt (s. **Abb. 4.3-4**). Die optische Füllstandsmessung hat sich bisher als sehr zuverlässig erwiesen.

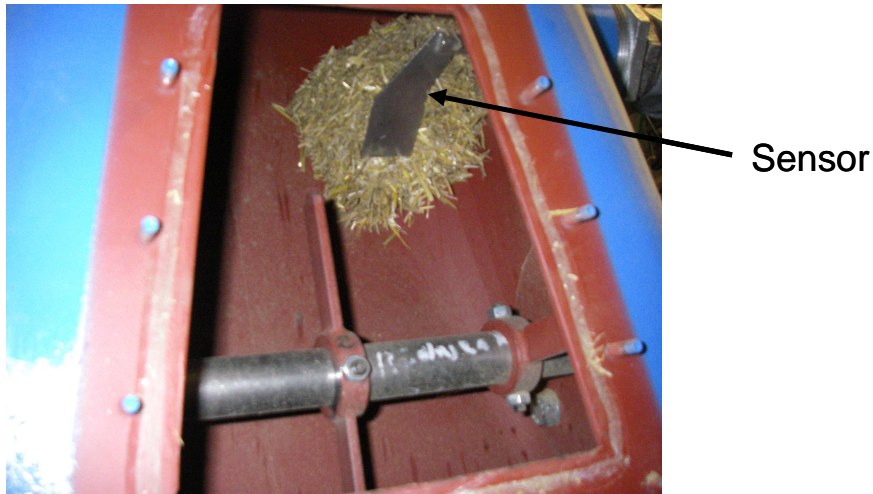
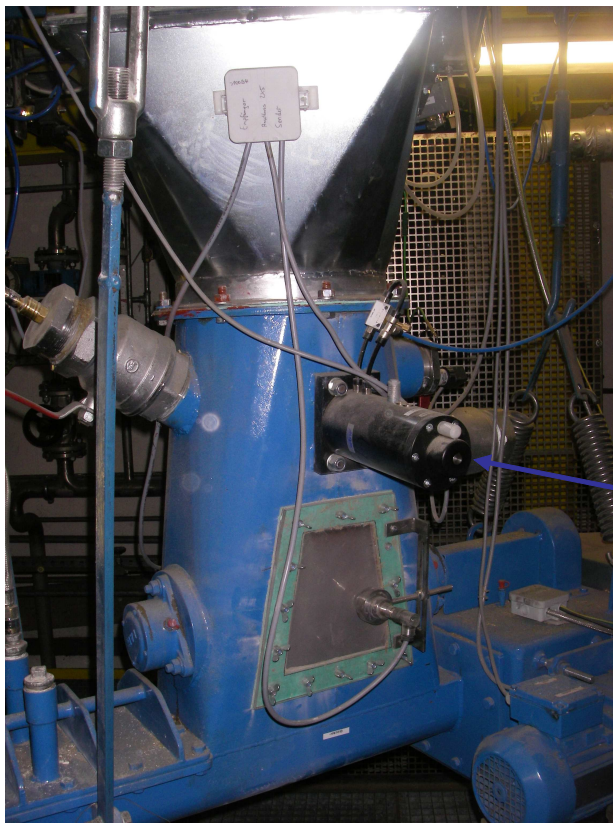


Abb. 4.3-3: Füllstandssensor im Füllbereich der Eintragsschnecke (1. Version)



Abb. 4.3-4: Optischer Füllstandssensor im Füllbereich der Eintragsschnecke

Oberhalb der Füllstandssensoren der Eintragsschnecke wurde weiterhin ein pneumatisch betriebener Klopfer angebracht (s. **Abb. 4.3-5**). Dieser lässt sich im Notfall betätigen, um gebildete Strohbrücken zu lösen.



Klopfer

Abb. 4.3-5: Pneumatisch betriebener Klopfer zum Lösen bei Brückenbildung

Der Flügelsensor oberhalb der Doppelpendelklappen wurde ebenfalls zeitweise durch Stroh blockiert. Um diese Stillstände des Eintragungssystems zu vermeiden, wurde ein Vibrationssensor eingebaut (s. **Abb. 4.3-6**). Dieser besteht aus zwei gabelförmigen Fühlern, die eine Meldung auslösen, sobald sich zwischen den Gabeln Material befindet. Der Sensor funktionierte problemlos.

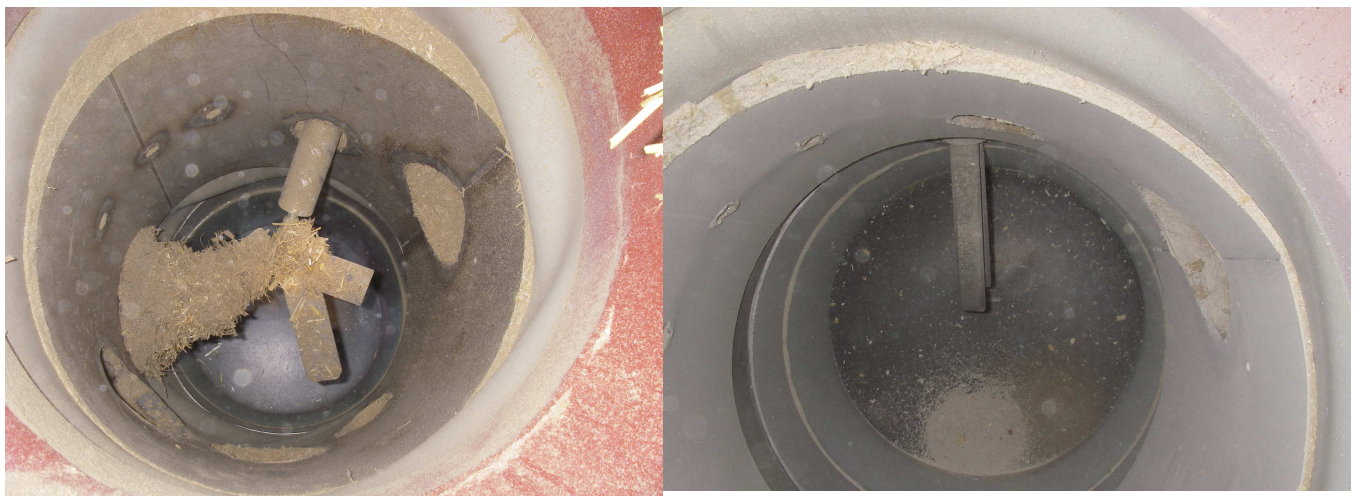


Abb. 4.3-6: Füllstandssensor im Fallschacht oberhalb der Doppelpendelklappen; blockierter Flügelsensor; Vibrationssensor

Eine weitere Problematik ergab sich durch die stark schwingenden Doppelpendelklappen. Um eine Übertragung auf das gesamte Anlagengestell zu vermeiden, wurden seitlich im Lichtgitter Halterungen mit einer dämpfenden Materialschicht angebracht.

Im gleichen Bereich liegen die Endstandsensoren der Doppelpendelklappen. Vermutlich aufgrund einer Materialschwäche zerbrach einer der Sensoren während des Betriebes und musste erneuert werden (s. **Abb. 4.3-7**).

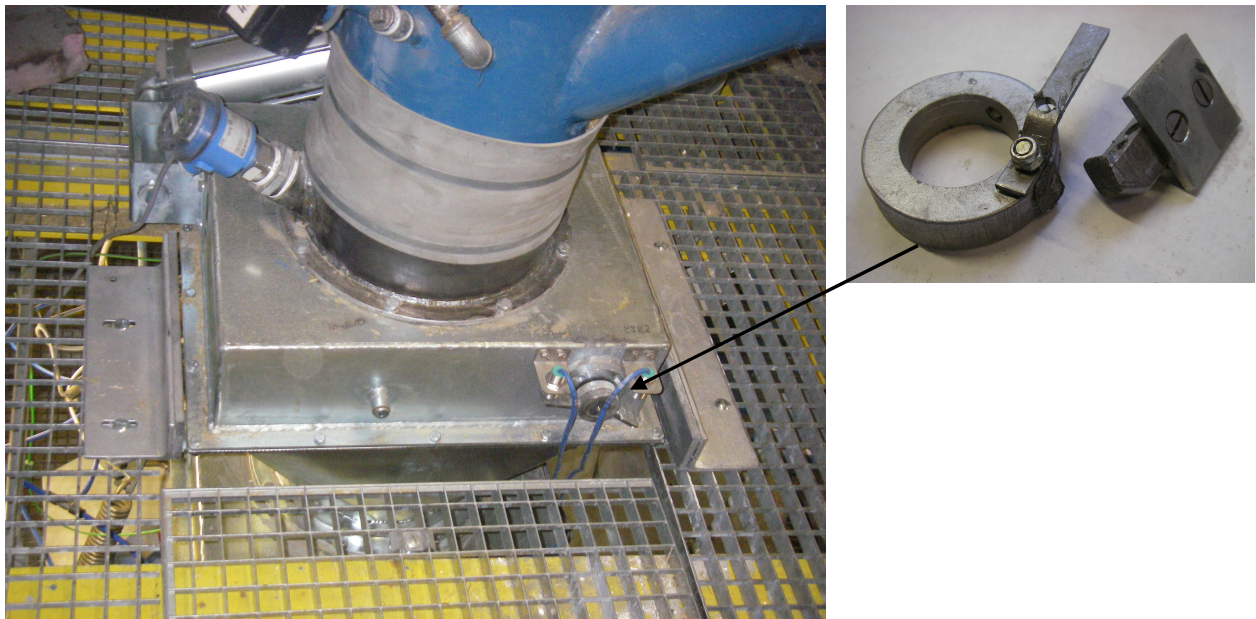


Abb. 4.3-7: Doppelpendelklappen mit Dämpfungsschienen; Lage des defekten Endstand-sensors

Aufgrund einer mangelhaften Entgratung der Einlässe in den Fallschacht (s. **Abb. 4.3-8**) staute das Stroh während des Betriebes in der Zuführung des Schnellzuschlagbunkers. Nachdem der angesammelte Quarzsand nachrutschen konnte, kam es aufgrund der großen Sandmenge zu einem Stillstand der Eintragsschnecke. Zusätzlich zum Entgraten wurde die Zuführung durch einen durchscheinenden Schlauch ersetzt, damit ein Materialstau rechtzeitig erkannt werden kann.

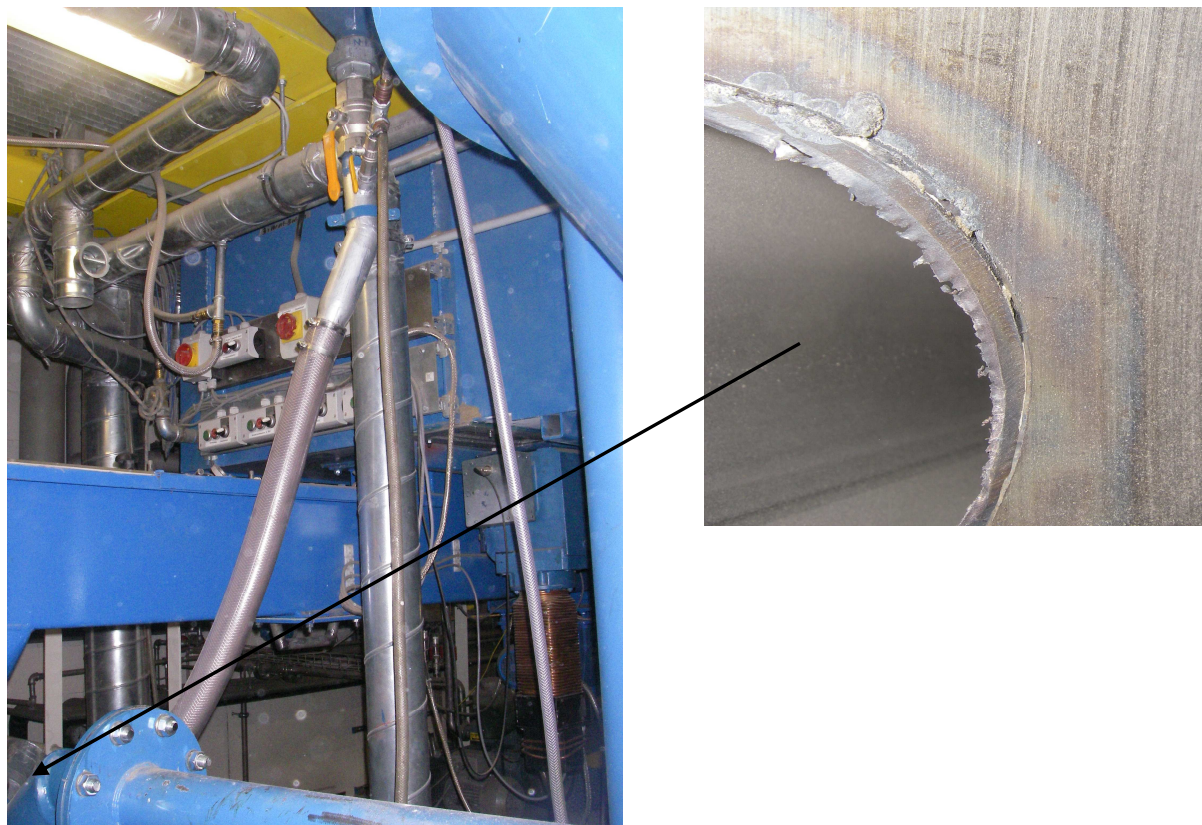


Abb. 4.3-8: Zuführung des Schnellzuschlagbunkers in den Fallschacht, schlecht entgrateter Einlass

5. Vergasungsbetrieb

Nach erfolgreichem Aufbau des Eintragungssystems erfolgten ab Anfang April die ersten Versuchsdurchläufe im Vergasungsbetrieb. Wie zu erwarten kam es bei einem Ausfall des Eintragungssystems aufgrund von Temperaturspitzen in der Wirbelschicht zu Verbackungen, die zu kurzen Standzeiten der Gesamtanlage führten. Die Ausfälle des Eintragungssystems sind auf unterschiedliche Problematiken zurückzuführen, die oben erläutert wurden.

Die Vergasungsversuche wurden bei einem Biomassedurchsatz von 60 kg/h absolviert, was einer thermischen Leistung der Wirbelschicht von ca 250 kW entspricht. Versuche mit bis zu 80 kg/h mußten abgebrochen werden, da die Eintragungsschnecke immer wieder zu Stillständen neigte. Die mittlere Vergasungstemperatur lag bei ca. 700 °C. Die Begleitheizung des Reaktors lief auf geringer bis mittlerer Leistung und das Wirbelbett bestand aus einer Kalk/Sand-Mischung.

Die Versuche wurden bei einem Lambda von ca. 0,22 bis 0,27 mit Dampf und Sauerstoff als Vergasungsmittel (Dampf-Sauerstoff-Verhältnis [kg/kg]: 2,09 bis 2,69) durchgeführt. Am letzten Tag der Versuchsreihe erfolgte die stufenweise Erhöhung der Temperatur auf ca 800 °C zur Erfassung von Temperatureffekten.

Die Verweilzeiten des Gases in der ZWS lagen bei den Versuchen zwischen 3,2 und 4,8 s. Die Verweilzeit wird bestimmt über den gemessenen Betriebsvolumenstrom des Rohgases und das Gesamtvolumen des Reaktors. Als Bettmaterial wurde Sand verwendet. Außerdem wurde während der Versuche kontinuierlich Branntkalk (CaO) zudosiert.

Während der Betriebszeit sind 7 Versuchseinstellungen analysiert und ausgewertet worden.

Bei allen auswertbaren Versuchseinstellungen wurden Teerprobenahmen im Rohgas durchgeführt. Es liegen Analysenwerte der Spurenkomponenten NH₃, H₂S, HCN und HCl vor. Gasproben wurden extern analysiert (Fa. K-UTECH). Bei den Versuchen wurden Bett- und Siphonascheprogen genommen und im CUTEC-Labor auf den Kohlenstoffgehalt analysiert. Filterascheprogen konnten nur von den beiden ersten Versuchspunkten analysiert werden, da anschließend die Nebenstrecke aufgrund defekter Filterkerzen abgeschaltet werden musste.

Die Gesamtbilanzen bezüglich Masse und Energie können wegen des Filterkerzenbruchs nur bei den ersten beiden Versuchspunkten erstellt werden.

