

*Erweiterung des Biomassepotentials zur energetischen Nutzung um kommerziell produzierte Algen*

Fördermittelgeber:

**NBank des Landes Niedersachsen** (Hannover)

**Volkswagen Aktiengesellschaft** (Wolfsburg)

**Projekt-Nr.:** 2665/2666

**Förderkennzeichen:** W3 – 80028034

29. Januar 2010



## Inhaltsverzeichnis

<b>0. Aufgabenstellung .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Eingesetzte Reaktortechnik.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Brennstoffanalysen .....</b>	<b>6</b>
<b>3. Versuchsdurchführung .....</b>	<b>10</b>
<b>4. Versuchsergebnisse.....</b>	<b>12</b>
4.1 Wirkungsgrade .....	12
4.2 Synthesegaseigenschaften .....	14
4.3 Einfluss der Algenaufbereitung .....	20
4.4 Analysen der Filter-, Siphon- und Bettaschen.....	20
<b>5. REM-Aufnahmen und EDX-Analysen.....</b>	<b>22</b>
<b>6. Betriebserfahrungen .....</b>	<b>28</b>
<b>7. Zusammenfassung .....</b>	<b>30</b>
<b>8. Unterschrift .....</b>	<b>31</b>
<b>9. Verwendete Quellen .....</b>	<b>31</b>
<b>10. Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>32</b>
<b>11. Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>32</b>
<b>12. Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>34</b>
<b>Nachtrag vom 25.10.10.....</b>	<b>35</b>

## 0. Aufgabenstellung

Die zunehmende Nutzung von Biomasse für die Energieerzeugung ist ein vielversprechender Ansatz, der ständig wachsenden Nachfrage nach erneuerbaren Energien gerecht zu werden. Ein mehr an Biomasse und Bioenergie bedeutet nach derzeitigem Entwicklungsstand, dass ein ständig wachsender Anteil bislang agrarisch genutzter Flächen für den Anbau von sogenannten Energiepflanzen benötigt wird. Diese Konkurrenz zur ebenfalls flächenintensiven Nahrungs- bzw. Futtermittelproduktion kann theoretisch durch die Nutzung von hochproduktiven Meeresalgen teilweise umgangen werden, da sie auf Arealen wachsen können, die agrartechnisch nicht geeignet sind und kein Süßwasser benötigen.

Die Ziele des vorliegenden Vorhabens lassen sich definieren zu:

1. Technische Machbarkeit der Herstellung von heizwertreichen Synthesegas aus Algen nachweisen.
2. Verfahrenstechnische Maximierung der Gasausbeute [ Nm<sup>3</sup> Gas pro kg Biomasse trocken ]
- 3.a Verfahrenstechnische Optimierung des H<sub>2</sub>/CO - Verhältnisses zur BtL-Produktion
- 3.b Verfahrenstechnische Maximierung des Heizwertes zur Nutzung im Gasmotor
4. Minimierung von Betriebsmittelverbräuchen, speziell Sauerstoff.

Als Aufgabenstellung ergibt sich

- a) die Planung, Durchführung und Auswertung von Versuchen mittels autothermer Vergasung in einer zirkulierenden Wirbelschicht und
- b) die Optimierung von Verfahrensparametern, soweit es die Reaktionsbedingungen zulassen

Der Innovationsgehalt liegt in dem Umstand, dass die thermische Zersetzung der Ganzpflanze zum Synthesegas zum ersten Mal ausprobiert wird. Im Falle des Gelingens würde sich für Anlagen zur thermischen Nutzung von Biomasse die Palette an nachwachsenden Rohstoffen erweitern. Untersucht werden sollten daher im Rahmen der Auswertung:

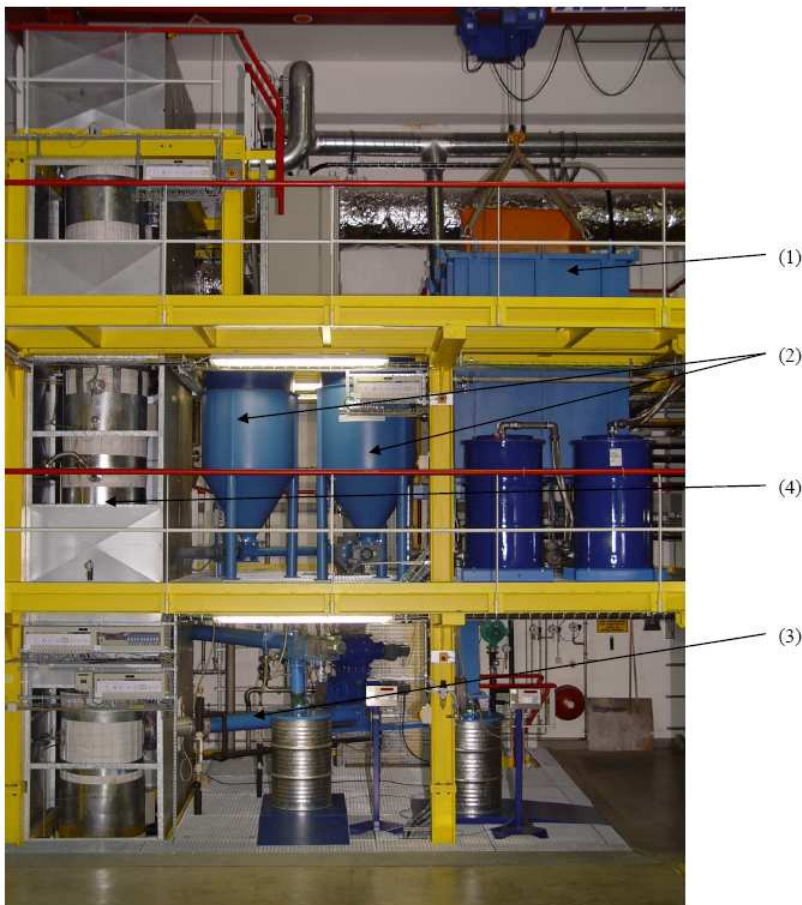
- Wirkungsgrade (Kaltgas, Kohlenstoffumsatz, Vergaserwirkungsgrad)
- Synthesegaszusammensetzung, H<sub>2</sub> : CO-Verhältnis
- Partikelmorphologie von Filter- und Siphonaschen
- Betriebserfahrungen darstellen.

Eingesetzt wurde eine Algenmischung aus Laboralgen einer Größe im µm-Bereich und Meeresalgen. Partner der Lieferung war die Fa. Phytolutions aus Bremen. Die Fa. Volkswagen schloß einen Liefervertrag mit dem Unternehmen ab und stellte die Algen dem Vorhaben zur Verfügung.

Im Projektverlauf war mit den Partnern Phytolutions und Volkswagen ein ständiger Austausch an Erkenntnissen zu leisten, um die Auswirkungen geänderter Aufbereitungsschritte auf die thermochemische Umsetzung zu diskutieren.

## 1. Eingesetzte Reaktortechnik

Die ArtFuelanlage der CUTE wurde 2004 in Betrieb genommen (s. **Abb. 1-1**). Es handelt sich um eine zirkulierende Wirbelschicht mit einer Leistung von  $0,4 \text{ MW}_{\text{therm}}$  und Betriebstemperaturen im Bereich von  $700\text{-}950^\circ\text{C}$ . Die Vergasung wird bei Atmosphärendruck durchgeführt und ist als Dampf-/Sauerstoff-Vergasung konzipiert. Als Vergasungsmittel können wahlweise Luft (An-/ Abfahrvorgänge), Sauerstoff, Wasserdampf oder Mischungen dieser eingesetzt werden. Die für die Zersetzung des Inputs notwendige Energie wird durch eine Teilverbrennung des Brennstoffs aufgebracht („Autothermes Prinzip“).



**Abb. 1-1:** Photo der Versuchsanlage

(1) Vorratsbunker Biomasse, (2) Additivbunker, (3) Eintragungssystem, (4) Vergaseranlage

Der benötigte Prozessdampf wird in einem  $100 \text{ kW}$  Dampferzeuger bereitgestellt. Sauerstoff lagert tiefkalt in einem  $6 \text{ m}^3$  Tank. Um das ungünstige Oberflächen-Volumenverhältnis der Pilotanlage und den damit verbundenen hohen Wärmeverlust zu kompensieren, sind Reaktor und Zyklon mit einer elektrischen Begleitheizung ausgerüstet. Der Wasserdampf dient neben seiner Funktion als Reaktionspartner zur Fluidisierung des Feststoffes.

Nach Austritt des staubbeladenen Rohgases aus dem Aufstromteil wird der Feststoff in einem nachgeschalteten Zyklon abgeschieden und über eine Rückführleitung dem Reaktor wieder zugeführt. Das vorentstaubte Rohgas tritt über das Tauchrohr des Zyklons aus (s. **Abb. 1-2**).

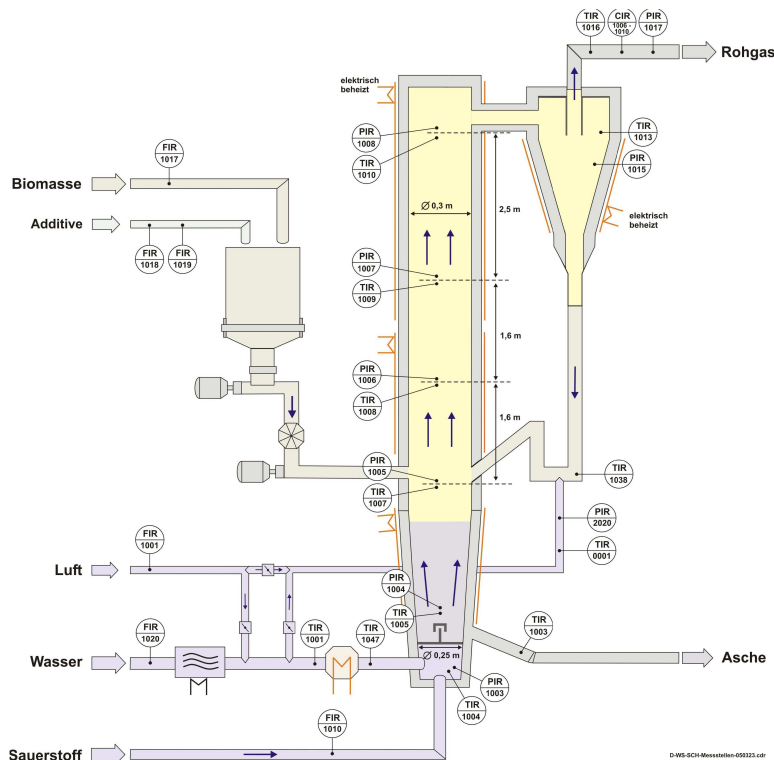


Abb. 1-2: Zirkulierende Wirbelschicht mit Messstellenerfassung

Als Besonderheit der Abgasreinigung (s. **Abb. 1-3**) startet diese mit einem Heißgasfilter mit keramischen Filterkerzen. Motivation ist die frühzeitige Abtrennung der Asche oberhalb des Teerkondensationspunktes vor allen weiteren Abkühlungs- und Reinigungsschritten. Dies ist besonders bei Jahrespflanzen bedeutend, da im ausgebrannten Feststoff die Mineralien als Nährstoffe enthalten sind. Die weitere Gasreinigung wird realisiert mittels einer Quenche zur Abkühlung des Synthesegases, eines Wasserwäschers zur Abscheidung saurer Komponenten wie  $\text{NH}_3$  und  $\text{HCl}$  sowie von einer Teerfraktion durch Kondensation und eines später nachgerüsteten RME-Wäschers zur Abtrennung der verbliebenen Teere. Ein abschließender Polzeifilter mit imprägniertem Aktivkoks sorgt derzeit für die Feinstreinigung von verbliebenden Verunreinigungen (besonders Schwefelverbindungen) im Falle einer Verwendung des Synthesegases in der Fischer-Tropsch-Synthese.

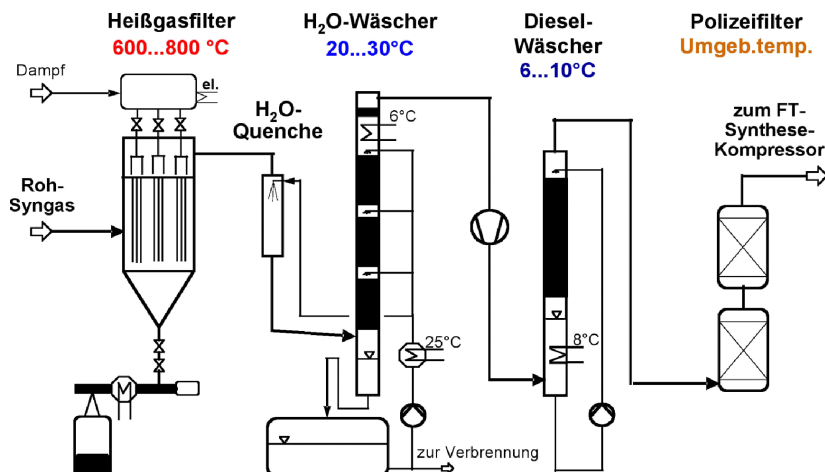


Abb. 1-3: Gasreinigung nach dem Reaktor

## 2. Brennstoffanalysen

Zur Beurteilung der Versuchsergebnisse werden die Eigenschaften der eingesetzten Biomasse betrachtet (s. **Tab. 2-1** und **2-2**). Die Chargen 0-IV entstammen unterschiedlichen Erntezeiträumen und differieren in der Aufbereitungskette.

**Tab. 2-1:** Elementar- und Spurenanalyse (**Bem.:** i. a.: im angelieferten Zustand; O-Gehalt berechnet)

		0	I	II	III	IV	
		Sept. '09	November '09				
Elementaranalyse		Analysezustand (gemahlen)					
Bezugszustand		i. an.	i. an.	i. an.	i. an.	i. an.	
Kohlenstoff	C	16,20	25,50	18,10	18,60	23,23	Ma.-%
Wasserstoff	H	1,93	3,05	2,01	1,96	2,63	Ma.-%
Sauerstoff	O	12,67	17,15	18,84	22,68	18,59	Ma.-%
Stickstoff	N	1,40	2,78	2,13	2,08	2,59	Ma.-%
Schwefel	S	<b>0,49</b>	<b>1,14</b>	<b>0,97</b>	<b>1,13</b>	<b>0,99</b>	Ma.-%
Chlor	Cl	<b>0,67</b>	<b>0,90</b>	<b>0,65</b>	<b>0,95</b>	<b>0,83</b>	Ma.-%
Wasser	w	8,63	10,75	10,21	13,05	12,04	Ma.-%
Asche	a	<b>58,02</b>	<b>38,73</b>	<b>47,10</b>	<b>39,56</b>	<b>39,10</b>	Ma.-%
Summe		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	Ma.-%

Spurenanalyse							
Calcium	Ca	<b>31,2</b>	<b>86,0</b>	<b>52,0</b>	<b>29,0</b>	<b>29,0</b>	mg/g
Kalium	K	16,5	16,0	17,0	15,0	16,0	mg/g
Magnesium	Mg	4,8	7,5	7,2	6,3	7,0	mg/g
Natrium	Na	13,1	8,6	11,0	12,0	11,0	mg/g
Silicium	Si	<b>44,6</b>	<b>48,0</b>	<b>71,0</b>	<b>68,0</b>	<b>37,0</b>	mg/g

**Tab. 2-2** Brennstoffanalyse

		0	I	II	III	IV	
		Sept. '09	November '09				
Brennstoffkennwerte		Analysezustand (gemahlen)					
Bezugszustand		i. an.	i. an.	i. an.	i. an.	i. an.	
Brennwert (Analyse)	H <sub>o</sub>	6,54	9,47	8,37	9,22	10,03	MJ/kg
Heizwert (Analyse)	H <sub>u</sub>	<b>5,91</b>	<b>8,54</b>	<b>7,67</b>	<b>8,49</b>	<b>9,16</b>	MJ/kg
Heizwert (Boje)	h <sub>u</sub>	6,05	9,98	6,18	5,84	8,58	MJ/kg
Heizwert (Verbandsformel)	h <sub>u</sub>	5,75	9,60	5,56	5,04	8,06	MJ/kg

Ascheschmelzverhalten (Probe wurde bei 550 °C verascht!)

