

Programm Biomasse

# Vergasung verschiedener Holzfraktionen mit einem Doppelfeuervergaser

ausgearbeitet durch:  
**Hydrotest AG, Emmenbrücke**

im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energie**

Dezember 1997

Schlussbericht

---

# HYDROTEST



Vergasung verschiedener Holzfraktionen mit einem Doppelfeuervergaser und Bewertung des Verfahrens mittels Stoffflussanalyse und Energiebilanzen, Wirtschaftlichkeit

Auftraggeber:

Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW)

Sektion Energietechnik, Bern

HYDROTEST Ingenieurunternehmung AG

Reusseggstrasse 17

CH-6020 Emmenbrücke

November 1997

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>1</b>
<b>0. Zusammenfassung .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>5</b>
1.1 Die Vergasung als Baustein der Energieversorgung .....	5
1.2 Historischer Rückblick.....	6
1.3 Nutzung von Reststoffen durch Vergasung .....	6
<b>2. Theorie der Vergasung .....</b>	<b>7</b>
2.1 Chemische Vorgänge.....	7
2.1.1 Ablauf der Vergasung .....	7
2.1.2 Bildung von Dioxin .....	11
2.2 Verfahrenstechnische Varianten.....	13
2.2.1 Gegenstromvergaser .....	14
2.2.2 Gleichstromvergaser .....	15
2.2.3 Doppelfeuervergaser.....	15
2.2.4 Querstromvergaser .....	16
2.2.5 Wirbelschichtvergaser.....	16
<b>3. Die Pilotanlage .....</b>	<b>17</b>
3.1 Der Vergaser.....	17
3.2 Die Gasreinigung .....	17
3.3 Die Wärme-Kraftkopplungsanlage .....	19
3.4 Die Materialzufuhr .....	19
3.5 Die Steuerung und Visualisierung.....	20
3.6 Bilanzierung über den Vergaser .....	21
3.6.1 Herleitung der Bilanzgleichungen .....	21
3.6.2 Energiebilanz .....	23
<b>4. Messtechnik und Analytik.....</b>	<b>25</b>
4.1 Messtechnische Ausrüstung der Vergasungsanlage und des BHKW .....	25
4.1.1 Messung des Brennstoffverbrauches .....	25
4.1.2 Messung der Ascheproduktion .....	25
4.1.3 Bestimmung der Luftzufuhr.....	26
4.1.4 Temperaturmessungen .....	26
4.1.5 Füllstand im Reaktor .....	26
4.1.6 Waschwassernachspeisung und Kondensatanfall .....	26
4.1.7 Elektrische Leistung.....	27
4.1.8 Thermische Leistung.....	27
4.2 Probenahme und Analytik von Brennstoffen und Rostasche .....	27

4.3	Probenahme und Analytik von Waschwasser und Kondensat .....	28
4.4	Reingasmessung .....	29
4.5	Abgasmessung .....	30
4.6	Probenahme und Analytik für die Teer- und Partikelmessungen .....	31
4.7	Probenahme und Analytik für die Schwermetall- und Dioxinmessungen .....	32
4.7.1	Messung der Konzentrationen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Sauerstoff im Motorenabgas .....	32
4.7.2	Messung der Schwermetallkonzentrationen im Motorenabgas .....	32
4.7.3	Messung der Konzentrationen von polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen ...	32
<b>5.</b>	<b>Durchführung .....</b>	<b>35</b>
5.1	Das Versuchsprogramm und Begründung der Vorgehensweise.....	35
5.2	Eingesetzte Materialien.....	35
5.2.1	Industrieschnitzel .....	36
5.2.2	Waldhackschnitzel .....	36
5.2.3	Altholz.....	36
5.2.4	Rinde.....	36
5.2.5	Charakterisierung der Materialien.....	36
5.3	Durchführung des 150-Studentests .....	38
5.4	Vergasung von trockenen Waldholzschnitzeln .....	40
5.5	Vergasung von Altholz .....	41
5.6	Vergasung von Rinde.....	42
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>43</b>
6.1	Der 150-Studentest mit Industriebackschnitzeln .....	43
6.1.1	Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen .....	43
6.1.2	Ergebnisse der Probenahmen im Gas.....	45
6.1.3	Zusammensetzung des Motorenabgases.....	51
6.1.4	Analyseresultate von Kondensat und Abwasser .....	52
6.1.5	Analyse der Asche .....	53
6.2	Waldhackschnitzel .....	54
6.2.1	Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen .....	54
6.2.2	Ergebnisse der Probenahmen im Gas.....	58
6.2.3	Analyseresultate von Kondensat und Abwasser .....	59
6.2.4	Analyse der Asche .....	59
6.3	Altholz.....	61
6.3.1	Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen .....	61
6.3.2	Teere und Partikel.....	66
6.3.3	Schwermetalle.....	67
6.3.4	Dibenzodioxine und Dibenzofurane .....	70
6.3.5	Analyseresultate von Kondensat und Abwasser .....	71
6.3.6	Analyse der Asche .....	73
6.3.7	Betrachtungen zum Stofffluss .....	73

6.4	Rinde .....	77
6.4.1	Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen .....	77
6.4.2	Ergebnisse der Probenahme im Gas.....	81
6.4.3	Analyseresultate von Kondensat und Abwasser .....	81
6.4.4	Analyse der Asche .....	82
<b>7.</b>	<b>Diskussion und Ausblick .....</b>	<b>83</b>
<b>8.</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>85</b>
<b>9.</b>	<b>Symbole und Abkürzungen .....</b>	<b>87</b>
<b>10.</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>89</b>

## Vorwort

Die Hydrotest Ingenieurunternehmung AG in CH-6020 Emmenbrücke, gegründet 1971, ist seit vielen Jahren in verschiedenen Bereichen der Umwelttechnik erfolgreich tätig. Auf der Grundlage des erarbeiteten Know-hows im Anlagebau und der Vergasungstechnik sowie abgestützt auf die Betriebserfahrung zahlreicher Langzeit-Testprogramme plant und liefert die Hydrotest Ingenieurunternehmung AG Vergaser-Kompaktanlagen unter der Markenbezeichnung PYROFORCE® für die industrielle Anwendung.

Eine sehr umfangreiche und interessante Arbeit, welche unsere Unternehmung mit finanzieller Unterstützung des Bundesamtes für Energiewirtschaft BEW unter dem Titel

**„Vergasung verschiedener Holzfraktionen mit einem Doppelfeuervergaser und Bewertung des Verfahrens mittels Stoffflussanalyse und Energiebilanzen, Wirtschaftlichkeit“**

durchführen konnte, findet nun mit den Berichtsarbeiten ihren Abschluss. Für ihre nützliche und kooperative Mitarbeit möchten wir der Auftraggeberschaft, allen beteiligten Ingenieuren und Fachkräften sowie den beauftragten Labors an dieser Stelle herzlich danken.

HYDROTEST  
INGENIEURUNTERNEHMUNG AG

Emmenbrücke, November 1997

W. Gemperle

Auftraggeberschaft:	Bundesamt für Energiewirtschaft, CH-3003 Bern
Projektbegleitung:	Herr R. Bühler, CH-8933 Maschwanden
Analytik:	Lobbe Sibag AG, CH-6020 Emmenbrücke
	Novartis Services AG, CH-4133 Pratteln 1
	Verenum, CH-8006 Zürich



## 0. Zusammenfassung

Die Vergasung biogener Brennstoffe zur Gewinnung von elektrischer Energie und Wärme erlebt zur Zeit eine Renaissance, nachdem sie in den letzten Jahrzehnten fast völlig in Vergessenheit geraten war. Aufgrund der günstigen Energiepreise stellte sich die Frage nach alternativen Energiequellen in den letzten Jahrzehnten nicht. Heute tritt diese Technik im Zuge der Suche nach ungenutzten Energiequellen wieder in den Vordergrund.

Es werden Vergaser entwickelt, die aus Holz und anderen biogenen Brennstoffen ein teer- und partikelarmes, heizwertreiches Gas erzeugen. Dieses Gas besteht hauptsächlich aus Stickstoff, Kohlenmonoxid, Wasserstoff und Kohlendioxid. Einer dieser Vergaser wird durch die Hydrotest Ingenieurunternehmung AG in Emmenbrücke als Pilotanlage betrieben. Die Anlage besteht aus der Brennstofflagerung und -zufuhr, dem Vergaser, der Gasreinigung und dem Blockheizkraftwerk (BHKW). Die Anlage wurde durch die AHT Inc. geliefert. Der Zusammenarbeitsvertrag mit dem Lieferanten wurde gekündigt. Die Hydrotest Ingenieurunternehmung AG wird in Zukunft eigene Vergasungsanlagen unter der Bezeichnung PYROFORCE anbieten.

Zur Bestätigung der Praxistauglichkeit des Vergasers und zur Aufdeckung eventueller Schwachstellen wurde im Auftrag des Bundesamtes für Energiewirtschaft ein umfangreiches Testprogramm durchgeführt. Zunächst wurde ein Dauertest über 150 Stunden durchgeführt, bei dem die Langzeittauglichkeit des Verfahrens nachgewiesen wurde. Als Brennstoff dienten kommerziell erhältliche Industrieschnitzel. Danach wurden jeweils zweitägige Versuche mit Waldschnitzeln, Altholz und Rinde durchgeführt. Diese verliefen sehr erfolgreich. Die Materialzufuhr und der Vergaser als Herzstück der Anlage funktionieren problemlos. Die Gasreinigung arbeitet zufriedenstellend, wobei sich einige Komponenten als verbesserungswürdig herausstellten. Die Pilotanlage der Hydrotest AG ist mit einem 14 Jahre alten Blockheizkraftwerk ausgerüstet, welches sich als schwächstes Glied des Verfahrens erwies.

Der Kaltgaswirkungsgrad gibt an, wie gross der Anteil der Energie des festen Brennstoffes, die in das kalte Schmelgas transferiert wird, bezogen auf den unteren Brennwert (Heizwert,  $H_u$ ) ist. Beim 150-Stundentest mit Industrieholzschnitzeln betrug der Kaltgaswirkungsgrad zu Beginn 73 % bis 77 %. Gegen Ende des Versuches sank der Wirkungsgrad auf 69.4 % und 66.8 %. Der Grund dafür ist im Anstieg des Druckabfalles über der Messstrecke zwischen dem Vergaser und dem Gaskühler zu suchen, die eigens für dieses Messprogramm installiert wurde. Diese war als Schwanenhals ausgebildet, damit eine genügend lange Einlaufstrecke für die isokinetische Probenahme realisiert werden konnte. In diesem Schwanenhals hatte sich über Monate Material abgelagert, das normalerweise in der Wäsche aus dem Gas entfernt worden wäre. Während des 150-Studentests musste dieser Schwanenhals nun zum ersten Mal geöffnet und gereinigt werden. In kommerziellen Anlagen ist diese Strecke als kurzes gerades Rohr ausgebildet. Da in diesem Leitungsabschnitt keine Richtungsänderungen oder Einschnürungen vorhanden sind, lagern sich die Partikel nicht in der Leitung ab, sondern werden in der Wäsche abgeschieden.

Bei den kurzzeitigen Versuchen wurde jeweils über zwei Tage gemessen, an denen Voll- und Teillast gefahren wurde. Der erste Kurzzeitversuch wurde mit trockenem Waldholz durchgeführt. Bei Teillast (37 kW<sub>el.</sub>) wurde ein Kaltgaswirkungsgrad von 71 % ermittelt, während dieser bei Volllast (51 kW<sub>el.</sub>) 67 % betrug.

Bei der Vergasung von Altholz wurde bei Volllastbetrieb (57.8 kW<sub>el.</sub>) ein Kaltgaswirkungsgrad von 76.4 % festgestellt. Bei Teillastbetrieb (42.1 kW<sub>el.</sub>) betrug er 75.7 %. Blei und Zink sind die Schwermetalle, die im Rohgas in den höchsten Konzentrationen vorkommen. Sie werden in der Gasreinigung zu rund 90 % abgeschieden. Nur ein Zehntel der dem Motor zugeführten Metalle wird im Motorenabgas wiedergefunden. Die im Motorenabgas gemessenen Konzentrationen an polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen (PCDD/F) lagen im Bereich der Grenzwerte des Bundesdeutschen 17. BImSchV. Dies lässt auf einen unkontrollierten Lufteintritt schliessen, da zur Bildung von Dioxinen Sauerstoff benötigt wird, der bei der Vergasung wegen des Luftunterschusses nicht vorliegen kann.

Bei der Vergasung von Rinde wurden Kaltgaswirkungsgrade von 71 % (45 kW<sub>el.</sub>) und 67 % (32 kW<sub>el.</sub>) erreicht. Es wurden vergleichsweise geringe Wasserstoff- und Kohlenmonoxid-Konzentrationen gemessen, da relativ viel Luft zugeführt wurde.

Das Waschwasser aus der Nassreinigung ist vor allem organisch belastet (bis zu 5.5 g/l TOC), wobei ein beachtlicher Anteil des totalen organischen Kohlenstoffes auf Phenole zurückzuführen ist (10-20%). Ammonium ist ein weiterer typischer Inhaltsstoff des Waschwassers, wobei Konzentrationen bis zu 1 g/l gemessen wurden. Das anfallende Kondensat ist wesentlich schwächer mit organischen Verbindungen belastet als das Waschwasser, wobei der Anteil an Phenolen wegen ihrer Flüchtigkeit stärker ins Gewicht fällt (30–60%).

Eine nach 1600 Betriebsstunden am Gasmotor durchgeführte endoskopische Untersuchung zeigte erstaunlich gute Resultate, obwohl die Gasreinigung erst nach den im Rahmen des BEW-Projektes durchgeführten Tests verbessert werden konnte. Der Motorverträglichkeit des produzierten Holzgases ist so gut, dass am Motor keine verschmutzungsbedingten Reinigungs- oder Wartungsarbeiten durchgeführt werden müssen.

Die Ergebnisse der Messreihe und der erwähnten Untersuchungen am Verbrennungsmotor beweisen, dass der technische Stand für den routinemässigen Dauerbetrieb erreicht werden kann, der für die erfolgreiche kommerzielle Nutzung erforderlich ist.

# **1. Einleitung**

## **1.1 Die Vergasung als Baustein der Energieversorgung**

Der Wohlstand der industrialisierten Welt basiert grossteils auf der ausreichenden Verfügbarkeit von Energie. Nur mit ausreichenden und jederzeit verfügbaren Energiequellen lassen sich aufwendige Bauwerke, schneller Transport von Personen und Waren, ein behagliches Wohnklima, die industrielle Produktion von Waren aller Art und eine intensive Landwirtschaft verwirklichen. Zur Energieversorgung werden heute vor allem fossile Energieträger, also Erdöl, Kohle und Erdgas genutzt. Der Einsatz der Wasserkraft und der Kernenergie liefert in der weltweiten Betrachtung einen wesentlich geringeren Beitrag (Weissermel und Arpe, 1988). All diese Quellen sind aber mit bekannten Nachteilen verbunden.

Für eine nachhaltige Energiegewinnung ist es daher unerlässlich, andere Wege der Energiegewinnung zu nutzen. Dabei werden neue Möglichkeiten, wie die Photovoltaik, und auch schon längst bekannte Wege der Energiegewinnung wie die Windenergie untersucht.

Zu den bereits bekannten Energieerzeugungsarten gehört die Vergasung. Als Ausgangsmaterial der Vergasung werden meist Kohle oder Holz eingesetzt. Die Vergasung von Holz hat nun gegenüber der Nutzung fossiler Energieträger den Vorteil, dass die Nachhaltigkeit erreicht werden kann. Voraussetzung ist dabei natürlich, dass nicht mehr Biomasse vergast wird, als nachwächst. Dadurch ergibt sich ein geschlossener Kohlenstoffkreislauf, der nicht zur Erhöhung der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre beiträgt. Es lassen sich aber neben Holz auch andere biogene Stoffe und Kunststoffe verarbeiten.

Vergaser lassen sich in vielfältigen Kombinationen zur Energiegewinnung einsetzen. Im einfachsten Fall wird das erzeugte Gas ohne vorherige Reinigung direkt verbrannt. Dabei werden die Vorteile des gasförmigen Aggregatzustandes genutzt. Gas kann in Leitungen leicht transportiert und gut dosiert werden und verbrennt sehr sauber. Ansonsten existieren aber keine grundsätzlichen Vorteile gegenüber der konventionellen Verbrennung, wobei die Fragestellung der Emissionen vorerst ausgenommen sei. Wirkliche Vorteile gegenüber der Verbrennung erreicht die Technologie in Kombination mit Verbrennungsmaschinen. Das erzeugte Gas wird gekühlt und gereinigt und anschliessend in einem Kolbenmotor oder einer Turbine verbrannt. Die Verbrennungsmaschine treibt einen Generator an, der elektrischen Strom erzeugt. Neben dem universell verwertbaren elektrischen Strom fällt Wärme an, die in der Raumheizung oder der Trocknung des Brennstoffes Verwendung findet.

## **1.2 Historischer Rückblick**

Die Vergasung von Kohle und Biomasse nahm ihren Anfang zu Beginn des neunzehnten Jahrhunderts, als die Vorteile des gasförmigen gegenüber den festen Brennstoffen einen so raschen Entwicklungsschub verursachten, dass Gaslicht für Strassenbeleuchtungen um 1850 weit verbreitet war. In den USA entstanden ungefähr 1200 Gaswerke, die vor dem Aufkommen von Erdgase-Pipelines zwischen 1935 und 1960 betrieben wurden. Während des zweiten Weltkrieges wurden in den USA fast eine Million kleiner Vergaser in Fahrzeugen, hauptsächlich mit Holz, betrieben. Während Kohle einige Zeit das bevorzugte Vergasungsgut wurde, scheint nun die Vergasung von Biomasse wieder oberhand zu gewinnen (Reed, 1981).

Das älteste Verfahren der Gasproduktion aus kohlenstoffhaltigen Materialien ist die Trockendestillation. Mit dieser Technologie, bei der das organische Material unter Luftausschluss erhitzt wird, so dass ein brennbares Gas entsteht, wurde in London bereits im Jahre 1812 Leuchtgas produziert. Um 1880 wurde der Wassergasprozess mit Wasser als Vergasungsmittel entwickelt. Schon im Jahre 1839 wurde ein vertikaler Vergasungsreaktor entworfen, aus dem sich die modernen Vergaser entwickelten (Groeneveld, 1980).

Nachdem die Vergasung in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts nahezu in der Bedeutungslosigkeit versank, brachte die Ölkrise neue Impulse. In Finnland kamen Untersuchungen zum Schluss, dass Verbrennungsöfen einer ständigen Betreuung bedürfen und nur Vergasungsanlagen in der Lage sind, automatisiert zu fahren. In den Jahren 1980 - 1982 wurden einfache Gegenstromvergaser entwickelt, deren Gas direkt zu Heizzwecken verbrannt wurde. Bis zum Jahr 1986 wurden in Finnland und Schweden 10 solcher Anlagen installiert, die unbemannt zuverlässig betrieben werden konnten (Haavisto, 1996). Schon zu Beginn der Arbeiten wurde entschieden, dass aus technischen Gründen im Leistungsbereich zwischen 1 und 10 MW nur Gegenstromvergaser anwendbar waren. Seit 1993 wird die Vergasung nun weiterverfolgt, wobei schwerpunktmässig die Gasreinigung untersucht wird, mit dem Ziel, das Gas motorisch nutzen zu können.

## **1.3 Nutzung von Reststoffen durch Vergasung**

Einige Fraktionen, die als Edukt für die Vergasung in Frage kommen, können nicht deponiert werden, sondern müssen von Gesetzes wegen einer thermischen Behandlung zugeführt werden (Elimination von Kohlenstoff). Genau wie die Verbrennung kann auch die Vergasung zur thermischen Entsorgung kohlenstoffhaltiger Stoffe eingesetzt werden. Dabei kann mit einer höheren Ausbeute an elektrischer Energie gerechnet werden, als dies bei der Verbrennung möglich ist.

Im vorliegenden Projekt werden Versuche mit der Vergasung von Altholz durchgeführt, wobei die Verteilung von Schwermetallen auf Rostasche, Abwasser und Reingas bestimmt wird.

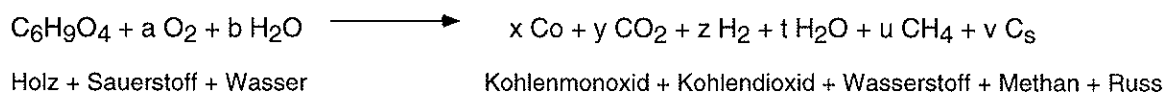
## 2. Theorie der Vergasung

### 2.1 Chemische Vorgänge

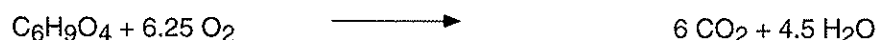
#### 2.1.1 Ablauf der Vergasung

Die Vergasung ist ein thermischer Prozess, der mit der konventionellen Verbrennung verwandt ist. Im Gegensatz zur Verbrennung wird bei der Vergasung kein vollständiger Umsatz der Kohlenwasserstoffe zu Kohlendioxid und Wasser angestrebt. Vielmehr wird systematisch mit der unvollständigen Verbrennung gearbeitet, die sich in geringerem Masse auch bei der Verbrennung bei ungenügender Luftzufuhr einstellen kann. Bei der unvollständigen Verbrennung entstehen vermehrt Kohlenmonoxid und Russ, wohingegen bei der Vergasung gezielt Kohlenmonoxid und Wasserstoff produziert werden.

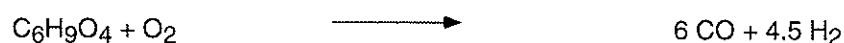
Die stöchiometrische Formulierung nach Chrysostome und Lemasle (1986) veranschaulicht den Zusammenhang. Für die Verbrennung und die Vergasung von Holz gilt folgende allgemeine Gleichung:



In dieser Form sagt die Gleichung nur aus, dass Holz (ungefähre Summenformel von trockenem Holz:  $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4$ ) mit Sauerstoff und Wasser zu Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasserstoff, Wasser, Methan und festem Kohlenstoff (Russ) reagieren kann. Die Variablen  $a$  und  $b$  definieren die molaren Verhältnisse von Sauerstoff und Wasser, mit denen das Holz umgesetzt wird. Liegt genügend Sauerstoff vor und herrschen im Reaktor geeignete Bedingungen, so läuft eine ideale Verbrennung ab, bei der nur Wasser und Kohlendioxid entstehen. Der stöchiometrische Koeffizient für Kohlendioxid ergibt sich aus der Anzahl Kohlenstoffatome im Vergasungsgut. Der stöchiometrische Koeffizient für Wasser ergibt sich aus der Anzahl der Wasserstoffatome im Aufgabematerial. Die Summengleichung für die ideale Verbrennung von trockenem Holz lautet also:

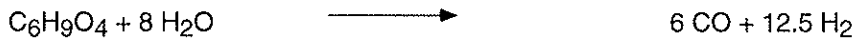


Bei der Vergasung wird Sauerstoff im Unterschuss zugeführt, so dass keine vollständige Oxidation der Biomasse möglich ist. Die stöchiometrische Gleichung für die ideale Vergasung von trockenem Holz lautet:



Die Sauerstoffkonzentration bestimmt also bei geeigneten Reaktortemperaturen, ob das organische Material vergast oder verbrannt wird. Reale Vergasungen sind immer ein Mittelweg zwischen idealer Vergasung und idealer Verbrennung. Der Wassergehalt des Vergasungsgutes spielt aus verschiedenen

Gründen eine grosse Rolle bei der Vergasung. Zum einen wird Energie verbraucht, wenn der Wasseranteil des Vergasungsgutes verdampft werden muss. Diese Energie steht dann zur Vergasung nicht mehr zur Verfügung. Zum andern ist Wasser, wie Sauerstoff, ein Vergasungsmittel. Dieses wird in der Praxis zwar kaum als solches eingesetzt (z. B. Kunststoff-Recycling), gedanklich lässt sich die Vergasung von Holz mit Wasser aber wie folgt beschreiben.



Die grosse Anzahl energiereicher Wasserstoffatome im Produktgas lässt erkennen, dass beim Ablauf dieser Reaktion Energie verbraucht wird. Dies führt zum Absinken der Temperatur, wenn keine zusätzliche Energie zugeführt wird. Man bezeichnet diesen Prozess mit Wasser als Vergasungsmittel auch als Hydrolyse.