In **Abb. 5-1** ist ein Auszug aus der Messwerterfassung der ArtFuel-Anlage während des Versuchsbetriebes im Zeitraum vom 26.04.09, 18:00 Uhr bis 07.05.09, 22:30 Uhr zu sehen. Folgende Werte sind dargestellt:

P1009 [mbar]: Berechnete Druckdifferenz zwischen Düsenboden und Reaktorkopf

T1005 [°C]: Temperaturmessstelle über dem Düsenboden

T1007 [°C]: Temperaturmessstelle im Bereich des Eintrags

T1009 [°C]: Temperaturmessstelle im oberen Drittel des Reaktors

T1038 [°C]: Temperaturmessstelle im Siphon

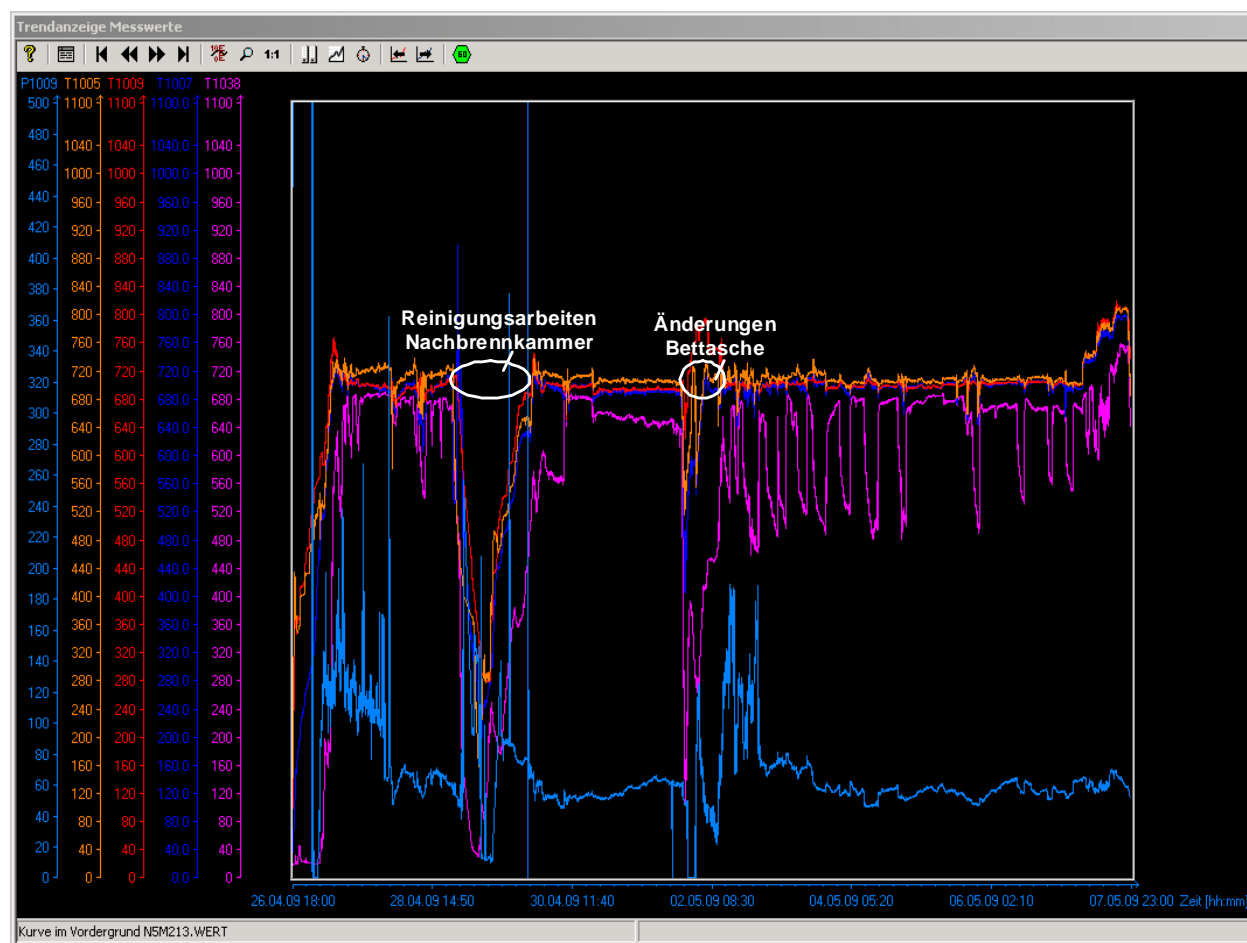


Abb. 5-1: Messwarterfassung während des Versuchsbetriebes vom 26.04.09, 18:00 Uhr bis 07.04.09, 23:00 Uhr

Für die Beurteilung des Betriebes interessant sind die Temperaturmess-Stellen T 1005, 1007 und 1009 (orange, blaue und rote Kurven). Sie dokumentieren den ruhigen und konstanten Betriebes des Vergasers, solange keine Störungen von außerhalb auftreten. Zwischendurch mußte der Vergaser einmal in den Warmhaltebetrieb gehen, um Reinigungsarbeiten in der Nachbrennkammer durchzuführen. Ein anderes Mal wurde der Sandanteil im Bett erhöht, da dies kurzzeitig zusammenfiel. Wie sich anschließend herausstellte, reibt der Sand sich bildende Verbackungen besser ab als der weiche Branntkalk.

Am 7. Mai ab ca 7:00 Uhr wurde die Temperatur auf die Niveaus von 730, 775 und 800 °C angehoben, um die Gaszusammensetzung zu ermitteln. Bei jeder Temperatur erfolgte die Ziehung einer Teerprobe. Analysiert werden sollte die Teermenge und –zusammensetzung als Funktion der Vergasertemperatur.

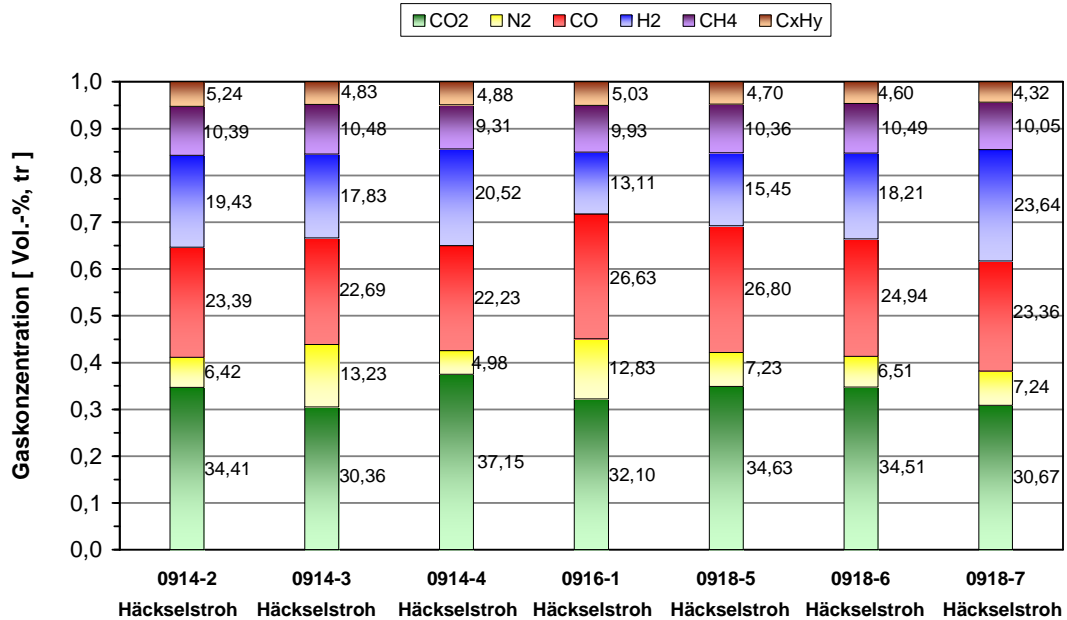
Die Graphik zeigt, dass der letzte Versuchszeitraum über ca 249 h ging. Mit allen vorherigen, kürzeren Zeiträumen zusammen kommt man auf einen Versuchsbetrieb (einschl. der Phasen im Warmhalte- und Verbrennungsbetrieb) von ca 590 h seit Anfang April. Der Vergasungsbetrieb lag insgesamt bei ca 319 h. **Mit dem Betrieb von 26. April bis 7. Mai konnte ein Zeitraum nachgewiesen werden, welcher weit über den Vorgaben des Zuwendungs-**

bescheidenes liegt. Die gemachten Erfahrungen bilden eine gute Grundlage, um die technische Absicherung einer hohen Verfügbarkeit der beabsichtigten Demonstrationsanlage mit der entwickelten Lösung von Häcksler und Eintragssystem zu bilden.

Für eine kommerzielle Anwendung wichtig ist der elektrische Energiebedarf des zweistufigen Häckslers. Er lag in den Versuchen bei 16,2 kWh pro Tonne zerkleinerten Strohs. Für eine Anlage der 5 MW_{el}-Klasse mit einer Jahresleistung von ca 38.000 Tonnen Stroh und 43.800 MWh produziertem elektrischen Strom bedeutet dies einen Eigenbedarf für die Zerkleinerung von 627 MWh_{el}, d.h. 1,43 % der elektrischen Bruttoleistung.

6. Versuchsergebnisse

6.1 Permanentgas



P [kW]:	261	252	306	334	294	315	383
T [°C]:	732	734	731	694	730	775	798
Dampf/O ₂ [%]:	2,50	2,54	2,52	2,33	2,69	2,39	2,09
H ₂ :CO:	0,83	0,79	0,92	0,49	0,58	0,73	1,01
Hu [MJ/Nm ³]:	12,07	11,60	11,36	11,54	11,73	11,61	11,57

Abb. 6.1-1: Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei

Die Ergebnisse der Permanentgaszusammensetzung in **Abb. 6.1-1** weisen einen durchgehend hohen Gehalt an Stickstoff und Kohlendioxid auf. Die hohen Stickstoffgehalte sind auf die Spülungen besonders im Bereich des Eintragungssystems zurückzuführen. Die Spülungen sollen den Eintragungsbereich der Wirbelschicht gegen ein Zurückzünden im Falle eines Ausfalls (Stehenbleiben der Eintragungsschnecke) sichern. Der hohe Kohlendioxidgehalt entsteht durch die Teilverbrennung der Biomasse, die für die Wärmebereitstellung nötig ist. Im Vergleich zu früheren Vergasungsversuchen mit Strohpellets (**s. Abb. 6.1-2**) und anderen Biomassen (**s. Abb. 6.1-3**) sind die erreichten Wasserstoffgehalte relativ gering, dafür ist der Gehalt an Methan und höheren Kohlenwasserstoffen größer. Eine höhere Vergasungstemperatur, verbunden mit einem sinkenden Dampf/O₂-Verhältnis (0918-5 bis -7), führt zu einem höheren Anteil an Wasserstoff und einem höheren H₂/CO-Verhältnis. Jedoch sind bei beiden Faktoren die erzielten Ergebnisse der Strohpellets-Vergasung besser.

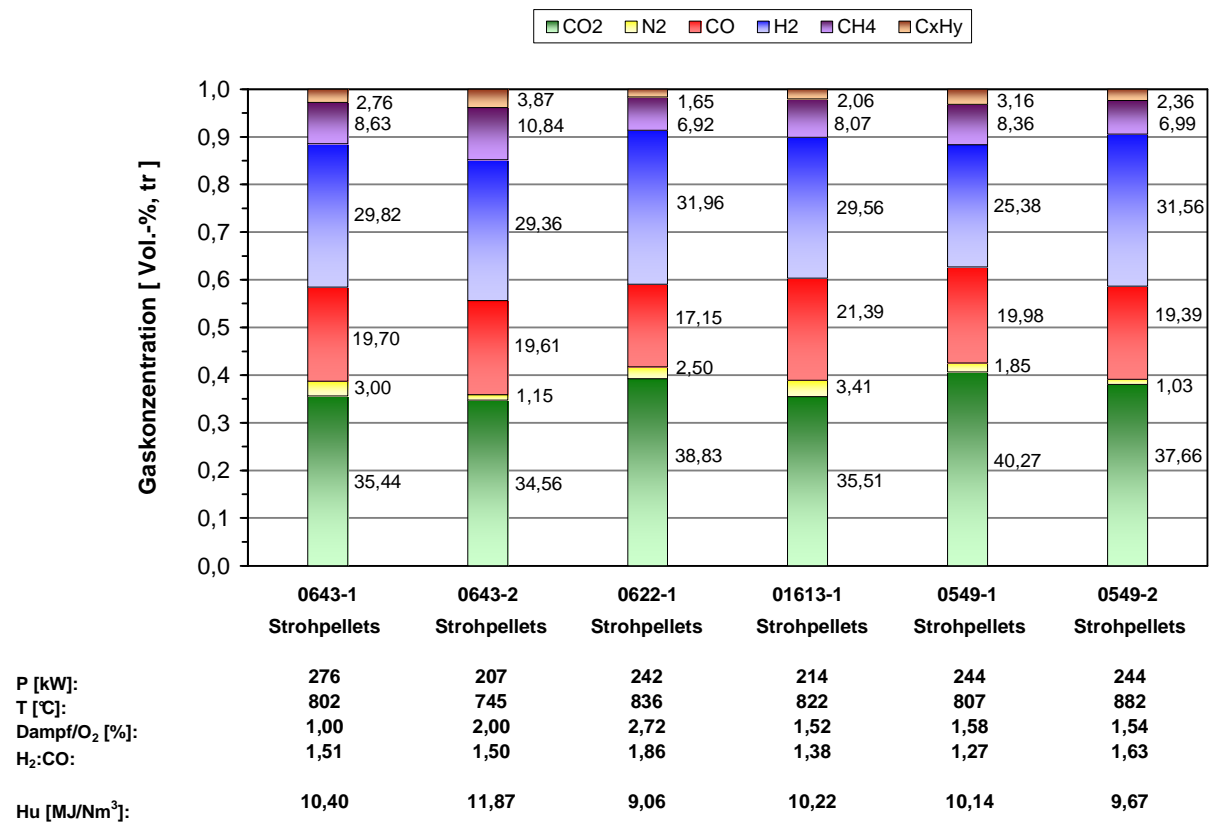


Abb. 6.1-2: Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei aus der Vergasung von Strohpellets [5]

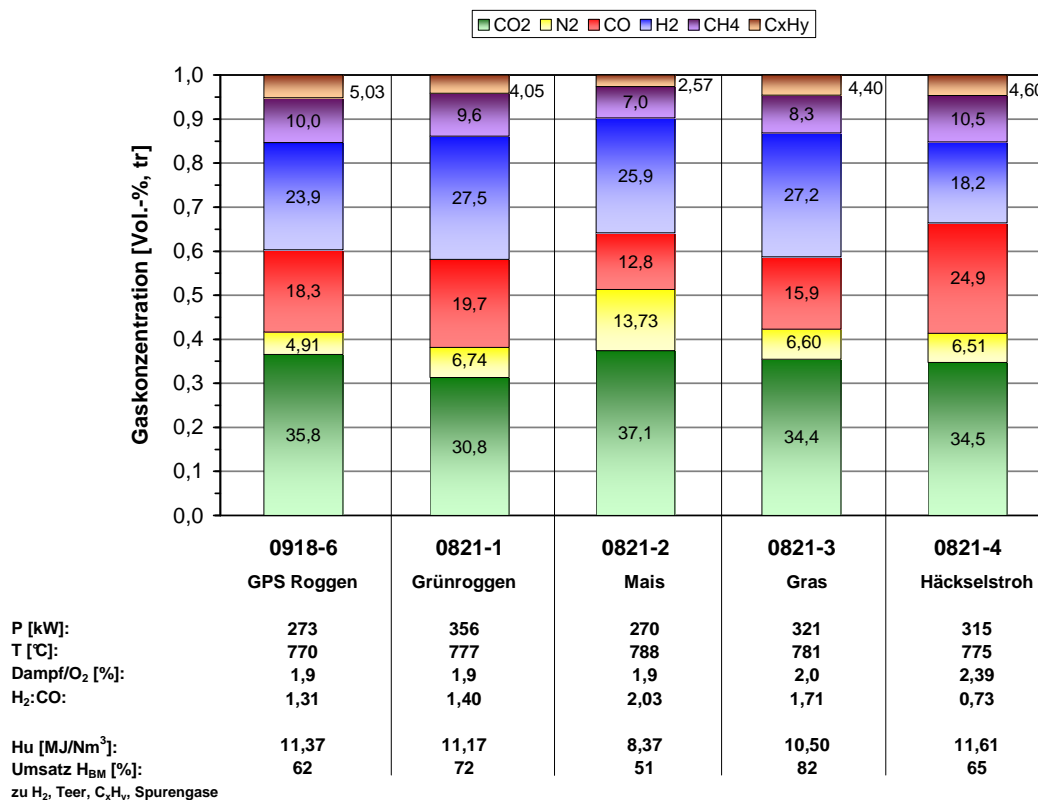


Abb. 6.1-3: Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei aus der Vergasung aufbereiteter Biomasse-Silagepellets im Vergleich zu Häckselstroh [6]

6.2 Teergehalt

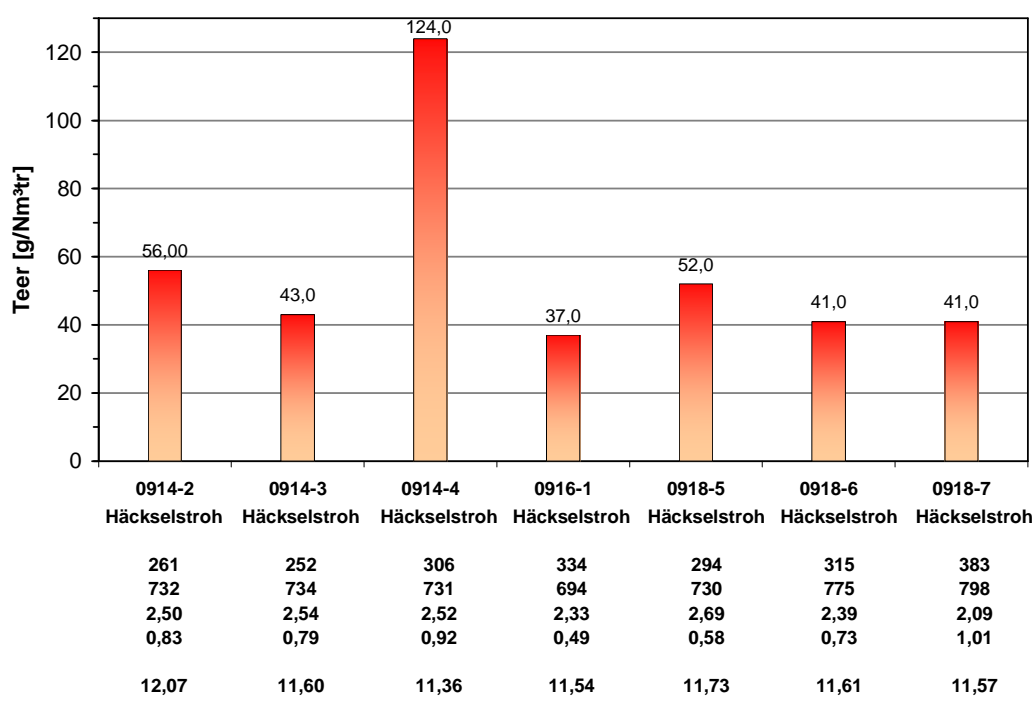


Abb. 6.2-1: Übersicht Teergehalte der Versuchspunkte

Die Teergehalte der Versuchseinstellungen mit Häckselstroh liegen allgemein auf einem relativ hohen Niveau (**s. Abb. 6.2-1**). Der Versuchspunkt 0914-4 weist einen sehr auffälligen Wert auf. Dieser wird vermutlich auf die Problematik des Anlagenbetriebes zurückzuführen sein. Kurz nach der entsprechenden Probenahme musste die Anlage abgefahren werden, da es zu starken Verbackungen innerhalb der Wirbelschicht gekommen war und kein zirkulierendes Wirbelbett mehr aufrecht erhalten werden konnte.