Atmosphäre		oxidierend					
Sinterbeginn	T <sub>S</sub>	<b>914</b>	<b>810</b>	<b>770</b>	<b>981</b>	<b>1028</b>	°C
Erweichungstemperatur	T <sub>E</sub>	1141	930	1000	1180	1190	°C
Halbkugeltemperatur	T <sub>H</sub>	1289	1317	1287	1236	1232	°C
Fließtemperatur	T <sub>F</sub>	>1380	1320	1310	> 1300	1282	°C

Besonders auffällig bei den Analysen ist der hohe Aschegehalt. Der Aschegehalt von Holz liegt beispielsweise in abgeschlossenen Projekten bei 0,4% i.a.n und von Stroh bei 8,4% i.a.n [1,2,3]. Bei der Algenbiomasse resultiert der hohe Aschegehalt vermutlich aus einem hohen Sandgehalt. Dies legt der hohe Siliciumgehalt nahe. Bei der Charge 0 wird der besonders hohe Aschegehalt vermutlich begründet durch eine lange Lagerung der Algen am Strand und dem anschließenden Aufnehmen mittels Baggern. Darauf wurde bei den weiteren Chargen verzichtet. Mit einem zusätzlichen Siebungsschritt und dem Abtrennen des Feinanteils konnte in den Chargen I-III der Sandanteil reduziert werden. Charge IV resultiert aus einem weiteren Aufbereitungsschritt des abgeseibten Feinanteils. Hierbei sollte der Verlust an organischen Bestandteilen verringert werden.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der Elementaranalysen sind die Gehalte an Stickstoff, Chlor und Schwefel deutlich höher als bei Holzpellets. Im Vergleich zu Häckselstroh [2] beträgt der Faktor bei diesen Elementen beispielsweise ca. 10 bei Charge 0. Weiterhin sind die hohen Spurengehalte auffällig. Der Unterschied zum Holz beträgt ca. 100. Die Gehalte im Stroh liegen dazwischen, jedoch ebenfalls um Faktoren zwischen 4 und 22 niedriger als bei den Algen.

Weiterhin ist der große Unterschied zwischen Charge 0 und den im November 2009 geernteten Chargen I bis IV bei den Elementen Stickstoff, Schwefel und Chlor bemerkenswert.

Die hohen Gehalte an Alkali können Auswirkungen auf das Ascheschmelzverhalten des Einsatzmaterials haben. Bei dem analysierten Material überwiegt jedoch scheinbar der Einfluss des Sandgehaltes und die Ascheerweichungstemperaturen liegen mit über 1000 °C eigentlich in einem unkritischen Bereich. Besonders der hohe Calciumgehalt lässt eine Beeinflussung des Ascheerweichungsverhaltens mit Branntkalk, wie sonst üblich [1,2], unnötig erscheinen.

Aufgrund der intensiven Trocknung der ursprünglich feuchten Biomasse liegt der Wassergehalt auf einem vergleichbaren Niveau wie bei anderen trockenen oder getrockneten Biomassen.

Mit dem hohen Aschegehalt geht ein niedriger Heizwert einher (s. **Tab. 2-2**). Als Vergleichswert ist der Heizwert von Holzpellets mit 17 MJ/kg zu nennen. Ab Charge I konnte jedoch auf eine Zudosierung heizwertreichen Materials bei der Versuchsdurchführung verzichtet werden.

### **Summenverteilung**

Aufgrund des hohen Ascheanteils in den Brennstoffanalysen wurde von der Charge 0 eine Siebanalyse durchgeführt (s. **Abb. 2-1**). Parallel wurde eine kleine Probe der Algen mittels eines Zick-Zack-Sichters (Luftvolumenstrom = 2,8-77,8 m<sup>3</sup>/h) getrennt. Daraus sollten Kenntnisse für die Optimierung der Aufbereitung gesammelt werden. Bei beiden Methoden konnte keine saubere Abtrennung der Sandpartikel erfolgen. Auch bei den gröberen Fraktionen (500-710µm) sind Sandpartikel erkennbar.

Als weiterer Schritt wurden die einzelnen Fraktionen der Siebanalyse bei 550°C verascht, um über die Bestimmung des Glühverlustes eine Vorstellung des restlichen Sandanteils in der Grobfraktion zu erlangen.

Auch bei den Glührückständen konnte, wie bei den feinen Siebfraktionen nicht eindeutig differenziert werden zwischen Sandanteil und Biomasseanteil. Bei den groben Fraktionen sieht man hingegen deutlich, dass die Biomasse ebenfalls einen deutlichen Glührückstand (Ascheanteil) besitzt (s. **Abb. 2-2**).



Abb. 2-1: Siebfraktionen der Charge 0

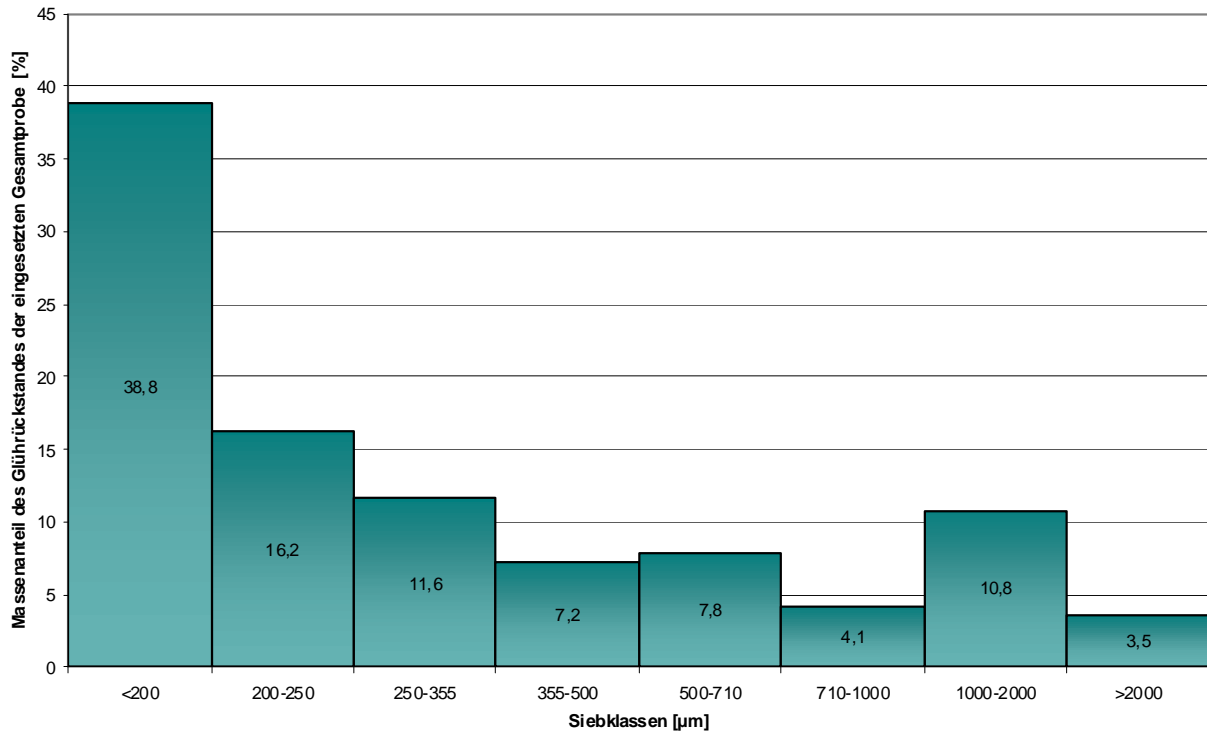


Abb. 2-2: Glührückstände der einzelnen Siebfraktionen (von links oben: <200µm, 200-250 µm, 250-355 µm, 355-500 µm, 500-710 µm, 710-1000 µm, 1000-2000 µm, >2000 µm)

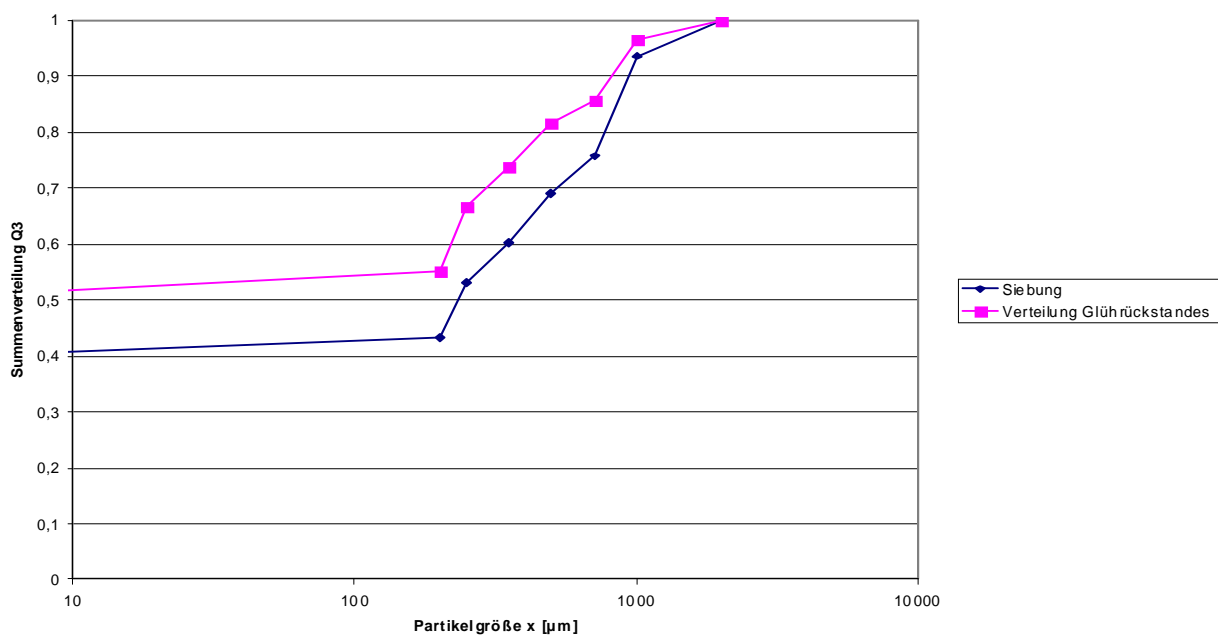
In **Abb. 2-3** sind die Massenanteile der Glührückstände zurückgerechnet auf die eingesetzte Gesamtprobe und deren Zusammensetzung dargestellt. Generell wird deutlich, dass wie erwartet die Glührückstände der feinen Fraktionen relativ groß sind. Wieviel von diesen Rückständen jeweils Sand ist lässt sich anhand dieser Analysen nicht beziffern.

Eine Abtrennung der Partikel kleiner 355 µm sollte den Sandanteil der Gesamtprobe jedoch bereits deutlich reduzieren. Bei dieser Siebung würden die Partikel, deren Anteil an dem Glührückstand ca. 67% ausmacht, bereits entfernt (s. **Abb. 2-4**).

Diese Erkenntnisse über das Einsatzmaterial fließen in die Optimierung der Aufbereitung der Chargen I-IV bei der Fa. Phytolutions ein.



**Abb. 2-3:** Massenanteile der Glührückstände der einzelnen Fraktionen bezogen auf die Gesamtprobe



**Abb. 2-4:** Darstellung der Siebung und der Verteilung des Glührückstandes bezogen auf die Gesamtprobe

### **3. Versuchsdurchführung**

In zwei Versuchswochen wurden Versuche zur Vergasung von Algen an der zirkulierenden Wirbelschicht durchgeführt. Ziel der Versuche war es die Machbarkeit, die Synthesegaszusammensetzung und die Betriebsparameter bei der Vergasung zu untersuchen.

In einem Betriebszeitraum von insgesamt ca. 87 Stunden konnten 11 Versuchspunkte mit unterschiedlichen Betriebsparametern eingestellt werden. Die Algencharge IV wurde während der Versuchseinstellung 0949-2 der Charge III als Veredelung hinzugefügt. Die Betriebsparameter wurden für den Versuchspunkt 0949-3 möglichst konstant gehalten, um eine Vergleichsmöglichkeit zu erhalten.

Bei allen Versuchseinstellungen wurden Teerprobenahmen im Rohgas durchgeführt. Es liegen Analysenwerte der Spurenkomponenten  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{HCN}$  und  $\text{HCl}$  sowie vom Wassergehalt der Rohgase vor. Für alle Versuchseinstellungen wurden neben der kontinuierlichen Gasanalyse zusätzlich Gasproben des Permanentgases extern analysiert ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_3\text{H}_6$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ). Bei den Versuchen 0937-1 bis -3 und 0949-1 bis -5 wurden Bett-, Filter- und Siphonascheprouben genommen und im CUTE-Labor auf den Kohlenstoffgehalt analysiert. Danach musste aufgrund eines Defektes der Filterkerzen im Heißgasfilter, vermutlich verursacht durch die hohe Staubfracht, die Nebenstrecke abgestellt werden und dementsprechend existieren für die folgenden Versuchseinstellungen keine Filterascheprouben.

Bereits während der Versuchseinstellung 0949-6 kam es zu Unregelmäßigkeiten während des Betriebs der Wirbelschicht. Obwohl mit der Biomasse ein großer Anteil an größerem Inertmaterial zugeführt wurde, konnte durch den Bettascheaustrag kein Material abgelassen werden. Der Versuchsbetrieb musste unterbrochen und die Wirbelschicht geöffnet werden. Es stellte sich heraus, dass es über die gesamte Höhe des Reaktors zu Materialanbackungen gekommen war. Nach dem Entfernen konnte der Betrieb weitergeführt werden. Jedoch war auch nach der Reinigung der Übergang zwischen Wirbelschicht und Zyklon so weit zugesetzt, dass kein Material zirkulieren konnte.

#### **Versuchsparameter**

Die Versuche wurden bei mittleren Temperaturen von 701 bis 820°C und einer Luftzahl von 0,26 bis 0,64 mit Dampf und Sauerstoff als Vergasungsmittel (Dampf-Sauerstoff-Verhältnis [kg/kg]: 1,21 bis 1,93) durchgeführt.

Die Verweilzeiten des Gases in der ZWS lagen bei den Versuchen bei 3,0 bis 5,4 s. Als Bettmaterial wurde Sand vorgelegt. Während des Versuchsbetriebes wurde aufgrund des hohen Sandgehaltes der Biomasse kein weiteres Bettmaterial zudosiert. Eine Zugabe von Branntkalk erschien nicht nötig aufgrund der bereits hohen Ascheerweichungstemperaturen der Biomasse.

Wegen des sehr hohen Inertanteils der Biomasse und dem entsprechend niedrigen Heizwert musste beim Einsatz des ersten Materials (Algen 0, Versuchseinstellungen 0937-x) eine Zudosierung heizwertreichen Materials in Form von Pellets stattfinden. In der zweiten Versuchswoche konnte hierauf verzichtet werden.

## **Massen- und Energiebilanzen**

Für die Zudosierung eines heizwertreichen Materials bei Charge 0 wurden Holzpellets benutzt. Die thermische Leistung resultierend aus den Algen lag bei 238 bis 264 kW (bezogen auf den Heizwert  $H_u$ ). Dies entspricht Brennstoffmassenströmen von ca. 138 bis 153 kg/h. Die zudosierte Holzmenge lag bei 7-8 kg/h mit einer Leistung von 35-36 kW.

Zum Ausgleich der Wärmeverluste wurde über die elektrische Begleitheizung Energie eingekoppelt. Die Leistung der Reaktorbegleitheizung lag bei 39-46 kW. Anhand der Energiebilanzierung wird deutlich, dass deutlich mehr Energie über die Reaktorbegleitheizung eingetragen wurde, als über die unterschiedlichen Verlustströme auszugleichen war.

Beim Versuchspunkt 0937-2 wurde zum Erreichen höherer Vergasungstemperaturen mehr Sauerstoff zudosiert. Dies äußert sich in einer geringeren Leistung der Reaktorbegleitheizung. Die deutliche Reduzierung der Sauerstoffdosierung beim Versuchspunkt 0937-3 äußert sich in einem höheren elektrischen Leistungseintrag der Begleitheizung.

Die Chargen I-IV konnten ohne Zudosierung eingesetzt werden. Die thermische Leistung lag bei 162 bis 359 kW, was einem Biomasseinput von 69-152 kg/h entspricht. Die eingekoppelte Leistung der Begleitheizung betrug 17-44 kW.