Unter Pyrolyse versteht man die Aufspaltung von Biomasse durch Zufuhr thermischer Energie bei 200 °C - 600 °C. Die Pyrolyse kann als Aufbrechen der drei Hauptbestandteile von Holz: Cellulose, Hemicellulose und Lignin verstanden werden. Dabei entsteht ein Gas mit mittlerem Heizwert, ein komplex zusammengesetztes Pyrolyseöl und Kohlenstoff. Die Betrachtung der reinen Pyrolyse, die ohne Vergasungsmittel betrieben wird, verdeutlicht die Funktion des Vergasungsmittels:



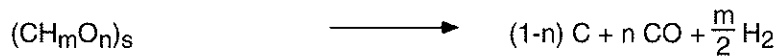
Bei dieser Reaktion treten als Produkte nur reduzierte Verbindungen auf, die mit Sauerstoff oxidiert werden können. Eine davon ist fester Kohlenstoff. Dieser ist bei der motorischen Nutzung unerwünscht. Lässt man gedanklich den Kohlenstoff aus dieser Gleichung mit Sauerstoff zu Kohlenmonoxid reagieren, so gelangt man zur stöchiometrischen Gleichung für die ideale Vergasung.

Bisher wurde nur die Summenformel der Vergasung betrachtet. In Wirklichkeit führen mehrere nebeneinander und nacheinander ablaufende Reaktionen vom Vergasungsgut zum Schmelgas. Die Anteile der verschiedenen Reaktionen am Gesamtumsatz hängen von der Temperatur im Vergaser ab.

Die ersten Teilschritte der Vergasung sind die Trocknung und die Pyrolyse. Während der Trocknung bei ca. 200 °C wird das Wasser, das mit dem Vergasungsgut in den Reaktor gelangt, verdampft. Es finden keine Zersetzungsprozesse statt. Der Wasserdampf kann abgezogen werden.

An die Trocknung schliesst die Pyrolyse an. Die Pyrolyse ist der erste Teilschritt sowohl der Verbrennung als auch der Vergasung. Bei Temperaturen von 200°C - 600°C beginnt die Zersetzung von Hemicellulose. Zwischen 325°C und 375°C wird die Cellulose aufgespalten. Es entstehen Kohlendioxid, Methanol, leichtflüchtige Teere und organische Säuren, vor allem Essigsäure. Oberhalb von 375 °C bricht Lignin (der Grundbestandteil von Holz) in kleinere chemische Verbindungen auf. Dabei fallen schwerflüchtige Teere und Kohlenwasserstoffe an. Über 700 °C entsteht nur noch Kohlenstoff in Form von Holzkohle. Die Aufenthaltszeit bestimmt über die gebildeten Produkte. Die langsame Pyrolyse oberhalb 280°C verläuft exotherm und schreitet daher ohne Energiezufuhr von aussen voran. Dabei wird ein grosser An-

teil Holzkohle gebildet. Bei der schnellverlaufenden Pyrolyse muss der Prozess durch Zufuhr von Wärme aufrecht erhalten werden. Cellulose wird schnell zu einem Gas umgesetzt, das einen hohen Olefinanteil enthält. Die Olefine können direkt genutzt oder mit Luftsauerstoff vergast werden (Reed, 1981). Jüntgen et al. (1981) formulierten die Pyrolyse vereinfacht mit folgenden Reaktionen:



Für die Abschätzung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von trockenem Holz können folgende Koeffizienten eingesetzt werden:  $m=1.22$ ;  $n=0.65$  (vergleiche z. B. Nussbaumer et al., 1990). Bei der reinen Pyrolyse entsteht ein Gas mit mittlerem Heizwert, ein komplex zusammengesetztes Öl und Kohle.

In Tabelle 2.1 sind die Vorgänge aufgezeigt, die bei der Erhitzung von Kunststoff unter Ausschluss von Sauerstoff (Pyrolyse) ablaufen. Die Tabelle gilt auch für die Pyrolyse biogener Stoffe.

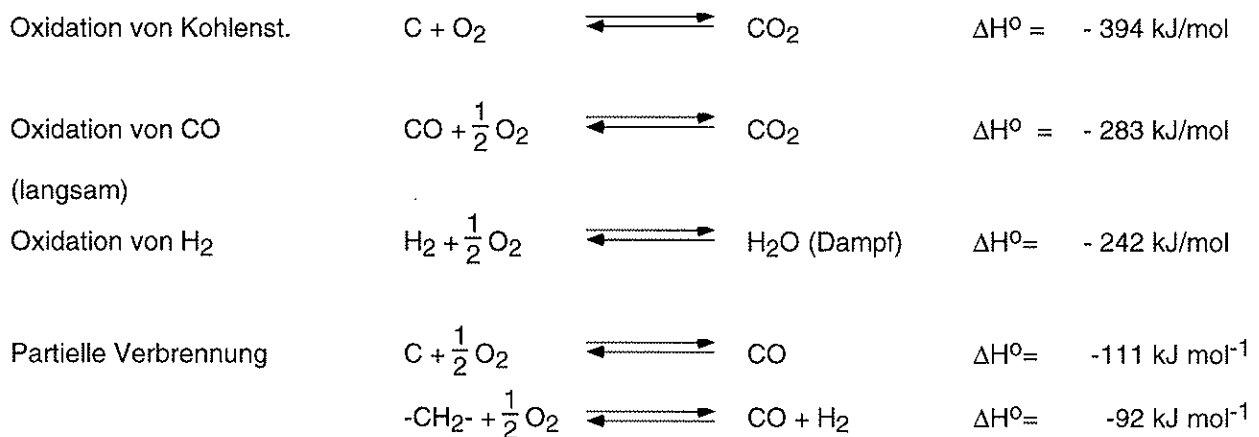
Tabelle 2.1: Physikalisch/chemische Vorgänge bei der Pyrolyse organischer Stoffe (Hamm, 1993)

Temperaturbereich	Physikalisch/chemische Vorgänge
100 – 200 °C	Thermische Trocknung
250 °C	Depolymerisation, Reduktion, Abspaltung von Reaktionswasser, CO, CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> S
300 °C	Abspaltung von Cl unter Bildung von HCl
340 °C	Bruch aliphatischer Bindungen, Beginn der Abspaltung von CH <sub>4</sub> und Aliphaten
400 °C	Bruch der C-O- und C-N-Bindungen
< 600 °C	Cracken von Bitumenstoffen zu thermodynamisch stabileren Stoffen, Entstehung von Aromaten aus Hydroaromaten
> 600 °C	Olefinbildung, Dimerisierung zu Butenderivaten mit anschliessender Dehydrierung zu Butadienen, Dien-Reaktionen mit Ethen zu Cyclohexenderivaten, thermische Aromatisierung zu Benzol und höheren Aromaten

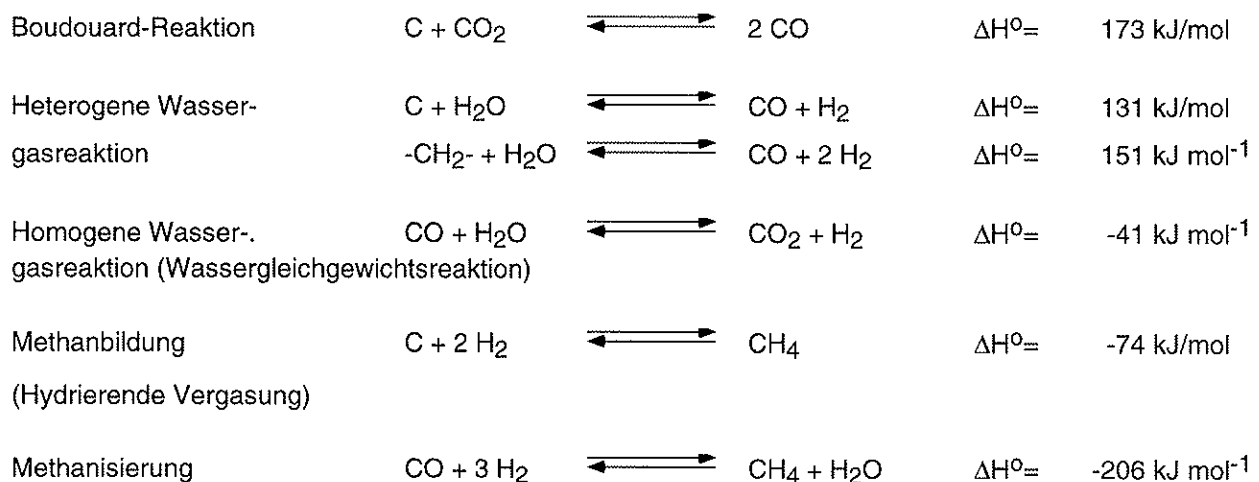
Der Ablauf der auf die Pyrolyse folgenden Prozesse hängt von der Konstruktion des Vergasers ab. Durchlaufen das Vergasungsgut und die Luft beziehungsweise das Schwelgas den Vergaser in der gleichen Richtung, so spricht man von Gleichstrom. Durchströmt das Gas den Vergaser aber entgegen dem Fluss des festen Vergasungsgutes, so spricht man von Gegenstrom.

Das Vergasungsgut durchläuft im Gegenstromvergaser die verschiedenen Zonen in der Reihenfolge Trocknung, Pyrolyse, Reduktion und Oxidation. Beim Gleichstromvergaser folgen einander die Stufen Trocknung, Pyrolyse, Oxidation und Reduktion (Bierter und Gaegauf, 1982; Nussbaumer et al., 1990b). In der folgenden Beschreibung werden die Vorgänge im Gleichstromvergaser erläutert.

Zur Aufrechterhaltung der Temperatur wird meist Luft oder reiner Sauerstoff zur Oxidation von Kohlenstoff zugegeben. Dabei entstehen in stark exothermen Reaktionen Wasser und Kohlendioxid.



Die freiwerdende Energie ermöglicht anschliessend den Ablauf der endothermen Reduktionsreaktionen. Das Holzgas entsteht durch Reduktion von vornehmlich Kohlendioxid und Wasser und in geringerem Ausmass von Kohlenmonoxid (Methanisierung) an der glühenden Kohle in der Reduktionszone. Dabei laufen wiederum verschiedene Reaktionen ab:



Die Enthalpien wurden aus den Standardbildungsenthalpien nach "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 73<sup>RD</sup> Edition, Special Student Edition, CRC Press, 1992-1993, 5-7-5-50" berechnet. Ähnliche Reaktionen treten auch bei der Vergasung von Kohle und Erdgas auf (Weissermel und Arpe, 1988). Die Formulierungen, die das Molekülteil  $-CH_2-$ , das allgemein für gesättigte organische Stoffe steht, enthalten stammen aus dieser Quelle.

Die Lage der Gleichgewichte ist temperaturabhängig. Daher ist auch der Sauerstoffverbrauch eine Funktion der Temperatur. Bei steigenden Temperaturen werden mehr leichtflüchtige Substanzen gebildet und der Anteil an brennbaren gasförmigen Komponenten im Produktgas nimmt zu. Zur Erzielung einer annähernd vollständigen Vergasung ist eine hohe Vergasungstemperatur notwendig. Hohe Temperaturen können aber nur durch partielle Verbrennung, durch Vorheizung des Aufgabegutes oder durch externe Beheizung des Reaktors erzielt werden. Da fast alle Reaktionen, bei denen Wasser verbraucht wird endotherm sind, kühlt sich der Reaktor bei hohen Wassergehalten des Aufgabegutes ab. Der Abbau von höhermolekularen Verbindungen zu niedermolekularen Verbindungen wird durch die Anwesenheit von Oxidationsmitteln begünstigt. Dabei nimmt aber der  $\text{CO}_2$ -Gehalt zu und daher der Heizwert des Schmelzgases ab. Dagegen zerfällt Wasser bei hohen Temperaturen zu Radikalen ( $\text{O}^\cdot$  und  $\cdot\text{OH}$ ). Die Zugabe von Wasser ist daher ein Mittel zur Unterstützung der Crack-Prozesse.

Bei grossen Brennstoffstücken ist das Oberflächen/Volumen-Verhältnis klein und die heterogenen Zersetzungsgeschwindigkeit ist daher geschwindigkeitslimitierend. Durch Zerkleinerung des Aufgabegutes wird ein günstigeres Oberflächen/Volumen-Verhältnis erreicht, wodurch der Stofftransport zur reagierenden Oberfläche weniger ins Gewicht fällt. Bei feinen Teilen steigt aber der Druckabfall über das Vergasungsbett.

Das Verhältnis zwischen der tatsächlich vorhandenen Luftmenge und der zur idealen Verbrennung benötigten Luftmenge wird durch die Luftüberschusszahl  $\lambda$  wiedergegeben. Für die Vergasung von Holz erachtet Bühler (1994) eine Luftüberschusszahl von 0.3 als optimal. Nussbaumer (1990 a) benutzt das  $\lambda$ -Verhältnis zur Einteilung des thermischen Prozesses in Pyrolyse (endotherm,  $\lambda = 0$ ), Vergasung (endotherm oder exotherm,  $\lambda = 0-1$ ) und Verbrennung (exotherm,  $\lambda > 1$ ).

### **2.1.2 Bildung von Dioxin**

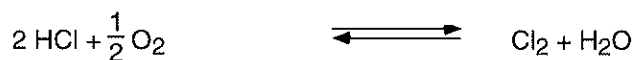
Hasler et al. (1993) befassten sich unter anderem mit dem Problem der Dioxin-Bildung in Holzfeuerungsanlagen. Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD und PCDF) sind im Feuerungsraum von Kehrlichtverbrennungsanlagen nur in geringen Mengen vorhanden. Dioxine und Furane entstehen aber, auch ohne Anwesenheit von molekularem Chlor, auf KVA-Flugstäuben.

Es genügt die Anwesenheit von partikulärem Kohlenstoff und einer Chlorquelle. Einflussparameter sind:

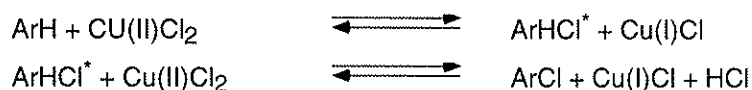
- Temperatur
- Sauerstoffgehalt
- Kohlenstoffgehalt
- Wasserstoffgehalt
- Chlorgehalt
- Metallgehalt (Kupfer und Eisen)

Bei einer Temperatur von 300 °C wird ein deutliches Maximum bei der Dioxinbildung erreicht. Ab einem Sauerstoffgehalt von ca. 12 Vol.-% steigt der Gehalt von PCDD und PCDF im Verbrennungsabgas exponentiell an. In Abwesenheit von Sauerstoff findet eine praktisch vollständige Dechlorierung von PCDD und PCDF statt. Auch der Kohlenstoffgehalt des Flugstaubes hat einen deutlichen Einfluss auf die Bildung von PCDD und PCDF, da die Oberflächen der Partikel katalytisch wirkendes Kupfer(II) und das weniger wirksame Eisen(III) tragen können. Der Einfluss des Wassergehaltes im Gas ist umstritten.

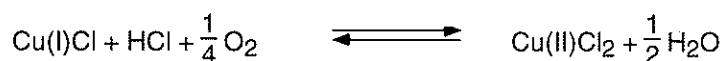
Für die Bildung von elementarem Chlor ist hauptsächlich der Deacon-Prozess verantwortlich:



Diese Reaktion ist im Temperaturbereich zwischen 20 und 1200 °C thermodynamisch begünstigt. Metalle (vor allem Kupfer) wirken als Katalysatoren. Die Bildung von PCDD und PCDF ist ein heterogener Prozess. Verschieden Hinweise sprechen für folgenden Mechanismus:



Kupfer(I) muss durch Sauerstoff zu Kupfer(II) oxidiert werden:



Diese Beobachtungen und Theorien erklären, in welcher Weise die Bildung von chlorierten Dioxinen und Furanen durch die Temperatur, den Partikelgehalt, den Metallgehalt auf den Partikeln und den Sauerstoffgehalt beeinflusst wird.

## 2.2 Verfahrenstechnische Varianten

Ausgehend von den Gegenstromvergäsern, die in der Zeit des zweiten Weltkrieges auf Fahrzeugen montiert wurden, wurden viele Reaktorvarianten geplant, im Pilotmassstab betrieben und in kleiner Anzahl gebaut. Wegen geringer Kosten fossiler Energieträger bestand lange Zeit kein Markt für die Vergasung. Unter veränderten Voraussetzungen muss die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens nun neu beurteilt werden.

Im gewerblichen und industriellen Einsatz liegt der Vorteil von Vergasungsanlagen gegenüber Verbrennungsanlagen in der energetischen Nutzbarkeit des Schwelgases. Der Einsatz von Biomasse-Vergasungsanlagen in Verbindung mit Blockheizkraftwerken (BHKWs) bietet sich für die Energieversorgung von Betrieben, bei denen biogene organische Abfälle im Überschuss anfallen, geradezu an. In den vergangenen Jahren wurden neue Vergasertypen entwickelt. Davon sind einige recht vielversprechend.

Für die Vergasung biogener Stoffe kommen verschiedene Verfahrenskonzepte in Frage, wie Festbettvergaser (Bierter und Gaegauf, 1982; Nussbaumer, 1990 a; Nussbaumer, 1990 b; Bühler, 1994). Wirbelschichtvergaser (Mehrling und Reimert, 1986; Stucki, 1994) und Drehrohrvergaser. Im Leistungsbereich unterhalb 2 MW<sub>el</sub> sind vor allem Festbettvergaser von Interesse. Bei diesen unterscheidet man wiederum zwischen Vergäsern, bei denen das Vergasungsmittel im Gleichstrom, und solchen, bei denen das Vergasungsmittel im Gegenstrom zum festen Brennstoff geführt wird. Wird die Luft von unten zugeführt, so spricht man von aufsteigender Vergasung, wird sie von oben zugeführt, so spricht man von absteigender Vergasung. Da das Vergasungsgut meist von oben zugeführt wird und anschliessend nach unten fliesst, entspricht die Gegenstromvergasung im Allgemeinen der aufsteigenden Vergasung und die Gleichstromvergasung der absteigenden Vergasung. Daher werden diese beiden Begriffspaare oft als Synonyme verwendet. Dies ist aber nicht immer korrekt, da das Vergasungsgut auch von unten zugeführt werden kann. Beim Michel-Kim-Vergaser (EFEU und Schwelm GmbH) wurde diese Variante gewählt. Die Anlage besteht aus einer Dosiereinrichtung, einem Unterschubreaktor, einem nachgeschalteten Koksreaktor und einer Gasreinigung. Man spricht bei diesem Reaktor von einem Gleichstromvergaser mit aufsteigender Vergasung (Nussbaumer, 1990 b). Zusammenstellungen unterschiedlicher Vergasertypen sind auch bei Bühler (1994), Reed (1981) oder bei Bierter und Gaegauf (1982) zu finden.

### 2.2.1 Gegenstromvergaser

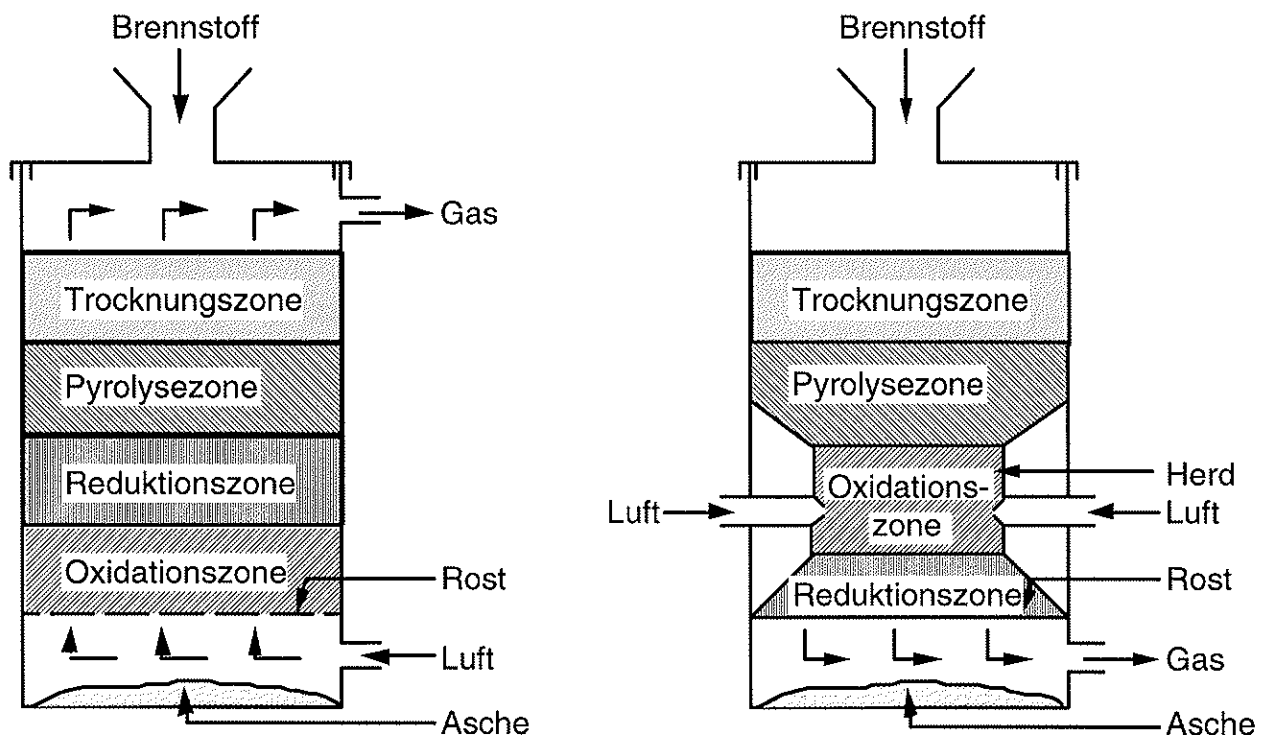


Abbildung 2.1: Schema eines Gegenstromvergasers mit aufsteigender Vergasung (links) und eines Gleichstromvergasers mit absteigender Vergasung (rechts) nach Bierter und Gaegauf (1982)

Als ein herkömmliches Vergasungsverfahren wird die Vergasung im Gegenstrom beschrieben (Bierter und Gaegauf, 1982). Im Gegenstromvergaser (Abb 1, links) durchläuft das Holz im Bewegtbett meist von oben nach unten die klar definierten Zonen der Trocknung, der Pyrolyse, der Reduktion und der Oxidation. Das unten einströmende Oxidationsgas (Luft oder Reinsauerstoff) durchströmt den Reaktor zusammen mit dem Schwelgas im Gegenstrom zum Vergasungsgut meist von unten nach oben (aufsteigende Vergasung). In der Oxidationszone wird die Wärmeenergie für die Folgeprozesse erzeugt. Die Oxidation läuft sehr schnell ab. Ihre Geschwindigkeit kann von der Stofftransportgeschwindigkeit begrenzt sein. In vielen Fällen wird der Vergasungsluft Wasser zugemischt, um die Temperatur in der Oxidationszone regeln zu können. In der Reduktionszone herrschen so hohe Temperaturen, dass die Umwandlung von Kohlendioxid und Kohlenstoff zu Kohlenmonoxid und die Spaltung von Wasserdampf an der Holzkohle in Wasserstoff und Kohlenmonoxid ablaufen kann.

Die Generatoren funktionieren mit einem sehr hohen Vergasungswirkungsgrad. Das gebildete Gas kann aber nur zur direkten Verbrennung verwendet werden, da es einen hohen Gehalt an schwerflüchtigen Pyrolyseprodukten aufweist. Das Gegenstromverfahren hat den Vorteil, dass der Anteil an mitgerissenen Partikeln klein ist, da durch Abkühlung und Volumenreduktion des Gases am Kopf des Reaktors die Gasgeschwindigkeit niedrig ist. Das Durchfallen von Kohlepartikeln durch den Rost muss durch eine geeignete Rostkonstruktion verhindert werden. Zum Einsatz kommen Fest- und Rüttelroste. Bei grösseren Re-

aktoren werden Schrägroste verwendet. Diese haben den Vorteil, dass die Zugänglichkeit zum Brennstoffbett besser gewährleistet ist als bei Flachrosten. Bei kontinuierlich betriebenen Anlagen finden rotierende Roste Anwendung.