Abb. 6.2-2 stellt die Teergehalte von Synthesegasen aus unterschiedlichen Biomassen über der mittleren Vergasungstemperatur da. Deutlich erkennbar sind die höheren Werte des Häckselstrohs. Der hohe Wert der Versuchseinstellung 0914-4 wird aufgrund des unregulären Betriebes nicht dargestellt. Die Tendenz des abnehmenden Teergehaltes mit ansteigender Temperatur wurde mit Holzpellets nachgewiesen. Bei den anderen Biomassen ist die Tendenz weniger deutlich erkennbar, jedoch sind mit diesen Biomassen aufgrund der niedrigeren Ascheerweichungstemperatur auch nur kleinere Temperaturbereiche getestet worden.

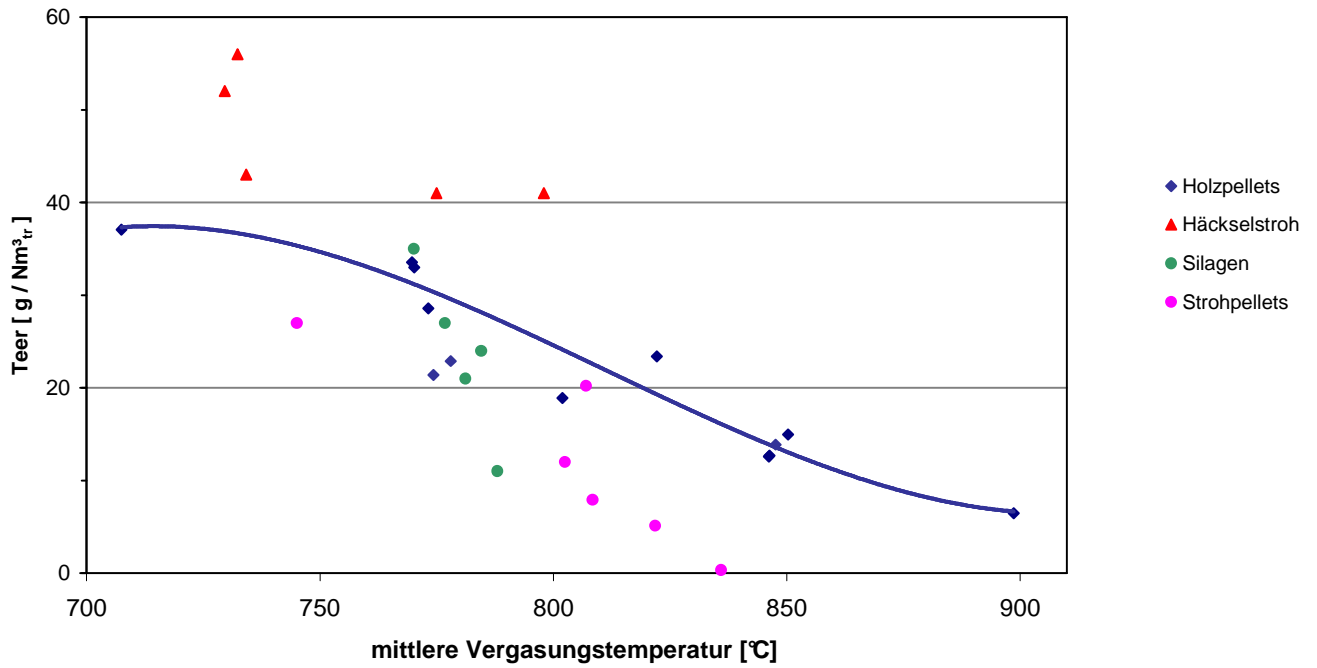
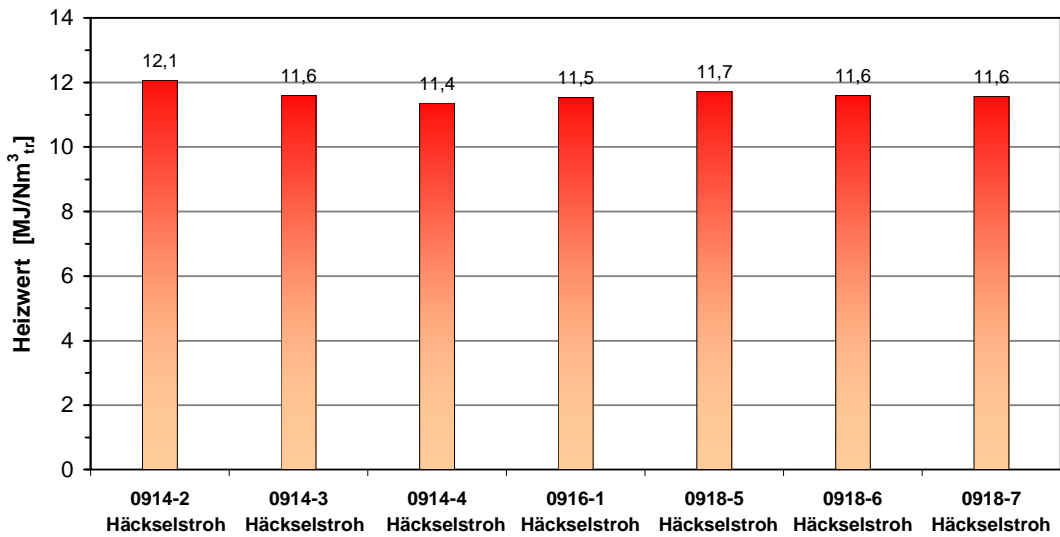


Abb. 6.2-2: Teergehalte unterschiedlicher Versuchsreihen; aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur

6.3 Heizwert



P [kW]:	261	252	306	334	294	315	383
T [°C]:	732	734	731	694	730	775	798
Dampf/O ₂ [%]:	2,50	2,54	2,52	2,33	2,69	2,39	2,09
H ₂ :CO:	0,83	0,79	0,92	0,49	0,58	0,73	1,01
Hu [MJ/Nm³]:	12,07	11,60	11,36	11,54	11,73	11,61	11,57

Abb. 6.3-1: Heizwerte der Versuchspunkte im trockenen Permanentgas

Aufgrund des hohen Gehaltes an Methan und höheren Kohlenwasserstoffen entsteht bei der Vergasung von Häckselstroh ein relativ heizwertreiches Synthesegas (s. **Abb. 6.3-1**). Jedoch ändert sich der Heizwert nicht mit der mittleren Vergasungstemperatur. Versuchsreihen mit Holzpellets zeigten eine deutliche Abnahme des Heizwertes mit ansteigender Vergasungstemperatur (s. **Abb. 6.3-2**), parallel zur Abnahme des Teergehaltes.

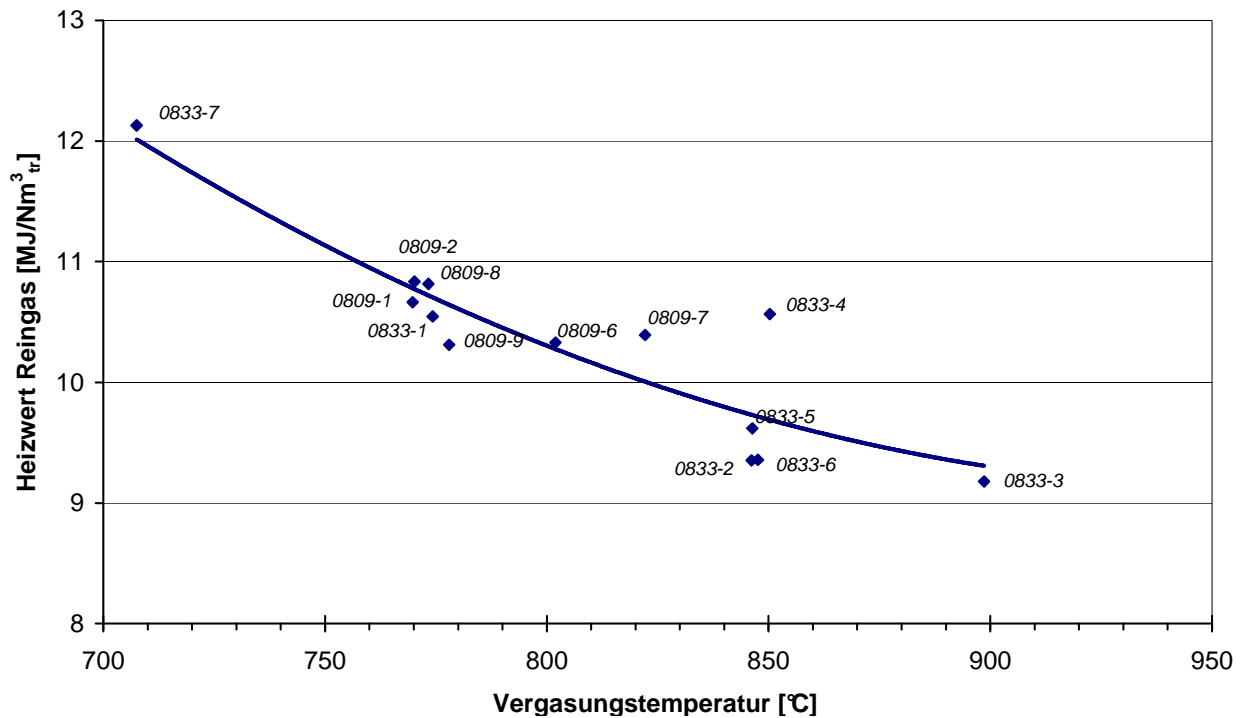


Abb. 6.3-2: Heizwerte der Versuchspunkte mit Holzpellets aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur

6.4 Zirkulationsrate, Gasausbeute, spezifischer Sauerstoffeinsatz und H_2/CO -Verhältnis

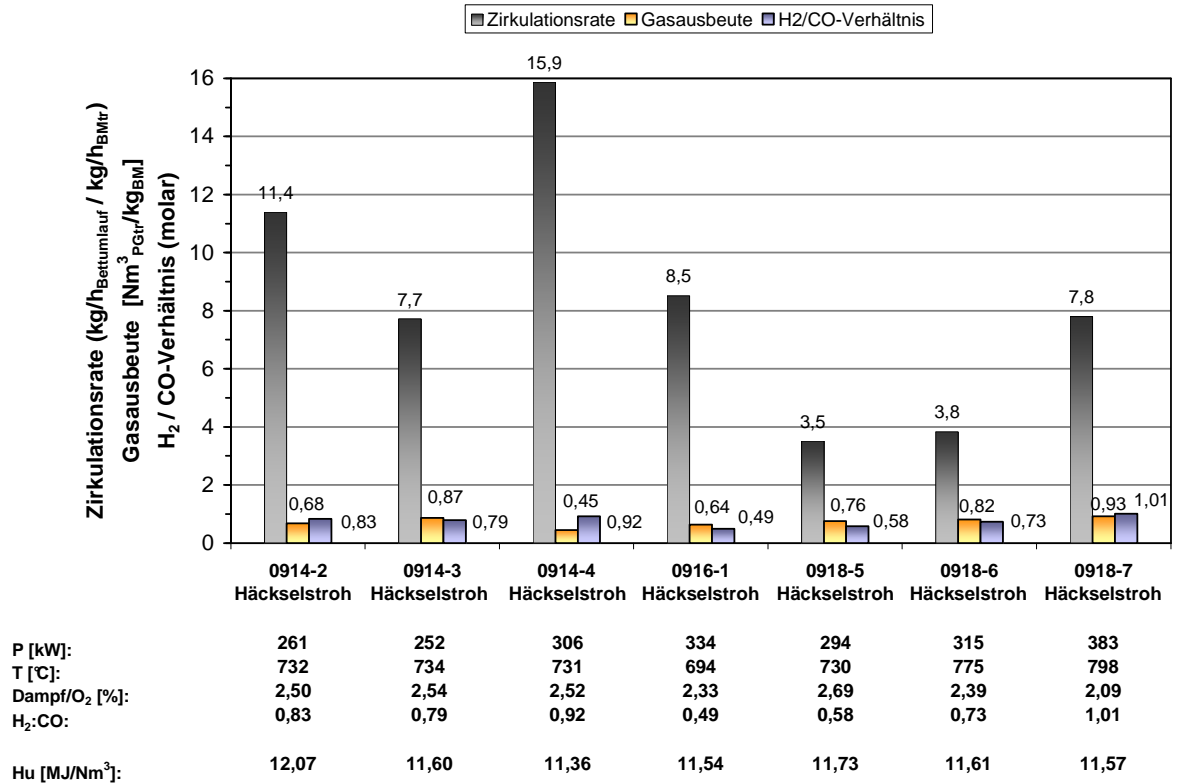


Abb. 6.4-1: Zirkulationsrate und Gasausbeute sowie H_2/CO -Verhältnis der einzelnen Versuchspunkte

Die Versuchsreihen mit Holzpellets ergaben Zirkulationsraten im Bereich von 2,3-9 (s. **Abb. 6.4-1**). Bei den Werten für die Zirkulationsrate der Versuchsreihen mit Häckselstroh fällt wiederum der Versuchspunkt 0914-4 mit sehr hohen Werten auf. Auch hierbei liegt die Begründung vermutlich in dem Anlagenbetrieb. Beim Vergleich der Ergebnisse ergeben sich höhere Gasausbeuten bei der Vergasung von Holzpellets und höhere Zirkulationsraten bei der Vergasung des Häckselstrohs. Die Zirkulationsrate ergibt sich über die Bettumlauf rate [kg/h], die den zirkulierenden Feststoffmassenstrom im Vergaser beschreibt und über eine Energiebilanz des Siphons berechnet wird. Hierfür wird zugrunde gelegt, dass die Temperaturen im Siphon charakteristisch für die Bettumlauf rate sind. Während der Häckselstrohvergasung stellten sich Betriebszustände mit einer ungewöhnlich geringen Temperaturdifferenz zwischen Wirbelbett und Siphon ein. Je kleiner die Temperaturdifferenzen im Downer und im Siphon, desto größer sind die Bettumlauf rate und die Zirkulationsrate. Auf diese Thematik wird bei der Betrachtung der Kohlenstoffgehalte der Aschen weiter eingegangen. Sowohl diese Temperaturdifferenz als auch die höheren Zirkulationsraten sprechen für eine bessere Zirkulation im Vergaser, vermutlich aufgrund der physikalischen Beschaffenheit der Stroh häcksel, besonders im Vergleich zu Pellets.

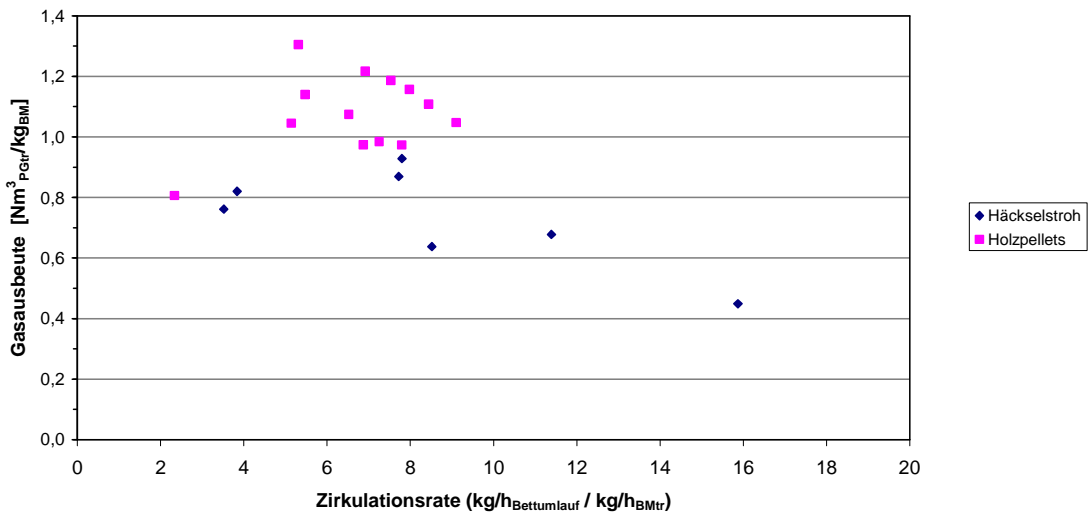
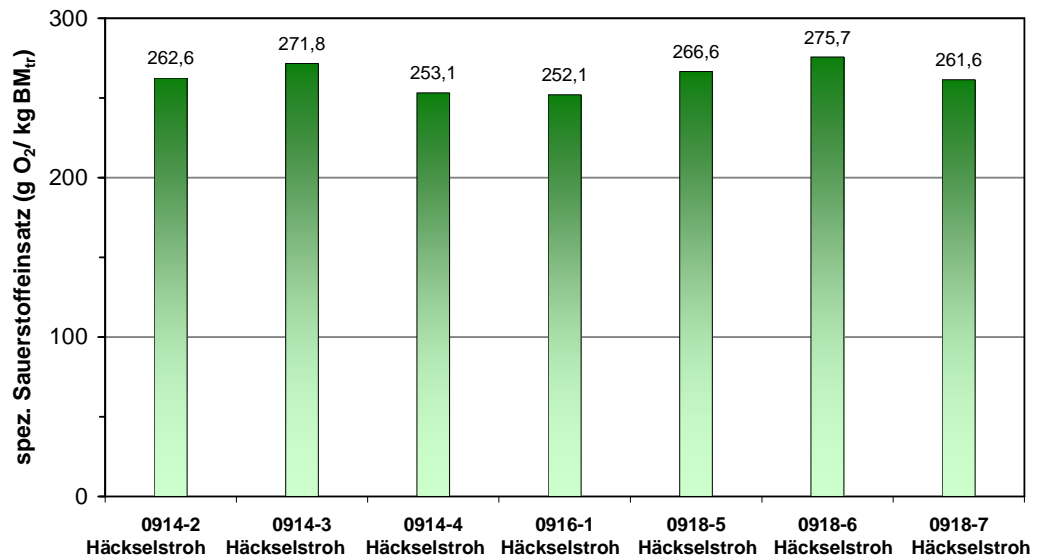


Abb. 6.4-2: Gasausbeute über Zirkulationsrate der einzelnen Versuchspunkte der Versuchsreihen mit Häckselstroh und mit Holzpellets im Vergleich

Eine eindeutige Abhängigkeit der Gasausbeute mit der Zirkulationsrate ist nicht zu erkennen (s. **Abb. 6.4-2**).

Der spezifische Sauerstoffeinsatz der einzelnen Versuchspunkte lag zwischen 252-276 g_{O₂}/kg_{BM} (s. **Abb. 6.4-3**).