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1 Wirkungsgrade

Der **Kaltgaswirkungsgrad** beschreibt im Folgenden das Verhältnis aus abgeführter thermischer Leistung des Permanentgases und dem thermischen Input des Einsatzmaterials.

$$\text{Kaltgaswirkungsgrad} = \frac{\text{Massenstrom}_{\text{Permanentgas}} \cdot \text{Heizwert}_{\text{Permanentgas}}}{\text{Heizwert}_{\text{Biomasse}} \cdot \text{Massenstrom}_{\text{Biomasse}}} \cdot 100$$

In vergangenen Projekten lag der Kaltgaswirkungsgrad bei Werten von 50-70% [1,2,3]. Mit Werten von 27-53% liegen die Algen deutlich niedriger (s. **Abb. 4.1-1+2**)

Der **Kohlenstoffumsatzgrad** ergibt sich aus einer Massenbilanz des Kohlenstoffs.

$$\text{Kohlenstoffumsatzgrad} = 100 - \frac{\text{StoffmengenstromKohlenstoff}_{\text{Flugkoks}}}{\text{StoffmengenstromKohlenstoff}_{\text{Biomasse}}} \cdot 100$$

Der Stoffmengenstrom des Restkohlenstoffs im Flugkoks wird berechnet über den Restkohlenstoffgehalt der Filterasche. Der Stoffmengenstrom des zugeführten Kohlenstoffs ergibt sich aus dem Kohlenstoffgehalt der Biomasse und der zugeführten Biomassemenge.

Versuchsreihen mit Holz ergaben Kohlenstoffumsatzgrade von 92-99% [1]. Auch hier schneiden die Algen mit 87-97% schlechter ab.

Der **Vergaserwirkungsgrad** ergibt sich als das Verhältnis der Enthalpien der ausgehenden Stoffströme und der Enthalpien der eingehenden Stoffströme. Üblicherweise liegt dieser im Bereich von 75-90%. Auch hier liegen die Algen mit Werten von 64-86% auf einem geringeren Niveau.

$$\text{Vergaserwirkungsgrad} = \frac{\text{Enthalpien}_{\text{aus}}}{\text{Enthalpien}_{\text{ein}}} \cdot 100$$

Die niedrigen Kaltgas- und Vergaserwirkungsgrade der Versuchseinstellungen 0949-6 bis-8 lassen sich vermutlich auf den undefinierten Betriebszustand der Wirbelschicht zurückführen, der zum Ende der Versuchsreihe bestand.

Generell liegen alle erreichten Ergebnisse beim Einsatz der Algenbiomasse mit ihrem hohen Inertanteil im unteren Bereich der erreichbaren Wirkungsgrade im Vergleich mit anderen Biomassen. Die Charge 0 scheint dabei bessere Ergebnisse erzielt zu haben. Dies ist jedoch darauf zurückzuführen, dass die Auswerteroutine der Versuchsdaten auf einen bestimmungsgemäßen Betrieb der Wirbelschicht angepasst ist. Dabei wird von einem sehr geringen Austrag von heißem Material aus dem Bettascheaustrag ausgegangen. Aufgrund des hohen

Sandanteils der Algen konnte dies im Betrieb jedoch nicht realisiert werden. Die Anpassung der Auswerteroutine erfolgte erst zur zweiten Auswertung ab der Charge I. Die Anpassung erfolgte bei der Charge 0 nicht aufgrund der Unwahrscheinlichkeit einer Realisierung der Vergasung von Algen mit einer Zudosierung von Holz.

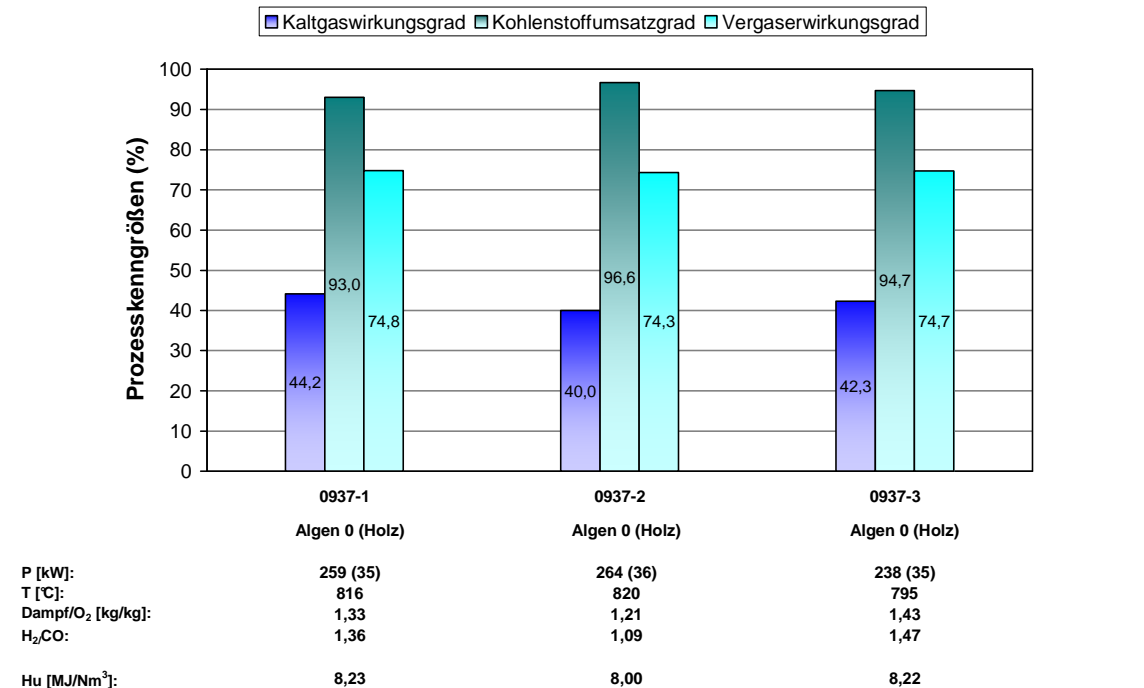


Abb. 4.1-1: Kaltgaswirkungsgrad, Kohlenstoffumsatzgrad und Vergaserwirkungsgrad der einzelnen Versuchspunkte mit der Charge 0

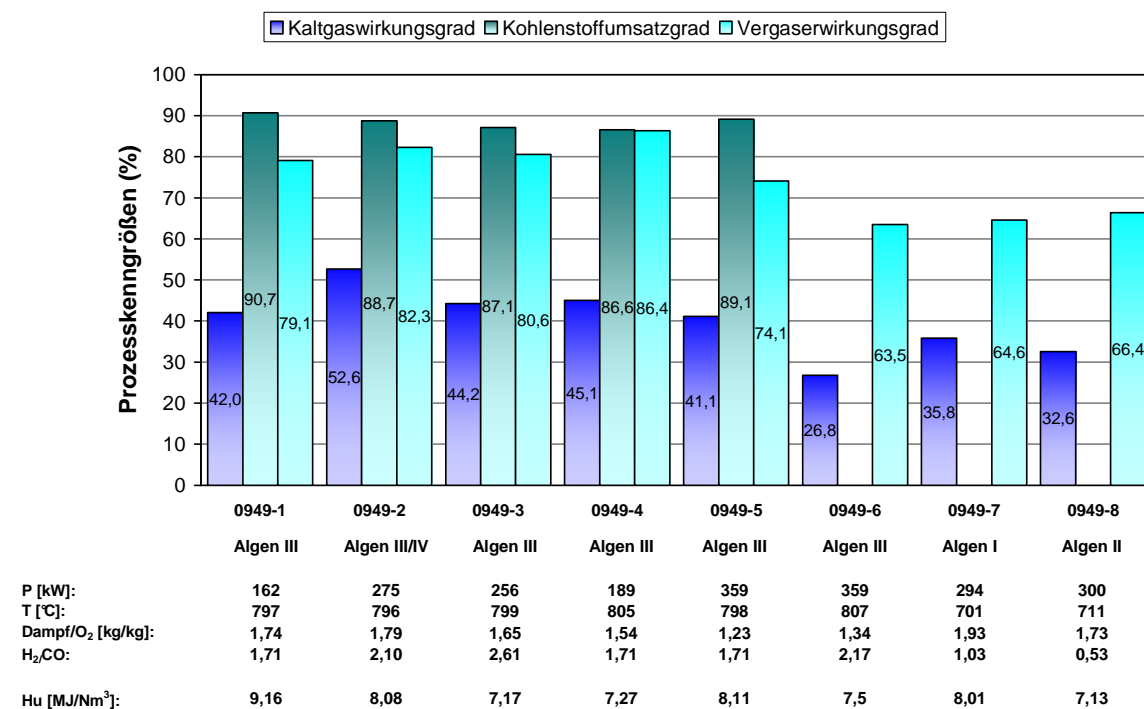
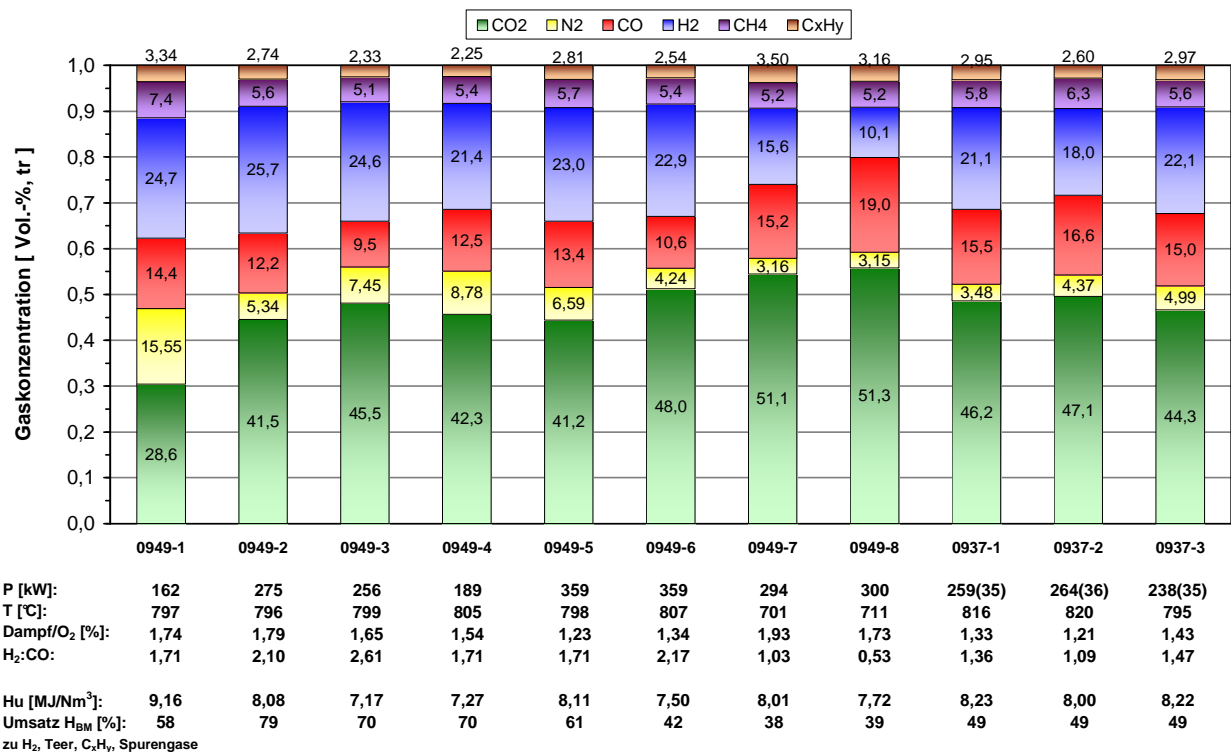


Abb. 4.1-2: Kaltgaswirkungsgrad, Kohlenstoffumsatzgrad und Vergaserwirkungsgrad der einzelnen Versuchspunkte mit den Charges I-IV

## 4.2 Synthesegaseigenschaften

Der Normvolumenstrom des Permanentgases betrug ca. 25,6 bis 62,1 m<sup>3</sup>/h (trocken und teerfrei). Zum Vergleich: Bei Versuchsreihen mit Holz konnten bis zu 90 m<sup>3</sup>/h erreicht werden [1]. Der hohe CO<sub>2</sub>-Gehalt des Permanentgases verdeutlicht den hohen Anteil an Verbrennungsreaktionen die nötig waren, um die Vergasung und die Temperaturen stabil zu halten (s. **Abb. 4.2-1**). Die Stickstoffgehalte im Gas resultieren aus den Stickstoff-Spülströmen, die ein Zurückschlagen von Synthesegas und ggf. ein Rückzünden verhindern sollen.



**Abb. 4.2-1:** Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei

In **Abb. 4.2-2** sind die Permanentgaszusammensetzungen aus Versuchsreihen mit Holzpellets dargestellt. Deutlich erkennbar sind die Unterschiede in CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>- und CO-Gehalt.

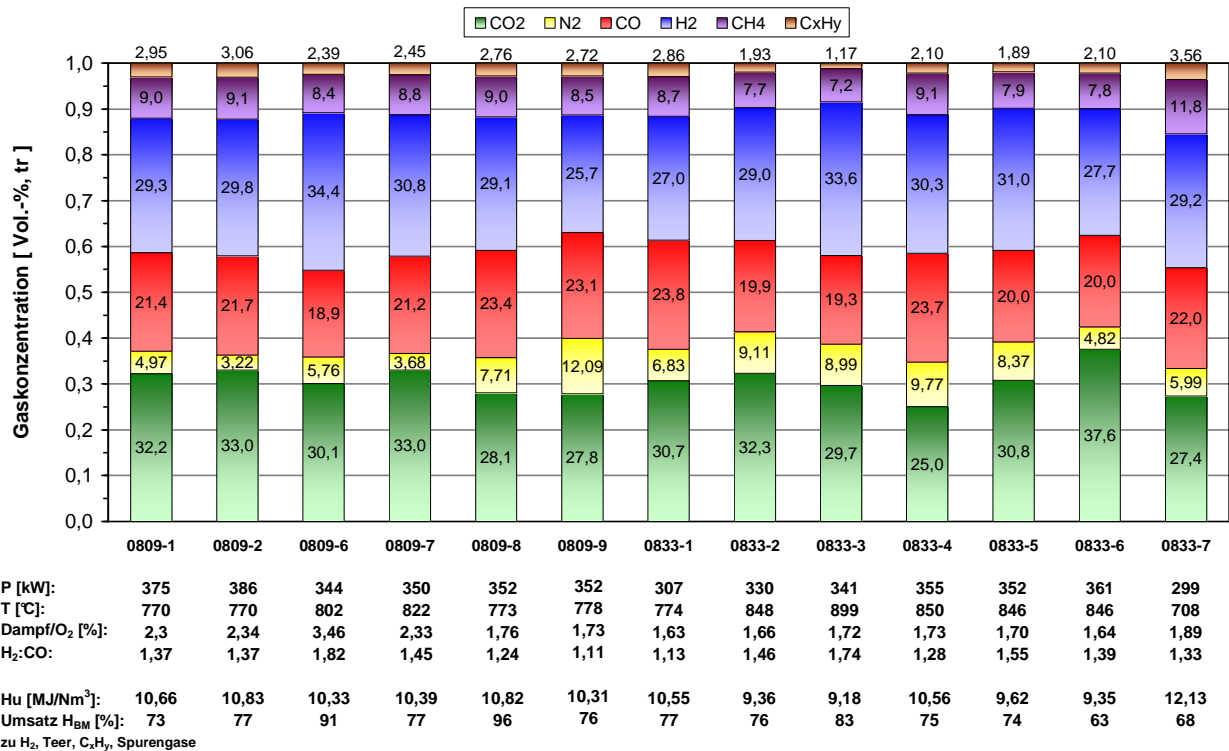


Abb. 4.2-2: Permanentgaszusammensetzung aus Holzpellets, teer- und wasserfrei [1]

In den **Abb. 4.2-3** und **4.2-4** sind die Heizwerte des teer- und wasserfreien Permanentgases dargestellt. Im Vergleich mit anderen Biomassen liegen die Heizwerte auf einem niedrigen Niveau, was sich anhand des hohen CO<sub>2</sub>-Gehaltes erklären lässt. Die Wasser- und Teergehalte sind relativ hoch.