### **2.2.2 Gleichstromvergaser**

Für die Verbrennung des Holzgases in einem Verbrennungsmotor ist ein Gas gefordert, das arm an schwerflüchtigen Komponenten ist. Bei optimalem Betrieb liefert der Gleichstromvergaser (Abb 1, rechts) das geforderte teearme Gas. Der obere Teil des Vergasers (Trocknungs- und Pyrolysezone) entspricht demjenigen des Gegenstromvergasers. Der Unterschied besteht nun darin, dass die Luft unmittelbar nach der Pyrolysezone zugeführt wird. Die Oxidation erzeugt die notwendigen Temperaturen, um die absteigenden Schwelprodukte aus der Pyrolysezone in leicht brennbare Gase aufzuspalten. Dadurch gelangen keine Teerprodukte in die Reduktionszone. Von entscheidender Bedeutung für eine saubere Vergasung sind die Anordnung der Luftdüsen und die Geometrie der Oxidationszone. Dieser Teil des Reaktors, der auch als Herd bezeichnet wird, hat die Aufgabe, eine homogene Holzkohleschicht zu bilden, die durch das durchströmende Gas gleichmässig beaufschlagt wird. Die Luftzufuhr hängt von der Körnung des Holzes ab. Eine zentrale Zuführung der Luft gewährt in der Herdeinschnürung eher die benötigten Temperaturen als Randdüsen. Herd und Luftdüsen müssen Temperaturen zwischen 800 und 1300 °C widerstehen. In der abschliessenden Reduktionszone findet die Umwandlung von  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  zu  $\text{CO}$  und  $\text{H}_2$  an der Holzkohle statt. Diese Reaktion ist sehr langsam und läuft deshalb in der Reduktionszone nicht bis zum Gleichgewicht ab. Eine längere Reduktionszone bringt aber keine wesentlichen Verbesserungen, da die endothermen Reaktionen die Temperaturen senken, was zu einer zusätzlichen Verlangsamung der chemischen Vorgänge führt. Die Länge der Reduktionszone entspricht etwa dem Herddurchmesser. Gleichstromgeneratoren eignen sich vor allem für biogene Stoffe mit einem kleinen Aschegehalt und nicht schlackender Asche. Eindüsen von Wasser oder Dampf sind bei dieser Verfahrensweise unüblich, da das im dosierten Material enthaltene Wasser meist für die Erzeugung von Wasserstoff ausreicht. Der Austrag der Asche erfolgt über Rüttelroste oder rotierende Roste.

### **2.2.3 Doppelfeuervergaser**

Der Doppelfeuervergaser kann als Kombination von Gleich- und Gegenstromvergaser angesehen werden. Die Gleichstromkomponente liefert schon ein sehr reines Gas. Die verbleibende Kohle mit nur noch geringen Anteilen an flüchtigen Komponenten wird in der Sekundärreaktion nach dem Gegenstromprinzip umgesetzt. Dadurch wird eine nahezu vollständige Vergasung des Brennstoffes erreicht. Die im Vergaser praktizierte Gasführung ermöglicht eine sichere Crackung der Kohlenwasserstoffe und liefert ein sehr reines Gas für die motorische Nutzung.

Durch eine entsprechende Abstimmung der Anteile der Ober- und Untervergasung ist es möglich, für die verschiedensten Brennstoffe die optimale Vergasung zu erzeugen. Die nutzbare Brennstoffpalette reicht damit von den Resten der Holzverarbeitenden Industrie über Verpackungsmaterialien bis zu kohlenstoffhaltigen Abfällen der Landwirtschaft.

Auf diesen Vergasertyp wird im folgenden Kapitel näher eingegangen werden, da die Messungen an einem Vergaser dieses Typs durchgeführt wurden.

#### **2.2.4 Querstromvergaser**

Der Querstromvergaser wurde speziell für den Fahrbetrieb entwickelt und zeichnet sich durch schnelle Betriebsbereitschaft und rasche Anpassung an Lastwechsel aus. Bei diesem Typ tritt die Luft auf einer Seite des Reaktors ein, durchströmt die Oxidationszone und einen Teil der Reaktionszone und tritt auf der anderen Seite wieder aus. Die Aufenthaltszeiten der Gase im Reaktor sind extrem kurz, weshalb nur eine schlechte Umwandlung von Kohlendioxid, Kohlenstoff (Russ) und Wasser zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff und eine mangelnde Spaltung der Schwelgase erfolgt. Für dieses Verfahren kann nur Holzkohle eingesetzt werden, die keine Schwelprodukte abgibt. In der Oxidationszone werden Temperaturen von bis zu 2000 °C erreicht, weshalb die Lufterdosen speziell für diese Temperaturen ausgelegt werden müssen. Bei diesen hohen Temperaturen kann die Asche auch zu Schlackestücken zusammenschmelzen.

#### **2.2.5 Wirbelschichtvergaser**

Wirbelschichtvergaser werden noch nicht so lange untersucht und eingesetzt wie Festbettvergaser. Es wurden allerdings schon einige Pilotanlagen gebaut und betrieben (Mehrling und Reimert, 1986; Stucki, 1994, Kurkela et al., 1995). Diese Anlagen sind meist zweistufig ausgelegt. Da in der Wirbelschicht keine so hohen Vergasungstemperaturen erreicht werden können wie im Festbett, wird der ersten Vergasungsstufe meist eine Crack-Stufe nachgeschaltet, in der grössere Moleküle und Teerstoffe bei hohen Temperaturen gecrackt werden.

Der Einsatz von Synthesegas, das mit Hilfe eines Wirbelschichtvergasers aus Biomasse erzeugt wird, zur Synthese von Methanol wurde von Stucki (1994) diskutiert. Wirtschaftliche Anlagegrößen werden in der Schweiz durch das Einzugsgebiet der Biomasse auf einige hundert Tonnen pro Jahr beschränkt.

### **3. Die Pilotanlage**

Bei dem in Emmenbrücke eingesetzten Vergaser handelt es sich um einen AHT-Doppelfeuervergaser, welcher für eine elektrische Leistung von ca. 150 kW ausgelegt wurde. Die Leistungsgrenze von Motor und Generator liegt mit 80 kW deutlich unter derjenigen des Vergasers. Dadurch wird der Vergaser immer im Teillastbetrieb gefahren. Die Gesamtanlage ist in zwei Sea-Containern eingerichtet. Im ersten befindet sich der Vergaser mit der Gasreinigung. Im zweiten Container befindet sich das Blockheizkraftwerk. Die Anlage ist mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) ausgerüstet, über die alle Schaltvorgänge gesteuert werden.

In den folgenden Abschnitten wird die Anlage eingehender beschrieben.

#### **3.1 Der Vergaser**

Das Vergasungsgut wird dem Vergaser von oben durch eine Schleuse zugegeben. Der Mantel des Vergasers ist in hochtemperaturbeständigem Stahl ausgeführt. Das Innere des Vergasers ist mit Keramikblöcken und gegossenen Keramikteilen ausgestaltet, die der thermischen Isolation und der Gasführung dienen. Der Aufbau des Vergaser ähnelt demjenigen eines einfachen Gleichstromvergaser. Die Luft wird hauptsächlich der Hauptoxidationszone zugeführt, die beim gewöhnlichen Gleichstromvergaser auch die einzige ist.

Das einzige bewegliche Teil im Innern des Vergasers ist der Drehrost. Die Asche fällt in den untersten Teil des Vergasers. Aus diesem Teil wird die Asche mit Hilfe einer Schnecke in einen luftdicht angekoppelten Aschebehälter gefördert.

#### **3.2 Die Gasreinigung**

Das heiße Generatorgas tritt mit einer Temperatur von 400 - 600 °C aus dem Vergaser aus. Es kann entweder zur direkten Verbrennung zur Fackel geleitet oder der Gasreinigung zugeführt werden.

Zum Anfahren des Vergasers wird der Anfahrventilator eingeschaltet. Der erzeugte Luftstrom startet die Vergasung. Das Gas kann in der Fackel durch eine Zündspirale gezündet werden. Es brennt dann mit einer blauen, bei Tageslicht unsichtbaren Flamme.

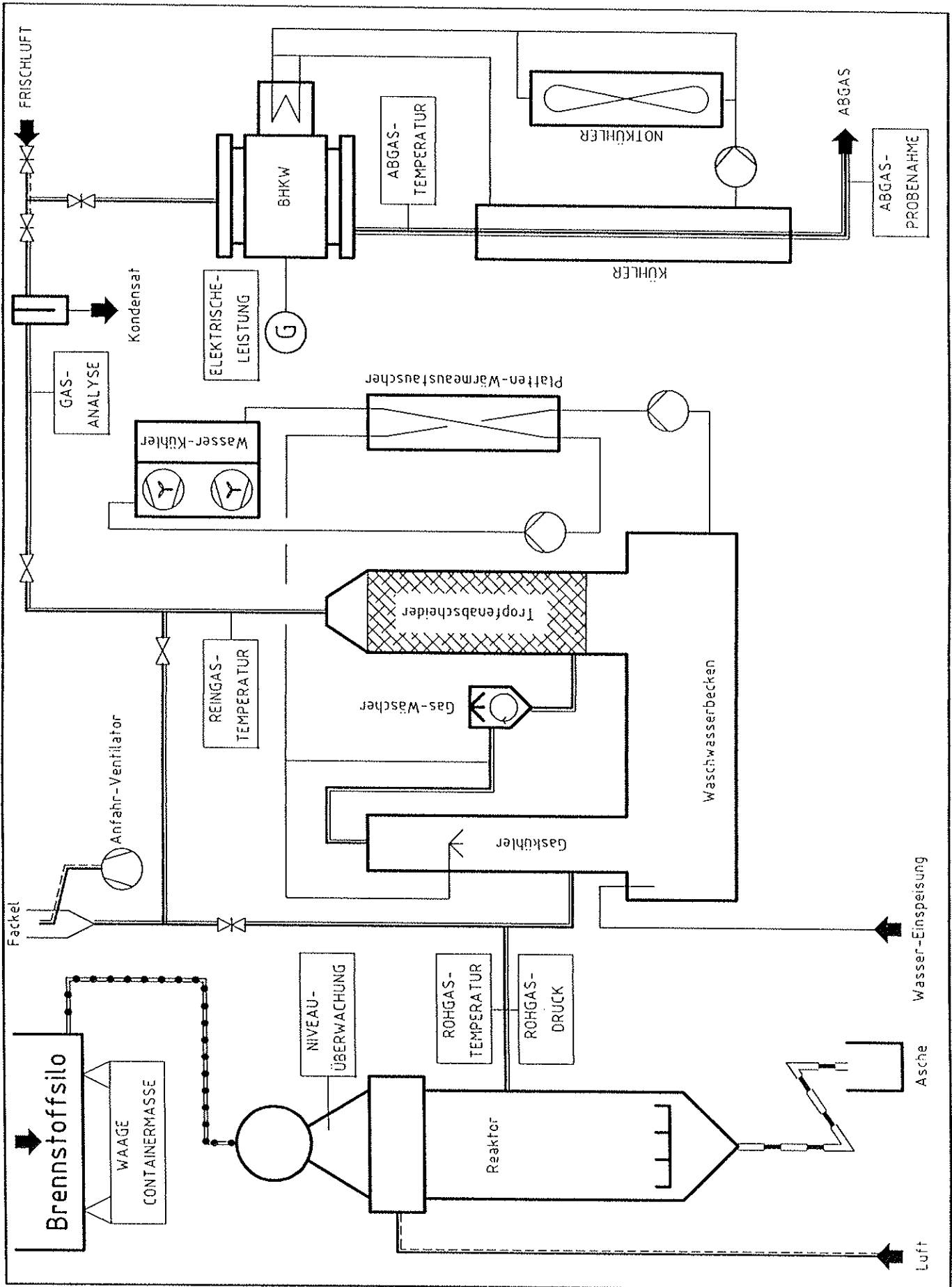


Abbildung 3.1: Schema der Pilotanlage

Sobald der Vergaser die richtige Temperatur erreicht hat, wird das Gas über die Gasreinigung gefahren und alternativ zur Fackel oder zum Motor geleitet. Das heiße Rohgas wird in einer Gegenstromwaschkolonne durch direkten Wärmetausch mit Waschwasser gekühlt und vorgereinigt. Danach gelangt es in den Wäscher. Der Kontakt zwischen Gas und Waschwasser im Wäscher ist sehr intensiv. Das Gas führt danach sehr viel Wasser mit. Dieses wird in einer Füllkörperkolonne abgeschieden. Nach dieser Tropfenabscheidung gelangt das Gas nun entweder zur Verbrennung auf die Fackel oder zur motorischen Nutzung in das Blockheizkraftwerk. Das Wasser aus dem Wäscher und dem Tropfenabscheider fließt in den gemeinsamen Waschwassertank unter den Gasreinigungseinrichtungen. Von dort wird es von einer Pumpe zur Kühlung über einen Wärmetauscher gepumpt und wieder dem Kreislauf zugeführt.

Wird mehr Wasser durch den chemischen Prozess der Vergasung gebildet, als aus dem Waschwassersystem in das Reingas verdampft, so läuft das gebildete Wasser in einen Auffangbehälter über, so dass es quantifiziert werden kann. Ist die Waschwasserbilanz aber negativ, so muss Wasser in das Waschwasserbecken nachgespeist werden. Das Waschwasser ist, abhängig vom Brennstoff, belastet und muss daher behandelt werden.

Die Kühlung des Systems erfolgt durch einen Plattenwärmetauscher, welcher der Waschwasserpumpe nachgeschaltet ist. Das erwärmte Kühlwasser wird durch einen Tischkühler auf dem Dach zurückgekühlt. Die Wärmeenergie wird dabei an die Umgebung abgegeben.

### **3.3 Die Wärme-Kraftkopplungsanlage**

Kernstück der Wärmekraftkopplungsanlage ist ein Generatorgas-Ottomotor des Typs GA 6M 816 G von der Klöckner-Humboldt-Deutz AG. Dabei handelt es sich um einen adaptierten sechszylinder-Dieselmotor mit einer Maximalleistung von 90 kW und Baujahr 1982. Der Motor treibt den Generator an, der netzsynchron betrieben wird. Das heißt, dass beim Anfahren die Frequenz und die Spannung des Generators dem Netz angepasst werden. Sobald Frequenz und Spannung des Generators mit den Netzparametern genau übereinstimmen, wird gekuppelt und der Generator speist Elektrizität ins Netz zurück. Die eingespeiste Energie wird durch einen Stromzähler registriert.

Mangels Abnehmer wird die Wärmeenergie des Kühlkreislaufes des Motors nicht genutzt, sondern über einen Notkühler an die Umgebung abgegeben. Die anfallende Wärmeenergie kann über die Ablesung des Wärmezählers und die Abgastemperatur bilanziert werden.

### **3.4 Die Materialzufuhr**

Das Material wird in einem Brennstoffcontainer mit hydraulisch angetriebenen Unterschubboden angeliefert. Die Schnitzel fallen aus dem Container in einen Trog, aus dem sie durch eine Querschnecke in den Kratzkettenförderer transportiert werden. Der Kratzkettenförderer befördert das Material mit seinen

Bürsten über die Höhe des Vergasers und wirft es in eine Vibrorinne ab. Aus der Vibrorinne gelangt das Material in die Drehschleuse und von dort in den Vergaser.

Die Materialzufuhr wird bedarfsabhängig gesteuert.

### **3.5 Die Steuerung und Visualisierung**

Die gesamte Anlage wird über eine speicherprogrammierbare Steuerung gesteuert. Diese erfasst die Messwerte des Vergasers und des Blockheizkraftwerkes und steuert die Materialzufuhr, den Vergaser und die Gasreinigung. Ausserdem kann der Motor des Blockheizkraftwerkes über diese SPS gestartet und ausgeschaltet werden.

Einige Werte werden aus sicherheitstechnischen Gründen gemessen (Temperaturen, CO-Konzentrationen in den Containern) und lösen bei Überschreiten von festgelegten Grenzwerten eine Abschaltung der Anlage aus.

### **3.6 Bilanzierung über den Vergaser**

Die Bilanzierung der Stoff- und Energieflüsse in der Anlage ist mit vernünftigem Mess- und Analyseaufwand nur mit einigen vereinfachenden Annahmen möglich. So erwies sich das angewendete Verfahren der Elementaranalyse als zu wenig empfindlich für die Bestimmung von Schwefel und Stickstoff. Ausserdem ist die Erfassung von Wasserstoff und Sauerstoff mit dem gewählten Verfahren nicht möglich. Daher werden die Gehalte von Wasserstoff und Sauerstoff anhand von Literaturquellen ermittelt. Die Stoffströme der Elemente Schwefel und Stickstoff werden nicht bilanziert.

#### **3.6.1 Herleitung der Bilanzgleichungen**

Holz und Rinde enthalten immer einen Wasseranteil in Form von Feuchte oder gar von freiem Wasser auf der Oberfläche. Wird Holz verbrannt, so bleiben die mineralischen Bestandteile des Holzes als Asche zurück. Ausserdem ist Holz keine reine chemische Substanz, sondern setzt sich aus verschiedenen organischen und anorganischen Stoffen zusammen.

Die Elemente Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, die mit dem Brennstoff und mit der Luft in den Vergaser gelangen, müssen diesen in gleicher Menge wieder verlassen, wenn sie nicht im Vergaser gespeichert werden. Im stationären Zustand ist die Änderung des Speicherterms gleich null oder zumindest vernachlässigbar klein. Ausserdem wurde festgestellt, dass die Asche nahezu vollständig ausgebrannt ist und der Ascheanfall im Vergleich zur zugeführten Brennstoffmenge sehr gering ist.

Die Anteile von Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff, die in Form von kondensierbaren Kohlenwasserstoffen und Russteilchen in das Waschwasser gelangen, sind ebenfalls sehr gering und werden in der Bilanzierung vernachlässigt. Versuchsergebnisse zeigen, dass die Zunahme organischer Stoffe im Wasch-

wasser auch über längere Zeit gering ist. Somit sind alle signifikanten Stoffströme bekannt. Diese Annahmen werden im fünften Kapitel verifiziert.

Die Bilanzgleichungen für Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff lauten somit:

$$\dot{n}_{C,BS} = \dot{n}_{CH_4} + \dot{n}_{CO} + \dot{n}_{CO_2} \quad (3.1 \text{ a})$$

$$\dot{n}_{H,BS} + 2 \dot{n}_F = 2 \dot{n}_{H_2} + 2 \dot{n}_{H_2O} + 4 \dot{n}_{CH_4} \quad (3.1 \text{ b})$$

$$\dot{n}_{O,BS} + \dot{n}_F + 2 \dot{n}_{O,L} = \dot{n}_{H_2O} + \dot{n}_{CO} + 2 \dot{n}_{CO_2} + 2 \dot{n}_{O_2} \quad (3.1 \text{ c})$$

Da die Feuchte, der Aschegehalt und der Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes analytisch bestimmt werden und die Verhältnisse von Sauerstoff und Wasserstoff zum Kohlenstoff im Brennstoff aus der Literatur bekannt sind, können alle Terme der linken Seite der Gleichungen mit Ausnahme des Molstromes des Luftsauerstoffes berechnet werden.

In der Elementaranalyse wird der Kohlenstoffgehalt bezogen auf die Originalmasse der Probe (feuchtes Material) bestimmt. Die Massenanteile von Wasserstoff und Sauerstoff sind für verschiedene Materialien tabelliert (z.B. Hofbauer, 1994). Die folgende Bilanz besagt, dass der Brennstoffmassenstrom gleich der zeitlichen Abnahme des Brennstoffes im Vorratscontainer ist:

$$\dot{m}_{BS} = - \frac{dm_{BS}}{dt} \quad (3.2)$$

Der Kohlenstoffstrom errechnet sich aus dem Brennstoffstrom durch Multiplikation mit dem Kohlenstoff-Massenanteil:

$$\dot{m}_C = \dot{m}_{BS} w_C$$

und daher

$$\dot{m}_C = - w_C \frac{dm_{BS}}{dt} \quad (3.3)$$

Der Molstrom des Kohlenstoffes durch den Vergaser ist nun bekannt:

$$\dot{n}_{C,BS} = \frac{\dot{m}_{BS} w_C}{M_C} = - \frac{w_C}{M_C} \frac{dm_{BS}}{dt} \quad (3.4)$$

Damit ist neben der Kohlenstoffbilanz (3.1 a) eine zweite Gleichung für den Kohlenstoffstrom bekannt und der Bezug zum Strom gasförmiger Produkte hergestellt.

In der Anlage enthält das Schwelgas einen Anteil Wasserdampf. Das Wasser stammt aus der Feuchte des Brennstoffes und aus den chemischen Reaktionen. Nun muss der Zusammenhang zwischen den

gemessenen Anteilen der Vergasungsprodukte im trockenen Gas und den Anteilen im feuchten Rohgas hergestellt werden. Der tatsächliche Gasstrom beträgt:

$$\dot{n}_{\text{Gas}}^* = \dot{n}_{\text{N}_2}^* + \dot{n}_{\text{O}_2}^* + \dot{n}_{\text{H}_2}^* + \dot{n}_{\text{CO}}^* + \dot{n}_{\text{CO}_2}^* + \dot{n}_{\text{CH}_4}^* + \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}^* \quad (3.5)$$

Für die Messung wurde ein kleiner Teilstrom des Gases abgezogen und der enthaltene Wasserdampf vollständig kondensiert. Der Molstrom des gemessenen Gases ist also um den Wasserdampfanteil geringer:

$$\dot{n}_{\text{G, tr}}^* = \dot{n}_{\text{N}_2}^* + \dot{n}_{\text{O}_2}^* + \dot{n}_{\text{H}_2}^* + \dot{n}_{\text{CO}}^* + \dot{n}_{\text{CO}_2}^* + \dot{n}_{\text{CH}_4}^* \quad (3.6)$$

Dividiert man die Kohlenstoffbilanz (3.1 a) durch den gemessenen Gasstrom (3.6), so erhält man:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{n}_{\text{C, BS}}^*}{\dot{n}_{\text{G, tr}}^*} &= \frac{\dot{n}_{\text{CH}_4}^* + \dot{n}_{\text{CO}}^* + \dot{n}_{\text{CO}_2}^*}{\dot{n}_{\text{N}_2}^* + \dot{n}_{\text{O}_2}^* + \dot{n}_{\text{H}_2}^* + \dot{n}_{\text{CH}_4}^* + \dot{n}_{\text{CO}}^* + \dot{n}_{\text{CO}_2}^*} \\ &= x_{\text{gem, CH}_4} + x_{\text{gem, CO}} + x_{\text{gem, CO}_2} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Somit beträgt der trockene Gasstrom:

$$\begin{aligned} \dot{n}_{\text{G, tr}}^* &= \frac{\dot{n}_{\text{C, BS}}^*}{x_{\text{gem, CH}_4} + x_{\text{gem, CO}} + x_{\text{gem, CO}_2}} \\ &= \frac{\frac{w_{\text{C}}}{M_{\text{C}}} \frac{dm_{\text{BS}}}{dt}}{x_{\text{gem, CH}_4} + x_{\text{gem, CO}} + x_{\text{gem, CO}_2}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Damit ist der Molstrom des trockenen Gases bekannt. Der tatsächliche Molstrom enthält aber noch Wasserdampf. Um diesen Anteil zu erfassen, muss die Wasserstoffbilanz (3.1 b) in die Gleichung (3.8) eingesetzt werden:

$$\begin{aligned} \dot{n}_{\text{H, BS}}^* + 2 \dot{n}_{\text{Feuchte}}^* &= 2 \dot{n}_{\text{H}_2}^* + 2 \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}^* + 4 \dot{n}_{\text{CH}_4}^* \\ &= 2 x_{\text{gem, H}_2} \dot{n}_{\text{G, tr}}^* + 2 \dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}^* + 4 x_{\text{gem, CH}_4} \dot{n}_{\text{G, tr}}^* \end{aligned} \quad (3.1 \text{ b})$$

Der Molstrom des Wasserstoffes, der mit der trockenen Biomasse in den Vergaser gelangt muss durch Multiplikation des Kohlenstoffstromes mit dem Wasserstoff/Kohlenstoff-Verhältnis aus der Literatur ermittelt werden.

Der Molstrom des Wasserdampfes beträgt demnach:

$$n_{\text{H}_2\text{O}}^* = \frac{n_{\text{H,BS}}^* + 2n_{\text{F}}^* - 2n_{\text{G,tr}^{\text{xgem}},\text{H}_2}^* - 4n_{\text{G,tr}^{\text{xgem}},\text{CH}_4}^*}{2} \quad (3.9)$$

Somit ist der Molstrom des trockenen und des feuchten Gases bekannt. Der Molstrom der einzelnen Komponenten wird aus dem Strom des trockenen Gases und dessen gemessener Zusammensetzung berechnet.