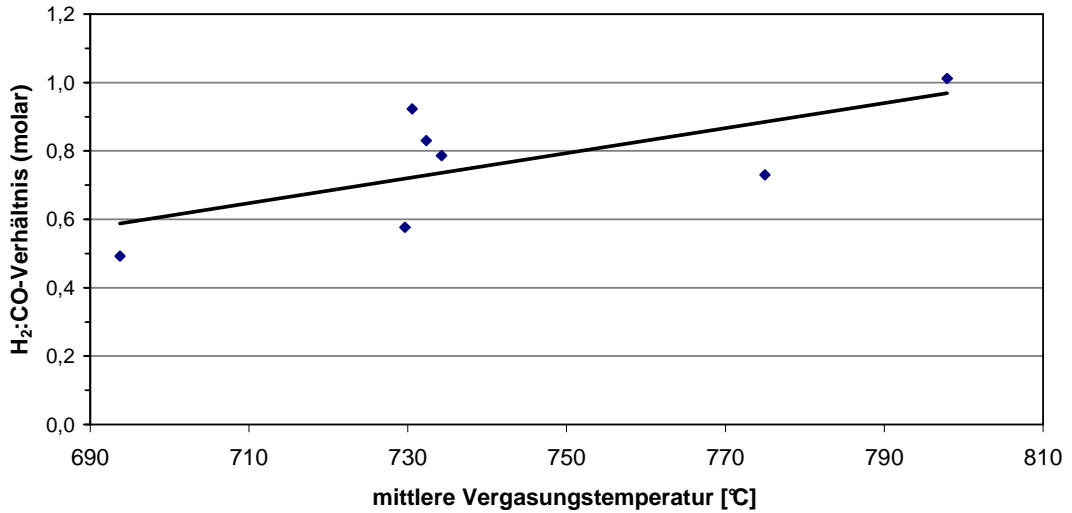


P [kW]:	261	252	306	334	294	315	383
T [°C]:	732	734	731	694	730	775	798
Dampf/O ₂ [%]:	2,50	2,54	2,52	2,33	2,69	2,39	2,09
H ₂ :CO:	0,83	0,79	0,92	0,49	0,58	0,73	1,01
Hu [MJ/Nm ³]:	12,07	11,60	11,36	11,54	11,73	11,61	11,57

Abb. 6.4-3: Spezifischer Sauerstoffeinsatz der einzelnen Versuchspunkte

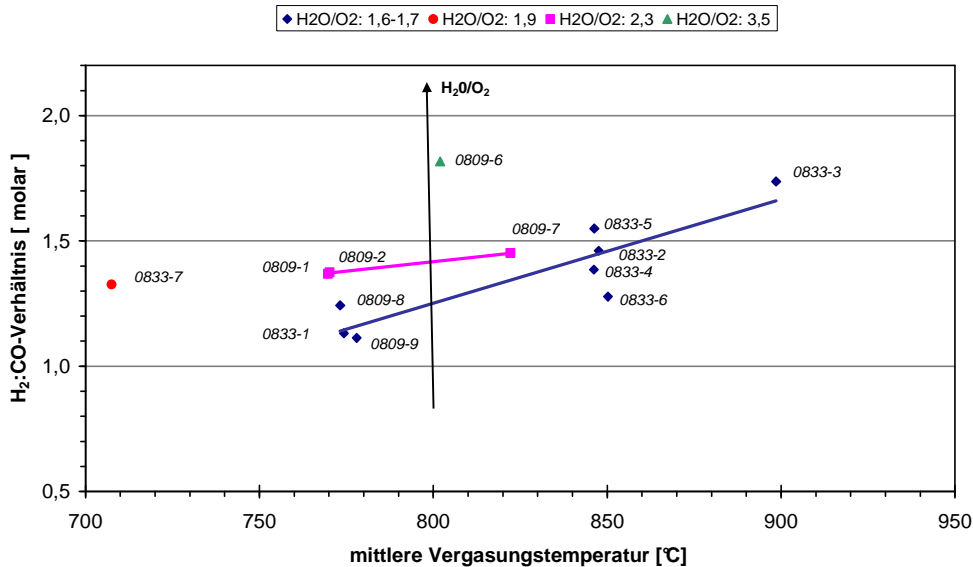
Allgemein weist das Synthesegas aus Häckselstroh ein niedriges H₂/CO-Verhältnis auf. Wie bei den Versuchsreihen mit Holzpellets deutet sich ein höheres H₂/CO-Verhältnis mit steigenden

Vergasungstemperaturen an (s. **Abb. 6.4-4**). Bei den Versuchsreihen mit Holz war ebenfalls eine Abhängigkeit des H_2/CO -Verhältnisses mit dem Dampf/ O_2 -Verhältnis zu erkennen (s. **Abb. 6.4-5**).



	Häckselstroh	Häckselstroh	Häckselstroh	Häckselstroh	Häckselstroh	Häckselstroh	Häckselstroh
P [kW]:	261	252	306	334	294	315	383
T [°C]:	732	734	731	694	730	775	798
Dampf/ O_2 [%]:	2,50	2,54	2,52	2,33	2,69	2,39	2,09
$H_2:CO$:	0,83	0,79	0,92	0,49	0,58	0,73	1,01
Hu [MJ/Nm ³]:	12,07	11,60	11,36	11,54	11,73	11,61	11,57

Abb. 6.4-4: H_2/CO -Verhältnis; aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur



	0809-1	0809-2	0809-6	0809-7	0809-8	0809-9	0833-1	0833-2	0833-3	0833-4	0833-5	0833-6	0833-7
P [kW]:	375	386	344	350	352	352	307	330	341	355	352	361	299
T [°C]:	770	770	802	822	773	778	774	848	899	850	846	846	708
Dampf/ O_2 [%]:	2,3	2,34	3,46	2,33	1,76	1,73	1,63	1,66	1,72	1,73	1,70	1,64	1,89
$H_2:CO$:	1,37	1,37	1,82	1,45	1,24	1,11	1,13	1,46	1,74	1,28	1,55	1,39	1,33

Abb. 6.4-5: H_2/CO -Verhältnis der Versuchspunkte mit Holzpellets; aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur in Abhängigkeit vom Dampf/ O_2 -Verhältnis [6]

6.5 Vergasungsverhältnis und Dampf/Biomasse-Verhältnis

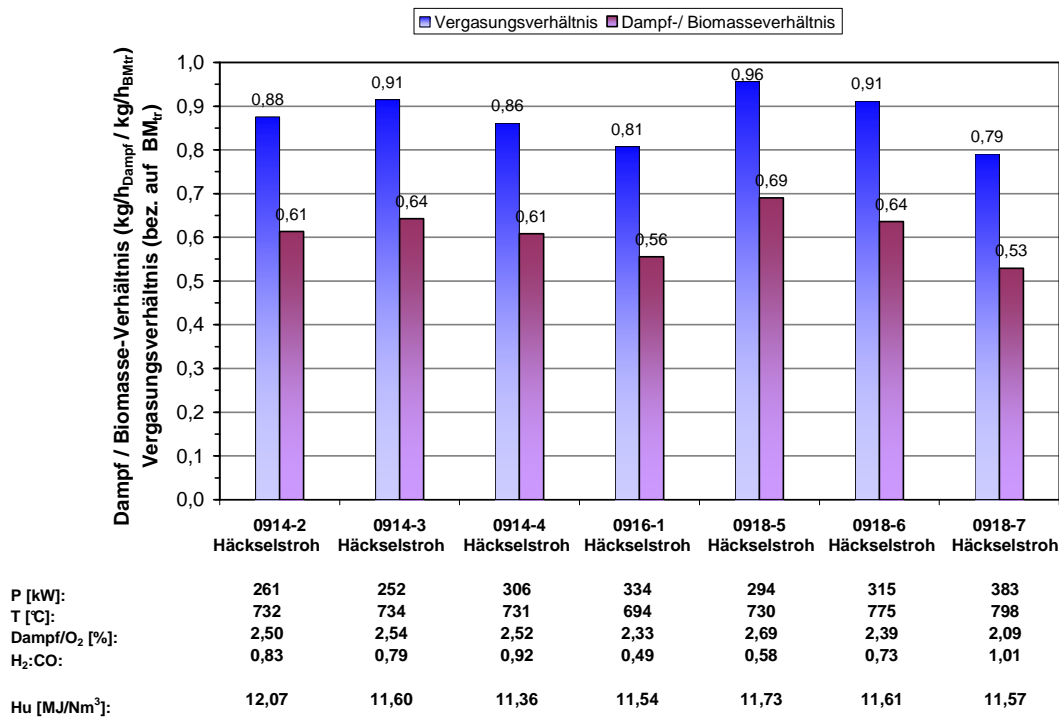


Abb. 6.5-1: Vergasungsverhältnis und Dampf/Biomasse-Verhältnis der einzelnen Versuchspunkte

Sowohl das Dampf/Biomasse-Verhältnis als auch das Vergasungsverhältnis liegen verglichen mit den Versuchsreihen mit Holzpellets auf einem mittleren Niveau.

6.6 Wirkungsgrade

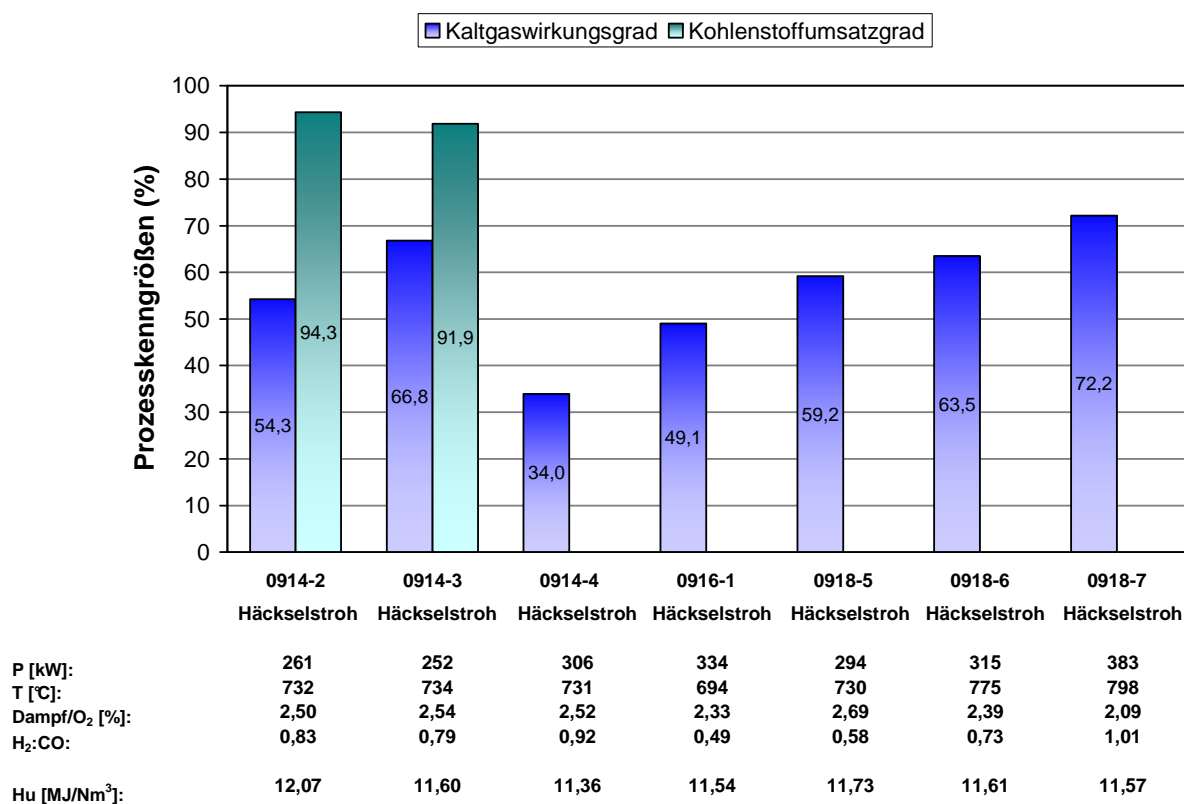


Abb. 6.6-1: Kaltgaswirkungsgrad und Kohlenstoffumsatzgrad der einzelnen Versuchspunkte

Der Kohlenstoffumsatzgrad kann nur für die ersten beiden Versuchseinstellungen angegeben werden, da anschließend die Nebenstrecke abgeschaltet werden musste. Der Kohlenstoffumsatzgrad liegt mit 92-94% im unteren Bereich der in den letzten Jahren erzielten Umsätze. Der Kaltgaswirkungsgrad liegt im Vergleich zu Ergebnissen aus der Holzpelletvergasung (53-72%) auf einem niedrigen Niveau. Aus den letzten vier Versuchspunkten ist eine Steigerung mit der Temperatur zu vermuten.

Die früheren Versuchsreihen mit Strohpellets konnten durchschnittlich höhere Kaltgaswirkungsgrade erreichen (65-72%). Das Ergebnis des Versuchspunktes 0914-4 begründet sich vermutlich wiederum in dem schlechten Vergasungsbetrieb.

6.7 Analytik Bett-, Siphon- und Filteraschen

6.7.1 Kohlenstoffgehalte

Tab. 6.7.1-1: Kohlenstoffgehalte der Siphon-, Filter- und Bettascheproben

Versuchsnr.:	Probenbezeichnung	Total Carbon (%)	Total Inorganic Carbon(%)	Total Organic Carbon(%)	Zirkulation	
					gut	schlecht
0914-2	Häckselstroh					
	Filterasche vom 06.04.09, 11:00 Uhr	32 %	1,3 %	30,7 %		
	Siphonasche vom 06.04.09, 16:40 Uhr	5 %	4,6 %	0,4 %		X
	Bettasche vom 06.04.09, 11:00 Uhr	4,4 %	4,4 %	0 %		
0914-3	Häckselstroh					
	Filterasche vom 07.04.09, 18:40 Uhr	30,2 %	1,8 %	28,4 %		
	Bettasche vom 07.04.09, 18:40 Uhr	5,5 %	5,4 %	0,1 %		X
0914-4	Häckselstroh					
	Siphonasche vom 08.04.09, 14:00 Uhr	5,0 %	2,5 %	2,5 %		
	Bettasche vom 08.04.09, 13:00 Uhr	5 %	5 %	0 %		X
0916-1	Häckselstroh					
	Siphonasche vom 15.04.09, 10:30 Uhr	5,3 %	1,7 %	3,6 %		
	Bettasche vom 15.04.09, 10:15 Uhr	5,5 %	5,5 %	0 %	X	
0918-5	Häckselstroh					
	Siphonasche vom 07.05.09, 12:50 Uhr	2,5 %	0,1 %	2,4 %		
	Bettasche vom 07.05.09, 12:50 Uhr	3,3 %	2,9 %	0,3 %		X
0918-6	Häckselstroh					
	Siphonasche vom 07.05.09, 17:45 Uhr	0,9 %	0,1 %	0,8 %		
	Bettasche vom 07.05.09, 16:00 Uhr	2,1 %	2 %	0,2 %	X	
0918-7	Häckselstroh					
	Siphonasche vom 07.05.09, 21:30 Uhr	0,5 %	0,2 %	0,4 %		
	Bettasche vom 07.05.09, 20:50 Uhr	0,7 %	0,6 %	0,1 %	X	
	Siphonasche vom 04.05.09, 13:40 Uhr	9,0 %	0,8 %	8,3 %		
	Bettasche vom 04.05.09, 14:00 Uhr	4,7 %	4,7 %	0 %		X
	Siphonasche vom 05.05.09, 11:00 Uhr	3,3 %	0,8 %	2,5 %		
	Bettasche vom 05.05.09, 11:00 Uhr	4,4 %	4,0 %	0,4 %	X	

In **Tab. 6.7.1-1** sind die Kohlenstoffgehalte der einzelnen Ascheproben und Versuchseinstellungen dargestellt. Die Verteilung der Gesamtkohlenstoffgehalte auf die unterschiedlichen Ascheproben bleibt über die Versuchspunkte relativ konstant. Auffällig sind die geringen Kohlenstoffgehalte der Versuchseinstellungen 0918-5 bis -7. Dies kann an der höheren Vergasungstemperatur liegen. Hinzu kommt noch die lange Betriebsdauer, die diesen Versuchseinstellungen vorausging.

Des Weiteren ist gekennzeichnet, ob die Versuchseinstellung mit einer guten Zirkulation des Bettmaterials verbunden war. Dieser Zustand wird festgemacht an der Siphontemperatur. Während der Versuchswochen pendelte der Vergasungsbetrieb oftmals zwischen zwei, über längere Zeiträume konstanten Zuständen, gekennzeichnet durch den Temperaturunterschied zwischen Wirbelschicht und Siphon. Als „gute“ Zirkulation wird hierbei der Zustand betrachtet, wenn die Siphontemperatur nahezu der Wirbelschichttemperatur entsprach. Als „schlechte“ Zirkulation wird dementsprechend eine Temperaturabweichung zwischen Siphon und Wirbelschicht von bis zu 250°C betrachtet. Die letzten analysierten Bettasche- und Siphonascheproben entstammen einer Versuchseinstellung mit beiden Zirkulationszuständen. Die Kohlenstoffgehalte der Bettaschen weichen kaum voneinander ab. Jedoch besteht ein deutlicher Unterschied bei den Kohlenstoffgehalten der Siphonaschen. Der unterschiedliche Gesamtkohlenstoffgehalt ergibt sich aus dem Bestandteil an organischem Kohlenstoff. Da der Betriebszustand mit dem geringen Temperaturunterschied zwischen Wirbelschicht und Siphon den niedrigeren Kohlenstoffgehalt aufweist, spricht dies für die Theorie der besseren Zirkulation, verbunden mit einem besseren Kohlenstoffumsatz.

6.7.2 REM/EDX

Für REM-Aufnahmen einschließlich EDX-Analysen wurden unterschiedliche Ascheproben an das Institut für Metallurgie der TU-Clausthal weitergegeben. Viele Analysen weisen einen hohen Anteil an Gold auf. Dieser ist auf die Probenvorbereitung zurückzuführen und stammt nicht aus der ursprünglichen Biomasse. Die hohen Gehalte an Silicium stammen großteils aus dem als Bettmaterial eingesetzten Quarzsand und die hohen Calciumgehalte aus dem zugefügten Additiv Branntkalk. Beim Vergleich der unterschiedlichen Proben fällt folgendes auf:

- Die Filterasche erscheint sehr fein, mit einer verhältnismäßig engen Korngrößenverteilung.
- Die Siphonasche enthält meist eine Mischung aus eher kugeligen und faserigen Partikeln.
- Die Bettasche besteht aus kugeligen Partikeln mit vereinzelt sehr großen Partikeln.
- Siphon- und Bettaschen enthalten hohe Anteile an Silicium und Calcium aufgrund des Bettmaterials und Additivs.