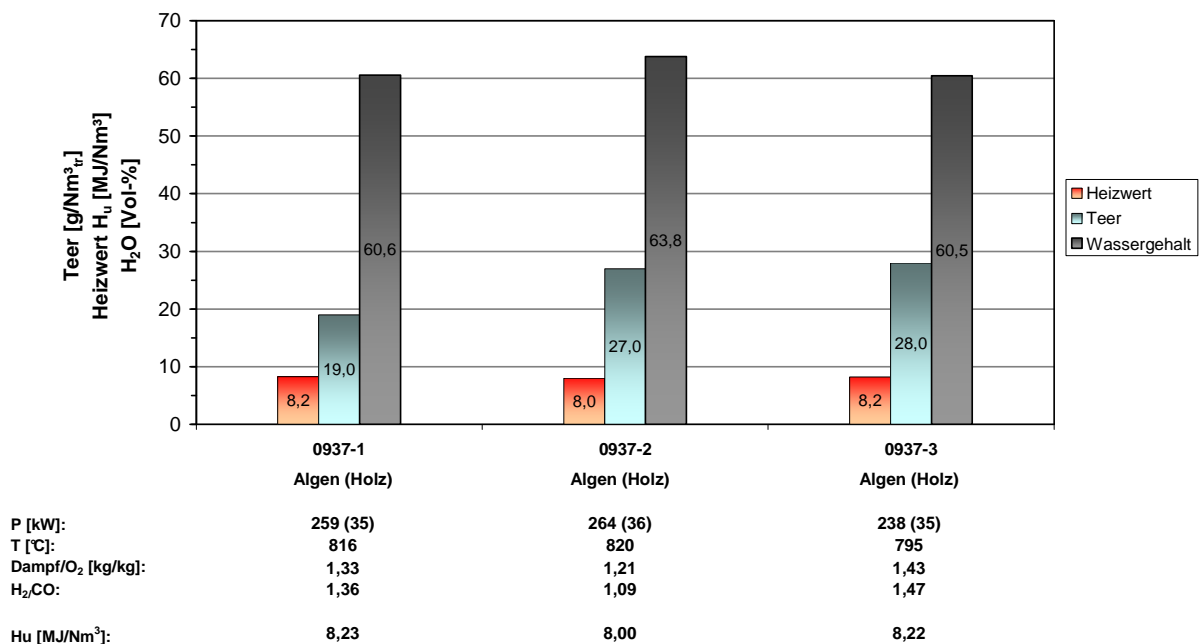


Abb. 4.2-3: Übersicht Heizwerte Permanentgas (teer- und wasserfrei) sowie Teer- und Wassergehalte des Rohgases der Versuchspunkte mit der Charge 0

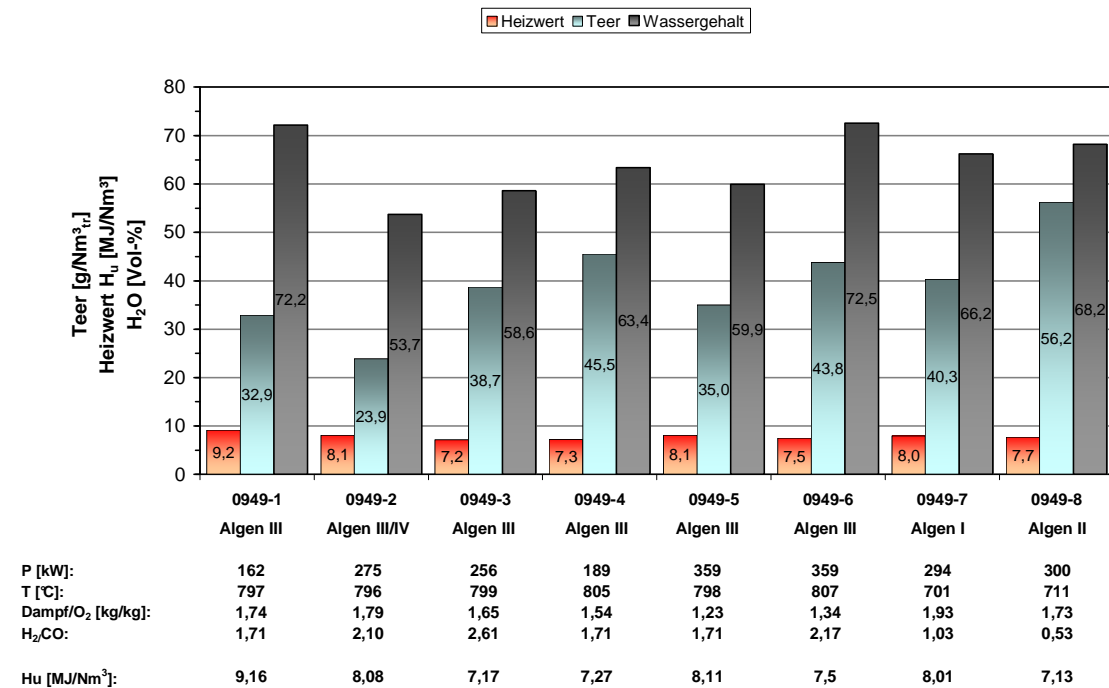


Abb. 4.2-4: Übersicht Heizwerte Permanentgas (teer- und wasserfrei) sowie Teer- und Wassergehalte des Rohgases der Versuchspunkte mit den Chargen I-IV

Die unterschiedlichen Vergasungstemperaturen haben bei den Versuchseinstellungen jedoch entgegen bisheriger Erfahrungen scheinbar keinen signifikanten Einfluss auf die Teerbildung. In Abb. 4.2-5 sind die Teergehalte beim Einsatz unterschiedlicher Biomassen über der Temperatur dargestellt.

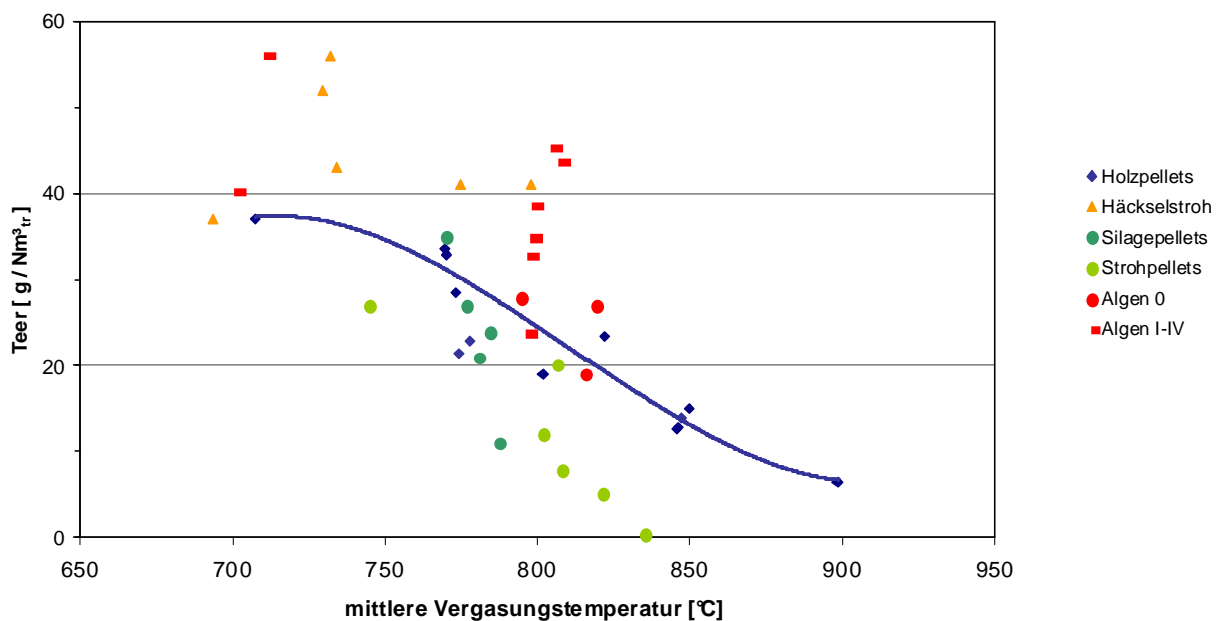
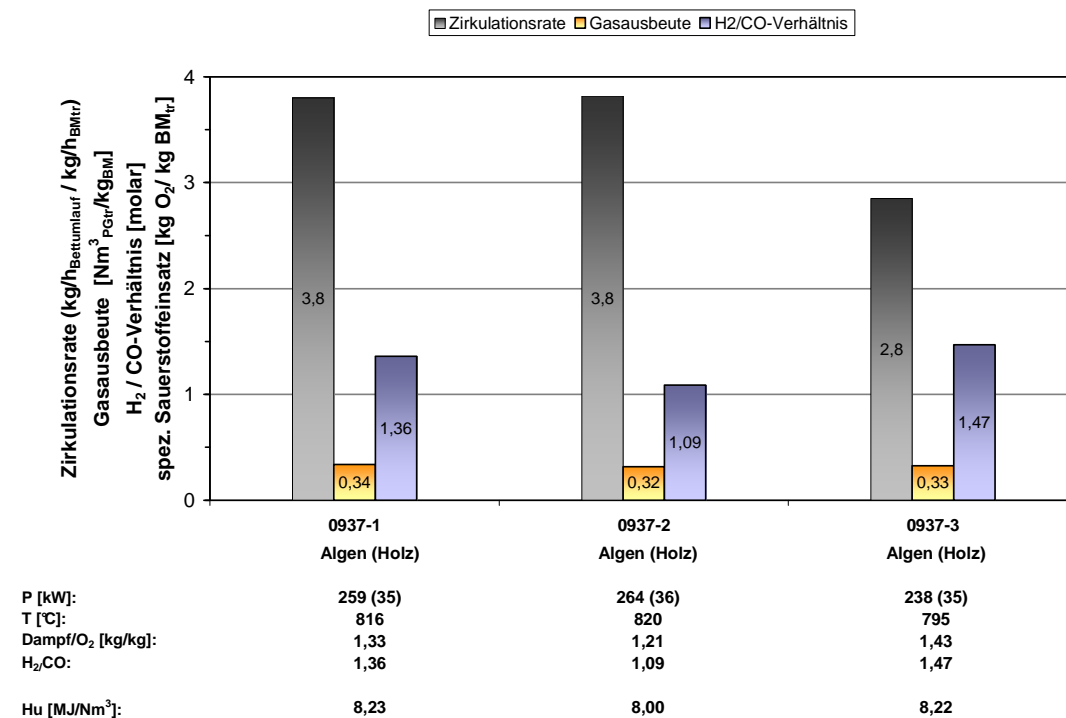


Abb. 4.2-5: Teergehalte im Rohgas aufgetragen über die mittlere Vergasungstemperatur unterschiedlicher Biomassen im Vergleich [1]

In den **Abb. 4.2-6 und 4.2-7** sind die Zirkulationsraten, die Gasausbeute und das H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis dargestellt. Die Zirkulationsrate beschreibt das Verhältnis von Bettumlauf rate [kg/h] zum trockenen Biomassestrom [kg/h]. Bisherige Vergleichswerte bei Versuchsreihen mit Holzpellets ergaben Zirkulationsraten zwischen 2 und 9. Je größer die Zirkulationsrate, desto besser zirkulieren die Feststoffe in der Wirbelschicht und desto effektiver kann der Wärmeübergang realisiert werden. (**Bem.:** Aufgrund des zugesetzten Übergangs zwischen Wirbelschicht und Zyklon wird die Zirkulationsrate für die Versuchseinstellungen 0949-7 und -8 nicht dargestellt.)

Die Gasausbeute der Algen liegt bei 0,31-0,56 Nm<sup>3</sup><sub>PG</sub>/kg<sub>BM</sub>. Vergleichbare Werte bei der Vergasung von Holzpellets liegen zwischen 0,8 und 1,3 Nm<sup>3</sup><sub>PG</sub>/kg<sub>BM</sub>.

Das H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis schwankte stark. Sieht man von einem Ausreißer ab, lag das Verhältnis generell im Bereich von 1,03 bis 2,61. Bei Versuchsreihen mit Holzpellets hat sich herausgestellt, dass das H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis sowohl mit steigender Temperatur als auch mit steigendem Dampf/O<sub>2</sub>-Verhältnis ansteigt [1].



**Abb. 4.2-6:** Zirkulationsrate, Gasausbeute und H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis der Versuchspunkte mit der Charge 0

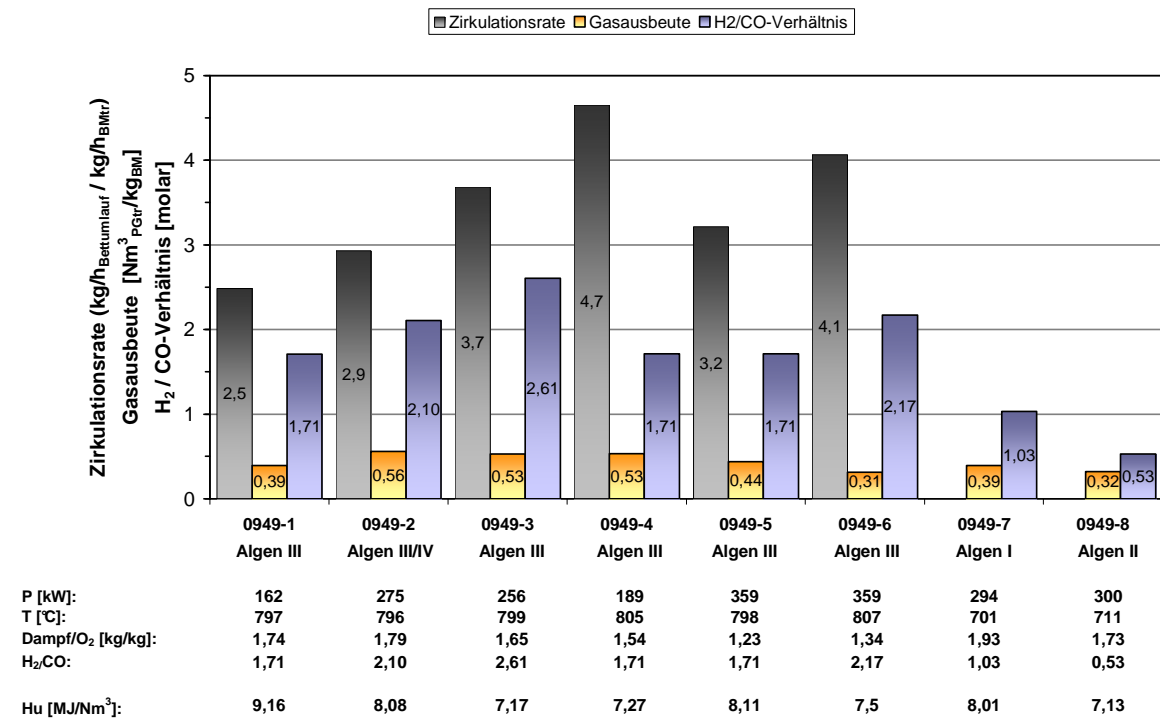


Abb. 4.2-7: Zirkulationsrate, Gasausbeute und H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis der Versuchspunkte mit den Chargen I-IV

Die Werte für den spezifischen Sauerstoffeinsatz liegen im Bereich von Erfahrungswerten bei der Vergasung von Mischholzpellets (s. Abb. 4.2-8).