### 3.6.2 Energiebilanz

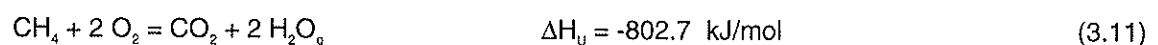
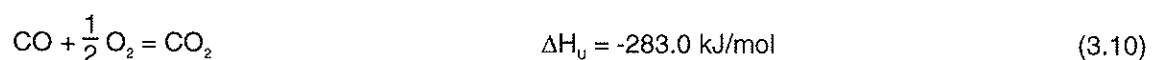
Um die energetische Effizienz des Verfahrens zu beurteilen, muss der Energieinhalt des Brennstoffes mit demjenigen des Roh- und des Reingases verglichen werden. Ausserdem wird die Ausbeute an elektrischer Energie dem Energieinhalt des Brennstoffes gegenübergestellt, woraus sich der elektrische Wirkungsgrad der Anlage ergibt.

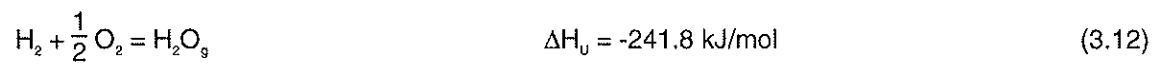
Da der Brennstoffverbrauch und die Gaszusammensetzung gemessen wurden, kann die produzierte Gasmenge wie beschrieben, berechnet werden. Die Heizwerte der festen Brennstoffe werden anhand ihrer Feuchte und ihres Aschegehaltes berechnet. Der Energieinhalt des Gases wird aus der Gaszusammensetzung und dem Heizwert der einzelnen Gase berechnet. Die Heizwerte errechnen sich aus den Standard-Bildungsenthalpien der Gase. Diese Werte sind zum Beispiel im Handbook of Chemistry and Physics (Seiten 5-19 bis 5-27) tabelliert:

Tabelle 3.1: Standardbildungsenthalpien der Komponenten des Schwelgase

Komponente	Bildungsenthalpie $\Delta_f H_{298.15\text{ K}}^0$ [kJ/mol]
Wasserstoff	0
Kohlenmonoxid	-110.5
Sauerstoff	0
Methan	-74.4
Stickstoff	0
Kohlendioxid	-393.5
Wasser gasförmig	-241.8
Wasser flüssig	-285.8

Mit Hilfe der chemischen Gleichungen der Oxidation der Gaskomponenten können die Heizwerte berechnet werden:





Der Gemischheizwert lässt sich sehr einfach aus den Heizwerten der Komponenten berechnen:

$$\Delta H^0_{\text{Gasgem.}} = x_{\text{H}_2} \Delta H^0_{\text{H}_2} + x_{\text{CH}_4} \Delta H^0_{\text{CH}_4} + x_{\text{CO}} \Delta H^0_{\text{CO}} \quad (3.13)$$

Somit ist der Energieinhalt des Schwelgases bekannt.

## **4. Messtechnik und Analytik**

Die messtechnischen Einrichtungen wurden so gewählt, dass eine ausreichend umfassende Beschreibung des Betriebes der Anlage möglich ist. Wie bereits erwähnt, wird die Anlage durch eine SPS gesteuert. Die Messdaten werden von der SPS erfasst und an einen Personalcomputer weitergegeben. Auf diesem können die Messwerte in einer Trenddarstellung oder im Anlagefliessbild beobachtet werden. Die Daten werden in einem Intervall von einer Minute auf der Festplatte des Visualisierungscomputers abgelegt.

Für die Bestimmung der Belastung von Abwasser und Kondensat wurden Proben gezogen und durch das Labor der Lobbe Sibag AG in Emmenbrücke analysiert. Proben des Brennstoffes wurden jeweils zu Beginn, während den Messungen und am Ende der Messungen gezogen. Die Proben wurden zu Mischproben vereint. Die Asche wurde jeweils nur am Ende der Tests entnommen. Bei den kurzzeitigen Tests zeigte sich, dass die Asche jeweils einen Anteil der Asche des vorgehenden Materials enthielt. Die Analytik der Feststoffe, also des Ausgangsmaterials und der Asche, wurde durch die Novartis Services AG in Basel durchgeführt. Diese führte auch die Schwermetall- und Dioxinmessungen durch. Von der Novartis wurde auch der Gaschromatograph zur Analyse des Reingases und der Abgascomputer zur Bestimmung der Abgasparameter in Miete überlassen und sämtliche Messleitungen installiert. Während des 150-Studentests wurde zusätzlich ein on-line Messsystem eingesetzt. Die Teer- und Partikelmessungen wurden durch die Firma Verenum, Dr. Thomas Nussbaumer, Zürich, durchgeführt.

### **4.1 Messtechnische Ausrüstung der Vergasungsanlage und des BHKW**

#### **4.1.1 Messung des Brennstoffverbrauches**

Der Brennstoffverbrauch wurde durch kontinuierliche Erfassung des Gewichtes des Vorratscontainers ermittelt (vier Wägezellen der Firma Mettler-Toledo AG). Die Anzeigegenauigkeit des Wägesystems beträgt 10 kg. Der Brennstoffverbrauch wird aus der Steigung der Regressionsgeraden in der Darstellung von Masse gegen Zeit sehr genau berechnet. Aufgrund des Volumens von Kettenförderer, Vibrorinne und Schleuse liegt die zeitliche Verzögerung zwischen der Gewichtsabnahme des Containerinhaltes und dem Verbrauch der Schnitzel im Vergaser in der Grössenordnung von 5 Minuten.

#### **4.1.2 Messung der Ascheproduktion**

Der Ascheanfall wurde durch Wägen des vollen Aschebehälters ermittelt. Die Wägung erfolgte auf einer geeichten Plattformwaage (Mettler Toledo AG) der Lobbe Sibag AG.

Der Vergaser wurde mit jedem Material vorgängig mehrere Stunden betrieben. Danach wurde die Asche entfernt, um nur den Ascheanfall aus der Messperiode zu erfassen. Nach der Messperiode wurde die produzierte Asche so vollständig wie möglich aus dem Vergaser entfernt und quantifiziert. Da aber in der Asche aus dem Versuch, der auf die Vergasung von Altholz folgte, signifikante Mengen von Nägeln und Schrauben gefunden wurden, muss geschlossen werden, dass sich die Aschen dennoch vermischen. Diese Messung ist also sicherlich mit Unsicherheiten verbunden.

Die Auswirkung auf die Auswertung der Stoffbilanzen ist allerdings gering, da der Ascheanfall jeweils sehr gering ausfiel.

#### **4.1.3 Bestimmung der Luftzufuhr**

Die Menge Luft, die dem Vergaser zugeführt wird, ist ein wichtiger Parameter. Die genaueste Methode zur Ermittlung der zugeführten Luftmengen ist die Berechnung anhand der Schwelgaszusammensetzung und der zugeführten Brennstoffmenge. Diese ist aufgrund der hohen Genauigkeit der Waage und der Analyse der Gaszusammensetzung sehr zuverlässig.

#### **4.1.4 Temperaturmessungen**

Für die Auswertung sind vor allem die Roh- und die Reingastemperatur sowie die Abgastemperatur von Belang. Daher sind an diesen Stellen Thermoelemente eingebaut, deren Messwerte kontinuierlich aufgezeichnet werden. Ausserdem wird die Abgastemperatur des Blockheizkraftwerkes (BHKW) ständig registriert. Sehr aufschlussreich wäre zudem die Temperaturverteilung im Vergaser und dort speziell in der Oxidationszone. Da aber zur Zeit keine Temperatursonden verfügbar sind, die sich zur Messungen von Temperaturen eignen, wie sie in der Oxidationszone herrschen, muss auf diese Erkenntnisse verzichtet werden. Hingegen wird die Temperatur im Ascherost gemessen.

#### **4.1.5 Füllstand im Reaktor**

Die Materialzufuhr zum Reaktor wird über den Füllstand im Reaktor geregelt.

#### **4.1.6 Waschwassernachspeisung und Kondensatanfall**

Die Wasserbilanz des Waschwasserbeckens ist meist negativ, da mehr Wasser verdampft, als dem Waschwasserbecken mit dem Rohgas durch Kondensation zugeführt wird. Daher wurde auf dem Dach des Vergasungscontainers ein Frischwassertank mit Skalierung aufgestellt. Mit Hilfe einer einfachen, mechanischen Schwimmerregelung wird Frischwasser nachgespeist. Der Füllstand des Vorratsbehälters wird periodisch notiert.

In der Rohrleitung zum Motor des BHKW ist ein Kondensatabscheider installiert. Das abgeschiedene Kondensat wird zu späteren Analyse gesammelt und dessen Menge bestimmt.

#### **4.1.7 Elektrische Leistung**

Die elektrische Leistung wird über die Messung der Stromstärke bestimmt und kontinuierlich auf der SPS erfasst. Zusätzlich wird die an das öffentliche Stromnetz zurückgespeiste Energie regelmässig am Stromzähler abgelesen. Somit ist eine Redundanz dieser Messung gegeben.

#### **4.1.8 Thermische Leistung**

Da das heisse Reingas des Vergasers durch eine Wäsche abgekühlt wird, erwärmt sich das Waschwasser. In einem Plattenwärmetauscher wird diese Wärmeenergie auf einen Kühlkreislauf übertragen. Zur Rückkühlung des Kühlwassers dient ein Tischkühler auf dem Dach des Vergasungscontainers. Dieser gibt die Energie ohne Nutzung an die Umgebung ab. Die abgegebene thermische Leistung wird nicht erfasst. Sie kann jedoch aus der Gasmenge, der durchschnittlichen Wärmekapazität des Gases und der Temperaturdifferenz zwischen eintretendem und austretendem Gas berechnet werden.

Das verwendete Blockheizkraftwerk ist für die Abwärmenutzung durch Einbindung des Kühlwasserkreislaufes und Nutzung des Wärmeinhaltes des Motorenabgases ausgerüstet. Über die Messung der Vor- und Rücklauftemperatur, sowie des Kühlwasserdurchflusses wird die eingespeiste Wärmemenge durch einen handelsüblichen Wärmezähler berechnet.

Wegen des Standortprovisoriums wird die Wärmeenergie jedoch nicht genutzt, sondern über einen Notkühler an die Umgebung abgegeben. Während der Versuche wurde lediglich die Energieabgabe des Kühlwasserkreislaufes durch den Wärmezähler registriert. Für die Nutzung der Abgaswärme ist ein Wärmetauscher zwar vorhanden; er wurde jedoch nicht betrieben, so dass das Motorenabgas die BHKW-Anlage ohne Abkühlung verliess. Auch hier ist die rechnerische Bestimmung der nutzbaren und der abgeführten Wärmeenergie möglich.

### **4.2 Probenahme und Analytik von Brennstoffen und Rostasche**

Bei den Vergasungsversuchen sind mehrere Probenahmen für die spätere Analyse erforderlich. Für die Bilanzierung der Stoffflüsse müssen die Zusammensetzungen des Brennstoffes, der Asche, des Abwassers, des Kondensats sowie des Schwegases und des Abgases bekannt sein.

Die Bestimmung des Brennwertes (oberer Heizwert) der Brennstoff- und Ascheproben erfolgte bei Novartis in einem Kalorimeter, basierend auf einem doppeltrockenen Messverfahren gemäss den Richtlinien DIN 51900 Teil 1 bis 3.

Durch die Elementaranalysen wurden die Anteile von Kohlenstoff und Stickstoff erfasst. Die ebenfalls wichtigen Elemente Wasserstoff und Sauerstoff wurde durch das angewandte Verfahren nicht erfasst und es wird daher zur Bestimmung dieser beiden Gehalte auf Literaturangaben zurückgegriffen. Die Gehalte

an Kohlenstoff und Stickstoff wurden durch Verbrennung und Quantifizierung der Verbrennungsprodukte Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) bestimmt. Die Gehalte an Schwefel und Chlor wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ohne Nassaufschluss bestimmt.

Die Metallgehalte des Altholzes wurde nach Mahlen in einer Stickstoffmühle und einem sauren Aufschluss bestimmt. Danach wurden Cadmium, Kupfer, Chrom, Nickel, Blei und Zink durch induktiv gekoppelte Plasma-Atomemission quantifiziert. Der Quecksilberanteil wurde mittels Atomabsorptionsspektrometrie unter Einsatz der Kaltdampftechnik bestimmt.

Die Metallgehalte der Ascheproben wurden durch Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt. Der Quecksilbergehalt wurde wiederum durch Atomabsorptionsspektrometrie unter Einsatz der Kaltdampftechnik bestimmt.

Der Trockenstoffgehalt der Proben wurde durch die Lobbe Sibag AG durch Trocknen bei 105 °C und Wägen bestimmt.

### **4.3 Probenahme und Analytik von Waschwasser und Kondensat**

Da die Wände des Waschwassertanks und des Waschwasserkreislaufs selbst nach der Entleerung, Reinigung und Wiederbefüllung des Waschwassertanks noch Verunreinigungen an das Waschwasser abgaben, wurde vor Beginn jedes Vergasungsversuches eine Waschwasserprobe gezogen. Nach Abschluss jeder Messperiode wurde eine zweite Probe gezogen. Aus der Differenz der Belastungen kann die in das Waschwasser eingetragene Fracht ermittelt werden.

Die Proben wurden jeweils bei laufendem Waschwasserkreislauf (Durchmischung) mittels eines in Bodennähe des Tanks eingeschweissten Hahnens gezogen, umgehend beschriftet und bis zur Analyse im Kühlschrank gelagert.

Kondensat fällt in der Leitung zwischen dem Tropfenabscheider als letzter Stufe der Gasreinigung und dem Gasmotor an. Ein Kondensatabscheider schützt den Motor vor dem Eintritt des Kondensates in die Brennräume. Das Kondensat fließt aus dem Kondensatabscheider durch eine Syphonleitung in einen Sammelbehälter von 40 l Inhalt ab. Bei der Entleerung der Behälter wird die Kondensatmenge bestimmt und jeweils eine Probe für die spätere Analyse sichergestellt.

In Kondensat und Abwasser werden folgende Parameter analysiert (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Analyseparameter für Waschwasser und Kondensat

Parameter	Methode	Bestimmungsgrenze
Ammonium, Ammoniak	EDI 30	0.01 mg/l
Cyanid	EDI 30	0.01 mg/l
Totaler organischer Kohlenstoff	EDI 41/42	0.01 mg/l
Phenol gesamt	EDI 52	0.02 mg/l
Cadmium	AAS, EDI 12-27/DIN38406E7	0.001 mg/l
Blei	AAS, EDI 12-27/DIN38406E7	0.005 mg/l
Chrom	AAS, EDI 12-27/DIN38406E7	0.005 mg/l
Nickel	AAS, EDI 12-27/DIN38406E7	0.005 mg/l
Kupfer	AAS, EDI 12-27/DIN38406E7	0.005 mg/l
Zink	AAS, EDI 12-27/DIN38406E7	0.001 mg/l

EDI: Eidgenössisches Departement des Innern

AAS: Atomadsorptionsspektrometrie

DIN: Deutsches Institut für Normung e. V.

## 4.4 Reingasmessung

Die Reingasmessung wurde quasi on-line durchgeführt. Das Gas wurde aus der Leitung zwischen dem Tropfenabscheider der Gasreinigung und dem Kondensatabscheider vor dem Verbrennungsmotor abgezogen. Eine Membranpumpe erzeugte den nötigen Unterdruck und transportierte das Gas durch Teflon-Leitungen durch die Gasreinigung und zu den Analysegeräten. Von dort wurde der geringe Gasstrom ins Freie geleitet und an die Umgebung abgegeben.

Bevor das Gas zu den Analysegeräten gelangte, wurde das Kondensat in einer Gaswaschflasche abgeschieden. Anschliessend wurde es zur Entfernung von kondensierbaren Kohlenwasserstoffen in einer mit Benzylalkohol befüllten zweiten Gaswaschflasche gereinigt. Zur Zurückhaltung des Benzylalkohols wurde eine wasserbefüllte Waschflasche eingesetzt. Beide Gaswaschflaschen wurden in einem Wasserbad mit Eiswürfeln gekühlt. Zum weiteren Schutz des Gaschromatographen vor Verunreinigungen wurde noch ein Glasröhrchen in die Leitung eingebaut, das mit Glaswolle und Aktivkohle gefüllt war.

Die Gaszusammensetzung wurde bei allen Versuchen mit einem kompakten Gaschromatographen (P200H Micro GC, MTI Analytical Instruments, Fremont, CA) durchgeführt. Das Gerät ist mit zwei Trennsäulen (Pora-Pak und Silicagel) ausgerüstet. Somit wird eine gute Auftrennung und Detektion der Gasbestandteile erreicht. Während der Versuche wurde jeweils mit jeder Messung eine Eichgasmessung zur Kalibrierung von Wasserstoff, Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Stickstoff und eine Messung von Luft zur Eichung des Sauerstoffpeaks durchgeführt.

Während des 150 Stundentests wurde durch die Firma Verenum eine kontinuierlich arbeitende Messeinrichtung installiert, die aus folgenden Geräten bestand:

- URAS 10 E (Hartmann & Braun) zur Messung von CO, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>
- Binos 100 (Fisher Rosemount) zur Messung von CO<sub>2</sub>
- Thermor 6N (MBE Electronic) zur Messung von H<sub>2</sub>

Diese Messeinrichtung erlaubte den unbeaufsichtigten Betrieb der Messungen. Die Messungen von CO, CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> beruht auf NDIR (Infrarotspektrometrie). Wasserstoff wird mittels Wärmeleitungsdetektor quantifiziert. Bei der kontinuierlichen Messung wird die Stickstoffkonzentration als Ergänzung der Summe der gemessenen Konzentrationen zu 100 % berechnet. Die Messgeräte wurden in unregelmässigen Abständen mit Eichgas nachgeeicht.

## **4.5 Abgasmessung**

Messungen im Abgas wurden mit einem Abgascomputer (ecom®-KD, Alba-Therm AG, Bassersdorf) durchgeführt. Ein kleiner Teilstrom des Abgases wurde aus dem Kamin des BHKW mit Hilfe einer Membranpumpe abgezogen und in einer Teflon-Leitung in den Messcontainer geleitet. Dort wurde das Kondensat in einer Gaswaschflasche abgeschieden. In der Leitung zurück ins Freie war ein T-Stück eingebaut, in das die Sonde des Abgascomputers eingeführt werden konnte.

Das Gerät misst die Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid und Stickstoffdioxid. Als Brennstoff kann am Gerät Stadtgas gewählt werden, dessen Zusammensetzung derjenigen des Schwelgases der Vergasungsanlage ähnelt. Anhand dieser Eingabe und der gemessenen Kohlenmonoxid-Konzentration errechnet das Gerät die Kohlendioxid-Konzentration.

## 4.6 Probenahme und Analytik für die Teer- und Partikelmessungen

Teere und Partikel sind als kritische Faktoren für den Betrieb von Verbrennungsmotoren anzusehen. Stassen (1993) nennt als Kriterien für den Betrieb eines Gasmotors einen Partikelgehalt von weniger als  $50 \text{ mg/Nm}^3$  und einen Teergehalt von maximal  $100 \text{ mg/Nm}^3$ .

Eine Schwierigkeit bei der Quantifizierung der Teergehalte besteht in der Festlegung, welche Komponenten überhaupt als Teer bezeichnet werden sollen. Je nach eingesetzten Absorptionsmitteln werden mehr oder weniger Teere aus dem Gas abgeschieden und gemessen. Somit hat die Messmethode einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis. Um so wichtiger ist es, auf ein bewährtes, allgemein angewendetes Messverfahren zurück zu greifen, wie es durch das Büro Verenum durchgeführt wird.

Die Probenahme für die Bestimmungen der Teer- und Partikelkonzentrationen und Frachten wurden daher durch das Büro Verenum vorgenommen. Die Probeaufbereitung und Ermittlung der Partikel- und Teermengen wurde durch die Abteilung Organische Werkstoff- und Schadstoffanalytik der EMPA Dübendorf durchgeführt. Die Ermittlung der Konzentrationen an polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und mittelflüchtigen Kohlenwasserstoffen wurde durch das Institut Bachema in Zürich durchgeführt. Ausser der Probenahme oblagen die Koordination der nasschemischen Analysen und die Auswertung der Teer- und Partikelmessungen der Verenum. Das Vorgehen ist in den Richtlinien „Guideline for Sampling and Analysis of Tars, Condensates and Particulates from Biomass Gasifiers“ (Salzmann et al, 1996) beschrieben.

Pro Material wurde eine Probenahme im Roh- und im Reingas bei Volllast durchgeführt. Die Messungen erfolgten im Rein- oder im Rohgas. Zusätzlich wurde ein Versuch zur Bestimmung der Partikelgrössenverteilung mit einem Andersen-Kaskadenimpaktor und zur Adsorption der mittelflüchtigen Kohlenwasserstoffe (light tars) durchgeführt. Beim 150-Studentest wurden folgende Messungen durchgeführt: 9.8 Stunden und 79.7 Stunden nach der Zündung wurden Probenahmen im Rohgas durchgeführt. 128.6 Stunden und 149.1 Stunden nach der Zündung wurden Probenahmen in Roh- und Reingas durchgeführt. Die erwähnte Impaktormessung erfolgte während des 150 Studentests unmittelbar vor der ersten Teer- und Partikelprobenahme. Dazu wurde ein Teilstrom des Gases abgezogen und auf den Impaktor geleitet, in dem die im Gasstrom enthaltenen Partikel nach Teilchengrösse getrennt abgeschieden werden. Die Mengen der einzelnen Fraktionen wurden durch Wägen bestimmt.

Die mittelflüchtigen Kohlenwasserstoffe (light tars) wurden durch Adsorption in TENAX-Patronen erfasst. Dabei handelt es sich hauptsächlich um die monocyclischen Aromaten Benzol, Toluol, Xylol und Ethylbenzol (BTEX). Der Gesamtgehalt an „light tars“ ergibt sich als Summe der in der Anisollösung und in den TENAX-Röhrchen gefundenen Mengen. Es zeigt sich, dass alle Kohlenwasserstoffe die schwerflüchtiger als Xylol sind quantitativ absorbiert werden und somit keine Probenahmeverluste auftraten.

## **4.7 Probenahme und Analytik für die Schwermetall- und Dioxinmessungen**

Die Probenahme und die Analytik der für die Schwermetall- und Dioxinmessungen wurden durch die Novartis Services AG (Basel) durchgeführt. Bei der Vergasung von Altholz wurden an drei Messstellen (Rohgas, Reingas und Motorenabgas) die Konzentrationen von Cadmium, Quecksilber, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei und Zink bestimmt. Zusätzlich wurde bei Vollast eine Bestimmung der Konzentration der mehrfach chlorierten Dibenzodioxin- und Dibenzofurankonzentrationen durchgeführt. Während den Metallmessungen wurde im Motorenabgas kontinuierliche Sauerstoff, Kohlenmonoxid- und Stickoxid-Messungen durchgeführt.

### **4.7.1 Messung der Konzentrationen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid und Sauerstoff im Motorenabgas**

Zusätzlich zu der in Kapitel 4.5 beschriebenen Analyse der Abgase mittels Abgascomputer wurden während den Dioxin- und Schwermetallmessungen weitere Analysen der Abgasparameter durchgeführt.

Die Stickoxide wurden vor der Analyse durch einen Konverter zu Stickstoffoxid (NO) reduziert und anschliessend mit einem Chemilumineszenz-Analysegerät quantifiziert (BUWAL-Richtlinie Januar 1996). Die Sauerstoffkonzentration wurde mittels magnetischer Suszeptibilität ermittelt. Kohlenmonoxid (CO) wurde mittels nichtdispersiver Infrarotabsorption gemessen (BUWAL-Richtlinie Januar 1996). Die Ergebnisse sind im Anhang aufgeführt.

### **4.7.2 Messung der Schwermetallkonzentrationen im Motorenabgas**

Zur Bestimmung der Metallkonzentrationen wurde ein Teilstrom abgezogen und durch zwei in Serie geschaltete Impinger mit stark oxidierenden Lösungen (7 % Salpetersäure und 3 % Kaliumperoxidsulfat) geleitet. In diesen Lösungen wurden die Konzentrationen von Cadmium, Kupfer, Chrom, Nickel, Blei, Zink durch induktiv gekoppelte Plasma-Atomemission gemessen (ICP, DIN 38406-E 22). Quecksilber wurde mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) quantifiziert. Die maximale Messunsicherheit beträgt bei den Metallen  $\pm 20\text{-}25\%$ .