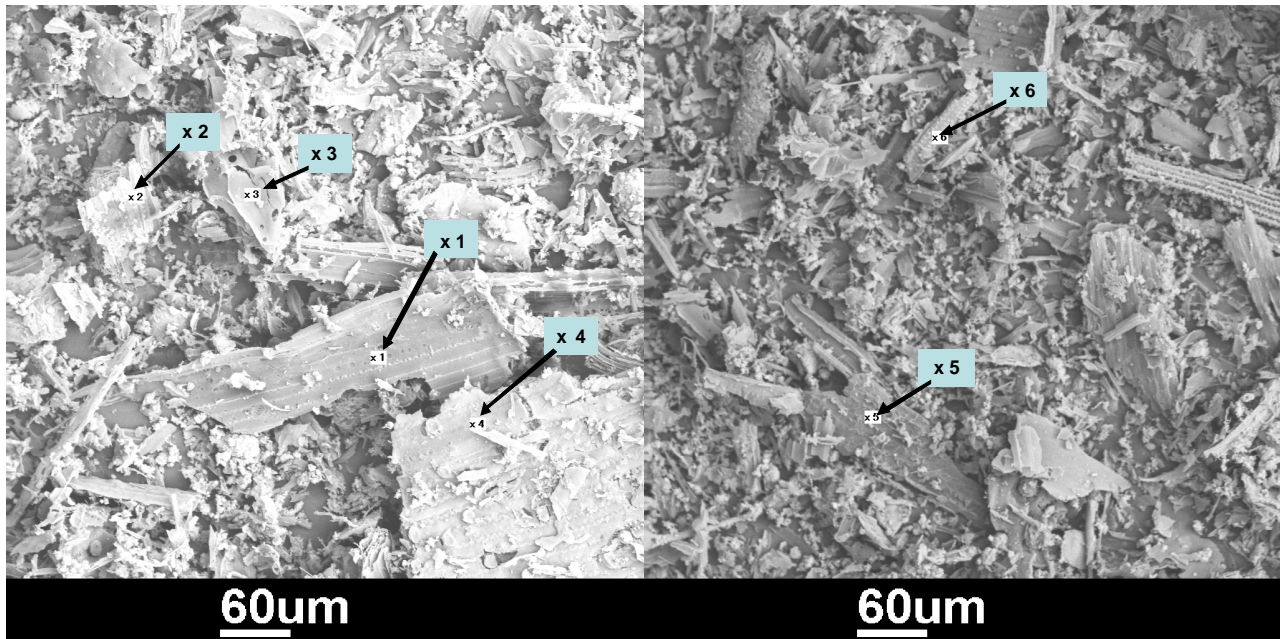
In diesen Punkten bestätigen die REM-Aufnahmen die bereits während der Probenahme gemachten Beobachtungen.

Zunächst wird die Filterasche der Versuchseinstellung 0914-3 betrachtet.

Anschließend die Siphon- und Bettascheproben der Versuchspunkte 0918-5, -6 und -7 verglichen. Bei diesen Versucheinstellungen wurde nach und nach die Vergasungstemperatur über den ermittelten Wert des Sinterbeginns von Strohasche gesteigert.

Die letzten beiden betrachteten Probenahmen von Siphon- und Bettasche während der Versuchseinstellung 0918-4 wurden in stabilen Betriebszuständen mit guter und schlechter Zirkulation gezogen.

Für die Beurteilung der EDX-Analysen wurden die ermittelten Werte für Gold, Sauerstoff und Aluminium herausgerechnet. Der Goldanteil stammt aus der Probenvorbereitung und der Aluminiumanteil vermutlich vom Probenträger. Für Atome niedriger Ordnungszahl, wie Kohlenstoff und Sauerstoff ist das Messgerät recht ungenau, daher ist eine Zuordnung hierbei erschwert.



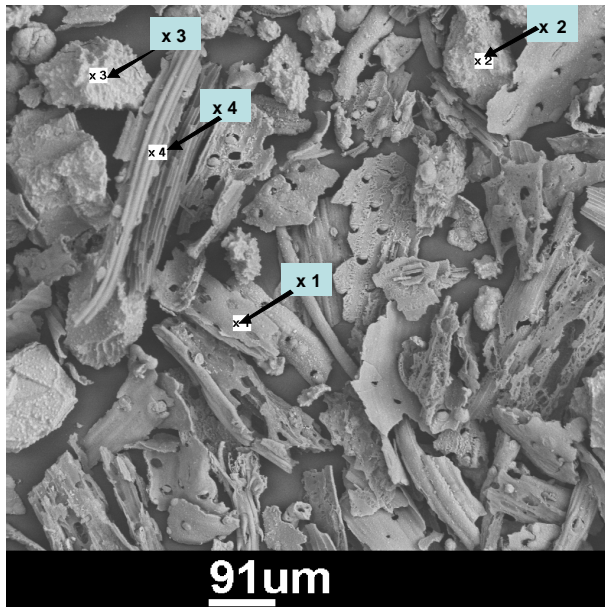
Filterasche 0914-3

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4		Partikel 5		Partikel 6	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	7,3	5,7	35,3	29,4	29,1	25,2	7,8	6,0	34,7	30,0	55,5	48,4
K	24,4	19,4	17,5	15,0	28,1	24,9	23,5	18,6	24,4	21,6	13,9	12,4
Cl	2,5	2,2	10,8	10,2	13,3	13,1	2,2	1,9	10,1	9,8	3,2	3,1
Si	65,4	72,3	25,9	30,9	27,6	34,1	64,3	70,7	27,9	34,4	16,7	20,8
Mg	0,4	0,5	10,6	14,5	1,9	2,7	2,2	2,8	2,9	4,1	10,7	15,3
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Abb. 6.7.2-1: Filterasche 0914-3 REM/EDX-Ergebnisse (Reaktortemperatur: 734°C, Dampf: O₂-Verh. [kg/kg]: 2,54)

In den Partikeln 1 bis 5 ist ein hoher Siliziumanteil zu finden. Partikel 6 scheint auf Branntkalk zu basieren. Dass auch andere Elemente angezeigt werden, könnte daran liegen, dass der Elektronenstrahl im Material streut und Signale aus dem Nachbarbereich und hinter der optisch sichtbaren Oberfläche eingefangen werden. Der Signal-Eingangsbereich um den Meßpunkt kann bis zu einer Eindringtiefe des Strahles von etwa 3µm und einem Durchmesser der Anregungsbirne von etwa 5 µm betragen. Auffällig ist in den Partikeln 1 bis 5 der hohe Gehalt an Kalium und Magnesium, welche in der Silikatphase gelöst zu sein scheinen. Auch der Gehalt an Chlor ist fast überall bemerkenswert. Das Element kann als Kaliumchlorid (KCl) vorliegen, da der analysierte Molanteil an Kalium immer höher ist.

Die Morphologie der Partikel ist tendenziell stabförmig, wie es den Häckseln entspricht. Agglomerationen oder Sinterkörper sind noch nicht zu sehen.



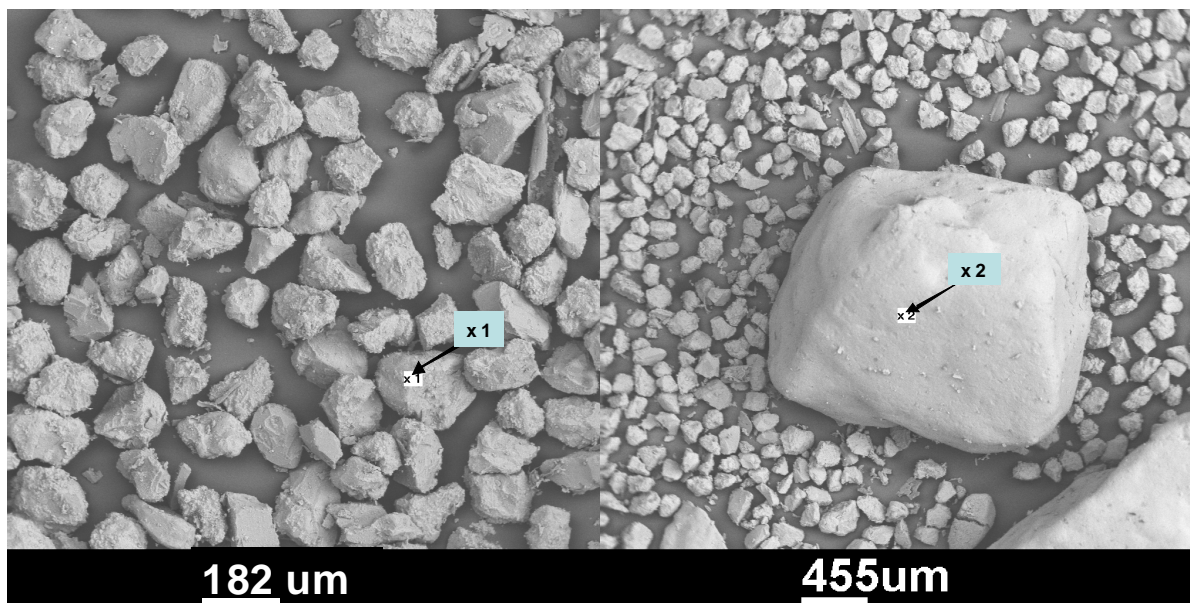
Siphonasche 0918-5

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	1,4	0,6	11,2	8,3	44,6	36,1	1,6	0,9
K	16,2	8,0	8,7	6,7	1,4	1,2	23,1	12,6
Cl	2,5	1,3	0,3	0,3	0,5	0,4	5,0	3,0
Si	41,1	28,1	78,4	83,5	47,5	54,9	39,8	30,2
Mg	0,2	0,2	0,6	0,8	4,0	5,4	0,4	0,3
Fe	0,1	0,0	0,7	0,4	0,3	0,2	0,2	0,1
P	0,0	0,0	0,0	0,0	1,8	1,8	0,0	0,0
C	38,6	61,7	0,0	0,0	0,0	0,0	29,9	53,0
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100

Abb. 6.7.2-2: Siphonasche 0918-5 (Reaktortemperatur: 730°C, Dampf/ O₂-Verh. [kg/kg]: 2,69)

Da die Siphonasche die Grobfraktion des Zyklons bildet, zeigt **Abb. 6.7.1-2**. Zu finden ist wieder die stäbchenförmige Morphologie. Große Partikel wie die Nummern 1 und 4 enthalten viel nicht umgesetzten Kohlenstoff. Auffällig gegenüber den Filteraschen sind die hohen Gehalte an Kalium bei gleichzeitig geringem Chlorgehalt.

Versinterungen und Agglomerationen sind nicht zu erkennen.



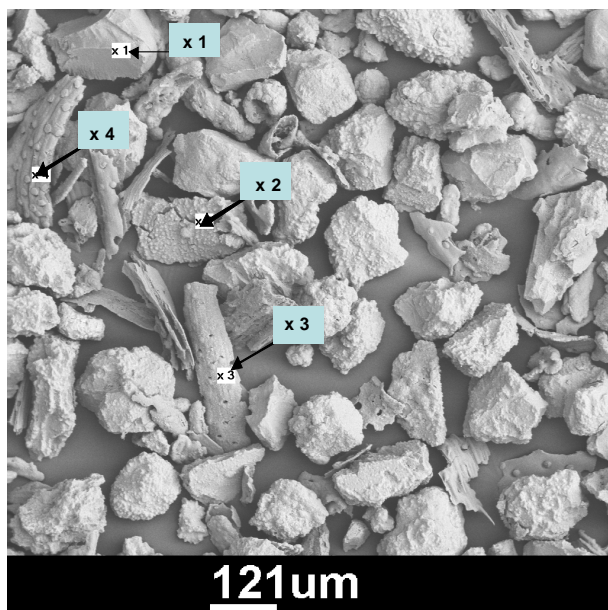
Bettasche 0918-5

Element	Partikel 1		Partikel 2	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	26,2	20,4	96,3	94,8
K	9,3	7,4	0,2	0,2
Cl	0,3	0,3	0,0	0,0
Si	60,3	67,1	2,2	3,1
Mg	3,6	4,6	1,1	1,8
Fe	0,4	0,2	0,1	0,1
TOTAL	100	100	100	100

Abb. 6.7.2-3: Bettasche 0918-5 (Reaktortemperatur: 730°C, Dampf/ O₂-Verh. [kg/kg]: 2,69)

Die Morphologie der Bettasche steht in krassem Widerspruch zu den beiden vorhergehenden Aufnahmen. Die Körner sind abgerundet mit gleichmäßigen Durchmessern. Die beiden analysierten Partikel scheinen dem Branntkalk und dem Sand zu entstammen. Kornform und Zusammensetzung weisen auf den Grobanteil der beiden zugeführten Additive hin.

Versinterte Partikel sind nicht zu finden.

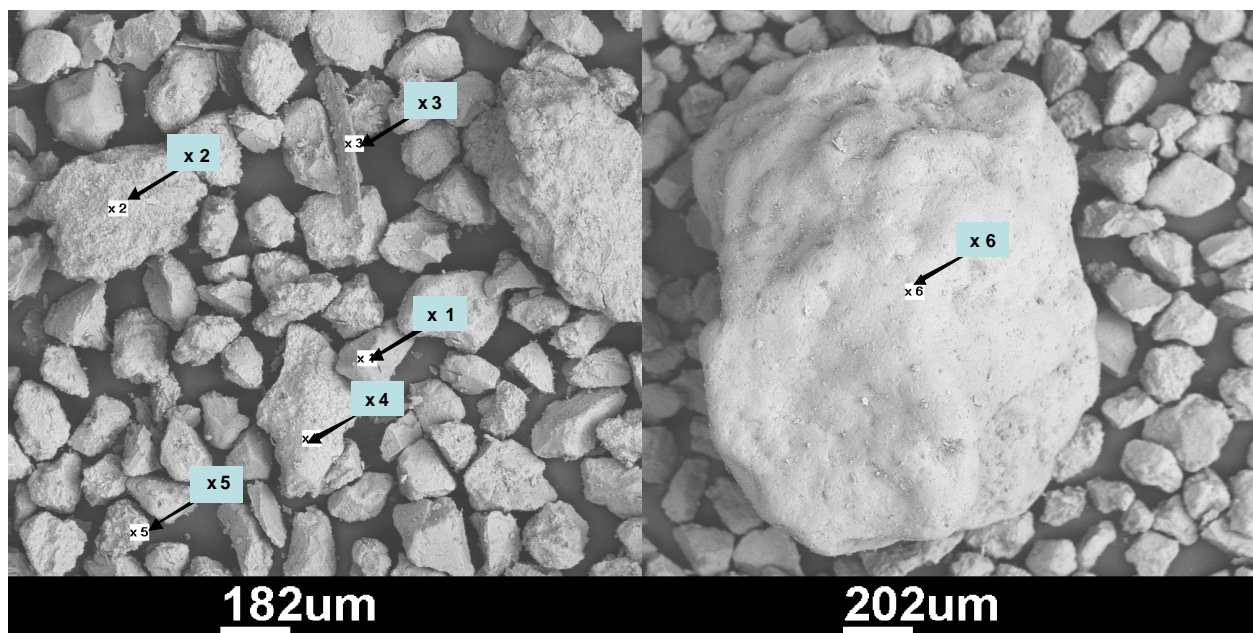


Siphonasche 0918-6

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 3	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	9,2	6,9	53,2	44,8	5,8	4,4	1,5	1,1
K	11,7	8,9	3,1	2,7	23,4	18,3	23,5	18,2
Cl	0,3	0,2	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3
Si	78,3	83,4	38,9	46,9	69,4	75,7	74,3	80,1
Mg	0,3	0,4	2,1	2,9	0,9	1,2	0,2	0,2
Fe	0,2	0,1	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
P	0,0	0,0	1,8	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Abb. 6.7.2-4: Siphonasche 0918-6 (Reaktortemperatur: 775°C, Dampf/ O₂-Verh. [kg/kg]: 2,39)

Mit der Steigerung der Reaktortemperatur von ca 730 °C auf 775 °C ändert sich das Aussehen der Siphonasche signifikant. Die Partikel wirken wesentlich abgerundeter. Der Chlorgehalt geht tendenziell zurück, wobei eine makroskopische Analyse aussagekräftiger wäre.

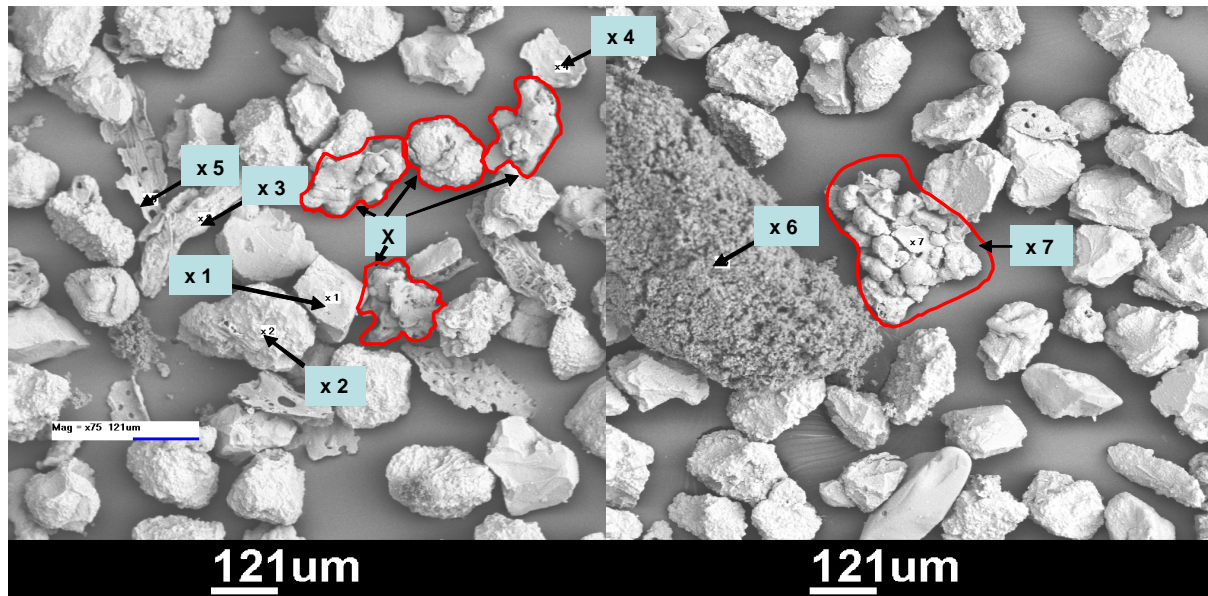


Bettasche 0918-6

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4		Partikel 5		Partikel 6	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	85,3	80,3	96,7	95,3	13,8	11,0	59,8	51,1	44,7	36,5	95,9	94,0
K	0,5	0,5	0,1	0,2	26,8	21,9	1,7	1,5	3,2	2,7	0,5	0,6
Cl	0,2	0,2	0,1	0,1	1,7	1,5	0,7	0,6	1,0	0,9	0,0	0,0
Si	11,4	15,3	1,9	2,7	56,5	64,2	33,1	40,4	48,2	56,1	1,7	2,4
Mg	2,3	3,5	1,0	1,6	1,0	1,3	4,3	6,1	2,7	3,6	1,9	3,0
Fe	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,4	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Abb. 6.7.2-5: Bettasche 0918-6 (Reaktortemperatur: 775°C, Dampf/ O₂-Verh. [kg/kg]: 2,39)

Die Bettasche einer Reaktortemperatur von 775 °C zeigt gegenüber den Versuchen bei 730 °C keine signifikanten Veränderungen auf.