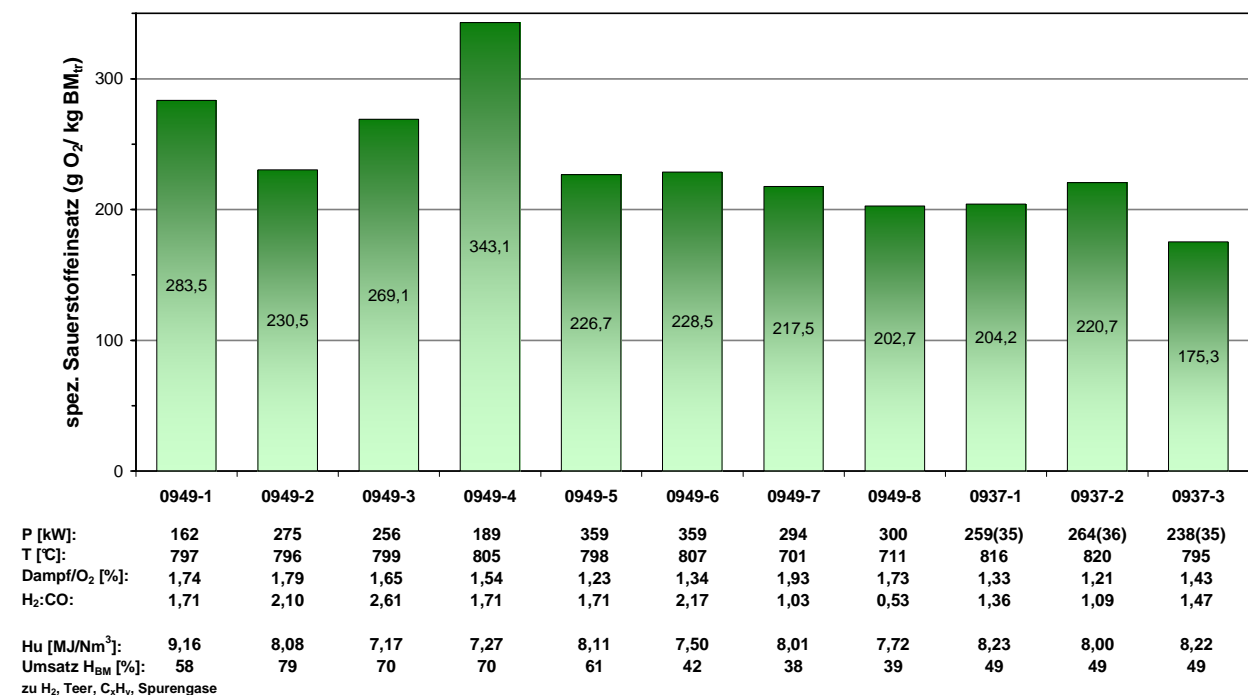
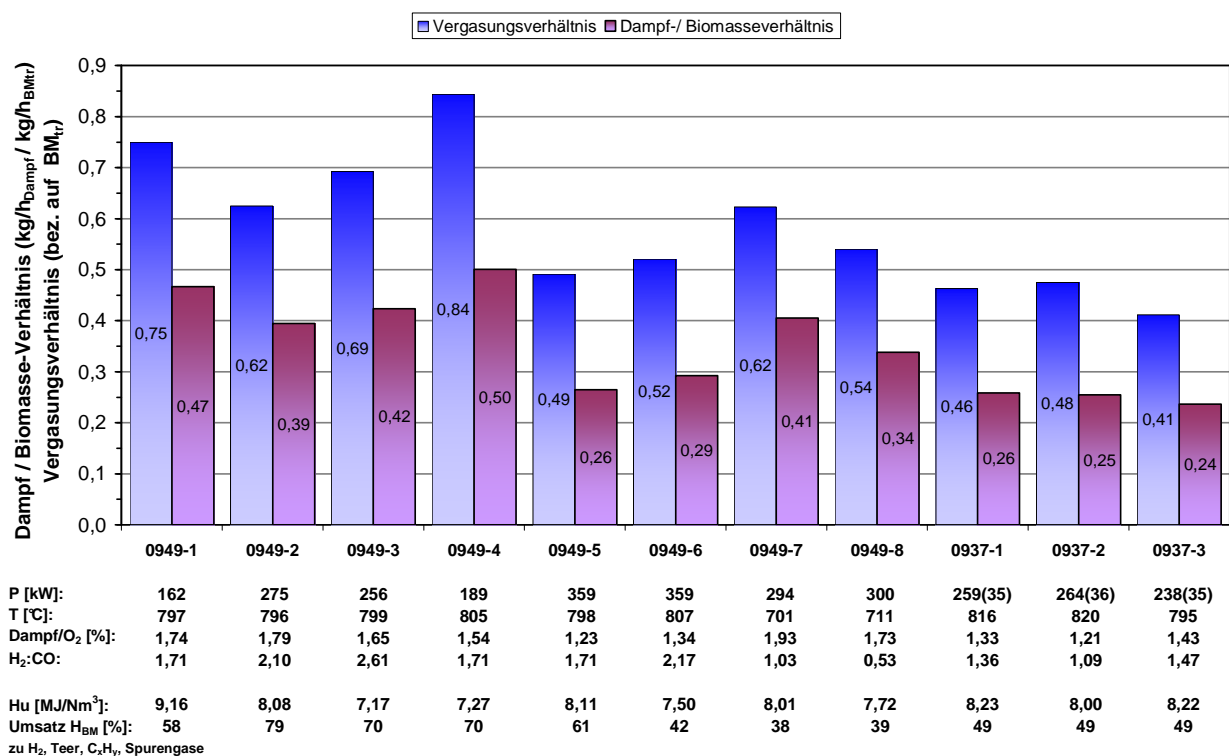


Abb. 4.2-8: Spezifischer Sauerstoffeinsatz der einzelnen Versuchseinstellungen

Zur Beurteilung des Brennstoffverhaltens im Reaktor sind ferner noch das Vergasungsverhältnis und das Dampf/Biomasse-Verhältnis von Interesse.

Das **Vergasungsverhältnis** ergibt sich als Quotient aus den zugeführten Massenströmen Prozessdampf [kg/h], Prozesssauerstoff [kg/h] und Prozessluft [kg/h] und dem Massenstrom trockener Biomasse [kg/h<sub>BMt</sub>]. Da es sich bei den Versuchen um eine Dampf/Sauerstoff-Vergasung handelte, fällt der Massenstrom Prozessluft weg. *Ergebnis:* Das Vergasungsverhältnis der Algenversuche liegt im unteren Bereich, verglichen mit Erfahrungswerten mit Mischholzpellets.

Das **Dampf/Biomasse-Verhältnis** ergibt sich aus dem Massenstrom Prozessdampf [kg/h], bezogen auf den trockenen Biomassestrom [kg/h] und liegt ebenfalls unterhalb der Erfahrungswerte (s. **Abb. 4.2-9**).



**Abb. 4.2-9:** Vergasungs- und Dampf/Biomasse-Verhältnis der einzelnen Versuchseinstellungen

Zunächst erscheinen diese niedrigen Verhältnisse von Vorteil, da sie einen geringen Einsatz von Betriebsmitteln im Verhältnis zur Biomasse ergeben. Jedoch wird dieses Verhältnis auf den gesamten Biomassestrom bezogen, unabhängig vom Aschegehalt. In diesem speziellen Fall besteht die zugeführte Biomasse zu einem großen Teil aus Sand, der das Verhältnis beeinflusst. Würde man die Verhältnisse mit der reinen nutzbaren zugeführten Biomasse bilden, würden diese entsprechend höher ausfallen und vermutlich oberhalb der ermittelten Werte für Holzpellets liegen.

### **4.3 Einfluss der Algenaufbereitung**

Aufgrund der ähnlichen Verfahrensparameter lässt sich der Einfluss der Biomasse bei den Versuchseinstellungen 0949-2 und 0949-3 betrachten. Bei der Versuchseinstellung 0949-2 wurde der Charge III die Charge IV zugesetzt. Diese ist charakterisiert durch einen geringeren Grobanteil, da es sich um den aufbereiteten Siebdurchgang handelt. Die Charge IV besitzt einen höheren Anteil an Flüchtigen und einen etwas höheren Heizwert als die Charge III. Der Heizwert des gemischten Einsatzmaterials sollte damit ebenfalls etwas höher liegen als der Heizwert der Charge III. Der Anteil der Charge IV an der Gesamtmasse betrug ca. 12%.

An den Ergebnissen verdeutlicht sich der niedrigere Heizwert (0949-3) in einem höheren Vergasungsverhältnis und einem höheren Sauerstoffbedarf für gleichbleibende Vergasungstemperaturen sowie einem höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt im Synthesegas. Die eingespeiste Leistung der Begleitheizung ist ebenfalls bei der zweiten Versuchseinstellung höher.

Der Versuchspunkt 0949-2 weist in folgenden Punkten bessere Ergebnisse auf:

- höherer Heizwert des Synthesegases
- höhere Gasausbeute
- weniger Teer und Wasser im Synthesegas
- höherer Umsatz des Wasserstoffs der Biomasse in Synthesegas und Teer
- höhere Wirkungsgrade.

Diese Ergebnisse verdeutlichen den Einfluss einer effektiveren Aufbereitung der Biomasse mit daraus resultierendem höheren Heizwert.

Weiterhin lassen sich die Versuchspunkte 0949-5 und 0949-6 miteinander vergleichen. Diese beiden Versuchseinstellungen unterscheiden sich in den Temperaturniveaus und anderen Dampf/Sauerstoff-Verhältnissen. Beide Versuchseinstellungen wurden jedoch mit der gleichen Biomasse (Charge III) durchgeführt. Auffällig ist das ansteigende H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis mit steigender Reaktortemperatur und größerem Dampf-/Sauerstoffverhältnis. Die Ergebnisse aus Versuchen mit Holz wurden somit bestätigt. Jedoch weist der Versuchspunkt 0949-6 einen höheren Teergehalt auf, was den Erkenntnissen aus den Holzversuchen (s. Abb. 4.2-5) widerspricht.

### **4.4 Analysen der Filter-, Siphon- und Bettaschen**

In **Tab. 4.4-1** sind die organischen, anorganischen und Gesamtkohlenstoffgehalte der Filter-, Bett- und Siphonaschen dargestellt. Aufgrund von Problemen in der Analytikroutine sind bei einigen Bett- und Siphonaschen die anorganischen Kohlenstoffgehalte etwas höher als die gemessenen Gesamtkohlenstoffgehalte. Bei diesen Analysen kann davon ausgegangen werden, dass der Gesamtkohlenstoffgehalt dem anorganischen Kohlenstoffgehalt entspricht.

Allgemein sind die Kohlenstoffgehalte aller Filteraschen relativ gering, was auf einen guten Kohlenstoffumsatz hinweist. Auffällig sind wiederum die Ergebnisse der Versuchseinstellungen 0649-6 und -7 (-8). Hierbei sind die ermittelten Kohlenstoffgehalte etwas höher. Der Grund wird in der fehlenden Zirkulation der Wirbelschicht liegen.

**Tab. 4.4-1:** Kohlenstoffgehalte der Filter-, Bett- und Siphonaschen

Lab.Nr.	Probenbezeichnung	Total Carbon (%)	Total Inorganic Carbon(%)	Total Organic Carbon(%)
<b>Versuchsnr.: 0949-1</b>		<b>Algen III</b>		
	Filterasche 30.11.09, 15:30 (Vnr 1)	9,5 %	0,80 %	8,7 %
	Bettasche 30.11.09 15:30 ( Vnr 1)	0,12 %	0,12 %	0 %
	Siphonasche 30.11.09 14:20 (V nr 1)	0,18 %	0,08 %	0,09 %
<b>Versuchsnr.: 0949-2</b>		<b>Algen III</b>		
	Filterasche 30.11.09, 21:00 (0949-2)	7,8 %	2,2 %	5,7 %
	Bettasche 30.11.09 21:00 ( 0949-2)	0,49 %	0,58 %	0 %
<b>Versuchsnr.: 0949-3</b>		<b>Algen III</b>		
	Filterasche 01.12.09, 11:30 (0949-3)	5,6 %	1,1 %	4,4 %
	Bettasche 01.12.09 11:30( 0949-3)	0,21 %	0,33 %	0 %
	Siphonasche 01.12..09 11:15(0949-3)	0,37 %	0,65 %	0 %
<b>Versuchsnr.: 0949-4</b>		<b>Algen III</b>		
	Filterasche 01.12.09, 16:00 (0949-4)	3,7 %	1,0 %	2,7 %
	Bettasche 01.12.09 16:00 ( 0949-4)	0,10 %	0,16 %	0 %
	Siphonasche 01.12..09 16:00 (0949-4)	0,27 %	0,21 %	0,06 %
<b>Versuchsnr.: 0949-5</b>		<b>Algen III</b>		
	Filterasche 01.12.09, 21:00 (0949-5)	6,6 %	1,9 %	4,6 %
	Bettasche 01.12.09 21:00( 0949-5)	0,41 %	0,47 %	0 %
	Siphonasche 01.12.09 21:00 (0949-5)	0,38 %	0,72 %	0 %
<b>Versuchsnr.: 0949-6</b>		<b>Algen III</b>		
	Bettasche 02.12.09 11:00( 0949-6)	1,5 %	1,7 %	0 %
	Siphonasche 02.12..09 11:00 (0949-6)	2,5 %	2,6 %	0 %
<b>Versuchsnr.: 0949-7</b>		<b>Algen I</b>		
	Bettasche 4.12.09 10:45 (0949-7)	1,7 %	1,8 %	0 %
	Siphonasche 4.12.09 10:50 (0949-7)	4,7 %	2,4 %	2,3 %
<b>Versuchsnr.: 0949-8</b>		<b>Algen II</b>		
	Bettasche 4.12.09 17:00 (0949-8)	1,0 %	1,2 %	0 %
<b>Versuchsnr.: 0937-1</b>		<b>Algen 0</b>		
	Filterasche 0937-1 vom 07.09.09, 12:30 Uhr	17,5 %	1,03 %	16,4 %
	Siphonasche 0937-1 vom 07.09.09, 12:30 Uhr	0,3 %	0,07 %	0,24 %
	Bettasche 0937-1 vom 07.09.09, 12:30 Uhr	0,12 %	0,06 %	0,06 %
<b>Versuchsnr.: 0937-2</b>		<b>Algen 0</b>		
	Filterasche 0937-2 vom 07.09.09, 17:00 Uhr	11,8 %	0,34 %	11,5 %
	Siphonasche 0937-2 vom 07.09.09, 17:00 Uhr	0,13 %	0,03 %	0,10 %
	Bettasche 0937-2 vom 07.09.09, 17:00 Uhr	0,07 %	0,03 %	0,04 %
<b>Versuchsnr.: 0937-3</b>		<b>Algen 0</b>		
	Filterasche 0937-3 vom 07.09.09, 21:00 Uhr	13,3 %	0,36 %	12,9 %
	Siphonasche 0937-3 vom 07.09.09, 21:00 Uhr	1,12 %	0,08 %	1,05 %
	Bettasche 0937-3 vom 07.09.09, 21:00 Uhr	0,23 %	0,06 %	0,17 %

## 5. REM-Aufnahmen und EDX-Analysen

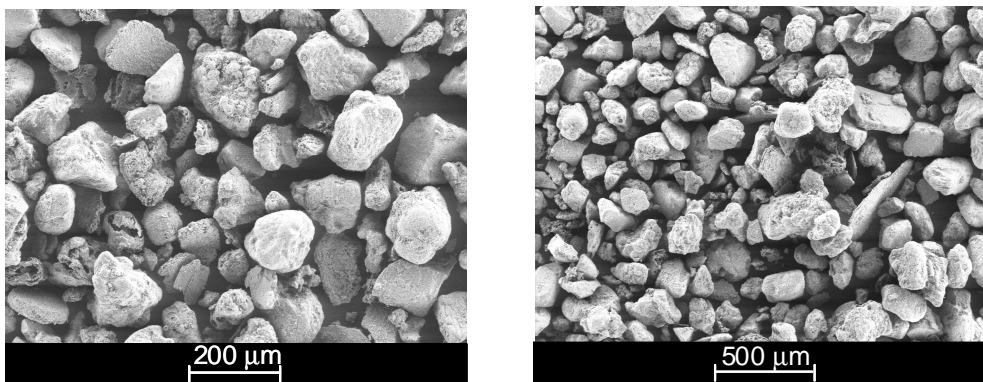
Für REM-Aufnahmen einschließlich EDX-Analysen wurden die Filter- und Siphonascheprouben der zweiten Versuchswoche an das Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der TU-Clausthal weitergegeben.

Beim Vergleich der Proben unterschiedlicher Herkunft 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.

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

In den Übersichtsaufnahmen der einzelnen Ascheprouben waren keine groben Versinterungen zu erkennen (s. **Abb. 5-1**). Daher sind im Folgenden hauptsächlich starke Vergrößerungen einzelner Partikel dargestellt.



**Abb. 5-1:** REM-Aufnahmen der Siphonasche 0949-1

Die Algenaschen weisen teilweise sehr interessante Partikelformen auf. Beispielsweise in **Abb. 5-2** erkennt man die ovalen Gitterstrukturen. Hierbei handelt es sich vermutlich um die Struktur einer Kieselalge, welche während der Vergasung nicht zerstört wurde. Größere Ansammlungen dieser Morphologien lassen sich vor allem in den Siphonaschen wiederfinden (s. **Abb. 5-3**). Daraus lässt sich folgern, dass der hohe Silicium- und Aschegehalt in den Brennstoffanalysen zu einem größeren Anteil aus den Algen selbst stammt. *Eine mechanische Abtrennung ist somit nicht möglich.* Vermutlich werden die Strukturen bei einer längeren Verweilzeit im Reaktor weiter zersetzt, jedoch nicht zerstört.