### **4.7.3 Messung der Konzentrationen von polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen**

Die Messverfahren zur Bestimmung der Konzentrationen von polychlorierten Dibenzodioxinen (PCDD) und Dibenzofuranen (PCDF) sind in der VDI-Richtlinie 3499 beschrieben. Dabei wird bei möglichst isokinetischen Bedingungen ein Teilvolumenstrom abgezogen und rasch abgekühlt. Staub und kondensierbare Komponenten fallen dabei gemeinsam an. Danach werden die restlichen kondensierbaren Komponenten in einem mit Ethoxyethanol gefüllten und auf  $-25$  bis  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  gekühlten Impinger abgeschieden.

Zur Ermittlung der Wiederfindungsrate wurde den Flüssigkeiten in den Kondensatgefässen  $10\text{ ng } 1,2,3,4\text{-}^{13}\text{C}_{12}\text{-TCDD}$  zugesetzt. Die Wiederfindungsrate liegt typischerweise zwischen 45 und 80 %.

Die Proben wurden anschliessend im Labor aufgearbeitet. Die Identifizierung und Quantifizierung der PCDD/PCDF erfolgte mit einem hochauflösenden Gaschromatographen in Verbindung mit einem hochauflösenden Massenspektrometer.



## **5. Durchführung**

### **5.1 Das Versuchsprogramm und Begründung der Vorgehensweise**

Das Versuchsprogramm wurde in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energiewirtschaft und dessen Berater für das tangierte Sachgebiet, Herrn R. Bühler, zusammengestellt. Ziel waren die Ermittlung relevanter Daten für die Bewertung der Vergasung von Holzfraktionen und der Nachweis der Praxistauglichkeit des AHT-Vergasers. Die Vergasungsanlage sollte mit den Brennstoffen Industrieschnitzel, trockene und waldfeuchte Waldschnitzel, Altholz und Rinde betrieben werden. Ausserdem sollten Messungen bei Voll- und bei Teillast durchgeführt werden, um das Verhalten bei reduzierter Leistung mit demjenigen bei Volllast vergleichen zu können. Nach ersten Versuchen mit waldfeuchten Holzschnitzeln wurde dieses Material aufgrund des hohen Druckabfalles über das Festbett fallengelassen. Daher wird nachfolgend nicht mehr näher auf dieses Material eingegangen.

Das ursprüngliche Vorhaben, die Langzeittauglichkeit des Vergasers in einem 100-Studentest zu belegen wurde so abgeändert, dass der Langzeittest im Rahmen eines normierten 150-Studentestprogrammes nachgewiesen werden sollte. Als Brennstoff für den 150-Studentest wurden Industrieschnitzel gewählt. Nach dem Dauertest sollte das Verhalten der anderen Brennstoffe in der Vergasung betrachtet werden. Die Versuche mit trockenem Waldholz, feuchtem Waldholz, Rinde und Altholz sollten in Kurzzeittests durchgeführt werden. Altholz wird als Beispiel eines mit problematischen Stoffen wie Schwermetallen, Chlor, Fluor usw. belasteten Materials eingesetzt.

Bei der Wahl der Analyseparameter wurde das Optimum zwischen maximaler Aussagekraft und analytischem Aufwand gesucht.

### **5.2 Eingesetzte Materialien**

Die eingesetzten Materialien wurden bei ortsansässigen Betrieben bezogen. Alle Materialien wurden in den Container mit Unterschubboden abgefüllt und in diesem für den Anlagebetrieb bereitgestellt. Alle Brennstoffe sind kommerziell erhältlich, wobei die Fraktionen wie folgt vorbehandelt wurden. Die Industrieholzchnitzel fallen produktionsbedingt trocken an und weisen einen geringen Feinanteil auf. Sie wurden daher ohne weitere Vorbehandlung eingesetzt. Beim Waldholz wurde ein natürlich getrocknetes Sortiment gewählt, das durch Sieben vom Feinstaub befreit wurde. Die Rinde wurde künstlich getrocknet und anschliessend abgesiebt. Das Altholz wurde ebenfalls abgesiebt.

Für die Siebung wurde ein Sieb mit einer Maschenweite von 10 mm eingesetzt, um den Feinanteil abzutrennen. Der Feinanteil erhöht den Druckabfall über den Vergaser und hemmt so den Vergasungsprozess.

### **5.2.1 Industrieschnitzel**

Als Brennstoff für den 150-Studententest wurden trockene Industrieschnitzel von der Firma Tschopp Holzindustrie AG, Buttisholz (LU) eingesetzt. Es stammt aus der Schalungstafelproduktion, in der es auf ca. 8 % atro getrocknet wurde. Es fällt im Prozess staubarm an und wurde daher nicht abgesiebt. Die Schnitzel bestanden ausschliesslich aus Fichtenholz und wiesen einen Rindenanteil (Schwarte) von ca. 10-15 % auf. Die kommerziell erhältlichen Industrieschnitzel wurden in Containern mit Schubboden angeliefert und ohne weitere Vorbehandlung für die Vergasung eingesetzt.

### **5.2.2 Waldhackschnitzel**

Die Versuche zur Vergasung von Waldholz wurden mit trockenem Material durchgeführt. Es wurde bei der Firma Amstutz Landschaftspflege, Emmen (LU), bezogen. Das Rundholz wurde im Freien unter einem Fliess sonnengetrocknet. Nach dem Hacken wurde ca. ein Viertel des Volumens als Feinanteil durch Siebung (10 mm) abgetrennt. Das Holz bestand hauptsächlich aus Fichte (ca. 80 %) und wies einen Hartholzanteil (Buche und Birke) von ca. 20 % auf.

### **5.2.3 Altholz**

Das Altholz stammt vom Sammelplatz der Kompostier- und Vergärungsanlage Almig der Firma Alfred Müller AG, Baar (ZG). Wie die Waldschnitzel wurde das Altholz vorgängig durch Absieben vom Feinanteil < 10 mm befreit. Das Material ist bedingt durch dessen Herkunft trocken. Es enthält beschichtetes, angestrichenes und unbehandeltes Holz, einen geringen Kunststoffanteil sowie Nägel, Schrauben und Beschläge.

### **5.2.4 Rinde**

Die eingesetzte Rinde stammt von Fichten und Tannen. Vor dem Einsatz der Rinde wurde diese in einem Trommeltrockner künstlich getrocknet. Anschliessend wurde der Feinanteil (< 10 mm) im Trommelsieb abgetrennt.

### **5.2.5 Charakterisierung der Materialien**

Die Materialien wurden von der Novartis Analytical Services AG und der Lobbe Sibag AG analysiert. Neben der Materialfeuchte, dem Aschegehalt interessieren der Energieinhalt, gemessen als Brennwert, die elementare Zusammensetzung und im Falle von Altholz, die Schwermetallkonzentrationen.

Tabelle 5.1 a: Analyseresultate der Brennstoffe

Material	Datum	Trocken- rückstand [% <sub>feucht</sub> ]	Glührück- stand [% <sub>atro</sub> ]	Brennwert minimal [MJ/kg <sub>feucht</sub> ]	Brennwert maximal [MJ/kg <sub>feucht</sub> ]	Brennwert mittel [MJ/kg <sub>feucht</sub> ]	Totaler Kohlenstoff [kg/kg <sub>feucht</sub> ]	Stickstoff [% w/w <sub>feucht</sub> ]	Schwefel [% w/w <sub>feucht</sub> ]	Chlor [% w/w <sub>feucht</sub> ]
Industrieschnitzel	Mischprobe 28.2.-6.3. 1997	86.2	0.8	17.1	17.6	17.4	44	< 2	0.3	-
Waldholzschnitzel	Mischprobe 16.-17.4. 1997	67.4	0.7	12.5	13.8	13.2	32	-	-	-
Rindeschnitzel	Mischprobe 1.-2.5. 1997	75.3	4.0	16.2	16.5	16.3	38	< 2	0.2	<0.1
Altholzschnitzel	Mischprobe 28.-29.4. 1997	84.9	0.8	17.0	17.8	17.4	43	< 2	<0.1	0.079

Tabelle 5.1 b: Analyseresultate der Brennstoffe

Material	Datum	Chrom [mg/kg <sub>feucht</sub> ]	Nickel [mg/kg <sub>feucht</sub> ]	Kupfer [mg/kg <sub>feucht</sub> ]	Zink [mg/kg <sub>feucht</sub> ]	Cadmium [mg/kg <sub>feucht</sub> ]	Quecksilber [mg/kg <sub>feucht</sub> ]	Blei [mg/kg <sub>feucht</sub> ]
Industrieschnitzel	Mischprobe 28.2.-6.3. 1997	-	-	-	-	-	-	-
Waldholzschnitzel	Mischprobe 16.-17.4. 1997	<10	<10	<10	<10	<10	<0.1	<10
Rindeschnitzel	Mischprobe 1.-2.5. 1997	-	-	-	-	-	-	-
Altholzschnitzel	Mischprobe 28.-29.4. 1997	25	3	8	36	3	<0.1	11

### 5.3 Durchführung des 150-Studentests

Wie erwähnt wurde der 150-Studentest mit trockenen Industrieschnitzeln durchgeführt. Er wurde am 28. Februar 1997 um 8<sup>00</sup> Uhr durch Einschalten des Anfahrventilators gestartet. Dadurch wurde die Vergasung angefacht. Um den Vergaser von Beginn weg mit dem zu testenden Brennstoff zu betreiben, war der Vergaser bereits am Vortag mit dem selben Material betrieben und am Abend abgeschaltet worden. Da das Glutbett bei abgeschaltetem Vergaser eine Weile überdauert, musste der Prozess nicht neu gezündet werden.

Um 8<sup>45</sup> Uhr wurde der Wäscher eingeschaltet, der eine erhöhte Luftzufuhr bewirkt. Dadurch wird der Vergasungsprozess beschleunigt, was ein Ansteigen der Temperaturen im Vergaser auslöst.

Um 8<sup>55</sup> Uhr wurde das Ventilpaar, welches das Gas entweder zur Fackel oder zum BHKW leitet, zum Verbrennungsmotor des BHKW geschaltet und dieser gestartet.

Während des Versuches wurden wiederholt Brennstoffproben aus der Vibratorrinne gezogen und am Ende des Versuches zu einer Mischprobe vereint. Dadurch gelangt eine repräsentative Mischprobe des Materials, das tatsächlich in den Vergaser fiel, zur Analyse.

Da das Waschwasser im Zirkulationsbehälter (ca. 800 l Inhalt) erst nach der Inbetriebnahme der Gasreinigung durch die Zirkulationspumpe durchmischt wird, wurde die Abwasserprobe, die die Zusammensetzung des Waschwassers bei Beginn des Versuches widerspiegeln soll, um 9<sup>15</sup> Uhr gezogen.

Während der gesamten Versuchsdauer wurden Analysen des Schwelgases sowohl mit dem Gaschromatographen der Novartis Analytical Services AG, als auch mit den on-line-Messgeräten, die von der Firma Verenum zur Verfügung gestellt wurden, durchgeführt. In unregelmässigen Abständen wurden Messungen der Abgaszusammensetzung durchgeführt. Störend wirkte sich bei dieser Messung die Abschaltung der Messgaspumpe bei Überschreitung der Obergrenze für die CO-Konzentration aus, die den Sensor vor dauernder Beschädigung durch Überlastung schützt. Der Betrieb des Gasmotors konnte wegen der fehlenden Lambda-Regelung nicht optimal sein. Aufgrund der tageszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur und des Luftdruckes sowie des leicht schwankenden Vordruckes des Gases und ähnlicher Phänomene, änderte sich das Mischungsverhältnis Luft-Brennstoff ständig. Dies machte von Zeit zu Zeit ein Nachstellen der entsprechenden Klappen notwendig. Die Abgastemperatur des Motors und die elektrische Leistung des Generators wurden als Kriterien für die Nachjustierung der Brenngasmischung herangezogen. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass der Motor während längerer Perioden mit einem ungünstigen Wirkungsgrad betrieben wurde.

Da der Drehrost aufgrund einer ungünstigen Lagerung und des schwachen Antriebes verklemmte, wurde kurzzeitig eine Kontrollöffnung (Durchmesser 50 mm) im Rostbereich aufgeschraubt, was wegen des Lufteintrittes um 10<sup>37</sup> Uhr zu einer Verschlechterung der Gasqualität und zu einem kurzzeitigen Ausfall des Motors führte. Der Drehrost stellte eine Schwachstelle bei der Versuchsdurchführung dar, da sich seine Funktion während des Versuches dauernd verschlechterte. Die Konstruktion wurde nach der Beendigung der Versuchreihe überarbeitet.

Die erste Teer- und Partikelprobenahme (AHT 1) erfolgte zwischen 15<sup>45</sup> Uhr und 18<sup>52</sup> Uhr und begann somit 9.8 Stunden nach dem Anfahren des Vergasers. Die Probenahme erfolgte im Rohgas.

Um ca. 20<sup>00</sup> Uhr sprang der Schlauch der Gasprobeleitung ab, was zu einer Unterbrechung der Gasmessung führte. Kürzere Unterbrechungen der Gasmessung sind auf das Entleeren der Kondensatsammelbehälter zurückzuführen. Die Störungen der Gasanalytik beeinflussen die Vergasung in keiner Weise.

Mehrfach wurde der Kondensatbehälter während des Versuches geleert, wobei die Kondensatmenge jeweils notiert wurde. Ausserdem wurde jeweils eine Probe sichergestellt.

Am 2. März 1997 um 6<sup>38</sup> Uhr wurde das Mischungsverhältnis des Motors nachgestellt, da die Leistung stark abgefallen war. Wegen zu raschem Nachregeln fiel dieser aus. Er konnte aber vier Minuten später wieder gestartet werden.

Der erste Wechsel des Schnitzelcontainers erfolgte am 2. März 1997. Der Wechsel des Containers erfolgt ohne Unterbrechung des Vergasungsbetriebes, da der Kettenförderer und der Vergaser selbst über eine genügend grosse Brennstoffreserve verfügen, um diese kurze Zeitdauer zu überbrücken.

Die zweite Teer- und Partikelprobenahme erfolgte am 3. März 1997 zwischen 13<sup>15</sup> Uhr und 17<sup>07</sup> Uhr und wurde somit 79.7 Stunden nach der Zündung begonnen. Wiederum wurde nur das Reingas beprobt.

Am Morgen des 4. März 1997 begann der BHKW-Motor aufgrund des ungünstig gewordenen Gemischverhältnisses unregelmässig zu laufen. Kurze Zeit später fiel er aus. Da die ersten Startversuche misslingen, wurden der Vergaser und die Gasreinigung weiterbetrieben und das Gas auf der Fackel verbrannt, bis der Startversuch um 5<sup>15</sup> gelang und der Normalbetrieb fortgesetzt werden konnte. Um 9<sup>30</sup> wurde die Teer- und Partikelsonde der Firma Verenum ausgebaut, um die Leitung zu inspizieren, in der der Grund für den signifikant angestiegenen Druckabfall vermutet wurde. Eine halbe Stunde später lief die Anlage wieder normal, so dass der BHKW-Betrieb fortgesetzt werden konnte. Um 18<sup>00</sup> Uhr wurde der Brennstoffcontainer gewechselt.

Nach Abschluss des Versuches wurde der Grund für den Druckabfall gefunden. Es handelte sich um Partikelablagerungen in dem Teil der Gasleitung, der speziell wegen den Rohgasmessungen erst weit oben von der Fackelleitung abzweigt und unten in den Sprühkühler mündet. Diese Leitung enthält die Stutzen für die Rohgasmessungen und ist daher erheblich länger als in einer kommerziellen Anlage. Ausserdem enthält sie drei zusätzliche Umlenkungen. In einer kurzen, geraden Leitung könnte sich diese Ablagerungen nicht bilden, das Material würde in der Wäschekolonne aus dem Gas abgetrennt.

Bei der dritten Teer- und Partikelprobenahme am 5. März 1997 zwischen 14<sup>21</sup> Uhr und 17<sup>51</sup> Uhr, also beginnend mit der 129. Stunde des Testbetriebes wurde sowohl im Roh- als auch im Reingas gemessen. Um 19<sup>15</sup> begann die Zirkulationspumpe des Wäscherkreises zu lecken. Zur Feststellung der Konzentration wurde daher eine Waschwasserprobe sichergestellt. Um 20<sup>00</sup> Uhr wurde die Leistung plangemäss auf Teillast reduziert. Das Dichtigkeitsproblem der Waschwasserpumpe verstärkt sich laufend. Die schlechter werdende Gaskühlung führte in der Folge zu zweimaligen Ausfall des Verbrennungsmotors. Daher wurde die Pumpe ausgebaut und zwischen 4<sup>30</sup> Uhr 6<sup>00</sup> repariert. Die Anlage lief in der Folge störungsfrei bis sie nach insgesamt 160 Betriebsstunden abgeschaltet wurde.

Am 6. März 1997, um 11<sup>05</sup> Uhr, 149.1 Stunden nach der Zündung des Vergasers, wurden die letzten Teer- und Partikelmessungen des 150 Stundentests im Roh- und im Reingas (AHT 4/1 und AHT 4/2) durchgeführt.

Nach 150 Stunden Betrieb und nach dem Abschalten der Anlage wurden Waschwasserproben gezogen. Auch eine Kondensatprobe wurde zurückgestellt. Die angefallene Asche wurde gewogen und beprobt.

Insgesamt fielen 41.2 kg Asche und 404.4 kg Kondensat an. Während der gesamten Versuchsdauer wurden 3760 l Kühlwasser in das Waschwasserbecken vom Frischwassertank auf dem Dach nachgespiesen.

## **5.4 Vergasung von trockenen Waldholzschnitzeln**

In kurzzeitigen Tests sollte die Eignung des Vergasungsverfahrens für die energetische Nutzung verschiedener Brennstoffe geprüft werden. Daher wurde bei diesen kurzzeitigen Versuchen weniger das dynamische Verhalten der Anlage, als viel mehr stationäre Zustände beobachtet. Daher wurde kein genauer Ablaufplan eingehalten, wie er bei 150 Stundentest vorgeschrieben ist.

Die Anlage wurde am Vortag des ersten Tests mit trockenen Waldholzschnitzeln eingefahren. Am 16. April sollte der Test dann mit den Messungen bei Teillast begonnen werden. Der Versuch wurde durch Einschalten des Anfahrventilators gestartet.

Da die Waschwasserpumpe, die bereits im 150-Stundentest Probleme bereitet hatte, wiederum leckte, wurde nach der Reparatur am 16. April erst ab 10<sup>00</sup> Uhr auf den Wäscher gefahren. Um 10<sup>05</sup> Uhr wurde der Motor gestartet. Der Generator konnte wegen Synchronisationsschwierigkeiten zwischen Generator und öffentlichem Netz aber erst ab 10<sup>20</sup> elektrischen Strom ins öffentliche Netz zurückspeisen. Um 11<sup>00</sup> Uhr wurde die erste Abwasserprobe gezogen. Anschliessend wurde die erste Brennstoffprobe aus der Vibrorinne gezogen.

In ungefähr stündlichen Intervallen wurden Messungen der Reingaszusammensetzung und der Motorenabgas-Parameter durchgeführt. Die Messungen wurden um 18<sup>30</sup> Uhr beendet.

Am darauffolgenden 17. April 1997 wurde der Versuch durch Fahren von Vollast fortgesetzt. Wiederum wurden in regelmässigen Abständen Analysen des Reingases durchgeführt und das Motorenabgas beprobt. Brennstoffproben wurden aus der Vibrorinne gezogen und der Abwasser- und Kondensatanfall beobachtet.

Durch das Ingenieurbüro Verenum wurden zwischen 12<sup>05</sup> Uhr und 15<sup>40</sup> Uhr Teer- und Partikelproben in Roh- und Reingas gezogen.

Am Ende des Versuches waren 135 l Kondensat angefallen. Eine Waschwasser- und eine weitere Schnitzelprobe wurden sichergestellt. Ausserdem wurde eine Probe der 22 kg angefallener Asche zurückgestellt.

## 5.5 Vergasung von Altholz

Die ersten Versuche zur Vergasung von Altholz wurde am 22. April 1997 durchgeführt. Da der Anlasser des BHKW-Motors defekt war, wurde dieser Versuch bei verminderter Vergaserleistung durchgeführt, wobei das Schmelgas nach der Gasreinigung der Fackel zugeführt wurde. Aus terminlichen Gründen wurden die Teer- und Partikelprobenahmen trotzdem, allerdings nur im Rohgas durchgeführt. Die Probenahme am 22. April 1997 dauerte von 12<sup>53</sup> Uhr bis 15<sup>53</sup> Uhr. Da das Gas nur durch die Probenahmestelle für das Reingas strömt, wenn die Gasventile in Richtung Blockheizkraftwerk geöffnet sind, konnten während dieses Versuches keine Analysen des Reingases durchgeführt werden. Die Gaszusammensetzung musste für die Auswertung aus den nachgeholtten Messungen mit Betrieb des Blockheizkraftwerkes durchgeführt werden.

Dieser zweite Versuch zur Untersuchung der Vergasung von Altholz wurde am 28. April 1997 gestartet. Um ca. 8<sup>00</sup> Uhr wurde die Vergasung durch Einschalten des Anfahrventilators gestartet. Ab 9<sup>05</sup> Uhr wurde das Gas im Blockheizkraftwerk genutzt. Der Betrieb erfolgte bei Nennlast. Wiederum wurde eine Waschwasser- und eine Brennstoffprobe gezogen und verwahrt. Aufgrund eines Lufteintrittes durch einen der Messstutzen von Novartis fiel der Motor um 10<sup>30</sup> Uhr aus. Die Anlage wurde daraufhin ausgeschaltet, um den Stutzen abzudichten. Ab 10<sup>45</sup> Uhr lief das BHKW wieder normal. Die Probenahme für die Quantifizierung der Konzentrationen an polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen dauerte von 10<sup>05</sup> Uhr bis 16<sup>33</sup> Uhr. Zwischen 10<sup>06</sup> Uhr und 16<sup>51</sup> Uhr wurde die Zusammensetzung des Motorenabgases on-line gemessen. Von 11<sup>08</sup> Uhr bis 15<sup>57</sup> Uhr erfolgte die nasschemische Anreicherung von Schwermetallen durch die Novartis Services AG.

Ein weiterer, kürzerer Ausfall des Motors ereignete sich zwischen 14<sup>20</sup> Uhr und 14<sup>25</sup> Uhr wegen einer Fehlmanipulation. Um 17<sup>00</sup> Uhr wurde eine Schnitzelprobe und eine Waschwasserprobe gezogen.

Am 29. April 1997 wurde der Versuch fortgesetzt. Die Anlage war während der Nacht aufgrund einer Störung der Brennstoffzufuhr heruntergefahren. Um 7<sup>43</sup> Uhr lief der Motor des BHKW aber wieder. Die Anlage wurde nun auf Teillast betrieben.

Von 9<sup>02</sup> Uhr bis 15<sup>57</sup> Uhr analysierte die on-line-Rauchgasmessung der Novartis Services AG die Motorenabgaszusammensetzung. Zwischen 10<sup>06</sup> Uhr und 14<sup>47</sup> Uhr wurde eine weitere nasschemische Anreicherung für die Quantifizierung der Schwermetallkonzentrationen durchgeführt.

Die Anlage arbeitete bis zum Abend einwandfrei und wurde um 17<sup>15</sup> Uhr abgeschaltet.

Proben des Brennstoffes, der während den beiden Messtagen angefallenen 60 l Kondensats, der 22 kg Asche und des Waschwassers wurden gezogen und bis zur Analyse aufbewahrt.

## 5.6 Vergasung von Rinde

Rinde wurde als letztes Material der Versuchsreihe vergast. Der Vergaser wurde am 1. Mai 1997 um 7<sup>00</sup> Uhr durch Einschalten des Anfahrventilators gestartet. Gleichzeitig wurde eine Rindeprobe aus der Vibrorinne gezogen. Um 8<sup>00</sup> wurde der Motor des BHKW gestartet. Er wurde auf Volllastbetrieb eingestellt. Gleichzeitig wurde eine Waschwasserprobe gezogen. Um 9<sup>40</sup> Uhr schaltete die Netzüberwachung des Motors aufgrund starker Netzschwankungen und daraus resultierenden Synchronisationsschwierigkeiten den Motor aus. Er konnte aber sofort wieder in Betrieb genommen werden. In der Folge wurden Proben der Rinde und des Kondensates gezogen. Zwischen 11<sup>45</sup> Uhr und 15<sup>15</sup> Uhr wurden die Teer- und Partikelprobenahme im Roh- und im Reingas durchgeführt. Um 17<sup>30</sup> Uhr wurde eine Abwasserprobe gezogen.