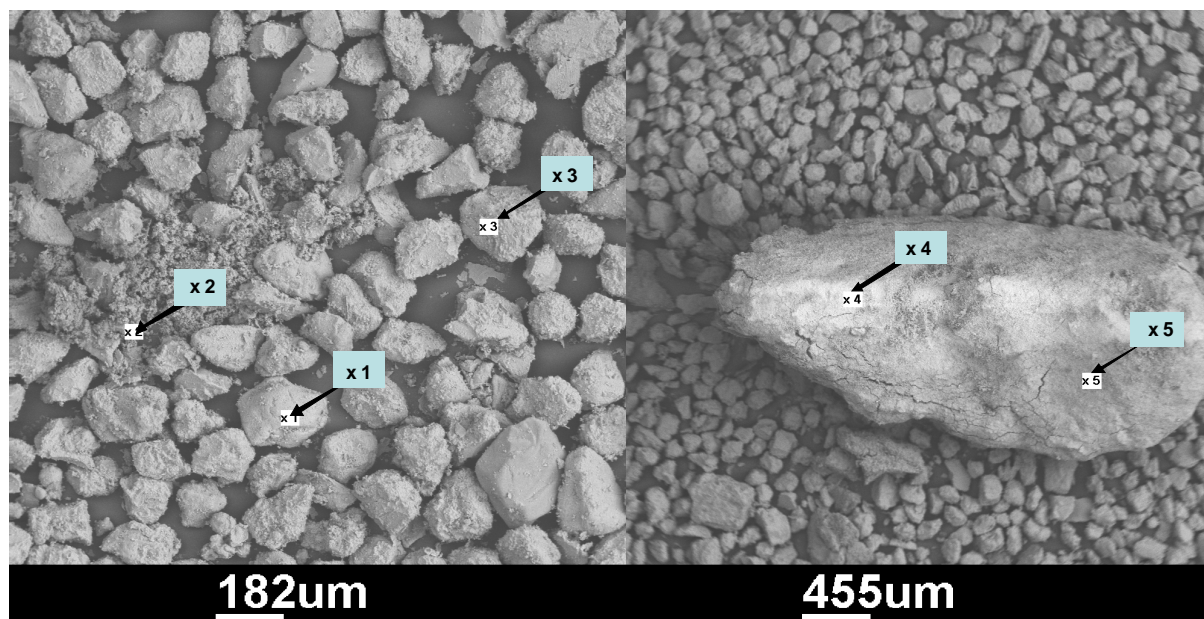
Siphonasche 0918-7

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4		Partikel 5		Partikel 6		Partikel 7	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	10,5	7,9	26,3	21,7	45,5	38,1	2,0	1,4	8,6	6,8	95,6	93,5	12,5	9,8
K	13,8	10,7	25,5	21,5	11,0	9,4	7,8	5,8	27,1	21,6	0,2	0,2	26,3	21,2
Cl	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	1,7	0,2	0,2	0,3	0,2
Si	75,3	80,9	48,1	56,6	40,9	48,9	90,0	92,5	60,1	67,0	2,2	3,1	60,1	67,6
Mg	0,4	0,5	0,0	0,0	2,6	3,6	0,2	0,3	2,3	3,0	1,9	3,1	0,9	1,2
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Abb. 6.7.2-6: Siphonasche 0918-7 (Reaktortemperatur: 798°C, Dampf/ O₂-Verh. [kg/kg]: 2,09)

Bei der Reaktortemperatur von durchschnittlich 798 °C ist der Anteil stäbchenförmiger Partikel zurückgegangen. Zu erkennen sind nun Agglomerationen (z.B. Partikel 7) und Versinterungen (z.B. die Partikel X). Partikel 6 weist einen hohen Calciumgehalt auf. Aufgrund der porösen Struktur liegt die Vermutung nahe, dass es sich um ein Kalkpartikel handelt, welches aufgrund von Feuchtigkeit agglomeriert und reagiert hat. Die Feuchtigkeit kann aufgrund der Probenahme und der damit verbundenen Inertisierung mit kaltem Stickstoff entstanden sein.

Kalium findet sich in sehr hohen Anteilen, während der mittlere Chlorgehalt zurückgegangen zu sein scheint.



Bettasche 0918-7

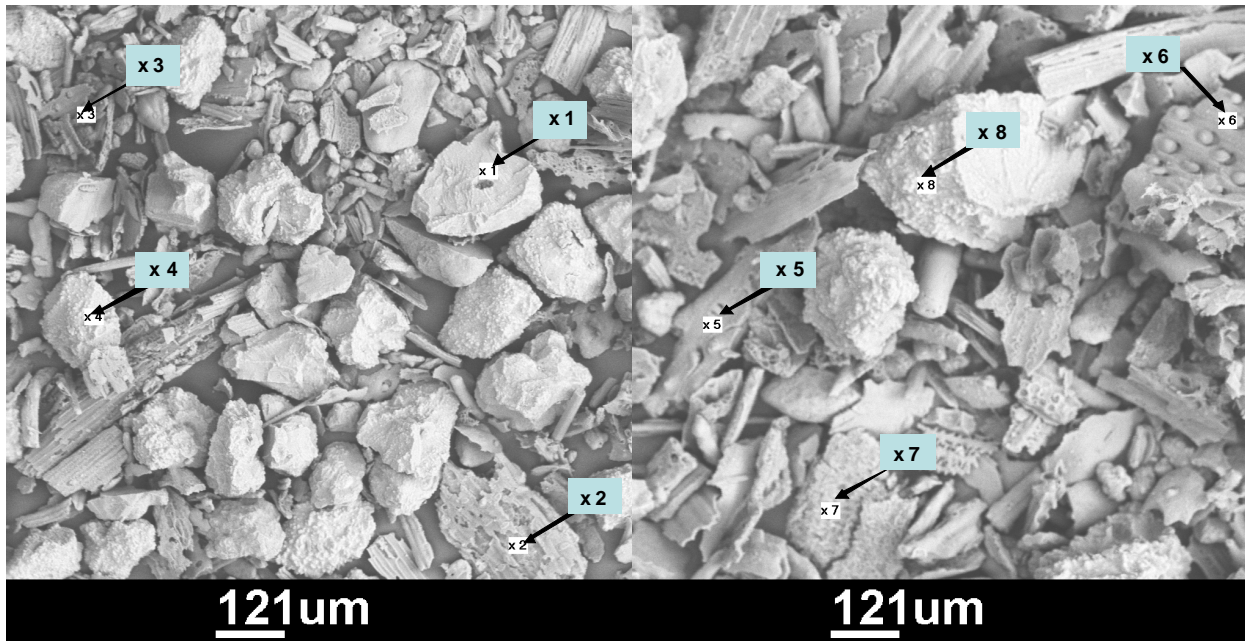
Element	Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4		Partikel 5	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	72,1	69,9	43,8	35,6	95,9	94,5	94,2	91,7
K	19,2	19,1	3,8	3,2	0,2	0,2	0,0	0,0
Cl	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
Si	6,6	9,1	49,0	56,9	2,2	3,0	3,5	4,9
Mg	0,5	0,7	3,0	4,0	1,0	1,6	1,8	2,9
Fe	1,6	1,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,0	0,0
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100

Abb. 6.7.2-7: Bettasche 0918-7 (Reaktortemperatur: 798°C, Dampf/ O₂-Verh. [kg/kg]: 2,09)

Die Bettaschen der drei letzten Versuchseinstellungen weisen keine deutlichen Abweichungen voneinander auf. Generell handelt es sich um annähernd kugelige Partikel mit hohem Silicium- und Calciumanteil. Weiterhin sind vereinzelt gröbere Kalkpartikel zu erkennen.

6.8 Vergleich von guter und schlechter Zirkulation

Beim Vergleich der Proben mit guter und schlechter Zirkulation fällt auf, dass die Siphon- und die Bettascheprobe bei guter Zirkulation sowohl faserige als auch kugelige Partikel aufweisen (s. **Abb. 6.8-1+2**). Dies deutet auf eine gute Durchmischung und gleichmäßige Verteilung im gesamten Reaktor samt Rückstromteil hin.



Siphonasche 0918-4 gute Zirkulation

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4		Partikel 5	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	31,8	24,8	17,4	14,5	5,5	2,0	0,9	0,7	44,3	35,9
K	2,2	1,7	30,0	25,5	9,6	3,7	24,9	19,4	1,3	1,0
Cl	0,8	0,7	6,7	6,3	2,0	0,9	1,2	1,1	0,7	0,6
Si	63,2	70,4	20,3	24,1	6,6	3,5	72,7	78,7	49,3	57,1
Mg	1,7	2,2	6,8	9,3	2,2	1,4	0,0	0,0	2,6	3,4
Fe	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,1	0,1
P	0,0	0,0	18,8	20,2	5,9	2,9	0,0	0,0	1,8	1,9
C	0,0	0,0	0,0	0,0	68,3	85,6	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Element	Partikel 6		Partikel 7		Partikel 8		Partikel 9	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	3,4	2,6	1,0	0,7	2,7	1,3	43,9	35,7
K	22,9	17,8	22,7	17,6	15,1	7,3	2,5	2,0
Cl	0,8	0,7	4,2	3,5	3,1	1,7	0,8	0,7
Si	72,5	78,4	71,7	77,5	36,6	24,7	49,2	57,2
Mg	0,4	0,5	0,5	0,6	0,9	0,7	1,8	2,4
Fe	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1
P	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,7	1,8	1,8
C	0,0	0,0	0,0	0,0	40,3	63,6	0,0	0,0
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100

Abb. 6.8-1: Siphonasche mit guter Zirkulation (Reaktor Temperatur: 692°C, Dampf/O₂-Verh. [kg/kg]: 2,83)

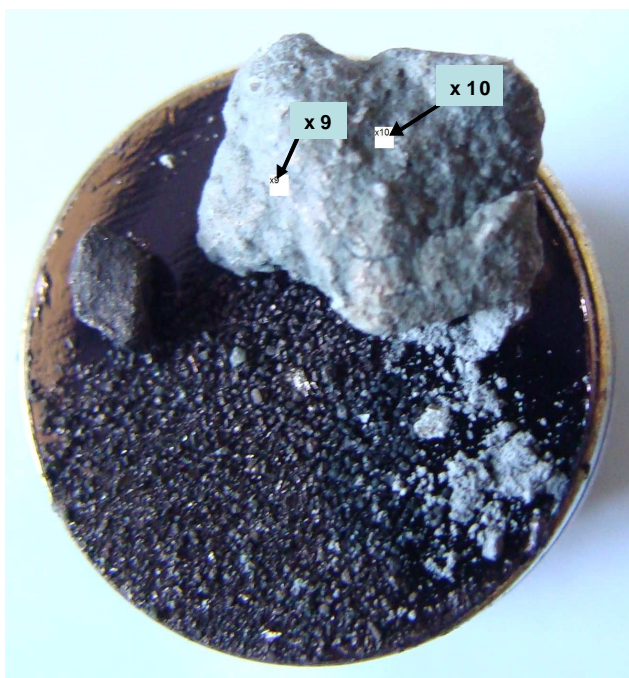
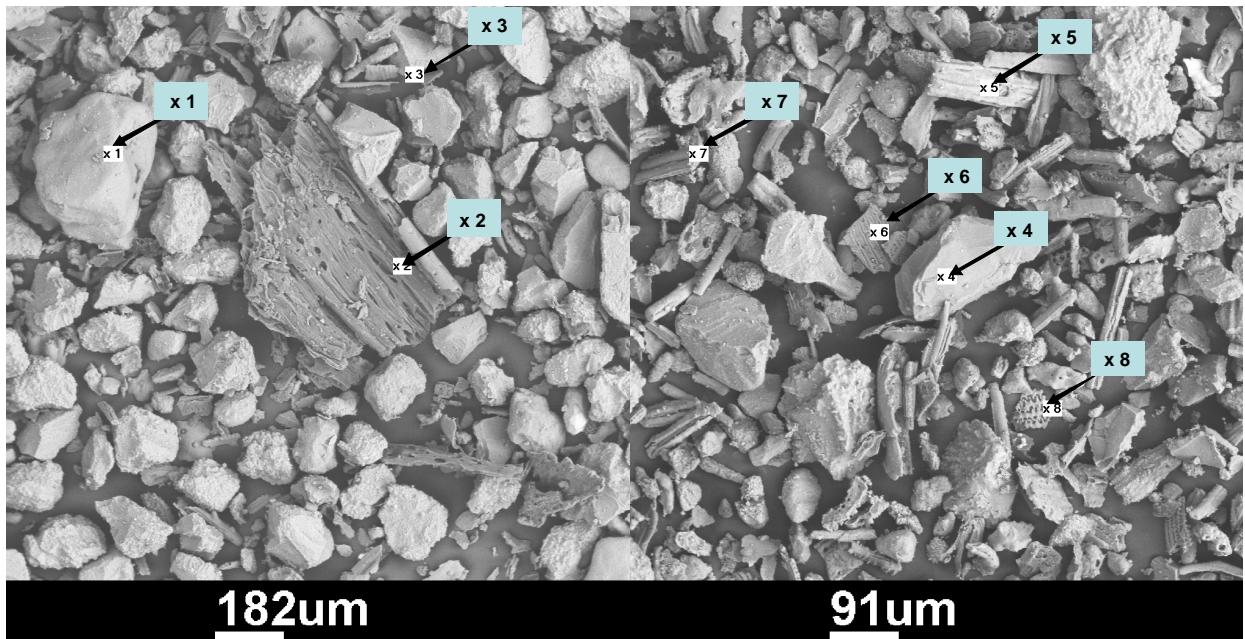


Abb. 6.8-2: Bettasche 0918-4, gute Zirkulation (Reaktortemperatur: 692°C, Dampf/O₂-Verh. [kg/kg]: 2,83)

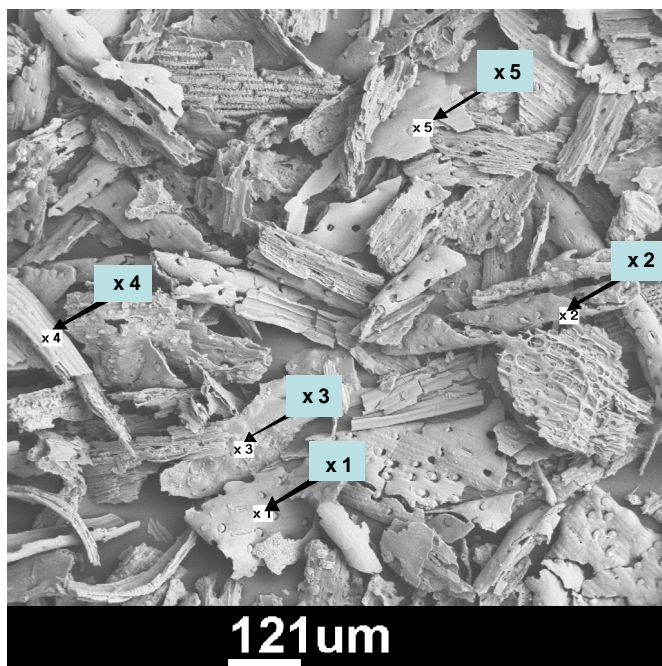
Tab. 6.8-1: Bettasche 0918-4 – gute Zirkulation (Reaktortemperatur: 692°C, Dampf/O₂-Verh. [kg/kg]: 2,83)

Bettasche 0918-4 gute Zirkulation

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4		Partikel 5	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	83,0	81,0	1,3	1,0	18,9	14,1	4,1	2,9	8,0	6,0
K	6,8	6,8	27,6	21,8	1,7	1,3	0,7	0,5	12,1	9,3
Cl	6,8	7,5	4,6	4,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,5	0,4
Si	0,8	1,1	65,9	72,7	77,9	83,0	94,9	96,3	78,7	83,8
Mg	1,9	3,0	0,2	0,2	1,1	1,3	0,2	0,2	0,2	0,3
Fe	0,7	0,5	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Element	Partikel 6		Partikel 7		Partikel 8		Partikel 9		Partikel 10	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	0,9	0,7	2,2	1,7	1,2	1,0	84,8	79,6	70,5	63,6
K	13,0	9,7	22,5	17,3	25,7	20,0	1,3	1,3	3,0	2,8
Cl	1,5	1,3	0,4	0,4	0,6	0,6	0,1	0,1	2,6	2,7
Si	84,4	88,1	74,2	79,8	72,2	78,2	11,4	15,3	22,0	28,3
Mg	0,2	0,2	0,6	0,8	0,2	0,2	2,4	3,6	1,7	2,6
Fe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,1
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