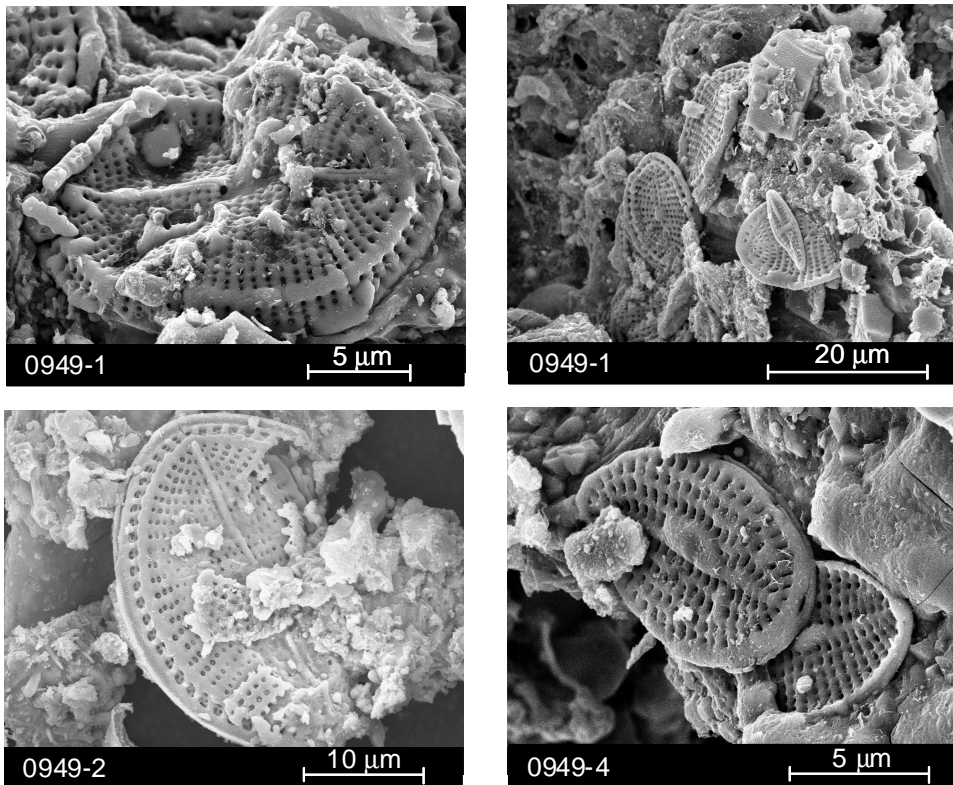


Abb. 5-2: Filteraschen mit verbliebenen Algenstrukturen

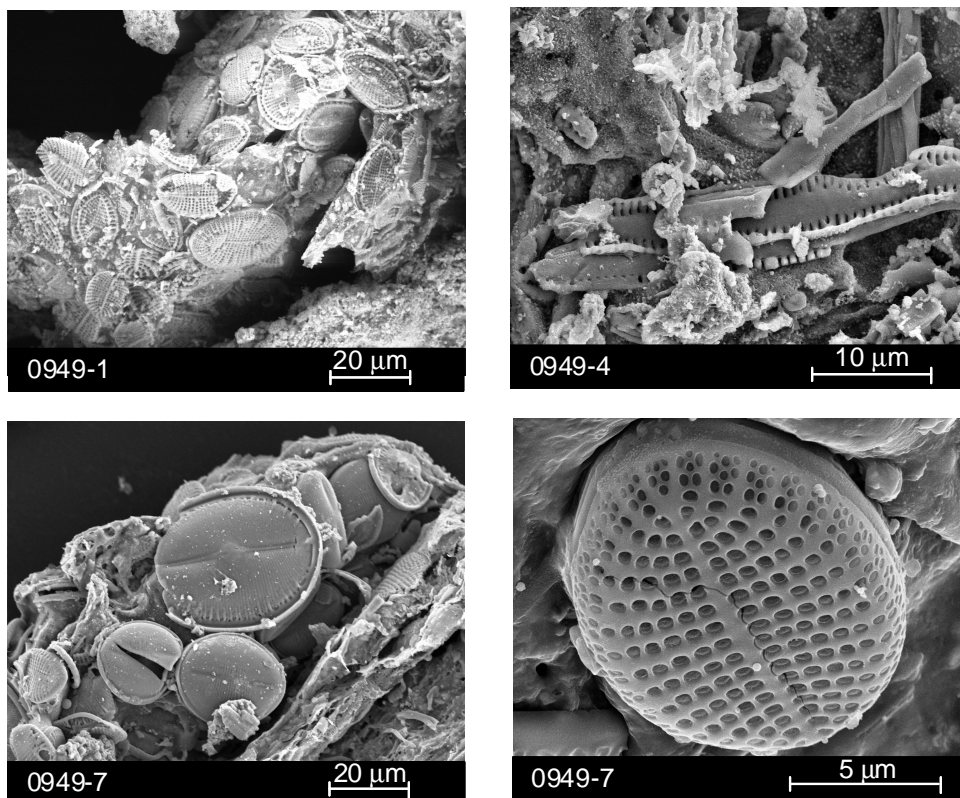
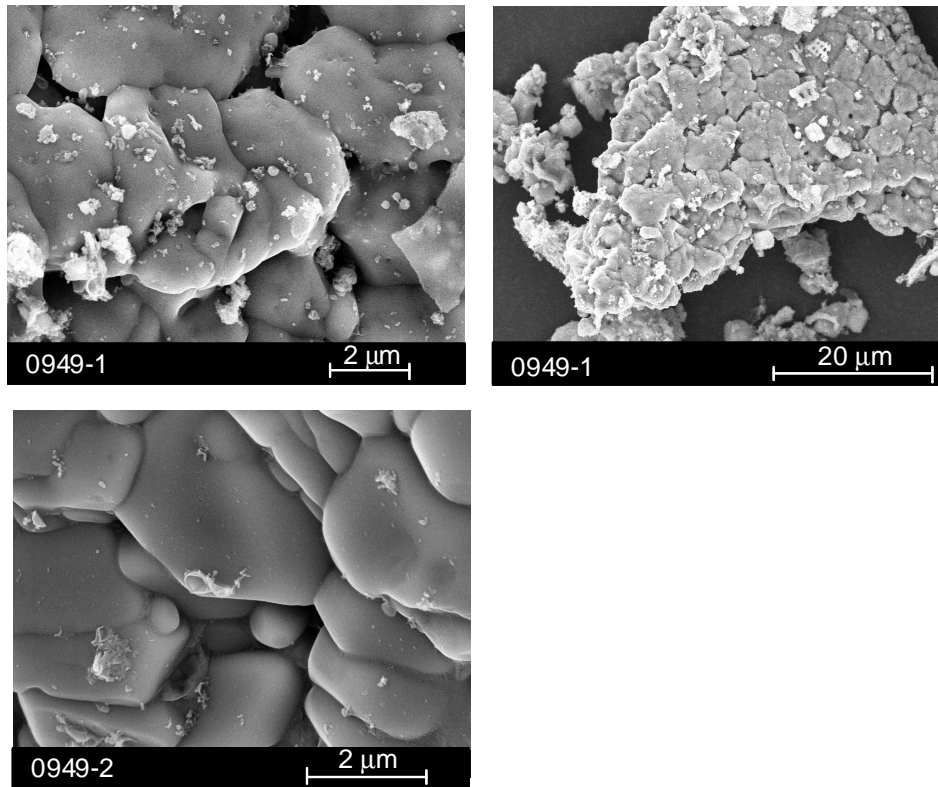


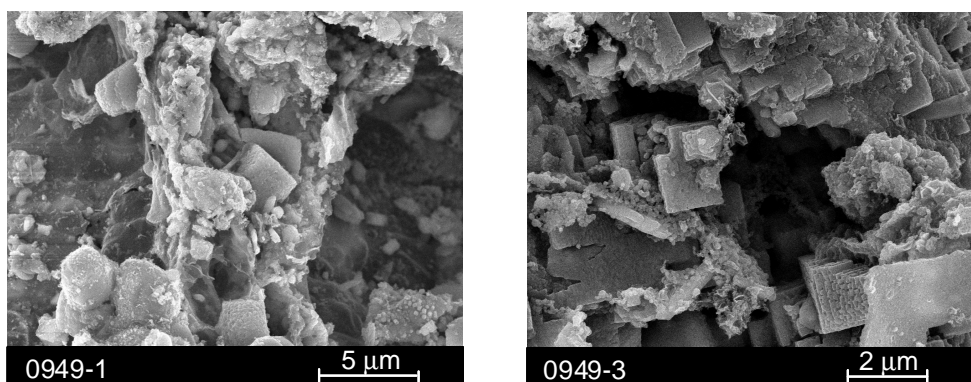
Abb. 5-3: Siphonaschen mit verbliebenen Algenstrukturen

In den geringen Auflösungen der Filteraschen lassen sich weiterhin anfängliche Sintervorgänge vermuten, besonders in Bereichen, in denen die Feinstpartikel an den Rändern leicht abgerundet sind (s. **Abb. 5-4**). Es ist deutlich zu erkennen, dass Schmelzvorgänge noch nicht eingesetzt haben. Ansonsten weisen die Filterascheproben untereinander keine bemerkenswerten Unterschiede auf.



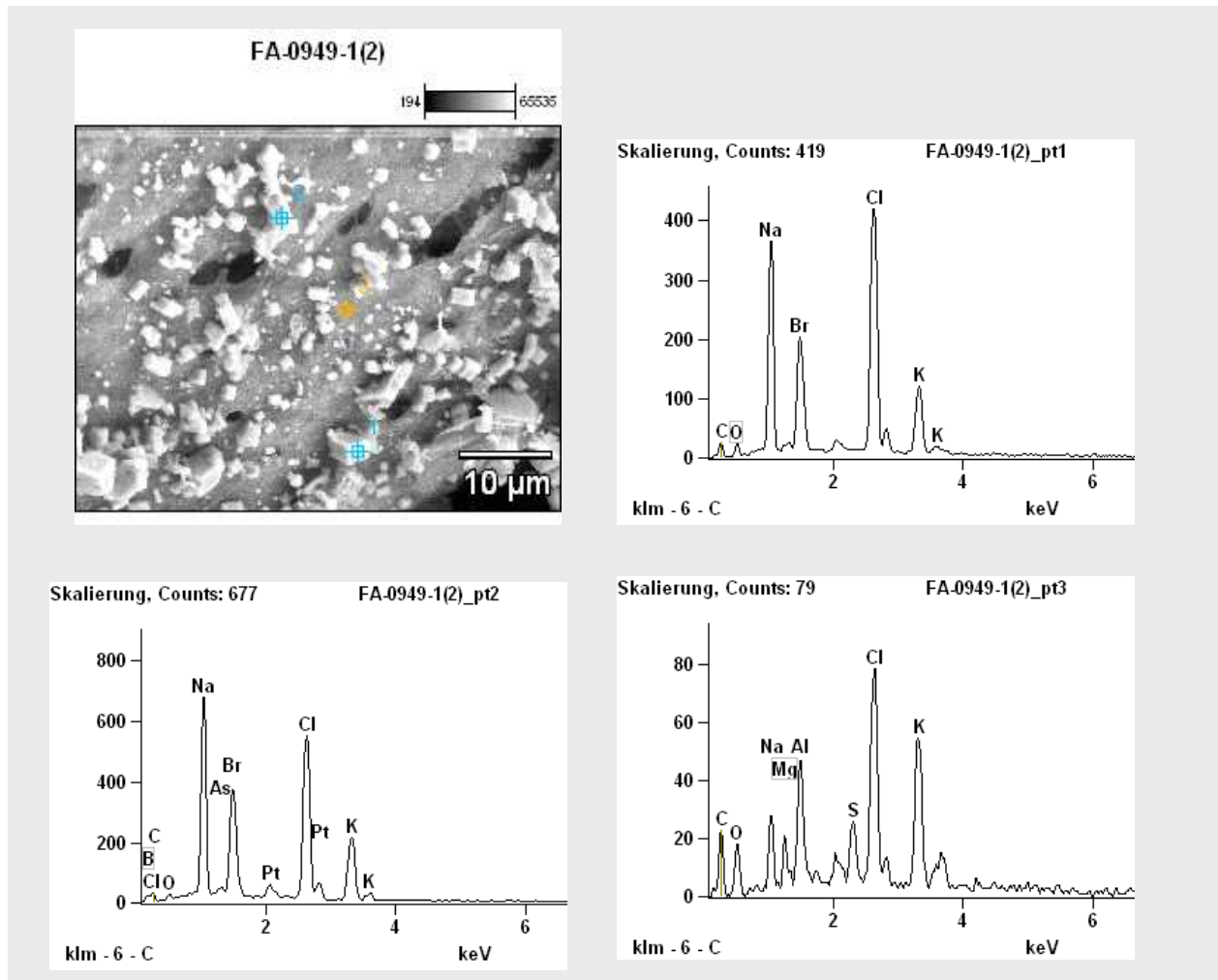
**Abb. 5-4:** Filteraschen: Beginnende Sintervorgänge

In **Abb. 5-5** sind deutlich die geometrischen Formen von Salzen in der Filterasche erkennbar. Diese lassen sich vereinzelt auch auf Bildern der Siphonaschen finden.



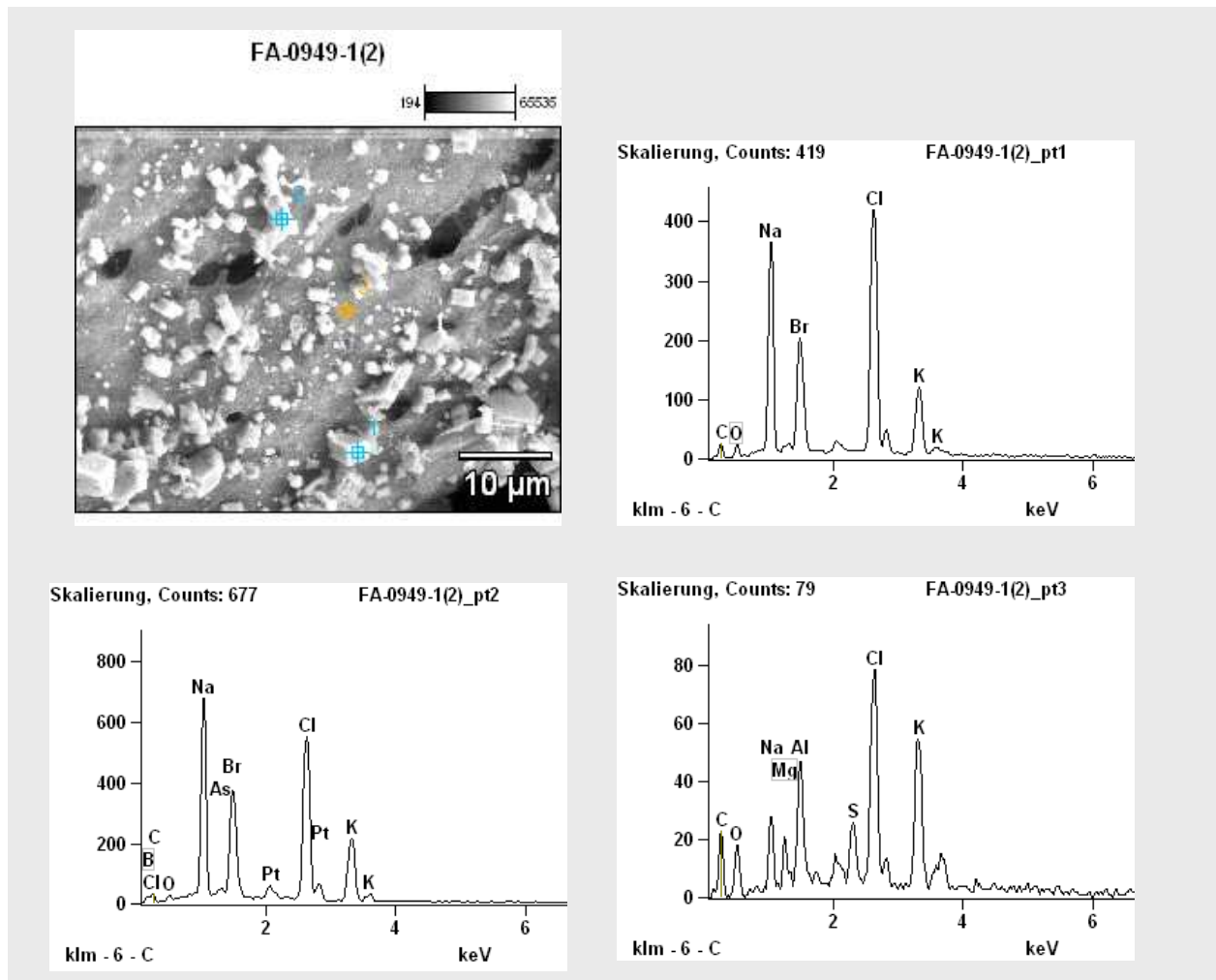
**Abb. 5-5:** Filteraschen: Fragmente mit Salzpartikeln

Gemäß der EDX-Analysen handelt es sich v.a. um Chlorsalze der Alkalimetalle Natrium und Kalium (s. **Abb. 5-6**).