Am 2. Mai 1997 wurde der Versuch durch Fahren von Teillast fortgesetzt. Aufgrund vorgängiger Überprüfungen am Motor wurde dieser erst um 8<sup>10</sup> Uhr gestartet. Ab 8<sup>15</sup> Uhr war das BHKW wieder im Netzbetrieb. Es folgten Ausfälle um 9<sup>30</sup> Uhr, um 10<sup>05</sup> Uhr 13<sup>07</sup> Uhr und um 14<sup>15</sup> Uhr. Diese Ausfälle waren auf materialbedingte Probleme bei der Vergasung zurückzuführen. Das Schmelgas wies gegenüber den vorhergehenden Versuchen geringere Wasserstoff- und Kohlenmonoxidgehalte und daher auch einen vergleichsweise geringen Brennwert auf. Um 15<sup>40</sup> Uhr wurde der Motor ausgeschaltet. Proben des Brennstoffes, des Kondensates, des Waschwassers und der Asche wurden gezogen. Die Asche enthielt Nägel und Schrauben, was auf einen Ascheanteil von der Altholzvergasung zurückzuführen war.

## **6. Ergebnisse**

### **6.1 Der 150-Studentest mit Industriebackschnitzeln**

#### **6.1.1 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen**

Als erster Versuch der Versuchsreihe wurde der 150-Studentest mit Industriebackschnitzeln durchgeführt. Die Resultate sind in der nachfolgenden Tabelle 6.1 und den Abbildungen 6.1 bis 6.7 dargestellt.

**Tabelle 6.1:** Anhand der Gaszusammensetzung und des Brennstoffverbrauches sowie den Brennstoffparametern wurden die Durchflüsse, der Heizwert und die Wirkungsgrade berechnet. Die Gasdurchflüsse beziehen sich auf das Rohgas. Der Durchfluss des trockenen Rohgases ergibt sich aus der Kohlenstoffbilanz und derjenige des Dampfes aus der Wasserstoffbilanz. Der Gemischheizwert des trockenen Gases ist negativ, da bei der Verbrennung Energie freigesetzt wird (thermodynamische Vorzeichendefinition). Sämtliche Werte wurden jeweils über 10 Stunden gemittelt.

Zeit [h]	H <sub>2</sub> [Vol.-%]	CH <sub>4</sub> [Vol.-%]	CO [Vol.-%]	CO <sub>2</sub> [Vol.-%]	O <sub>2</sub> [Vol.-%]	Brennstoff- verbrauch [kg/h]	Gasfluss trocken [Nm <sup>3</sup> /h]	Dampf- fluss [Nm <sup>3</sup> /h]	Gasheiz- wert [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	Kaltgaswir- kungsgrad	Elektrische Leistung [kW]	Elektrischer Wirkungsgr.	BHKW- Wirkungsgr.
000-010	13.94	1.84	18.95	12.21	0.47	79.0	197.0	22.0	-4552	73.3%	63.4	18.7%	25%
010-020	14.49	1.98	20.03	11.66	0.04	79.0	193.0	21.0	-4799	75.7%	64.9	19.1%	25%
020-030	14.41	2.22	19.34	12.36	0.32	79.0	191.6	20.5	-4791	75.1%	70.5	20.8%	28%
030-040	14.78	1.95	19.34	11.96	0.39	79.0	195.5	20.1	-4734	75.7%	68.9	20.3%	27%
040-050	14.69	2.24	19.90	11.68	0.37	79.0	192.1	19.8	-4899	77.0%	69.1	20.4%	26%
050-060	14.69	2.06	19.86	11.64	0.28	79.0	193.6	20.2	-4830	76.5%	67.5	19.9%	26%
060-070	14.55	2.07	19.16	12.13	0.12	75.2	185.3	19.3	-4728	75.3%	67.1	20.8%	28%
070-080	14.35	2.00	18.19	12.79	0.00	75.0	187.1	19.4	-4560	73.5%	63.6	19.7%	27%
080-090	14.86	1.91	18.38	12.49	0.00	75.0	188.2	18.6	-4606	74.7%	63.1	19.6%	26%
090-100	14.72	1.98	17.77	12.79	0.01	75.0	198.7	18.4	-4539	74.1%	60.0	18.6%	25%
100-110	14.16	1.78	17.49	12.77	0.00	71.6	183.7	18.8	-4373	72.5%	54.6	17.7%	24%
110-120	14.49	1.88	16.74	13.45	0.00	65.6	168.2	16.3	-4351	72.1%	47.0	16.7%	23%
120-130	14.32	1.84	18.00	12.95	0.55	65.6	164.5	17.4	-4477	72.5%	51.9	18.4%	25%
130-140	13.80	1.89	17.16	13.30	0.92	63.5	161.6	17.1	-4330	71.1%	41.3	15.1%	21%
140-150	13.54	1.80	16.85	13.77	0.64	63.5	161.1	17.9	-4232	69.4%	37.6	13.8%	20%
150-160	12.62	1.40	16.93	13.47	0.56	63.5	164.22	20.2	-3999	66.8%	40.6	14.9%	22%

Tabelle 6.2: Zehnstunden-Mittelwerte der Parameter zur Charakterisierung des Zustandes des Vergasers

Zeit [h]	Druck im Rohgas [mbar]	Rohgastemperatur [°C]	Reingas-temperatur [°C]	Elektrische Leistung [kW]	BHKW Ab-gastemp. [°C]
000-010	-5.1	412.1	50.6	63.4	477.3
010-020	-5.4	424.7	51.5	64.9	487.7
020-030	-5.8	508.3	60.9	70.5	531.6
030-040	-5.7	513.2	61.9	68.9	522.1
040-050	-5.2	511.8	60.8	69.1	519.2
050-060	-5.4	510.2	62.7	67.5	525.5
060-070	-5.0	503.5	61.8	67.1	519.5
070-080	-5.6	509.2	62.8	63.6	449.6
080-090	-5.7	489.9	60.9	63.1	515.9
090-100	-5.6	490.7	57.7	60.0	468.1
100-110	-5.8	490.4	60.2	54.6	498.3
110-120	-4.9	489.0	58.4	47.0	465.9
120-130	-5.0	488.3	59.4	51.9	470.8
130-140	-3.7	465.8	58.4	41.3	439.4
140-150	-3.7	468.5	55.7	37.6	418.9
150-160	-5.3	539.1	59.1	40.6	456.8
160-170	-5.3	537.2	58.6	39.9	420.4

In Abbildung 6.1 sind die Temperaturverläufe aufgetragen.

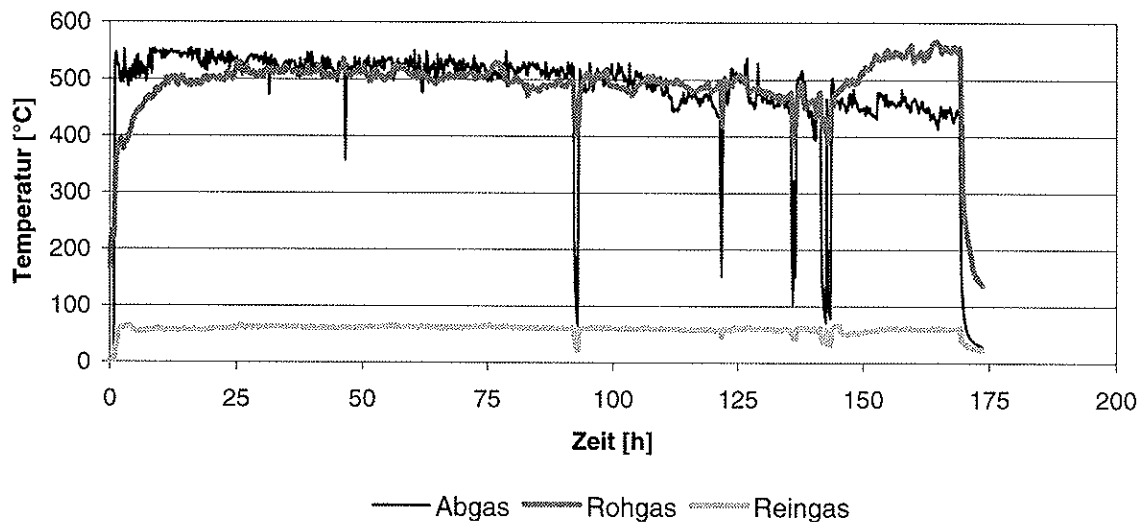


Abbildung 6.1: Verlauf der Roh- und Reingastemperaturen sowie der Temperatur der Motorenabgases während des 150-Studentests

Die Rohgastemperatur steigt zu Beginn auf den Betriebswert, bleibt anschliessend während 80 Stunden nahezu konstant und sinkt dann sehr langsam ab. Nach ca. 140 Stunden steigt sie wieder an. Hier macht sich bemerkbar, dass die Konstruktion des Drehrostes zum Zeitpunkt des 150-Studentests noch fehlerhaft war. Das Bewegen des Rostes wurde mit fortlaufender Versuchsdauer immer schwieriger, bis nach ca. 140 Betriebsstunden eine deutliche Drehrostbewegung mit mechanischen Hilfsmitteln gelang. Da das BHKW über keine Lambda-Regelung verfügt, musste das Mischungsverhältnis manuell, nach Gefühl eingestellt werden. Die Abgastemperatur ist aufgrund des thermischen Ballastes des Luftstickstoffes tief, wenn ein mageres Gemisch gefahren wird und umgekehrt sehr hoch, wenn ein fettes Gemisch gefahren wird. Die Abgastemperatur gibt somit keinen Aufschluss über den Vergasungsprozess.

Die Reingastemperatur steigt während der Versuchsdauer an. Die Gründe dafür liegen in der zunehmenden Verstopfung der Düsen des Wäschers durch Holzkohlepartikel. Das Problem konnte in der Zwischenzeit durch Zwischenschalten eines Filters gelöst werden.

Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf des Druckes im Rohgas. Hier ist kein systematischer Verlauf zu erkennen. Der Druck schwankt aufgrund sich ändernder Widerstandsverhältnisse im Vergasungsbett und aufgrund von leichten Schwankungen des Gasbedarfes des Verbrennungsmotors.

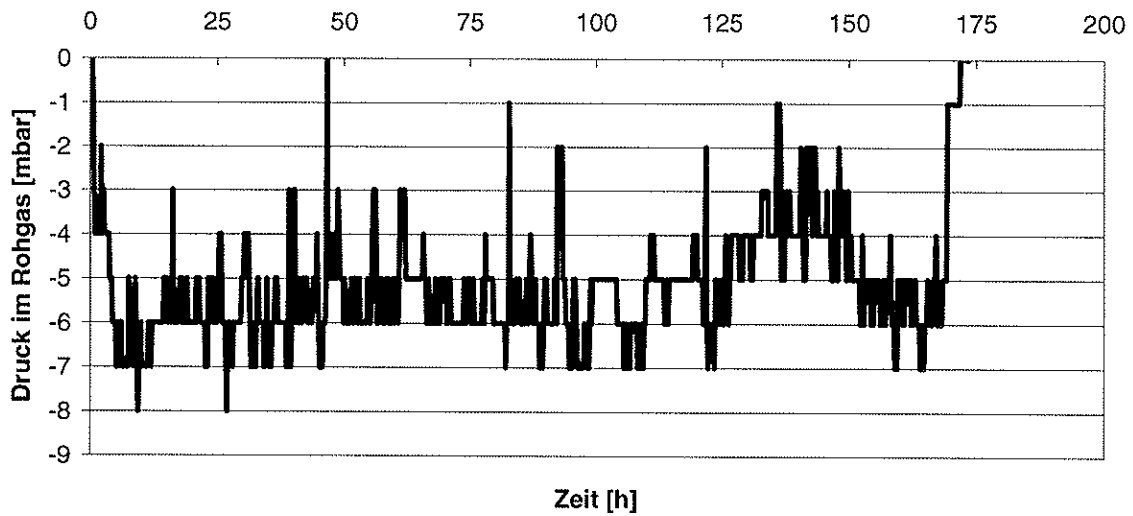


Abbildung 6.2: Druckverhältnisse im Rohgas während des 150-Studentests

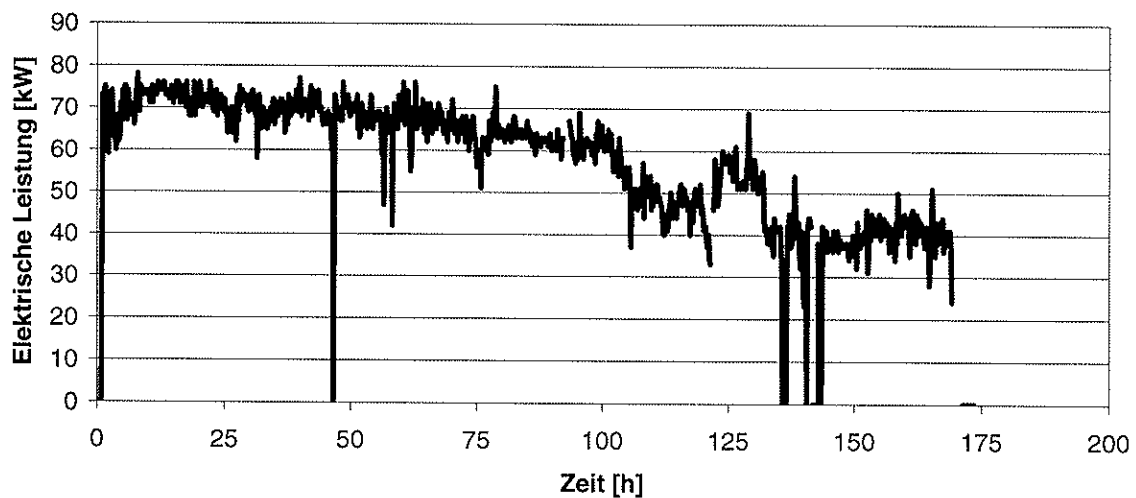


Abbildung 6.3: Elektrische Leistung, die vom BHKW in das öffentliche Netz eingespeist wurde.

Die Elektrische Leistung sinkt nach ca. 100 Betriebsstunden stark ab. Sie kann aber ca. 20 Stunden später wieder nach oben korrigiert werden. Nach 130 Betriebsstunden wird die Leistung plangemäss reduziert.

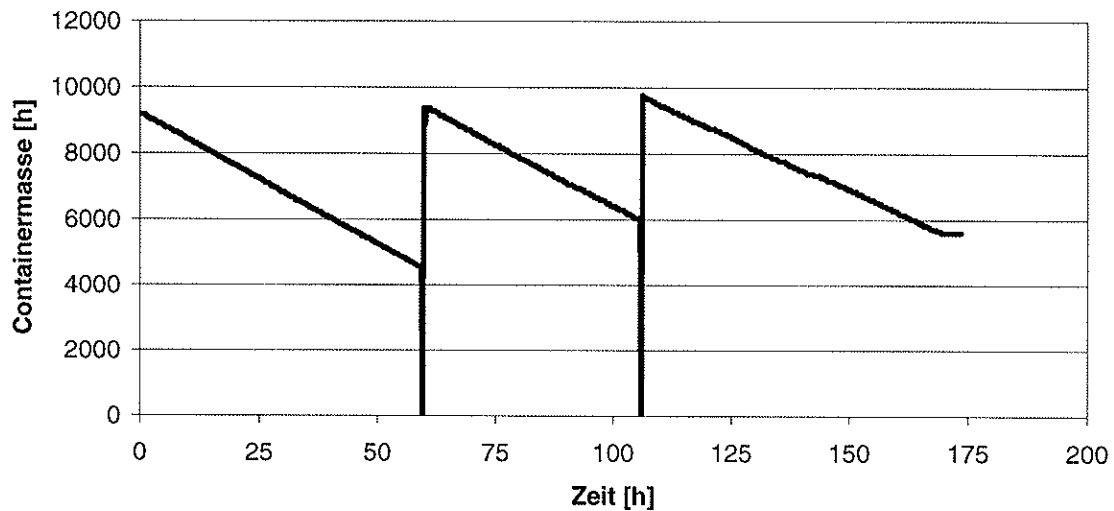


Abbildung 6.4: Auftragung der Containermasse gegen die Zeit. Beim Containerwechsel erreicht die Masse jeweils den Wert 0 kg. Die negative Steigungen der Geraden entspricht dem Brennstoffverbrauch.

Die Auftragung der Containermasse gegen die Zeit zeigt die gleichmässige Abnahme zwischen zwei Containerwechseln. Die Geschwindigkeit der Abnahme entspricht dabei dem Schnitzelverbrauch.

In den Abbildungen 6.5 und 6.6 sind die Gaskonzentrationen, wie sie durch die on-line-Messeinrichtungen gemessen wurden, gegen die Zeit aufgetragen. Die Konzentrationen der brennbaren Gase Wasserstoff und Kohlenmonoxid nehmen gegen Ende des Versuches leicht ab. Dies ist wahrscheinlich auf die zunehmende, wenn auch geringe, Undichtigkeit der Rostlagerung zurückzuführen. Tritt Luft am falschen Ort in den Vergaser ein, so kann dies zu einer teilweisen Verbrennung des Schwelgases führen.

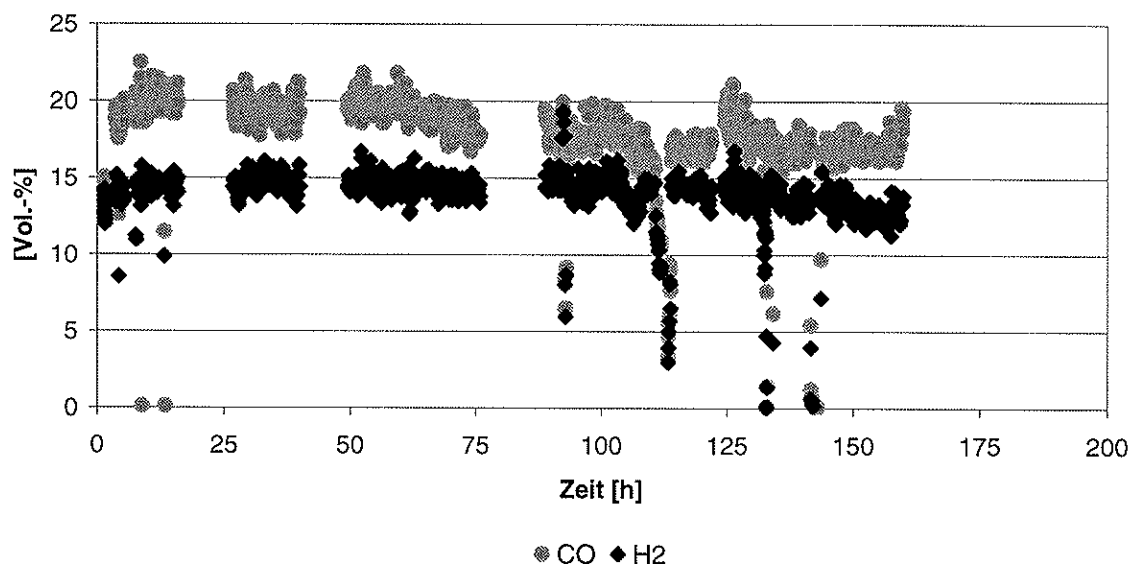


Abbildung 6.5: Verlauf der Kohlenmonoxid- und Wasserstoffkonzentrationen während des 150-Studentests

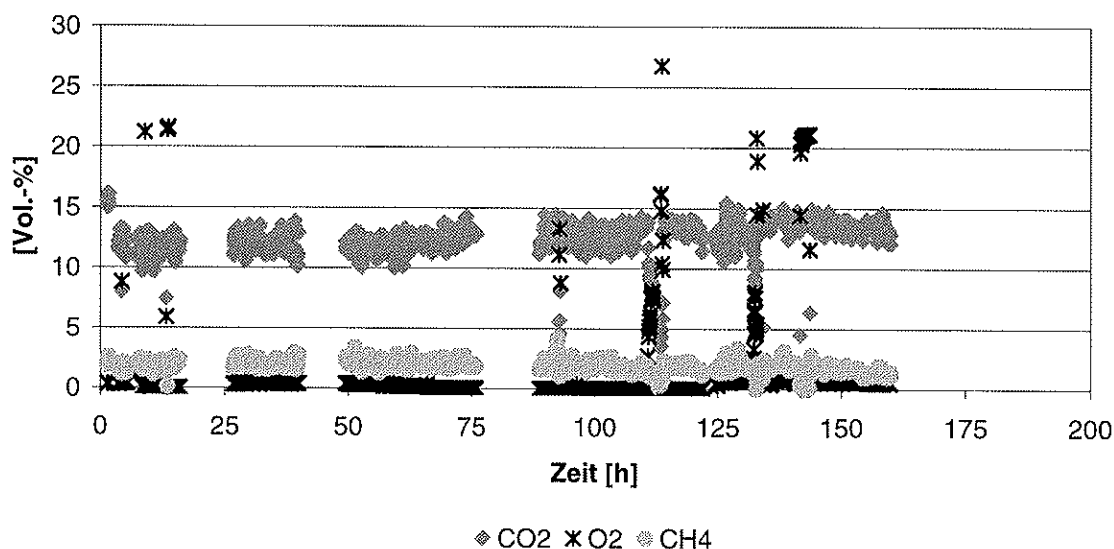


Abbildung 6.6: Verlauf der Methan-, der Kohlendioxid- und der Sauerstoffkonzentration während des 150-Studentests

### 6.1.2 Ergebnisse der Probenahmen im Gas

Wie erwähnt wurden die Teer- und Partikelprobenahmen zu verschiedene Zeitpunkten durchgeführt, nämlich ca. 10, 80, 130 und 150 Stunden nach der Zündung erfolgten Probenahmen im Rohgas. Zusätzlich wurden nach ca. 130 und 150 Stunden Probenahmen im Reingas durchgeführt. Die Ergebnisse der Probenahmen und der Laborauswertungen sind in der folgenden Tabelle 6.3 zusammengestellt.

Tabelle 6.3: Zusammenfassung der Teer- und Partikelmessungen während des 150-Studentests. Die mittelflüchtigen Kohlenwasserstoffe (light tars) wurden nur bei der ersten Probenahme analysiert.

Bezeichnung	AHT 1	AHT 2	AHT 3/1	AHT 3/2	AHT 4/1	AHT 4/2
Zeit seit Zündung [h]	9.8	79.7	128.6	128.6	149.1	149.1
Probenahmeort	Rohgas	Rohgas	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
Vergaserleistung [kW <sub>gesamt</sub> ]	350	330	280	280	280	280
Partikel gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	450	486	251	73	158	52
Heavy Tars [mg/Nm <sup>3</sup> ]	706	425	331	254	109	89
Phenole gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	236	241	123	104	69	82
Summe PAK [mg/Nm <sup>3</sup> ]	303	244	186	405	267	434
Davon Naphthalin [mg/Nm <sup>3</sup> ]	215	197	124	366	215	359
Light Tars gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	710					
Benzol [mg/Nm <sup>3</sup> ]	527					
Toluol [mg/Nm <sup>3</sup> ]	131					
Ethylbenzol [mg/Nm <sup>3</sup> ]	2					
Xylol [mg/Nm <sup>3</sup> ]	50					

Die Firma Verenum führte vor der ersten Teer- und Partikelmessung eine Impaktormessung zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung durch. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in der folgenden Abbildung dargestellt:

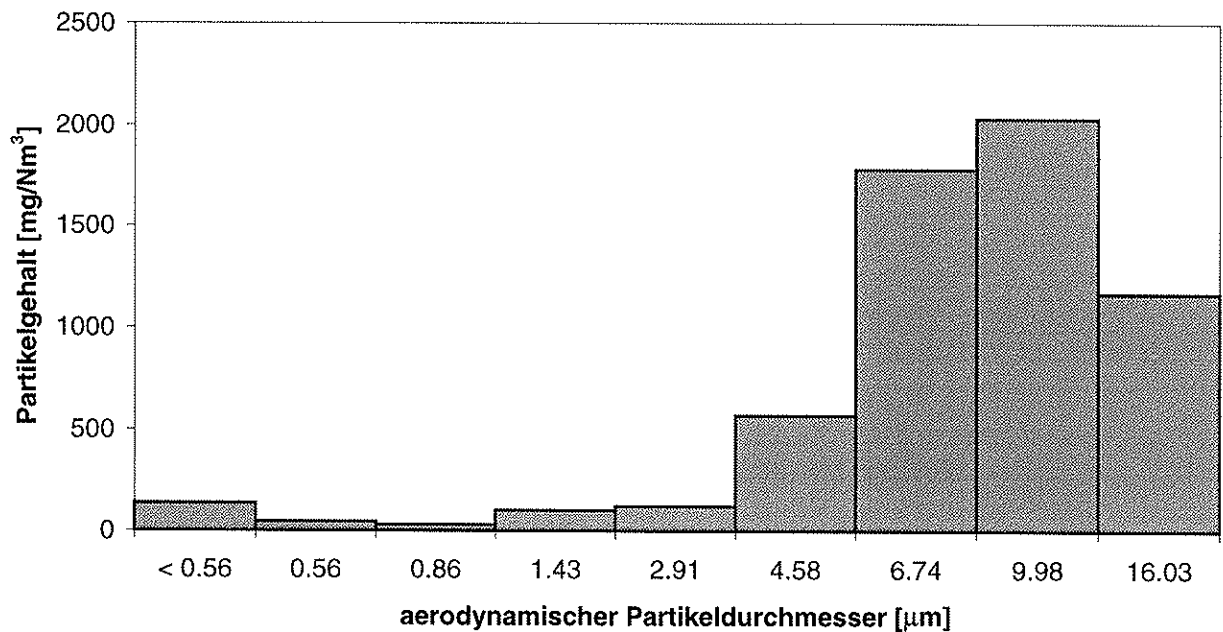


Abbildung 6.7: Grössenverteilung der Partikel im Rohgas. Die Messung erfolgte bei einer Temperatur von 270 °C.