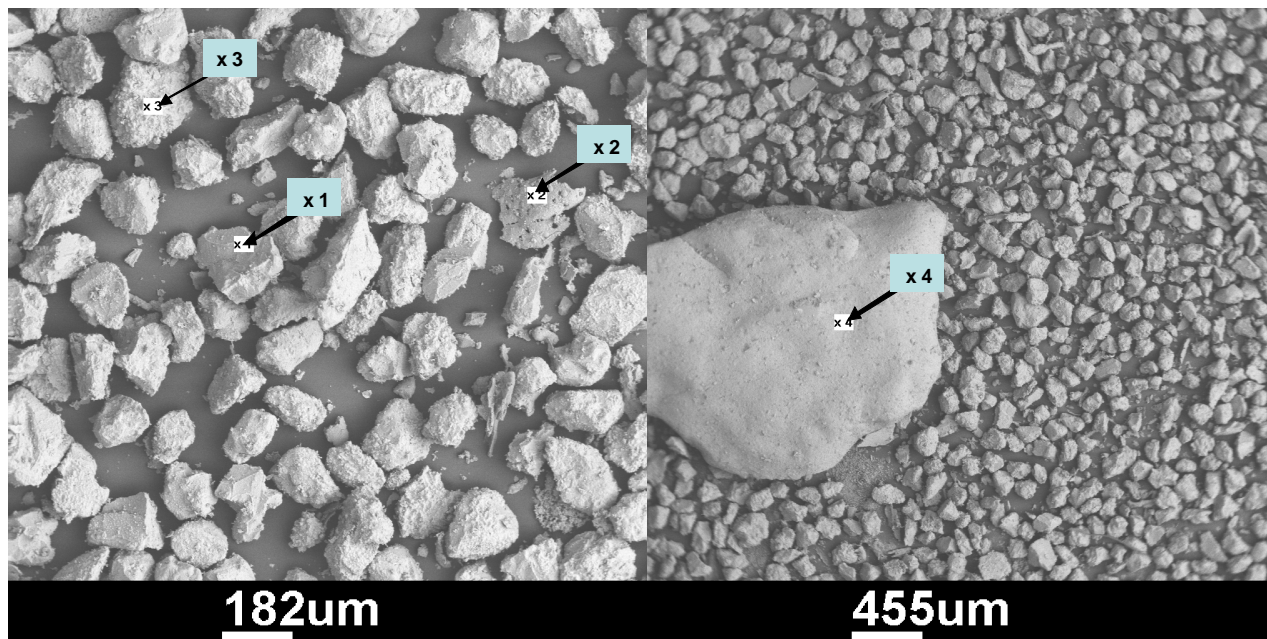
Bei schlechter Zirkulation scheint es jedoch zu einer Trennung der Partikelformen zu kommen. Die Bettasche enthält nahezu ausschließlich kugelige Partikel, wohingegen sich die Siphon- asche aus faserigen Bestandteilen zusammensetzt (s. **Abb. 6.8-3+4**). Es liegt die Vermutung nahe, dass bei schlechter Zirkulation das faserige Material den Siphonbereich aufgrund der schlechteren Fließeigenschaften zusetzt, und die kugeligen Sand- und Kalkpartikel wirbeln im Aufstromteil des Reaktors.



Siphonasche 0918-4 schlechte Zirkulation

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4		Partikel 5	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	0,5	0,4	0,8	0,6	0,0	0,0	4,5	3,4	0,8	0,6
K	26,0	20,3	29,3	23,4	14,6	10,9	21,5	16,9	24,0	18,7
Cl	3,3	2,9	8,2	7,2	1,9	1,6	4,5	3,8	3,2	2,8
Si	69,9	76,3	61,2	68,2	83,2	87,2	68,9	75,0	71,8	77,8
Mg	0,0	0,0	0,3	0,4	0,1	0,1	0,7	0,8	0,1	0,1
Fe	0,4	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Abb. 6.8-3: Siphonasche 0918-4, schlechte Zirkulation (Reaktortemperatur: 692°C, Dampf/O₂-Verh. [kg/kg]: 2,83)



Bettasche 0918-4 schlechte Zirkulation

Element	Partikel 1		Partikel 2		Partikel 3		Partikel 4	
	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%	Gewichts-%	Mol-%
Ca	11,4	8,5	5,5	4,3	85,0	80,4	86,2	81,7
K	10,7	8,2	26,9	21,2	1,7	1,6	0,2	0,2
Cl	0,1	0,1	0,5	0,4	0,2	0,2	0,8	0,8
Si	76,5	81,7	66,0	72,7	11,2	15,1	11,8	16,0
Mg	1,1	1,4	1,1	1,4	1,6	2,5	0,7	1,1
Fe	0,1	0,1	0,0	0,0	0,4	0,3	0,3	0,2
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100

Abb. 6.8-4: Bettasche 0918-4, schlechte Zirkulation (Reaktortemperatur: 692°C, Dampf/O₂-Verh. [kg/kg]: 2,83)

6.9 Korngrößenverteilung Siphonasche

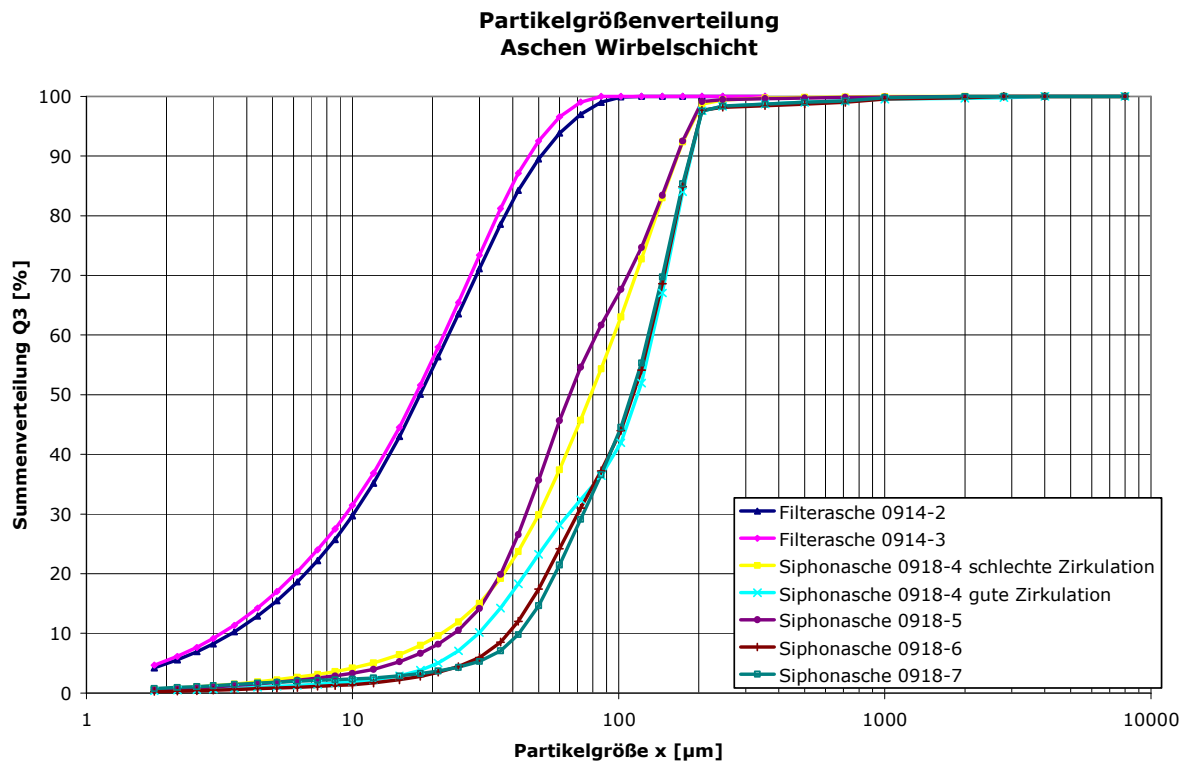


Abb. 6.9-1: Partikelsummenverteilung der Filter- und Siphonaschen aus den Versuchsreihen mit Häckselstroh

In **Abb. 6.9-1** deutlich erkennbar ist die feinere Struktur der beiden Filteraschen. Die Kurven der zwei beprobten Versuchseinstellungen weisen kaum Unterschiede auf.

Die Partikel der Siphonaschen sind, wie auch in den REM-Aufnahmen erkennbar war, um einiges größer. Hierbei liegen die Kurven auch weniger eindeutig übereinander. Gut vergleichen lassen sich die beiden Proben der Versuchseinstellung 0918-4. Die gelbe Kurve spiegelt den Anlagenzustand wieder, bei dem die Siphontemperatur stark von der Reaktortemperatur abweicht. Beim blauen Graphen stimmten die genannten Temperaturen nahezu überein. Vergleicht man die anderen Versuchseinstellungen der Siphonproben ebenfalls bezüglich der Siphon- und Reaktortemperatur, erkennt man, dass die Partikelgrößenverteilung der Versuchseinstellungen mit „schlechter“ Zirkulation (0918-5, 0918-4 schlechte Zirkulation) in der Darstellung generell zu kleineren Partikelgrößen verschoben sind.

Die Temperaturannäherung zwischen Siphon und Reaktor konnte unter anderem durch eine Erhöhung des Sandanteils im Bett erreicht werden. Dies könnte bereits eine Erklärung für die größeren Partikel in der Siphonasche sein, wenn man davon ausgeht, dass die „runden“ Sandpartikel gut zirkulieren und leichter mitgetragen werden als Kalkpartikel.

Eine weitere Möglichkeit, die Temperaturen anzunähern, bestand in der Erhöhung des Dampfstromes. Die daraus resultierenden höheren Strömungsgeschwindigkeiten ermöglichen ebenfalls das Mittragen größerer Partikel.

Weiterhin ist in der Graphik zu sehen, dass mit steigender Reaktortemperatur oberhalb von 730 °C der Feinkornanteil geringer wird (vgl. 0918-5 bis s-7). Dies verdeutlicht quantitativ die in Kap. 6.7.2 gemachte Beobachtung der Veränderung der Partikelform bis hin zur Sinterung bei der 798 °C-Aufnahme.

Vergleicht man die Ergebnisse der Partikelsummenverteilung für Häckselstroh mit denen aus früheren Versuchen mit Holzpellets (s. **Abb. 6.9-2**), fällt auf, dass die Kurven für die Holzpellets eng beieinander liegen. Die Versuchsdurchführungen mit den Holzpellets zeigten jedoch auch nicht die beiden Betriebszustände der Siphon- und Reaktortemperaturen. Der Medianwert x_{50} von den Versuchen mit Holzpellets liegt ein wenig höher als bei den Häckselstrohergebnissen mit guter Zirkulation.

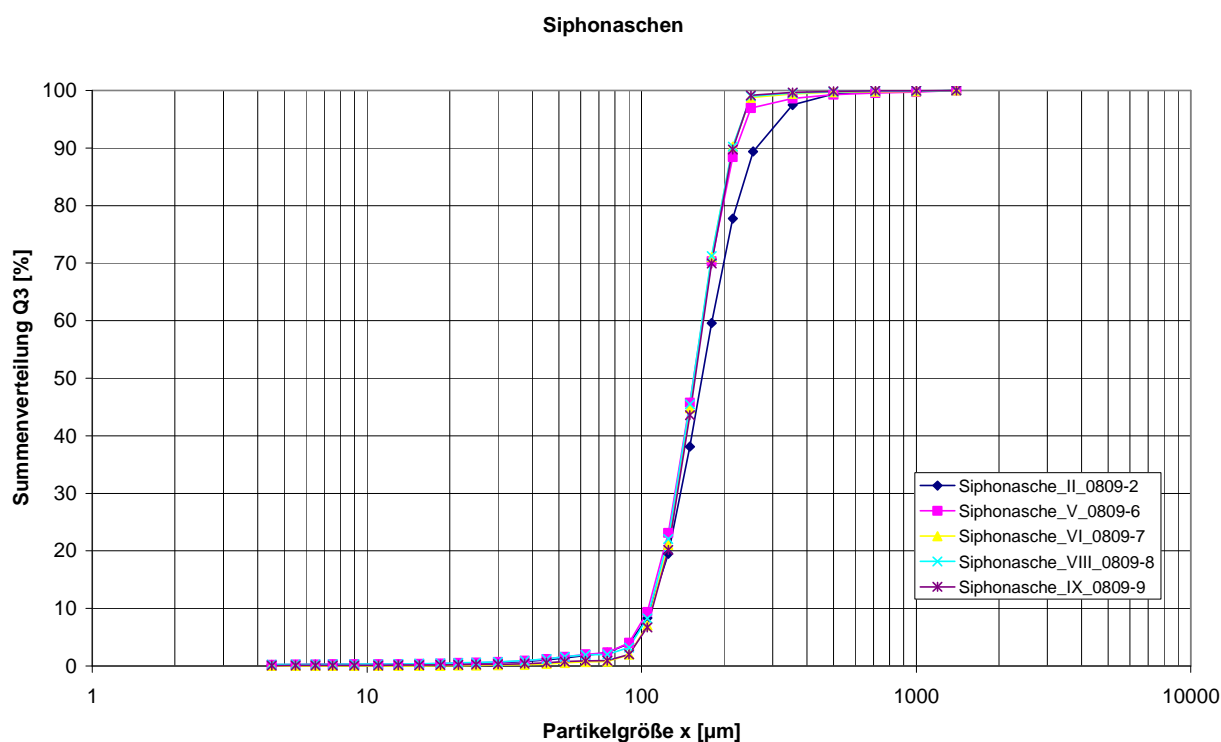


Abb. 6.9-2: Partikelsummenverteilung der Siphonaschen aus Versuchsreihen mit Holzpellets

6.10 Teeranalytik

Aufgrund der verhältnismäßig gleichbleibenden Teergehalte erschien es interessant, die Teerzusammensetzung zu analysieren. Herangezogen wurden hierzu die Analyse mittels Gaschromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung (GC/MS), durchgeführt in der Abteilung Analytik, und die simulierte Destillation, die bei der Fa. ASG Analytik-Service Gesellschaft mbH durchgeführt wurde. Mittels GC/MS erhält man aus einer Datenbank eine mögliche Stoffzuordnung der einzelnen Peaks. Die simulierte Destillation liefert eine Siedelinie in Bezug auf die Massenprozentage. Aufgrund der Vielzahl an vorkommenden Komponenten wurde eine schematische Einteilung in „Standardkomponenten“ vorgenommen. Die üblicherweise auftretenden Verbindungen bei einer Vergasung in einer Wirbelschicht wurden dem Tar Protocol [7] entnommen. Die in **Tab. 6.10-1** dargestellten Komponenten der einzelnen Gruppen sind laut Tar Protocol typische Vertreter der entsprechenden Siedebereiche und werden daher exemplarisch angeführt. Die Anteile der Teere, die diesen Gruppen zugeordnet werden, enthalten dementsprechend viele weitere Komponenten ähnlicher Siedebereiche.

Aufgrund der Probenahme, bei der Toluol als Lösungsmittel eingesetzt wird, ist der Gehalt an niedrig siedenden Komponenten (<115°C) im Teer schwer zu bestimmen und die erste Fraktion (I) wird aus dem Charakterisierungsschema herausgerechnet. Weitere Ungenauigkeiten entstehen durch die geringe Beheizung der Probenahmeleitung an der Anlage. Diese erlaubt eine maximale Temperatur von ca. 200°C, hierbei kann es jedoch schon zur Kondensation einiger Teerbestandteile kommen.

Tab. 6.10-1: Einteilung typischer Teerbestandteile nach Siedebereichen zur Charakterisierung unterschiedlicher Teere

I	II	III	IV	V
0-115°C	116-200°C	201-270°C	271-360°C	361-500°C
Toluol	Phenol	Naphthol	Dibenzofuran	Pyren
Pyridin	Methylphenol	Methylinden	Acenaphthen	
	Benzofuran	Naphthalin	Phenantren /Anthracen	
	Inden / Indan	Biphenyl		
	Methylpyridin	Azulen		
	Styrol	Chinolin / Isochinolin		
	Dimethylbenzol			
	Ethylbenzol			
	Methylstyrol			
	Ethenyl-Methyl-Benzol			
	Xylol			
	Dihydrobenzofuran			

Simulierte Destillation

Abb. 6.10-1 zeigt die Ergebnisdarstellung der Simulierten Destillation für den Versuchspunkt 0918-7. Über 70% der Teerprobe weisen einen Siedepunkt kleiner 120°C auf. Dieser Anteil ist besonders auf das Lösemittel Toluol zurückzuführen und wird deshalb in der weiteren Betrachtung nicht beachtet. Auffällig ist weiterhin, dass bei allen Teerproben ab einer Vergasertemperatur von 730 °C Teere mit einem Siedepunkt größer 350 °C vernachlässigbar sind (s. auch **Abb. 6.10-2**).

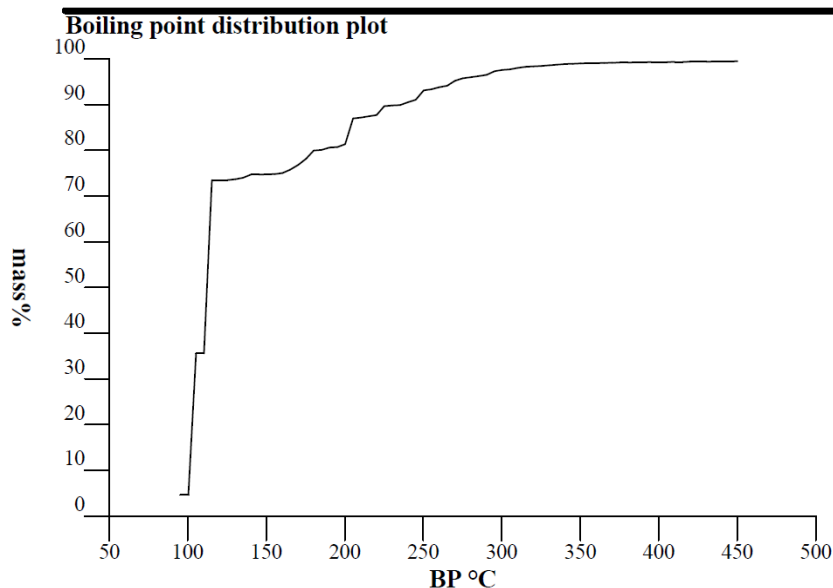


Abb. 6.10-1: Siedekennlinie für die Teerprobe 0918-7

Eine eindeutige Tendenz der Teerartbildung als Funktion der Temperatur ist aus den Ergebnissen nicht zu erkennen. Die höhersiedenden Komponenten der Gruppe V scheinen mit steigender Vergasungstemperatur stärker abgebaut bzw. gar nicht erst aufgebaut zu werden und finden sich als Verbindungen der Gruppen II und III wieder, da der Gesamtgehalt an Teeren ungefähr gleich bleibt (s. **Abb. 6.2-2**).