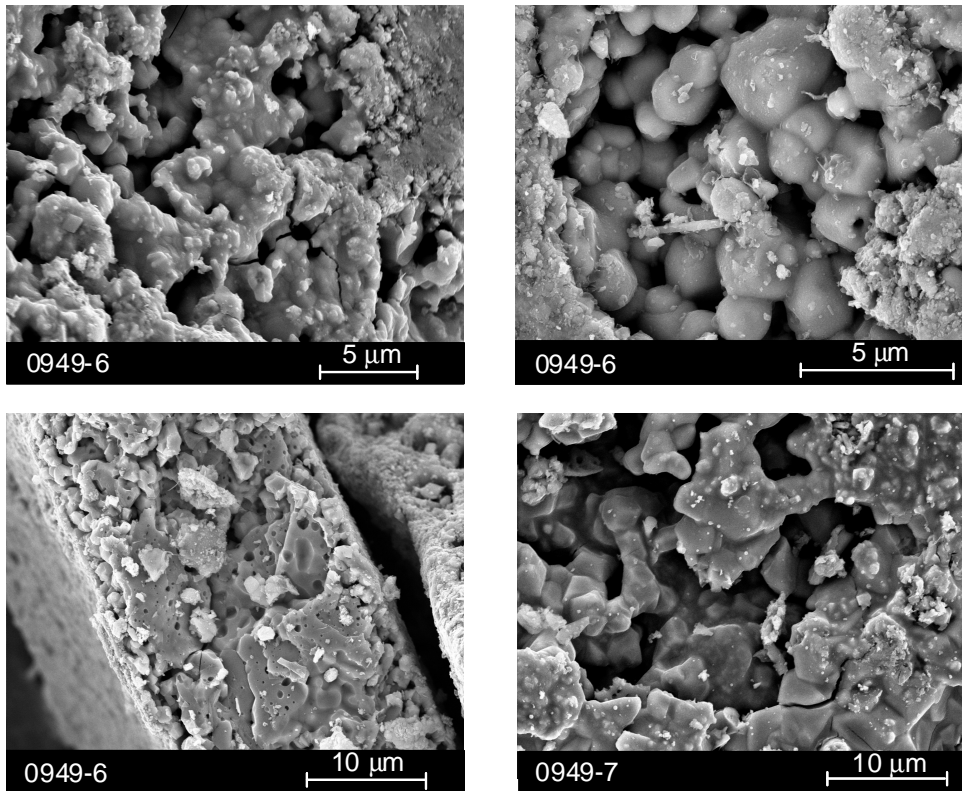
**Abb. 5-6:** EDX-Analysen eines Filteraschepartikels

Die Erdalkalimetalle und das Silizium scheinen vorzugsweise in oxidischen Verbindungen vorzuliegen (s. **Abb. 5-7**).



**Abb. 5-7:** EDX-Analysen eines Filteraschepartikels

In den detaillierten Darstellungen der Siphonaschen sind im Gegensatz zu den Filteraschen deutliche Sinter- und Schmelzvorgänge zu erkennen. Besonders deutlich sind diese in **Abb. 5-8** bei den Versuchseinstellungen 0949-6 und -7 zu erkennen. Nach diesen Probenahmen musste die Wirbelschicht aufgrund von Verbackungen über den gesamten Querschnitt des Reaktors abgefahren werden.



**Abb. 5-8:** Siphonaschen: Sinter- und Schmelzvorgänge

Die Bilder und Zusammensetzungen der Filter – und der Siphonaschen lassen keine deutlichen Unterschiede erkennen. Allgemein werden den meisten Partikeln eine Mischung aus folgenden Elementen zugeordnet: Kohlenstoff C, Sauerstoff O, Magnesium Mg, Natrium Na, Silicium Si, Phosphor P, Schwefel S, Chlor Cl, Kalium K, Calcium Ca, Aluminium Al, Brom Br. Diese Mischung an Elementen spiegelt die Zusammensetzung der Algenbiomasse mit den hohen Gehalten an Spurenelementen und Salzen wieder.

## 6. Betriebserfahrungen

Nach einem Versuchszeitraum von ca. 50 Stunden musste in der zweiten Versuchswoche der Betrieb unterbrochen werden, da über den Bettascheaustrag kein Material abgelassen werden konnte. Nach dem Öffnen der Wirbelschicht stellte sich heraus, dass der Reaktor über die gesamte Höhe mit einer ca. 3 cm dicken Materialschicht ausgekleidet war. Diese Verbackungen resultierten offensichtlich aus einer Überschreitung des Ascheschmelzpunktes (s. **Abb. 6-1+2**).



**Abb. 6-1:** Verbackungen im oberen Bereich der Wirbelschicht nach Entfernung des unteren Teils



**Abb. 6-2:** Verbackungen nach Entfernung aus der Wirbelschicht

Vermutlich hat sich die Biomasse beim Eintritt in die heiße Wirbelschicht und das zirkulierende Wirbelbett von dem inerten Sandanteil sehr schnell getrennt. Aufgrund der hohen Gehalte an Mineralien wie Kalium und Natrium könnte der Ascheschmelzpunkt der reinen Organik um einiges niedriger liegen als die ermittelten Werte anzeigen. Ursache: Bei der Ermittlung des Ascheschmelzverhaltens wird aus einer vorher veraschten Probe ein Quader geformt. Dieser wird langsam erwärmt und die Änderung der Form mikroskopisch festgehalten. Aufgrund des hohen Anteils an Sandpartikeln haben diese vermutlich die Quaderform in der Analyse aufrecht erhalten, während die Organik bereits geschmolzen ist.

Um diese Vermutung zu überprüfen, wurde eine weitere Algenprobe der Charge II hinsichtlich des Ascheerweichungsverhaltens analysiert. Zuvor wurde die Gesamtprobe jedoch einem Zickzacksichter zugeführt, um den Sandanteil so weit wie möglich zu reduzieren. Die Ergebnisse der Ascheanalytik sind im Vergleich zu den vorherigen in **Tab. 6-1** dargestellt. Auch nach der Abtrennung der schweren Fraktion im Sichter sind Sinterbeginn und die Ascheerweichungstemperatur nicht signifikant niedriger, jedoch lässt sich bei Betrachtung aller Temperaturen eine Tendenz zur größeren Reaktion auf die Temperatur erkennen.

**Tab. 6-1:** Brennstoffanalyse Algen (i.an: im angelieferten Zustand)

		0	I	II	III	IV	Organik	
		Sept. '09	November 2009					
Atmosphäre		oxidierend						
Sinterbeginn	T <sub>S</sub>	914	810	770	981	1028	826	°C
Erweichungstemperatur	T <sub>E</sub>	1141	930	1000	1180	1190	987	°C
Halbkugeltemperatur	T <sub>H</sub>	1289	1317	1287	1236	1232	1233	°C
Fließtemperatur	T <sub>F</sub>	>1380	1320	1310	> 1300	1282	1248	°C

Nach Entfernung der Verbackungen im Reaktor wurde der Versuchsbetrieb fortgesetzt. Während des Betriebes stellte sich die Vermutung ein, dass der Übergang zwischen Wirbelschicht und Zyklon ebenfalls voll Material stand. Dies bestätigte sich nach Versuche (s. **Abb. 6-3**). Damit war ein zirkulierendes Wirbelbett unmöglich. Während der letzten Betriebsstunden wurde sämtliches Inertmaterial mit dem Gas mitgetragen und sammelte sich in der Nachbrennkammer an. Diese musste regelmäßig händisch freigeräumt werden, um den Gasweg nicht zu blockieren.



**Abb. 6-3:** Zugesehter Übergang von der Wirbelschicht in den Zyklon

Der Austrag des heißen Inertmaterials während des regulären Betriebs über den Bettascheaustrag bereitete apparatetechnisch keine Probleme. Die Erwärmung der Armaturen hielt sich in akzeptablen Grenzen.

## 7. Zusammenfassung

Mit dem gelieferten Algenmaterial von ca. 13 t<sub>TS</sub> konnten 11 Versuchseinstellungen realisiert werden. Der Algendurchsatz betrug beim Einsatz der ersten Charge ca. 137-153 kg/h (238-264 kW). Die Vergasung konnte aufgrund des hohen Ascheanteils der Biomasse und dem damit verbundenen geringen Heizwert des Einsatzmaterials nur mit Zusatz von Mischholzpellets aufrecht erhalten werden. Dieser Zusatz lag bei 7-8 kg/h, was einer thermischen Leistung von 35-36 kW entspricht.

Die Chargen I-IV konnten aufgrund einer überarbeiteten Aufbereitung und besseren Sandabtrennung ohne Zudosierung eingesetzt werden. Die thermische Leistung lag bei 162 bis 359 kW, was einem Biomasseinput von 69-152 kg/h entspricht.

Ein Zusatz von Bettmaterial in Form von Quarzsand war aufgrund des hohen Sandanteils in der Biomasse nicht nötig. Aufgrund der hohen analysierten Ascheerweichungstemperaturen wurde kein Branntkalk zudosiert.

Allgemein konnten nur geringe Gasqualitäten (hoher CO<sub>2</sub>-Gehalt) mit relativ niedrigem Kaltgaswirkungsgrad erzielt werden. Die Kohlenstoffumsatzgrade liegen auf einem relativ hohen Niveau. Hierbei wird jedoch nicht unterschieden, ob die Umsetzung zu CO oder zu CO<sub>2</sub> stattfindet.

Das erzeugte Synthesegas hat einen niedrigen Heizwert von 7,1 - 9,2 MJ/Nm<sup>3</sup> (teer- und wasserfrei).

Die erzielten H<sub>2</sub>/CO-Verhältnisse lagen mit 1,03-2,61 in einem üblichen Bereich für Biomassen, sind teilweise sogar etwas höher und damit für die Anforderungen einer Fischer-Tropsch-Synthese ausreichend (H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis 2,1 : 1 bei cobaltbasiertem KAT).

Die Teerbildung mit einem Teergehalt von 19-56 g/Nm<sup>3</sup><sub>tr</sub> lag besonders im Bereich von 800°C zum Teil deutlich über den durchschnittlichen Werten beim Einsatz von Holzpellets.

Der hohe Sandgehalt der Algen führte zu einem hohen internen Leistungsbedarf zum Aufheizen des Einsatzmaterials, zu einem erhöhten Anlagenverschleiß aufgrund der abrasiven Wirkung, sowie zu einem hohen Wärmeverlust durch den intensiven Austrag des Bettmaterials. Die Wirkungsgrade lagen unterhalb der Erfahrungswerte mit anderen Biomassen (s.o.).

Die Aufbereitung des Einsatzmaterials bei den Chargen I-IV zeigte Erfolge. So war ein eigenständiger Vergasungsbetrieb ohne Zusatz von Holzpellets möglich, das H<sub>2</sub>:CO-Verhältnis stieg generell an und die Gasausbeute war höher.

Trotz der signifikant verbesserten Aufbereitung im Projektverlauf war der Aschegehalt der Algen bis zum Schluß sehr hoch und dementsprechend der Heizwert vergleichsweise gering. Der hohe Aschegehalt kann dabei an dem eingesetzten Kieselalgenanteil liegen, da deren Gerüst aus Silicium besteht.

## 8. Unterschrift

*Clausthal-Zellerfeld, den 29.01.2010*

Ort, Datum

Dr.-Ing. Stefan Vodegel

## 9. Verwendete Quellen

- [1] Teilvorhaben der CUTE: *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
- [2] *Eintrag von gehäckseltem Stroh in eine Zirkulierende Wirbelschicht*, CUTE-Institut GmbH, gefördert vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), FKZ 22011808, 2008-09
- [3] *RENEW - Renewable Fuels for Advanced Power Trains*, EU-Vorhaben, Contract No SES6-CT-2003-502705, 1.01.2004 bis 31.12.2007, Deliverable 2.3.6, Januar 2007.

## 10. Abkürzungsverzeichnis

<b>BM</b>	<b>B</b> iomasse
<b>BtL</b>	<b>B</b> iomass to <b>L</b> iquid
<b>EDX</b>	Energiedispersive Röntgenstrahlen-Analyse ( <b>E</b> nergy <b>D</b> ispersive <b>X</b> -Ray Analysis)
<b>PG</b>	<b>P</b> ermanentgas
<b>REM</b>	<b>R</b> asterelektronen <b>m</b> ikroskop
<b>TS</b>	<b>T</b> rockensubstanz
<b>ZWS</b>	<b>Z</b> irkulierende <b>W</b> irbelschicht

## 11. Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1-1</b>	Zirkulierende Wirbelschicht mit Messstellenerfassung	S. 04
<b>Abb. 1-2</b>	Photo der Versuchsanlage	S. 05
<b>Abb. 1-3</b>	Gasreinigung nach dem Reaktor	S. 05
<b>Abb. 2-1</b>	Siebfraktionen der Charge 0	S. 08
<b>Abb. 2-2</b>	Glührückstände der einzelnen Siebfraktionen	S. 08
<b>Abb. 2-3</b>	Massenanteile der Glührückstände der einzelnen Fraktionen bezogen auf die Gesamtprobe	S. 09
<b>Abb. 2-4</b>	Darstellung der Siebung und der Verteilung des Glührückstandes bezogen auf die Gesamtprobe	S. 09
<b>Abb. 4.1-1</b>	Kaltgaswirkungsgrad, Kohlenstoffumsatzgrad und Vergaserwirkungsgrad der einzelnen Versuchspunkte mit der Charge 0	S. 13
<b>Abb. 4.1-2</b>	Kaltgaswirkungsgrad, Kohlenstoffumsatzgrad und Vergaserwirkungsgrad der einzelnen Versuchspunkte mit der Chargen II-IV	S. 13
<b>Abb. 4.2-1</b>	Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei	S. 14
<b>Abb. 4.2-2</b>	Permanentgaszusammensetzung aus Holzpellets, teer- und wasserfrei	S. 15
<b>Abb. 4.2-3</b>	Übersicht Heizwerte Permanentgas (teer- und wasserfrei) sowie	S. 15

---

	Teer- und Wassergehalte des Rohgases der Versuchspunkte mit der Charge 0	
<b>Abb. 4.2-4</b>	Übersicht Heizwerte Permanentgas (teer- und wasserfrei) sowie Teer- und Wassergehalte des Rohgases der Versuchspunkte mit der Charge I-IV	S. 16
<b>Abb. 4.2-5</b>	Teergehalte im Rohgas aufgetragen über die mittlere Vergasungstemperatur unterschiedlicher Biomassen im Vergleich	S. 16
<b>Abb. 4.2-6</b>	Zirkulationsrate, Gasausbeute und H <sub>2</sub> /CO-Verhältnis der Versuchspunkte mit der Charge 0	S. 17
<b>Abb. 4.2-7</b>	Zirkulationsrate, Gasausbeute und H <sub>2</sub> /CO-Verhältnis der Versuchspunkte mit den Chargen I-IV	S. 18
<b>Abb. 4.2-8</b>	Spezifischer Sauerstoffeinsatz der einzelnen Versuchseinstellungen	S. 18
<b>Abb. 4.2-9</b>	Vergasungs- und Dampf/Biomasse-Verhältnis der einzelnen Versuchseinstellungen	S. 19
<b>Abb. 5-1</b>	REM-Aufnahmen der Siphonasche 0949-1	S. 22
<b>Abb. 5-2</b>	Filteraschen mit verbliebenen Algenstrukturen	S. 23
<b>Abb. 5-3</b>	Siphonaschen mit verbliebenden Algenstrukturen	S. 23
<b>Abb. 5-4</b>	Filteraschen: Beginnende Sintervorgänge	S. 24
<b>Abb. 5-5</b>	Filteraschen: Fragmente mit Salzpartikeln	S. 24
<b>Abb. 5-6</b>	EDX-Analysen eines Filteraschepartikels	S. 25
<b>Abb. 5-7:</b>	EDX-Analysen eines Filteraschepartikels	S. 26
<b>Abb. 5-8</b>	Siphonaschen: Sinter- und Schmelzvorgänge	S. 27
<b>Abb. 6-1</b>	Verbackungen im oberen Bereich der Wirbelschicht nach Entfernung des unteren Teils	S. 28
<b>Abb. 6-2</b>	Verbackungen nach Entfernung aus der Wirbelschicht	S. 28
<b>Abb. 6-3</b>	Zugesetzter Übergang von der Wirbelschicht in den Zyklon	S. 29

## 12. Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 2-1</b>	Elementar- und Spurenanalyse	S. 06
<b>Tab. 2-2</b>	Brennstoffanalyse	S. 06
<b>Tab. 4.4-1</b>	Kohlenstoffgehalte der Filter-, Bett- und Siphonaschen	S. 21
<b>Tab. 6-1</b>	Brennstoffanalyse Algen	S. 29

## Nachtrag vom 25.10.10

Restmengen der gelieferten Algenbiomasse konnten während einer Versuchswoche am 05.03.2010 eingesetzt werden. Bei den Algen handelte es sich um Restmaterial aus der zweiten Lieferung (Charge II). Diese konnten ohne weitere Zudosierung heizwertreichen Materials umgesetzt werden. Mit den Algen wurde eine Versuchsdauer von ca. 9 Stunden realisiert.