Mehr als 90 % der erfassten Partikel weisen einen Partikeldurchmesser von mindestens 4.58 μm auf. Der Verlauf der Kurve lässt vermuten, dass Partikel mit einem Durchmesser von mehr als 16.03 μm vorhanden sind. Die häufigste Grösse liegt aber bei ca. 10 μm.

### 6.1.3 Zusammensetzung des Motorenabgases

Abbildung 6.8 zeigt das Verhalten der Parameter, die im Motorenabgas gemessen wurden. Die Parameter schwanken sehr stark, da der Verbrennungsmotor über keine  $\lambda$ -Regelung verfügt und das Generatorgas/Luft-Gemisch daher je nach Einstellung und Druckverhältnissen starken Schwankungen unterworfen ist.

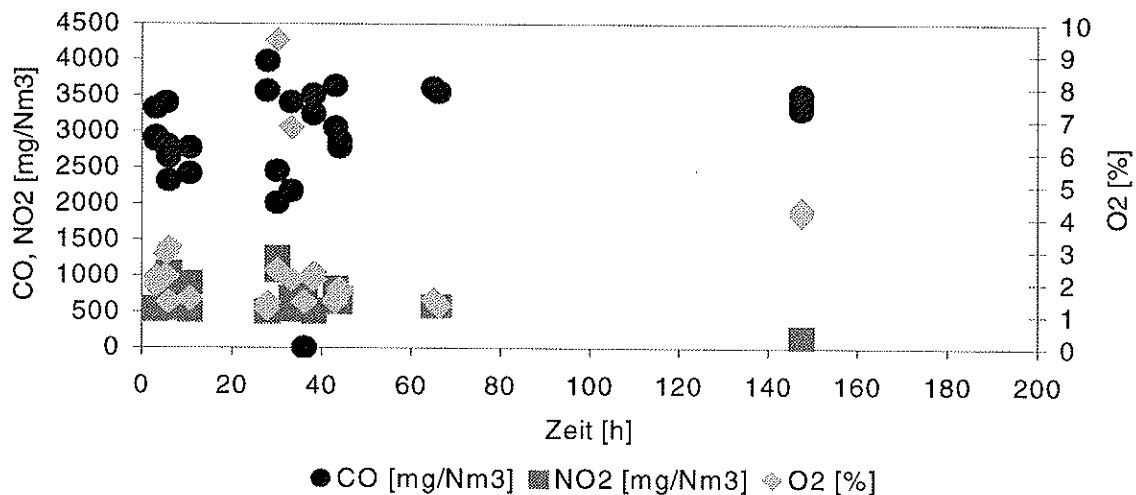


Abbildung 6.8: Verlauf der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (linke Achse) und Stickstoffdioxid (linke Achse), sowie von Sauerstoff (rechte Achse) im Motorenabgas

Die  $\lambda$ -Verhältnisse bewegen sich im Bereich zwischen 1.0 und 1.5. Es ist ausserdem anzumerken, dass keine Messung erfolgte, wenn die Kohlenmonoxid-Konzentration über 5'000 ppm lag, da der Abgascomputer bei diesem Grenzwert die CO-Sonde ausschaltet und freispült.

#### 6.1.4 Analyseresultate von Kondensat und Abwasser

Die Analyseresultate der Abwasserproben des 150-Studentests sind in Tabelle 6.4 aufgelistet. Ausser den Cyaniden haben alle Parameter des Abwassers im Verlauf des Tests abgenommen. Die Konzentrationen, die zu Beginn des Versuches festgestellt wurden sind recht hoch. Die totale Konzentration des organischen Kohlenstoffes (TOC) ist mit nahezu 3.5 g/l zu Beginn des Versuches sehr hoch. Dies deutet darauf hin, dass die Reinigung des Waschwasserbeckens vor Beginn des Versuches eine grosse Schadstoffmenge im Becken (z. B. als lösliche Schichten in den unzugänglichen Rohrleitungen zurückliess. Von diesen Verbindungen muss ein Teil wasserdampfgefährlich und mit dem Dampf und dem Rein gas aus dem Gasreinigungssystem entwichen sein.

Tabelle 6.4: Waschwasserparameter während des 150-Studentests: mit Ammonium wird die Summe der Konzentrationen von Ammonium und Ammoniak bezeichnet. TOC bezeichnet die Konzentration des gesamten Kohlenstoffes, der in organischen Verbindungen im Waschwasser vorliegt (Total Organic Carbon). Die Konzentrationen der Phenole wurden als Phenolindex bestimmt.

Zeit [h]	pH [ ]	Ammonium [mgN/l]	Cyanid [mg/l]	TOC [mg/l]	Phenole [mg/l]
1.25	7.4	707	6.8	3450	948
131.25	8.1	537	30.0	2600	343
143.00	8.2	615	20.0	1700	290

Das Kondensat wurde während der gesamten Versuchsdauer gesammelt und am Ende des Versuches quantifiziert und analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.5 dargestellt.

Tabelle 6.5: Waschwasserparameter während des 150-Studentests

Menge [l]	pH [ ]	Ammonium [mgN/l]	Cyanid [mg/l]	TOC [mg/l]	Phenole [mg/l]
404.4	8.1	469	2.9	1250	573

Die Ergebnisse in der Tabelle zeigen, dass ein beträchtlicher Teil des Phenoles und des Cyanides flüchtig sind, denn es kann nur über Verdampfung in das Kondensat gelangen. Zieht man die beträchtliche Menge des Kondensat in Betracht, so wird klar, dass erhebliche Mengen an Phenolen (232 g) und organischen Verbindungen (506 g TOC) durch die Gasreinigung durchtraten und sich als Kondensat nieder-

schlugen. Die Frachten, die in der Gasphase verblieben und im Motor verbrannten sind schwer einzuschätzen. Hinweise geben die Ergebnisse der Teer- und Partikelprobenahme.

#### 6.1.5 Analyse der Asche

Am Ende des 150-Studentests wurde die produzierte Asche durch Wägung quantifiziert. Eine repräsentative Probe der Asche wurde gezogen und analysiert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 6.6 zusammengestellt:

Tabelle 6.6: Analyseresultate der Ascheprobe des 150-Studentests

Menge	[kg]	62.2
Trockenrückstand	[Gew.-%]	100.0%
Glührückstand	[Gew.-%]	100.4%
Brennwert	[MJ/kg]	4.7
Kohlenstoff	[Gew.-%]	3.8%
Stichstoff	[Gew.-%]	< 2.0%
Schwefel	[Gew.-%]	0.25%
Chlor	[Gew.-%]	< 0.1%

Die Trocken- und Glührückstände von je 100% verdeutlichen, dass die Asche vollständig ausgebrannt ist. Der Kohlenstoffgehalt beträgt lediglich noch 3.8%. Der Brennwert ist mit 4.7 MJ/kg noch relativ hoch.

## 6.2 Waldhackschnitzel

### 6.2.1 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen

Die Versuche zur Vergasung von trockenen Waldhackschnitzeln wurden am 16. Und 17. April 1997 durchgeführt. Die Ergebnisse der Gasanalyse und die daraus berechneten Wirkungsgrade sind in den Tabellen 6.6a und 6.6b zusammengestellt. Die Summe der gemessenen Komponenten des Schwelgases im trockenen Gas beträgt jeweils nahezu 100 %, was einerseits für die Güte der Analyse spricht und andererseits zeigt, dass keine anderen gasförmigen Komponenten in bedeutendem Ausmass im Reingas vorliegen.

Tabelle 6.6a: Zusammenstellung der Gasanalyseresultate der Waldholzvergasung

Waldholz	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Summe
16.4.1997 11 <sup>00</sup> -18 <sup>09</sup>	18.6%	2.0%	12.8%	16.5%	1.1%	49.8%	100.9%
17.4.1997 10 <sup>01</sup> -18 <sup>01</sup>	16.9%	2.1%	12.8%	17.4%	0.8%	49.6%	99.6%

Tabelle 6.6b: Zusammenstellung der errechneten Wirkungsgrade

Waldholz	Brennstoff- verbrauch [kg/h]	Gasfluss trocken [Nm <sup>3</sup> /h]	Dampf- fluss [Nm <sup>3</sup> /h]	Gasheiz- wert [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	Kaltgas- Wirkungs- grad	Elektrische Leistung [kW]	Elektrischer Wirkungs- grad	BHKW- Wirkungs- grad
16.4.1997 11 <sup>00</sup> -18 <sup>09</sup>	77.8	148.1	28.9	-4347	71%	37	15%	21%
17.4.1997 10 <sup>01</sup> -18 <sup>01</sup>	96.2	178.4	39.5	-4184	67%	51	16%	25%

Die Mittelwerte der wichtigsten Vergasungsparameter sind in Tabelle 6.7 zusammengefasst. Die höhere Leistung am zweiten Versuchstag bewirkte einen höheren Druckabfall über das Vergasungsbett. Die Temperaturen sind bei den Versuchen mit der höheren Leistung etwas höher. Wiederum ist die Abgastemperatur des BHKW der Parameter, der am wenigsten Aussagekraft besitzt, da die Abgastemperatur durch das Gemischverhältnis beeinflusst wird, das nicht geregelt wird.

Tabelle 6.7: Mittelwerte der Vergasungsparameter während der Vergasung von trockenen Waldholzsnitzeln

Zeit [h]	Druck im Rohgas [mbar]	Rohgastemperatur [°C]	Reingastemperatur [°C]	Elektrische Leistung [kW]	BHKW-Abgastemp. [°C]
16.4.1997 10 <sup>58</sup> -22 <sup>00</sup>	-7.86	424.08	61.09	37.37	448.31
17.4.1997 10 <sup>01</sup> -18 <sup>01</sup>	-12.29	447.48	64.39	51.28	486.52

In Abbildung 6.9 sind die zeitlichen Verläufe der Temperaturen dargestellt.

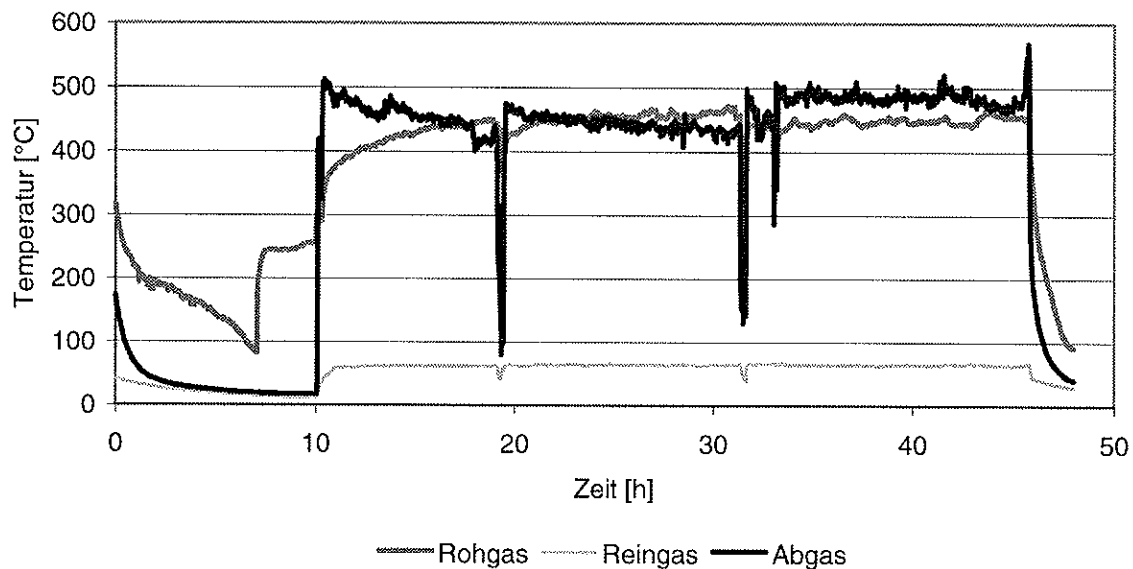


Abbildung 6.9: Verlauf der Roh- und Reingastemperaturen sowie die Temperatur des Motorenabgases während der Vergasung von Waldholzsnitzeln. Die Zeitachse reicht von 0<sup>00</sup> Uhr des ersten Messtages bis 24<sup>00</sup> Uhr des zweiten Messtages.

Die Abbildung zeigt sehr konstante Temperaturen während des Versuches. Vor Beginn der Versuche sinkt die Temperatur des Fühlers im Rohgas, da der Reaktor stillsteht. Sobald der Anfahrventilator eingeschaltet wird, steigen die Temperaturen rasch an. Der erste Anstieg der Abgastemperatur markiert den Start des Verbrennungsmotors.

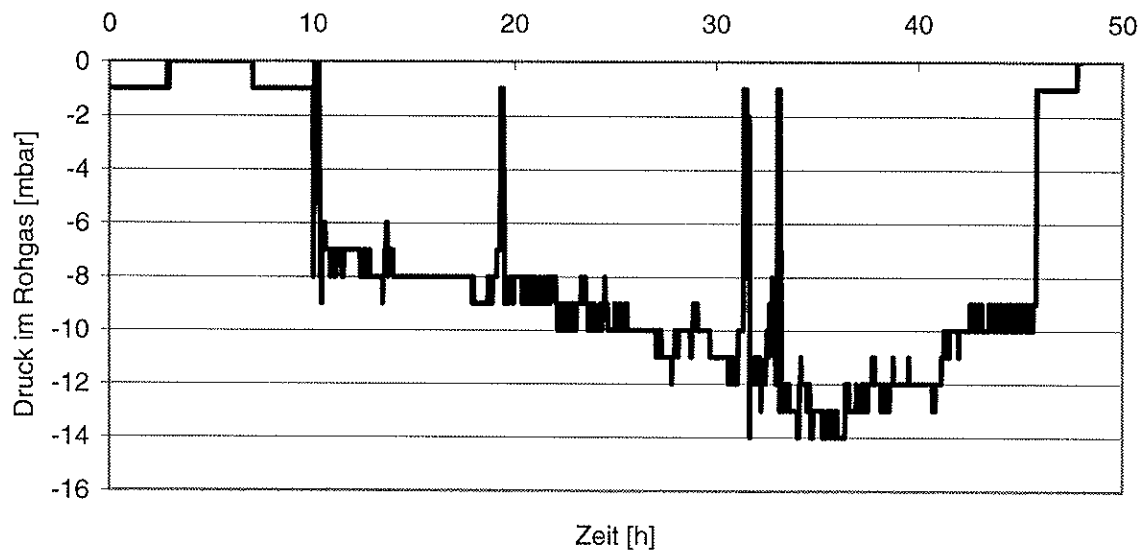


Abbildung 6.10: Druck im Rohgas

Auch der Druck im Rohgas widerspiegelt den Start des BHKW-Motors deutlich. Sobald der Motor eingeschaltet wird, steigt der Druckabfall über den Reaktor an. Der Druckabfall wird mit zunehmender Motorleistung grösser. Aber auch andere Einflussgrößen wirken sich auf diesen Parameter aus.

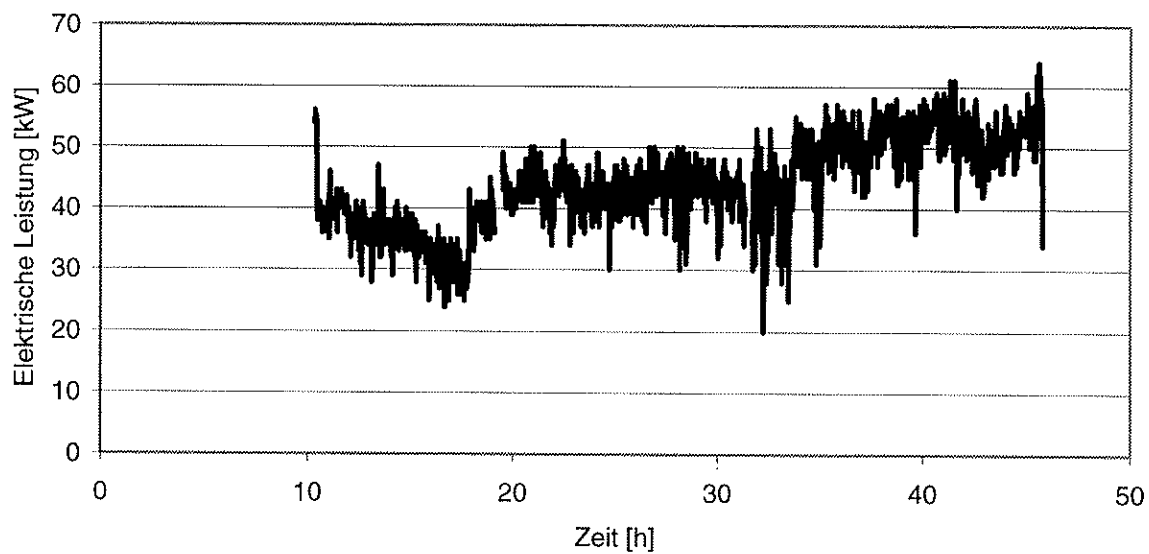


Abbildung 6.11: Elektrische Leistung des BHKW

Abbildung 6.1 zeigt, dass die ins Netz zurückgespeiste elektrische Leistung starken Schwankungen unterworfen ist. Die Darstellung verdeutlicht auch, dass die angestrebten Leistungsunterschiede bei Voll- und Teillastbetrieb nicht erreicht wurden. Der Grund liegt im engen Regelbereich des BHKW-Motors.

Dies wird auch durch Abbildung 6.12 verdeutlicht. Die Geschwindigkeit der Abnahme der Containermasse entspricht dem Schnitzzelverbrauch. Der Unterschied zwischen den Verbräuchen an den beiden Messtagen ist optisch nicht zu erkennen.

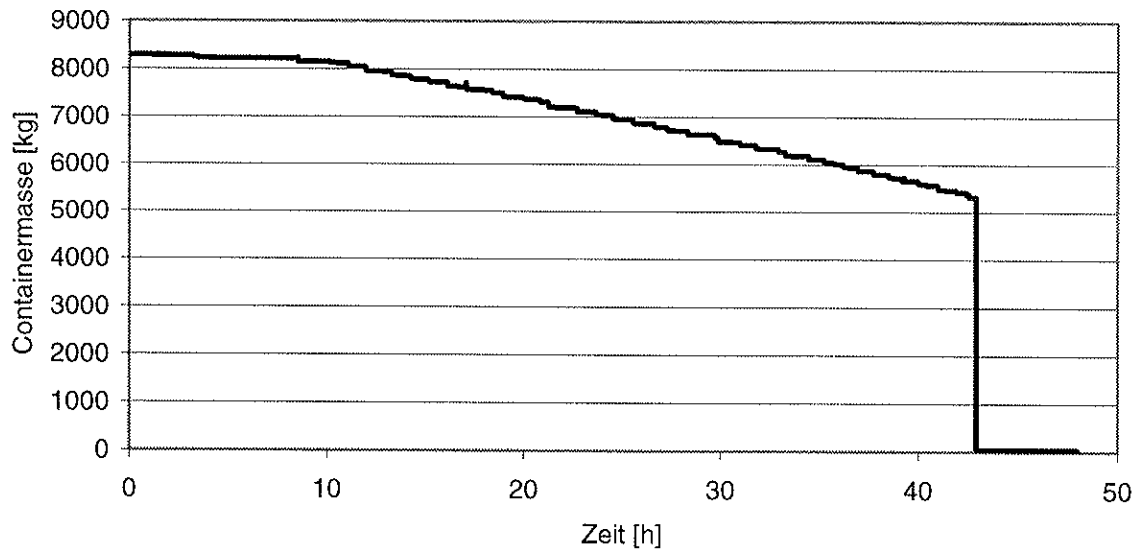


Abbildung 6.12: Darstellung der Masse des Brennstoffcontainers gegen die Zeit. Die negative Steigung der Containermasse entspricht dem Brennstoffverbrauch.

Abbildung 6.13 zeigt die Wasserstoff- und Kohlenmonoxidgehalte des trockenen Reingases während dem Vergasungsversuch.

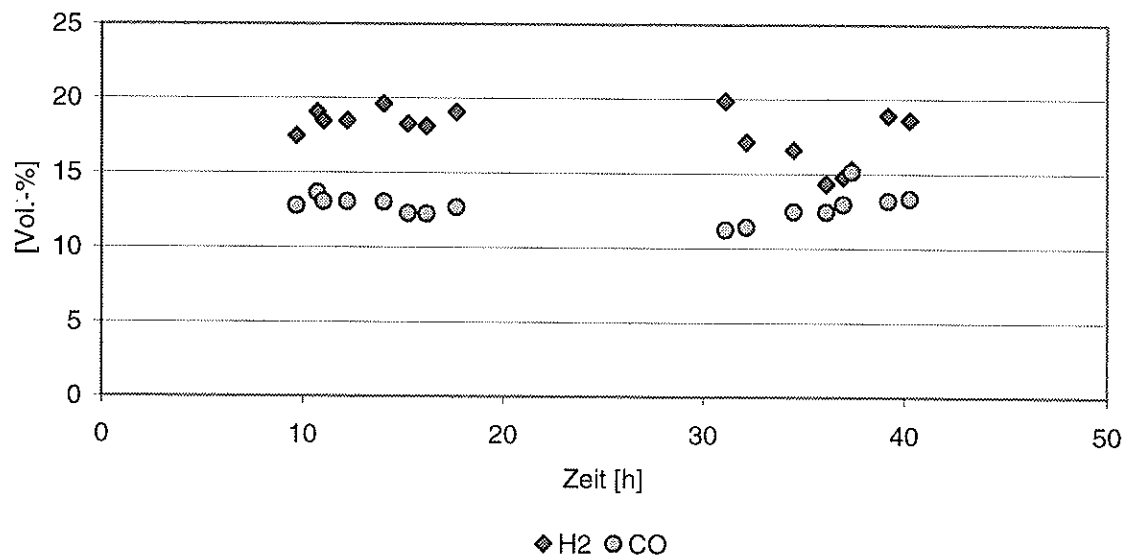


Abbildung 6.13: Volumenanteile von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO) im trockenen Reingas

Abbildung 6.14 zeigt die weiteren gemessenen Konzentrationen. Die Sauerstoffkonzentration ist sehr gering. Die Methankonzentration liegt im Allgemeinen bei ca. 2 %. Der Stickstoffgehalt liegt bei ca. 50 %.