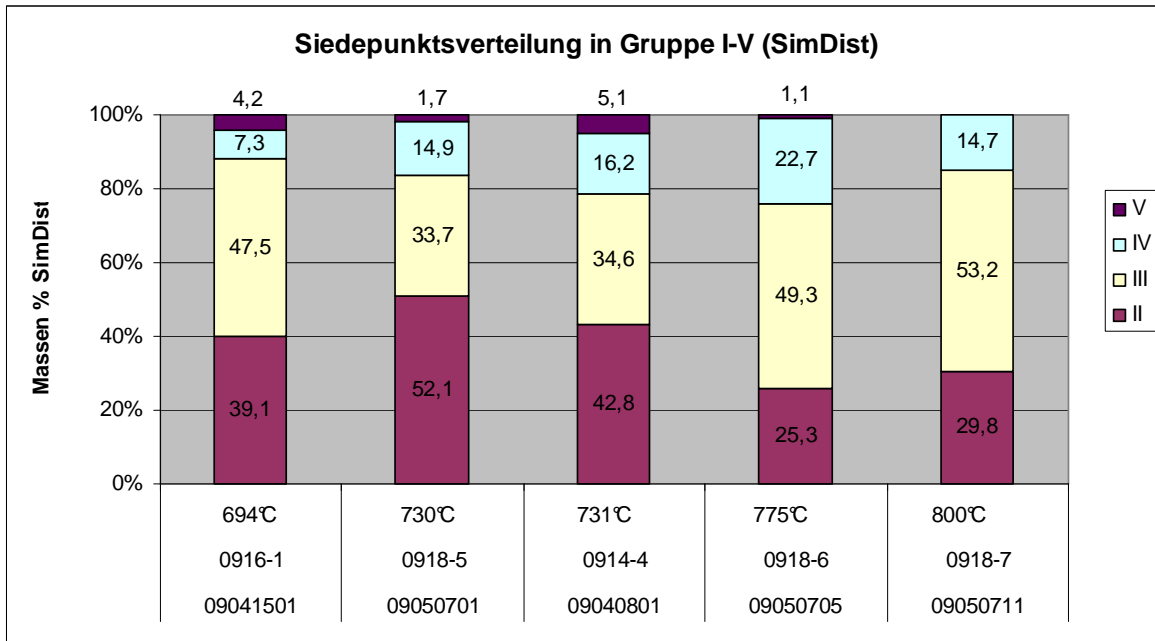


Abb. 6.10-2: Darstellung der Massenverteilung der SimDist für die einzelnen Gruppen

GC/MS

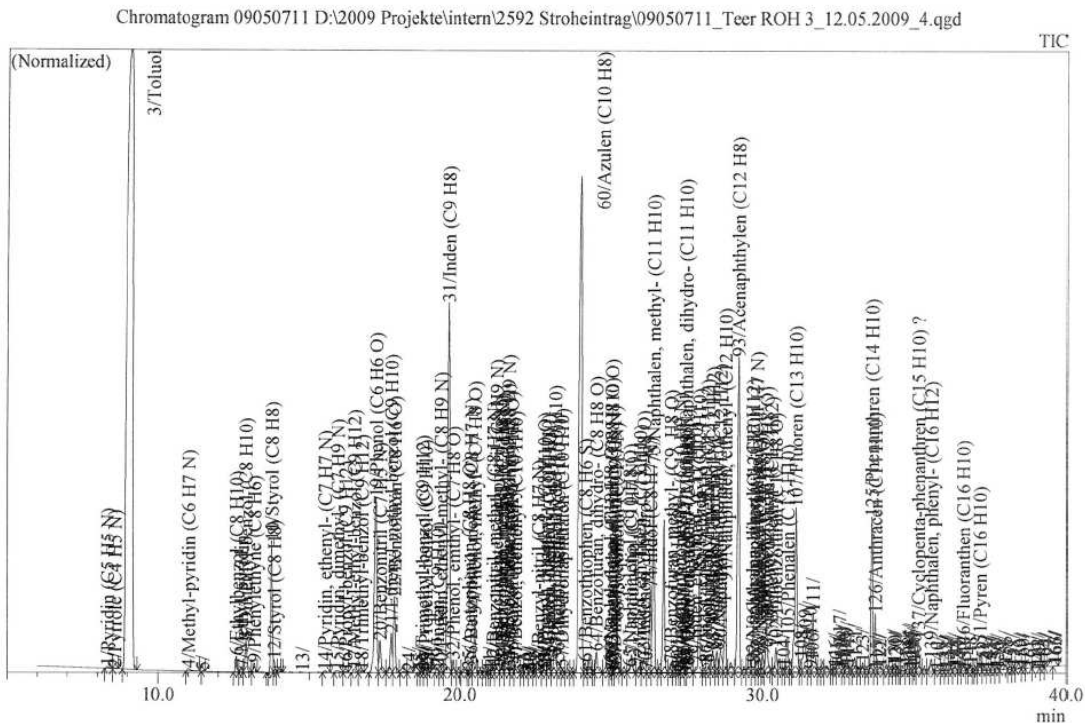


Abb 6.10-3: Chromatogramm der Teerprobe 0918-7

Die Darstellung aus der GC/MS-Messung verdeutlicht die Menge der vorkommenden Verbindungen und die Schwierigkeit der Zuordnung der einzelnen Peaks (s. **Abb. 6.10-3**).

7. Zusammenfassung

Das Vorhaben konnte zeigen, dass sich Strohballen mit dem installierten und weiterentwickelten Eintragungssystem inklusive Häcksler zerkleinern, fördern und vergasen lassen. Weiterer Optimierungsbedarf besteht im Bereich der Eintragungsschnecke. Diese neigt zu schnell zum Stehenbleiben, besonders bei vermehrtem Eintrag von Additiven, jedoch auch beim Transport von Holzspänen, Pellets und hohem Häckselstrohdurchsatz. Es erscheint ratsam, noch Umbauten an der Eintragungsschnecke durchzuführen und die Antriebsleistung des Motors zu erhöhen.

Die Vergasung bei einer mittleren Vergasungstemperatur von 700 °C gelang im Dauerbetrieb bis 249 h. Zählt man vorherige unterbrochene Versuchszeiten hinzu, wurden über 300 h Vergasungsbetrieb gefahren. Temperaturen bis zu 800 °C und damit oberhalb der ermittelten Erweichungstemperatur wurden für einige Stunden Betriebslaufzeit zum Versuchsende getestet. Noch höhere Temperaturen können ggf. mit dem optimierten Eintrag und im Falle einer höheren Förderleistung getestet werden. Maximale Temperaturen wären für ein höheres H₂/CO-Verhältnis und bessere Wirkungsgrade wünschenswert.

Das erzeugte Synthesegas hat einen hohen Heizwert von 11,4-12,1 MJ/Nm³ (teer- und wasserfrei).

Die erzielten H₂/CO-Verhältnisse liegen mit 0,46-1,01 unterhalb der erreichbaren Werte für Holzpellets und andere Biomassen und sind damit für die Anforderungen einer Fischer-Tropsch-Synthese zu gering (H₂/CO-Verhältnis 2:1 bei kobaltbasiertem Katalysator).

Die Teerbildung mit einem Teergehalt des Synthesegases von 37-56 (Ausreißer 124) g/Nm³_{tr} liegt auf einem sehr hohen Niveau.

8. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Das Vorhaben ergab viele Erkenntnisse zu einer funktionstüchtigen Durchfluss- und Füllstandsensorik an verschiedenen Stellen des Eintragungssystems vom Bunker bis zur Eintragungsschnecke. Über das Transportverhalten von gehäckseltem Stroh in verschiedenen Schnecken, speziell der Eintrag in einen atmosphärisch arbeitenden Wirbelschichtvergaser, konnten Erfahrungen gesammelt werden.

Die Ergebnisse können unmittelbar in das Engineering von Projekten einfließen, in denen Halmgut in atmosphärischen Bewegtbetten in Synthesegas umgewandelt werden soll. Erstes Anwendungsbeispiel ist das Basic Engineering für das Strohheizkraftwerk in Gronau [8]. Das Vorhaben ist als Demonstrationsobjekt geplant. Sollte eine Bauentscheidung fallen, kann es zu einer internationalen Multiplikation des Verfahrens zur Strom- und Wärmeerzeugung aus Halmgütern kommen.

Aber die Anwendung kann über diese Art der energetischen Verwertung hinausgehen. Sollte die Kombination von der autothermen Wirbelschicht in Kombination mit einem Heißgasfilter zur Nährstoffrückgewinnung ihre technische Machbarkeit in der großtechnischen Anwendung nachweisen, steht die Umsetzung in Anlagen zur Produktion von Kraftstoffen der zweiten Generation an.

9. Unterschrift

Clausthal-Zellerfeld, den 31.10.2009

Ort, Datum

pro S. Voegel

Dr.-Ing. Stefan Voegel

10. Verwendete Unterlagen

- [1] Abschlußbericht zum Vorhaben *Synthetische Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (ArtFuel)*, Förderinstitution: Niedersächsisches Umweltministerium (Hannover), Förderkennzeichen 17-32344/6/0/1/12-04032-5084 (2002), 21. Dezember 2005.
- [2] Vodegel, S.; Schindler, M.: *Vergasung von Biomassen in einer zirkulierenden Wirbelschicht - Betriebserfahrungen und Wirtschaftlichkeit*; in *Energie aus Abfall*, Bd. 3; Hrsg.: Thomé-Kozmiensky, K.J.; Beckmann, M.; TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, ISBN 978-3-935317-30-6, S. 487-501.
- [3] *Machbarkeitsstudie für eine thermische Strohverwertungsanlage im Landkreis Hildesheim*, CUTEC-Institut GmbH im Auftrage des Landkreises Hildesheim (Umweltamt) und des Niedersächsischen Landvolkes, Kreisverbände Alfeld/L. und Hildesheim-Marienburg e.V., August 2007.
- [4] Schreiben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe an den Landkreis Hildesheim/FD 503 vom 24.08.2008, Zeichen 07NR064.
- [5] EU-Project: *RENEW-Renewable Fuels for Advanced Power Trains*, Contract No SES6-CT-2003-502705; 2004-2007, <http://www.renew-fuel.com/>
- [6] Teilvorhaben *Energetische Nutzung aufbereiteter Produkte aus dem Energiepflanzenanbau, ökonomische und ökologische Begleitforschung, Projektkoordination*; Abschlussbericht im Verbundvorhaben *BioLog-Entwicklung, Erprobung und Demonstration neuer Logistikkonzepte für Biobrennstoffe*, gefördert durch BMELV (Berlin) über FNR (Gülzow), FKZ 220 031 905, Laufzeit 08.2006-12.2008
- [7] *Energy project ERK6-CT1999-20002 (Tar protocol), Guideline for Sampling and Analysis of Tar and Particles in Biomass Producer Gases; Version 3.3* J.P.A. Neeft, H.A.M. Knoef, U. Zielke, K. Sjöström, P. Hasler, P.A. Simell, M.A. Dorrington, L. Thomas, N. Abatzoglou, S. Deutch, C.Greil, G.J. Buffinga, C. Brage, M. Suomalainen; Prepared for European Commission (DGXII) Netherlands Agency for Energy and the Environment (NOVEM) Swiss Federal Office of Education and Science Danish Energy Agency (Energistyrelsen) US Department of Energy (DoE) National Resources Canada
- [8] Vorhaben *Basic Engineering für ein Strohkraftwerk als Demonstrationsanlage (Strohvergasung) im Industriegebiet West in Gronau a.d. Leine*, Fördermittelgeber: BMELV (Berlin) über FNR-Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Gülzow), FKZ 22006407, 1.09-30.11.2009

11. Abkürzungsverzeichnis

BtL	B iomass to L iquid
EDX	Energiedispersive Röntgenstrahlen-Analyse (E nergy D ispersive X -Ray Analysis)
EEG	E rneuerbare E nergien G esetz
FNR	F achagentur N achwachsende R ohstoffe
GC/MS	G aschromatographie mit M assenspektrometrie-Kopplung
H_u	U nterer H eizwert
KLE	K raftfahrzeug- L agerung- E lektro
N³m	N ormkubikmeter
REM	R asterelektronenmikroskop
REW	R egenerative E nergie W irtschaftssysteme
SimDist	Simulierte Destillation
ZWS	Z irkulierende W irbelschicht

12. Formelverzeichnis

C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
CaO	Calciumoxid
H₂	Wasserstoff
HCl	Chlorwasserstoff
HCN	Blausäure
H₂S	Schwefelwasserstoff
K	Kalium
KCl	Kaliumchlorid
Mg	Magnesium
NH₃	Ammoniak
O₂	Sauerstoff

13. Abbildungsverzeichnis

Abb. 4.1-1	Apparatefließbild des ArtFuel-Vergasers	S. 06
Abb. 4.2-1	Blick in Halle Nord	S. 07
Abb. 4.2-2	Zyklon mit installierter Absaugung, Druckluft zum Freipusten und höher gesetztem Deckel	S. 08
Abb. 4.3-1	Brückenbildung im Biomassebunker; verbogene Mitnehmer, neuer Mitnehmer	S. 08
Abb. 4.3-2	Füllstandssensoren im Biomassebunker; Vollstand oben; Leerstand unten	S. 09
Abb. 4.3-3	Füllstandssensor im Füllbereich der Eintragsschnecke (1. Version)	S. 10
Abb. 4.3-4	Optischer Füllstandssensor im Füllbereich der Eintragsschnecke	S. 10
Abb. 4.3-5	Pneumatisch betriebener Klopfer zum Lösen bei Brückenbildung	S. 11
Abb. 4.3-6	Füllstandssensor im Fallschacht oberhalb der Doppelpendelklappen; blockierter Flügelsensor; Vibrationssensor	S. 11
Abb. 4.3-7	Doppelpendelklappen mit Dämpfungsschienen; Lage des defekten Endstand-sensors	S. 12
Abb. 4.3-8	Zuführung des Schnellzuschlagbunkers in den Fallschacht, schlecht entgrateter Einlass	S. 13
Abb. 5-1	Messwerterfassung während des Versuchsbetriebes vom 26.04.09, 18:00 Uhr bis 07.04.09, 23:00 Uhr	S. 15
Abb. 6.1-1	Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei	S. 17
Abb. 6.1-2	Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei aus der Vergasung von Strohpellets	S. 18
Abb. 6.1-3	Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei aus der Vergasung aufbereiteter Biomasse-Silagepellets im Vergleich zu Häckselstroh	S. 18
Abb. 6.2-1	Übersicht Teergehalte der Versuchspunkte	S. 19
Abb. 6.2-2	Teergehalte unterschiedlicher Versuchsreihen; aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur	S. 20
Abb. 6.3-1	Heizwerte der Versuchspunkte im trockenen Permanentgas	S. 20
Abb. 6.3-2	Heizwerte der Versuchspunkte mit Holzpellets aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur	S. 21
Abb. 6.4-1	Zirkulationsrate und Gasausbeute sowie H ₂ /CO-Verhältnis der einzelnen Versuchs-punkte	S. 22
Abb. 6.4-2	Gasausbeute über Zirkulationsrate der einzelnen Versuchspunkte der Versuchsreihen mit Häckselstroh und mit Holzpellets im Vergleich	S. 23

Abb. 6.4-3	Spezifischer Sauerstoffeinsatz der einzelnen Versuchspunkte	S. 23
Abb. 6.4-4	H ₂ /CO-Verhältnis; aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur	S. 24
Abb. 6.4-5	H ₂ /CO-Verhältnis der Versuchspunkte mit Holzpellets; aufgetragen über der mittleren Vergasungstemperatur in Abhängigkeit vom Dampf/O ₂ -Verhältnis	S. 24
Abb. 6.5-1	Vergasungsverhältnis und Dampf/Biomasse-Verhältnis der einzelnen Versuchspunkte	S. 25
Abb. 6.6-1	Kaltgaswirkungsgrad und Kohlenstoffumsatzgrad der einzelnen Versuchspunkte	S. 26
Abb. 6.7.2-1	Filterasche 0914-3 REM/EDX-Ergebnisse	S. 30
Abb. 6.7.2-2	Siphonasche 0918-5	S. 31
Abb. 6.7.2-3	Bettasche 0918-5	S. 32
Abb. 6.7.2-4	Siphonasche 0918-6	S. 33
Abb. 6.7.2-5	Bettasche 0918-6	S. 34
Abb. 6.7.2-6	Siphonasche 0918-7	S. 35
Abb. 6.7.2-7	Bettasche 0918-7	S. 36
Abb. 6.8-1	Siphonasche mit guter Zirkulation	S. 37
Abb. 6.8-2	Bettasche 0918-4 gute Zirkulation	S. 38
Abb. 6.8-3	Siphonasche 0918-4 schlechte Zirkulation	S. 40
Abb. 6.8-4	Bettasche 0918-4 schlechte Zirkulation	S. 41
Abb. 6.9-1	Partikelsummenverteilung der Filter- und Siphonaschen aus den Versuchsreihen mit Häckselstroh	S. 42
Abb. 6.9-2	Partikelsummenverteilung der Siphonaschen aus Versuchsreihen mit Holzpellets	S. 43
Abb. 6.10-1	Siedekennlinie für die Teerprobe 0918-7	S. 45
Abb. 6.10-2	Darstellung der Massenverteilung der SimDist für die einzelnen Gruppen	S. 46
Abb. 6.10-3	Chromatogramm der Teerprobe 0918-7	S. 46

14. Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1	Brennstoffanalyse Teil I für Weizenstrohpellets und Häckselstroh	S. 05
Tab. 3-2	Brennstoffanalyse Teil II für Weizenstrohpellets und Häckselstroh	S. 05
Tab. 6.7.1-1	Kohlenstoffgehalte der Siphon-, Filter- und Bettascheproben	S. 27
Tab. 6.8-1	Bettasche 0918-4 – gute Zirkulation	S. 39
Tab. 6.10-1	Einteilung typischer Teerbestandteile nach Siedebereichen zur Charakterisierung unterschiedlicher Teere	S. 44