Die thermische Leistung lag mit 273 kW und einem Biomasseinput von ca. 135 kg/h im mittleren Bereich der bereits durchgeführten Algenversuche. Mit derselben Materialcharge wurden bereits Vergasungsversuche bei einer thermischen Leistung von 300 kW und einer mittleren Vergasungstemperatur von 711°C durchgeführt (0949-8, Ergebnisse ab S.11).

Die eingekoppelte Leistung der Begleitheizung betrug 53 kW beim aktuellen Versuch und die mittlere Vergasungstemperatur lag bei 774°C.

Im Folgenden sind die erreichten Ergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuchswoche 49/2009 dargestellt.

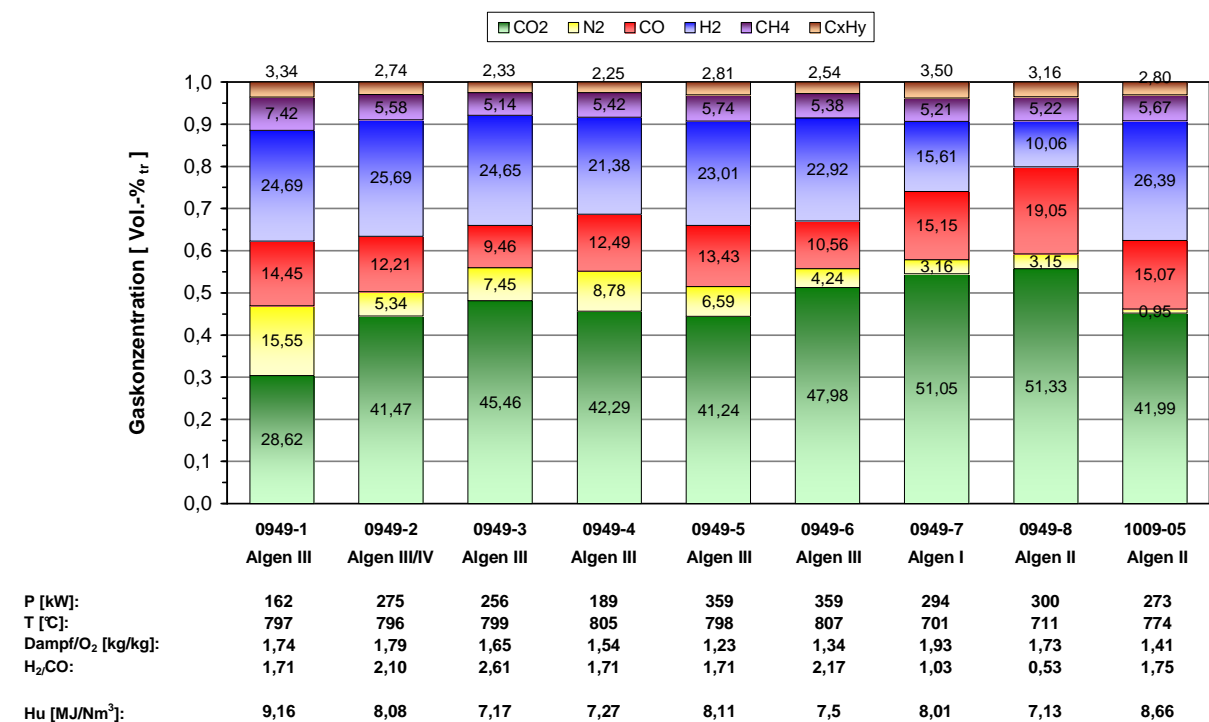


Abb. N-1: Gaszusammensetzung Permanentgas, teer- und wasserfrei

In **Abb. N-1** sind die Gaszusammensetzungen dargestellt. Versuchseinstellung 1009-05 zeigt im Vergleich zu 0949-8 einen ruhigeren Anlagenbetrieb, der sich in einem sehr geringen N<sub>2</sub>-Gehalt äußert. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt ist aufgrund der hohen eingespeisten Leistung der Begleitheizung geringer. Dies lässt sich auch anhand der Daten für den Sauerstoffbedarf erkennen (**Abb. N-2**).

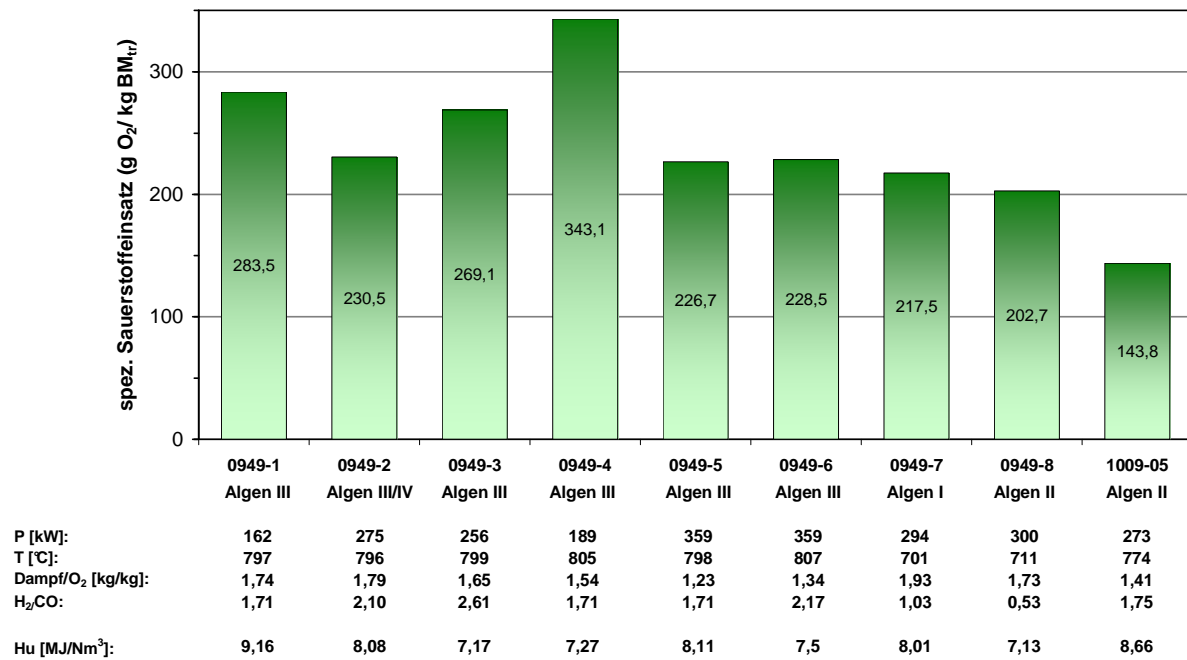


Abb. N-2: Spezifischer Sauerstoffeinsatz der einzelnen Versuchseinstellungen

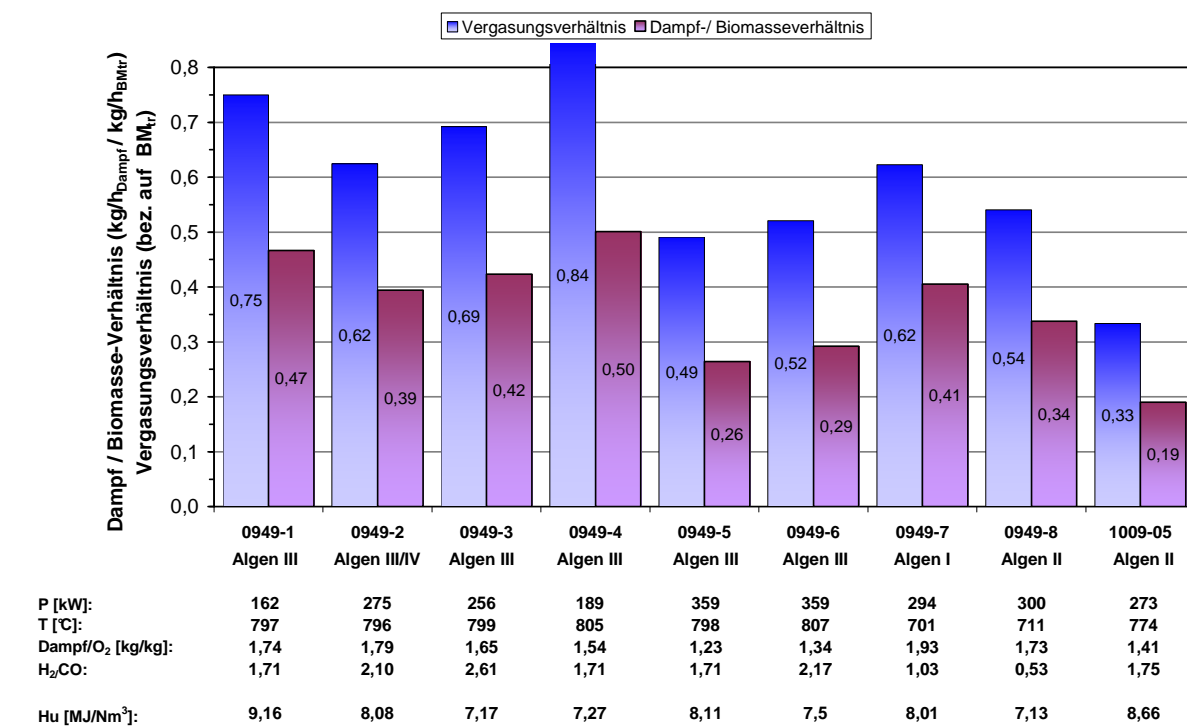


Abb. N-3: Vergasungs- und Dampf/Biomasse-Verhältnis der einzelnen Versuchseinstellungen

Das Vergasungsverhältnis und das Dampf-/Biomasseverhältnis liegen auf einem vergleichsweise geringen Niveau.

Das erzielte H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis und die Gasausbeute liegen beim Versuchspunkt 1009-05 im Mittelfeld. Die Zirkulationsrate ist verhältnismäßig gering (**Abb. N-4**)

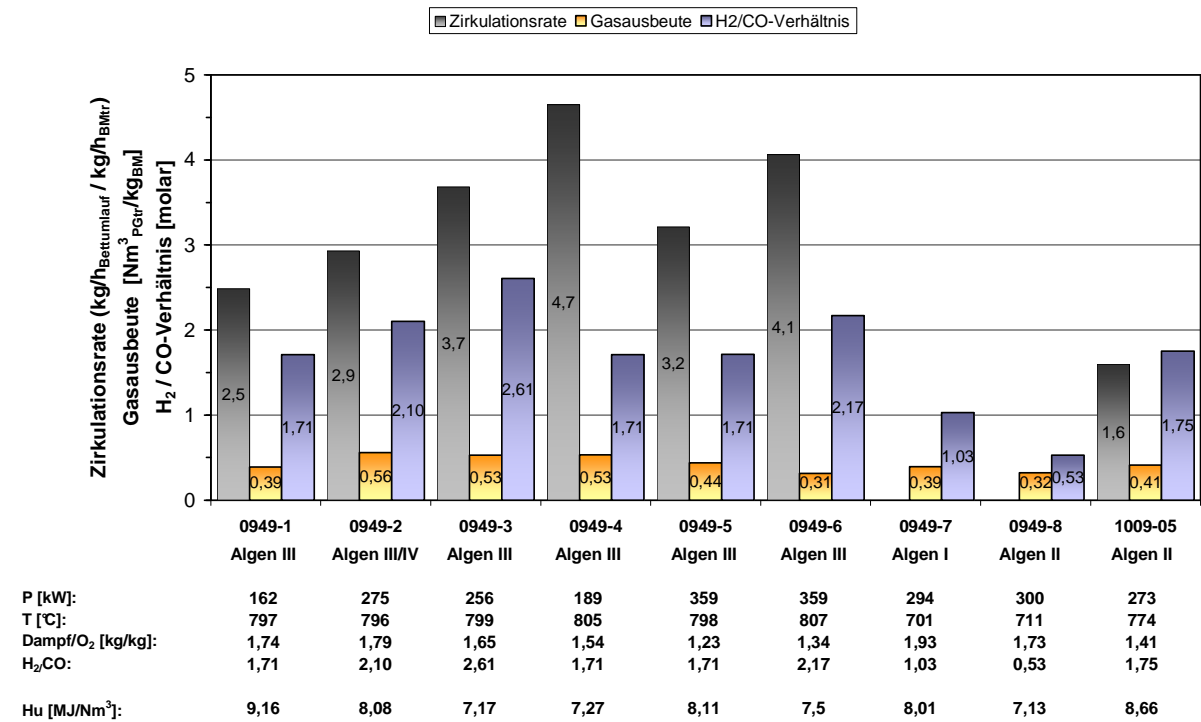


Abb. N-4: Zirkulationsrate, Gasausbeute und H<sub>2</sub>/CO-Verhältnis der Versuchspunkte

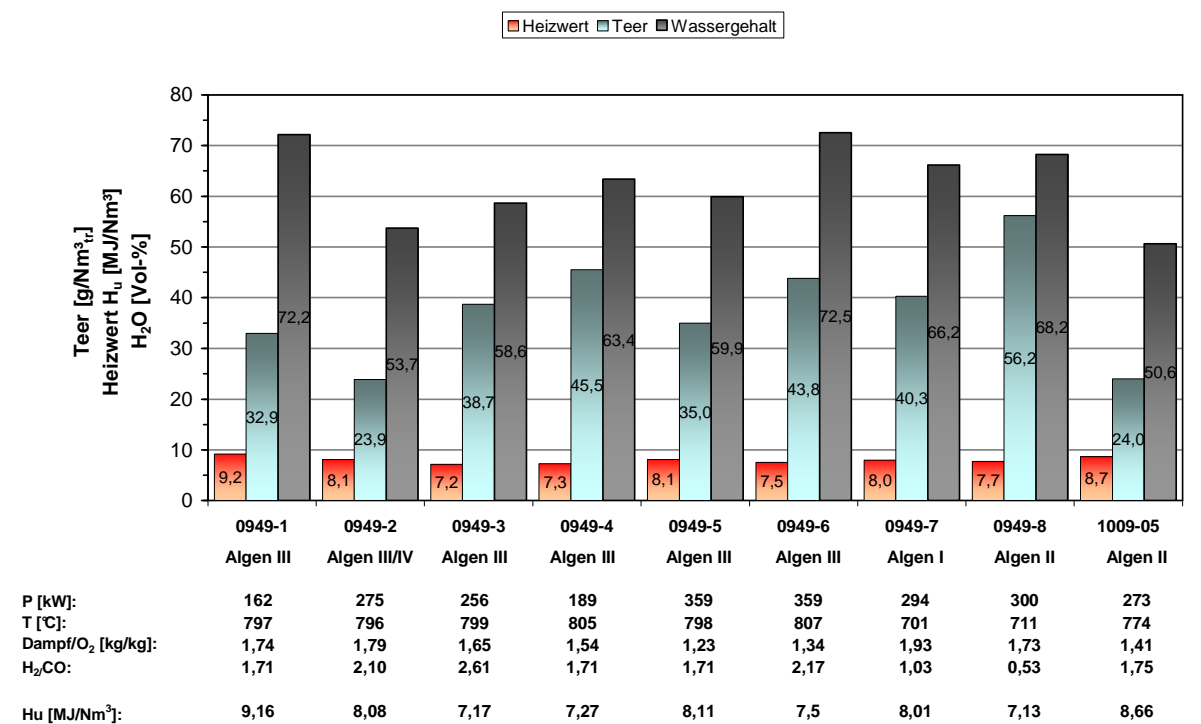


Abb. N-5: Übersicht Heizwerte Permanentgas (teer- und wasserfrei) sowie Teer- und Wassergehalte des Rohgases der Versuchspunkte mit den Chargen I-IV

Mit dem sicheren Anlagenbetrieb in der letzten Versuchswoche konnten geringere Teer- und Wassergehalte erreicht werden. Trotzdem ist der Heizwert relativ hoch.

Mit den zuvor gewonnenen Betriebserfahrungen konnten die restlichen Algen gut vergast werden. Eine geringe Verbesserung der Ergebnisse konnte ebenfalls erzielt werden. Jedoch steht weiterhin die Aufbereitungsproblematik besseren Wirkungsgraden im Wege.