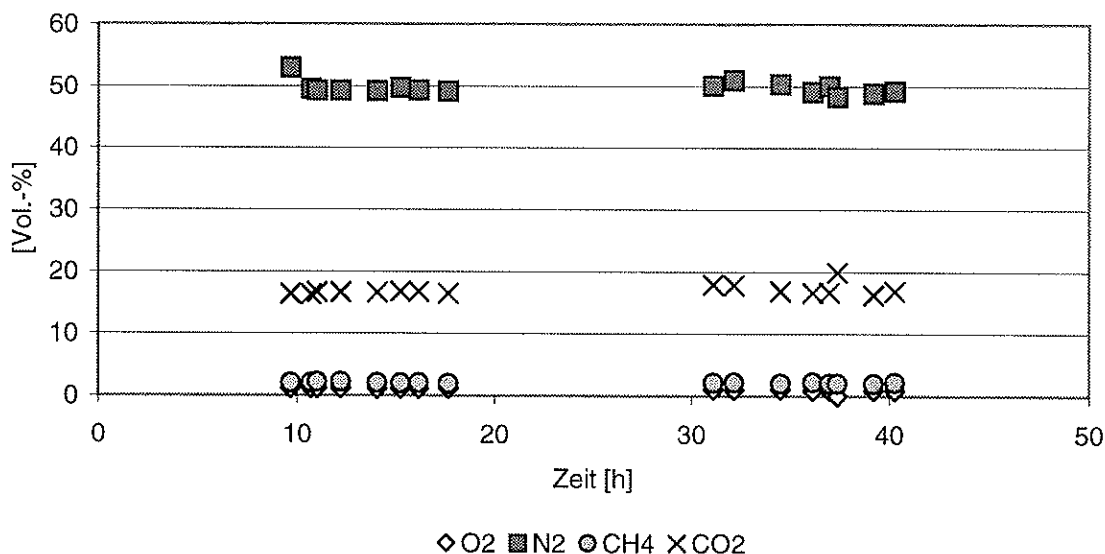


Abbildung 6.14: Gehalten von Sauerstoff, Stickstoff, Methan und Kohlendioxid im trockenen Reingas

Die Gasanalysen wurden jeweils manuell ausgelöst. Daher ist die Zahl der Analysen wesentlich geringer, als bei den im 150-Studentest gezeigten Analysedaten.

### 6.2.2 Ergebnisse der Probenahmen im Gas

Am 17. April 1997 erfolgte die Teer- und Partikelprobenahme zwischen 12<sup>05</sup> Uhr und 15<sup>40</sup> Uhr, und begann somit ca. 27 Stunden nach dem Start des Anfahrvorganges. Die Teer- und Partikelprobenahme erfolgte sowohl im Roh- als auch im Reingas. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.8 zusammengestellt:

Tabelle 6.8: Ergebnisse der Teer- und Partikelmessung

Probenahmeort		Rohgas	Reingas
Zeit seit Zündung [h]		26.9	
Vergaserleistung [kW]		310	
Partikel gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]		601	81
Heavy Tars [mg/Nm <sup>3</sup> ]		677	535
Phenole gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]		291	243
Summe PAK [mg/Nm <sup>3</sup> ]		613	340
davon Naphthalin [mg/Nm <sup>3</sup> ]		502	294

### 6.2.3 Analyseresultate von Kondensat und Abwasser

Das Waschwasser wurde kurz nach Beginn des Versuches und nach dessen Abschluss beprobt. Beide Proben wurden bei eingeschalteter Zirkulationspumpe gezogen, um eine gute Homogenisierung des Waschwassers zu gewährleisten. Die Waschwasserbilanz war bei diesem Versuch nahezu ausgeglichen.

Tabelle 6.9: Waschwasserparameter während der Waldholzvergasung: mit Ammonium wird die Summe der Konzentrationen von Ammonium und Ammoniak bezeichnet. TOC bezeichnet die Konzentration des gesamten Kohlenstoffes, der in organischen Verbindungen im Waschwasser vorliegt (Total Organic Carbon). Die Konzentrationen der Phenole wurden als Phenolindex bestimmt.

Zeit [h]	pH [ ]	Ammonium [mg <sub>N</sub> /l]	Cyanid [mg/l]	TOC [mg/l]	Phenole [mg/l]
16.4.1997 11:00	7.4	1060	5.4	4900	593
17.4.1997 17:45	7.8	960	5.2	5500	703

Wie schon beim 150-Stundenversuch ist die Anfangsbelastung des Waschwassers sehr hoch und es ist keine deutliche Zunahme der Belastung festzustellen.

Das Kondensat wurde während der gesamte Versuchsdauer gesammelt und am Ende des Versuches quantifiziert und analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.10 dargestellt.

Tabelle 6.10: Kondensat während des 150-Studentests: mit Ammonium

Menge [l]	pH [ ]	Ammonium [mg <sub>N</sub> /l]	Cyanid [mg/l]	TOC [mg/l]	Phenole [mg/l]
135	8.1	517	0.64	830	565

Wiederum zeigen die Ergebnisse der Kondensatanalyse eine recht hohe Belastung. Allerdings ist die gesammelte Kondensatmenge gering, so dass die Fracht mit wenigen Gramm pro Betriebstag gering ausfällt.

### 6.2.4 Analyse der Asche

Am Ende des zweiten Versuchstages wurde die produzierte Asche durch Wägung quantifiziert. Eine repräsentative Probe der Asche wurde gezogen und analysiert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 6.11 zusammengestellt:

Tabelle 6.11: Analyseresultate der Ascheprobe der Waldhackschnitzelvergasung

Menge	[kg]	22.2
Trockenrückstand	[Gew.-%]	99.8%
Glührückstand	[Gew.-%]	97.8%
Brennwert	[MJ/kg]	4.9
Kohlenstoff	[Gew.-%]	6.0%
Stichstoff	[Gew.-%]	< 2.0%
Schwefel	[Gew.-%]	0.20%
Chlor	[Gew.-%]	< 0.1%
Cadmium	[mg/kg]	< 10%
Blei	[mg/kg]	100
Chrom	[mg/kg]	110
Nickel	[mg/kg]	80
Kupfer	[mg/kg]	300
Zink	[mg/kg]	360

Die Trocken- und Glührückstände von je 100% verdeutlichen, dass die Asche vollständig ausgebrannt ist. Der Kohlenstoffgehalt beträgt 6 %. Der Brennwert der Asche ist mit 4.9 MJ/kg wiederum relativ hoch. Die Schwermetallgehalte in dieser Asche sind erstaunlich hoch. Die Bleikonzentration ist mit 100 mg/kg höher als in der Asche von Altholz. Diese enthält jedoch noch 20 % Kohlenstoff und ist damit weniger ausgebrannt als die Waldholzasche.

## 6.3 Altholz

Wie bei den Versuchen zur Vergasung von Altholz sollte je ein Tag Voll- und Teillast gefahren werden, wie dies schon beim Waldholz demonstriert worden war. Beim Altholz sollten neben den Bestimmungen der Teer- und Partikelgehalte auch die Schwermetall- und Dioxingehalte ermittelt werden. Dazu war es nötig, mit den Firmen Verenum und Novartis einen gemeinsamen Termin zu vereinbaren. Da aber am 22. April 1997 der in die Jahre gekommene Generator des BHKW ausfiel, musste die Versuchsdurchführung auf den 28. und 29. April 1997 verlegt werden. Die erwähnten Schwierigkeiten mit der terminlichen Koordination führten dazu, dass der Vergaser am 22. April lediglich über die Wäsche gefahren wurde und das BHKW nicht betrieben wurde. Somit war die Teer- und Partikelmessung nur im Rohgas möglich. Die Messungen von Schwermetall- und Dioxinkonzentrationen fanden am 28. und 29. April 1997 statt. Der Normalbetrieb war zu diesem Zeitpunkt nach dem erforderlichen Austausch des Generators wieder möglich.

### 6.3.1 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen

In den Tabellen 6.12a und 6.12b sind die Ergebnisse der Gasanalysen und die Berechnungen des Wirkungsgrades dargestellt.

Tabelle 6.12a: Zusammenstellung der Gasanalyseresultate der Altholzvergasung

Altholz	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Summe
22.4.1997	17.2%	1.5%	18.8%	12.4%	1.5%	50.2%	101.4%
28.4. 8 <sup>00</sup> - 29.4. 8 <sup>00</sup>	17.2%	1.5%	18.8%	12.4%	1.5%	50.2%	101.4%
29.4.1997 8 <sup>39</sup> -19 <sup>31</sup>	17.2%	1.2%	17.8%	12.4%	1.2%	50.3%	100.1%

Tabelle 6.12b: Zusammenstellung der errechneten Wirkungsgrade

Altholz	Brennstoff- verbrauch [kg/h]	Gasfluss trocken [Nm <sup>3</sup> /h]	Dampf- fluss [Nm <sup>3</sup> /h]	Gasheiz- wert [kJ/ Nm <sup>3</sup> ]	Kaltgas- Wirkungs- grad	Elektrische Leistung [kW]	Elektrischer Wirkungs- grad	BHKW- Wirkungs- grad
22.4.1997	48.4	119.3	10.8	-4748	76.4%	-	-	-
28.4. 8 <sup>00</sup> - 29.4. 8 <sup>00</sup>	71.9	177.2	16.1	-4748	76.4%	57.8	19%	25%
29.4.1997 8 <sup>39</sup> -19 <sup>31</sup>	63.0	161.4	13.7	-4529	75.7%	42.1	16%	21%

Tabelle 6.13: Mittelwerte der Vergasungsparameter während der Vergasung von Altholz

Zeit [h]	Druck im Rohgas [mbar]	Rohgas-temperatur [°C]	Reingas-temperatur [°C]	Elektrische Leistung [kW]	BHKW-Ab-gastemp. [°C]
22.4.1997 8 <sup>54</sup> -17 <sup>30</sup>	-7.45	413.78	45.12	-	-
28.4.1997 8 <sup>00</sup> - 29.4.1997 1 <sup>59</sup>	-11.89	473.35	57.78	57.75	474.66
29.4.1997 8 <sup>39</sup> -19 <sup>31</sup>	-9.19	477.87	60.86	42.06	455.25

In den folgenden Abbildungen werden die Verläufe der Messungen ohne Betrieb des Blockheizkraftwerkes gezeigt. Diese Messungen wurden wegen des Ausfalles des Generators durchgeführt. Da nur für diese Messung Teer- und Partikelanalysen vorliegen, werden sie vor den Resultaten der wiederholten Versuche aufgeführt.

In Abbildung 6.15a sind die Temperaturverläufe während der Vergasung von Altholz dargestellt:

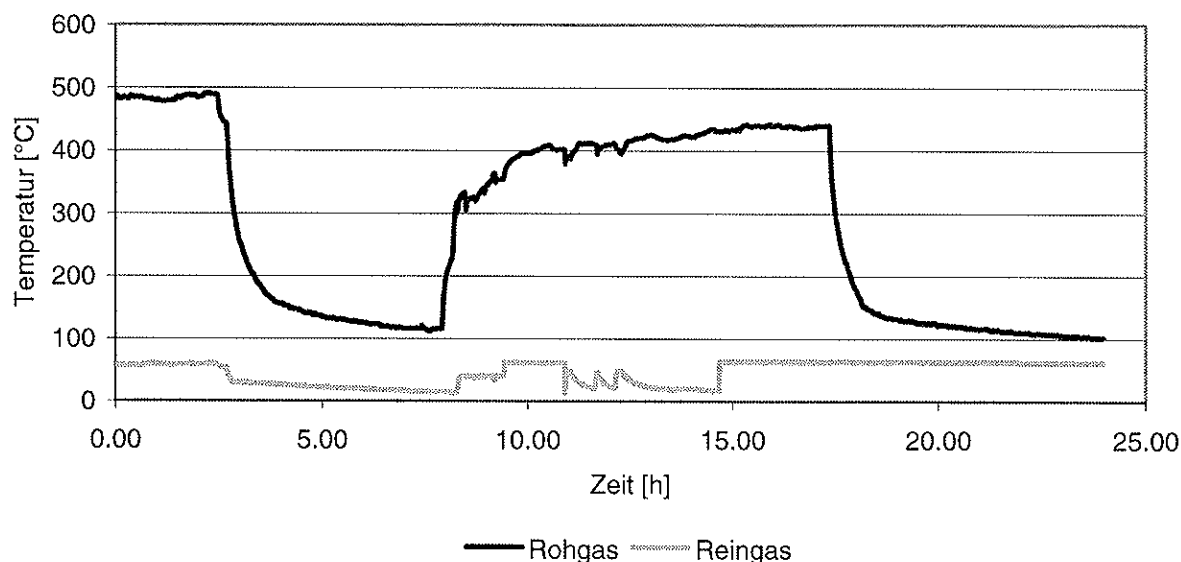


Abbildung 6.15a: Darstellung der Temperaturverläufe während der Vergasung von Altholz ohne BHKW-Betrieb. Die Zeitskala beginnt am 22. April 1997 0<sup>00</sup> Uhr.

Der Motor fiel um ca. 3<sup>00</sup> Uhr aus. Er konnte wegen des Defekts des Generators anschliessend nicht mehr gestartet werden. Das Ansteigen der Rohgastemperatur folgt auf die Inbetriebnahme der Gasförderung. Danach konnten die Teer- und Partikelmessungen erfolgen, nicht aber die Analyse des Reingases.

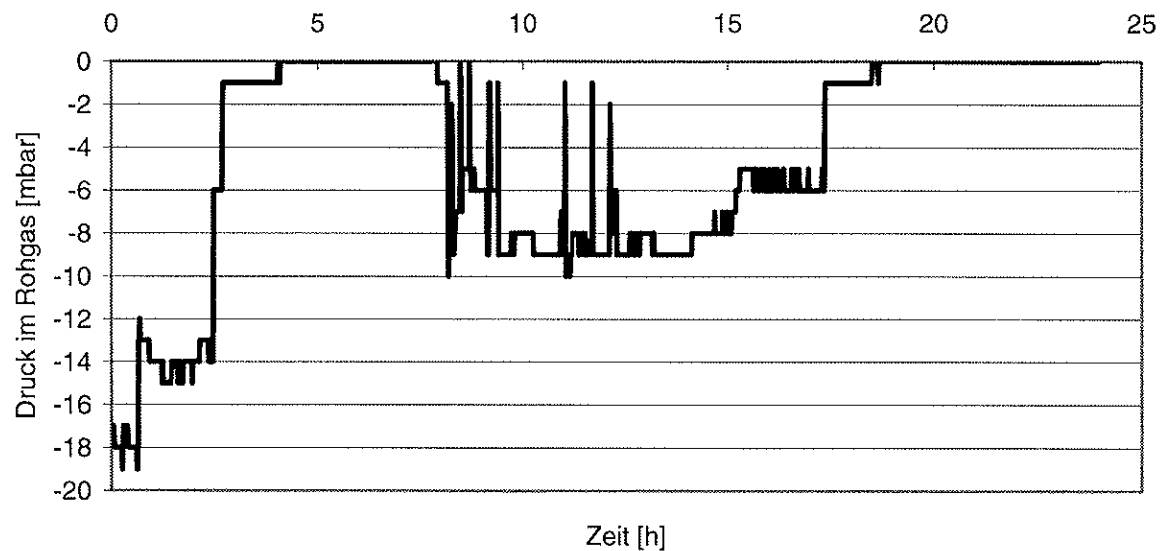


Abbildung 6.15b: Druck im Rohgas während des oben beschriebenen Versuches

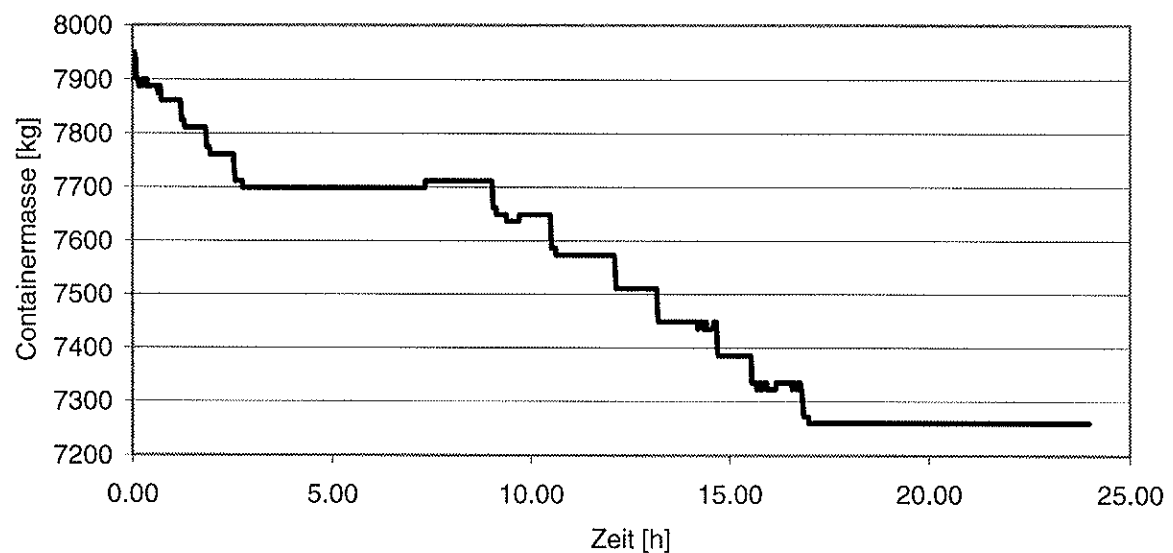


Abbildung 6.16: Abnahme der Containermasse aufgrund des Schnitzelverbrauches

Nach dem Ausfall des Motors um 3<sup>00</sup> Uhr schaltete die Anlage automatisch ab und verbrauchte keine Schnitzel mehr. Der Schnitzelverbrauch nach dem erneuten Fahren ohne Motor ist wesentlich geringer (Steigung).

Da das Gas die Leitung zum BHKW nicht passierte, konnte keine Analyse der Zusammensetzung erfolgen.

Am 28. und 29. April 1997 wurden die Versuche zur Vergasung von Altholz wiederholt. Die Ergebnisse sind bereits in den Tabellen 6.11 und 6.12 zusammengestellt. In Abbildung 6.17 sind die Temperaturverläufe beginnend mit dem 28. April 1997 0<sup>00</sup> Uhr dargestellt.

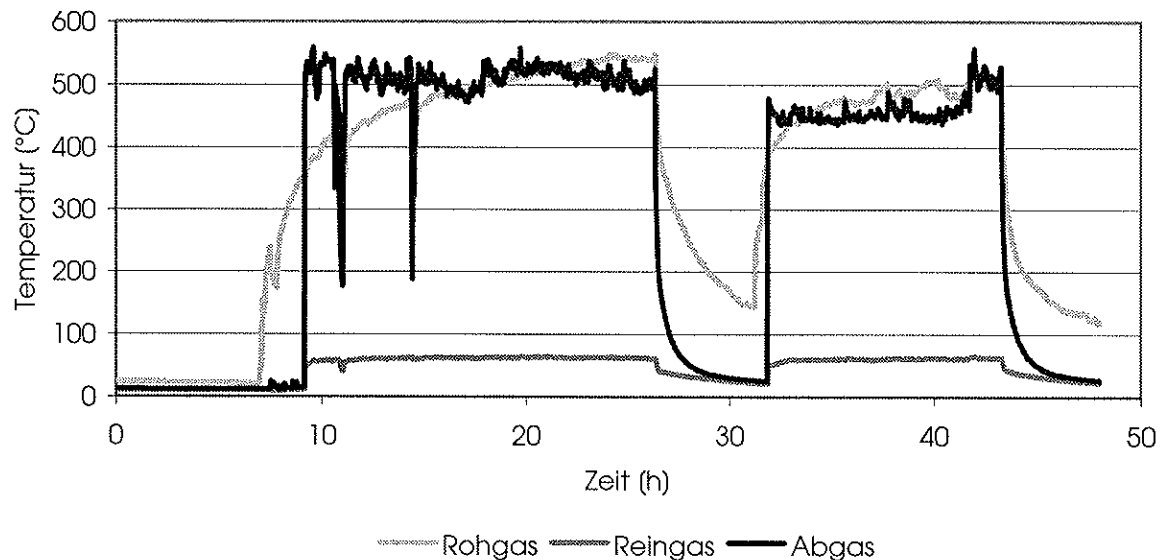


Abbildung 6.17: Verlauf der Temperaturen während der Vergasung von Altholz.

Die beiden Abfälle der Abgastemperatur zwischen Stunde 10 und Stunde 15 sind auf Störungen des BHKW-Motors zurückzuführen. Das Ansteigen der Rohgastemperatur zeigt, dass zumindest am 28. April der stationäre Betrieb der Anlage nicht erreicht wurde.

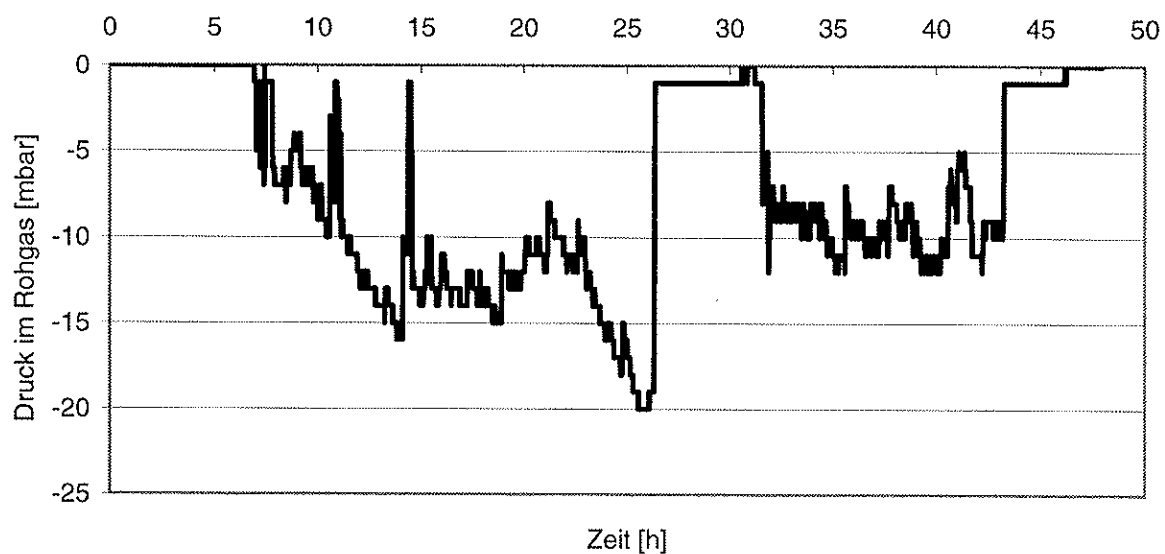


Abbildung 6.18: Verlauf des Druckes im Rohgas

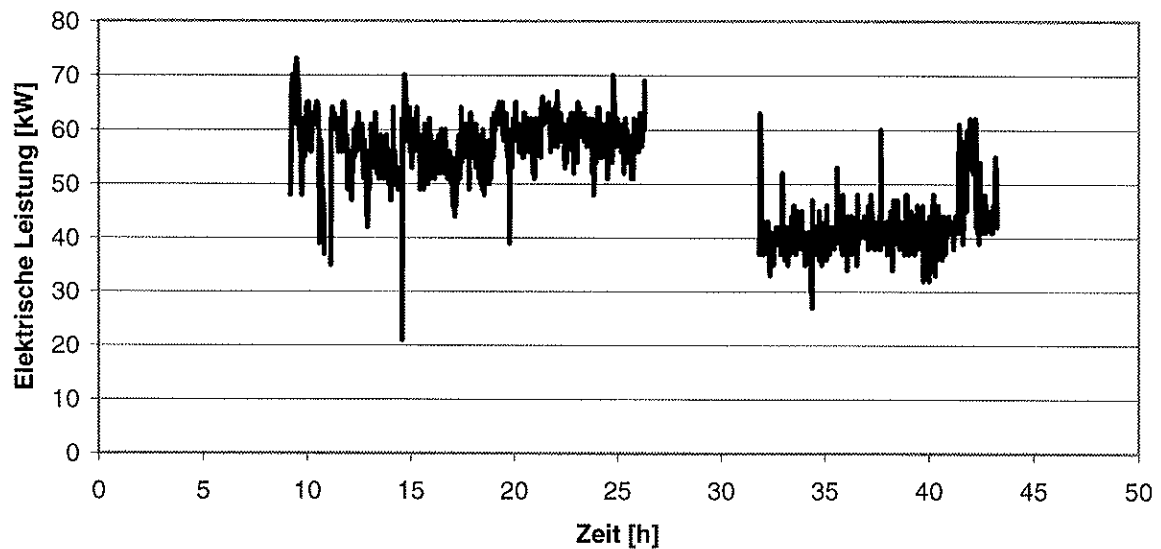


Abbildung 6.19: Elektrische Leistung an den beiden Messtagen

Die Auftragung der elektrischen Leistung zeigt, dass diese während den beiden Messtagen jeweils konstant war. Sie zeigt aber auch, dass die Reduktion der Leistung geringfügiger ist, als bei der Versuchsplanung vorgesehen. Der Grund liegt in der geringen Bandbreite des BHKW-Betriebes.

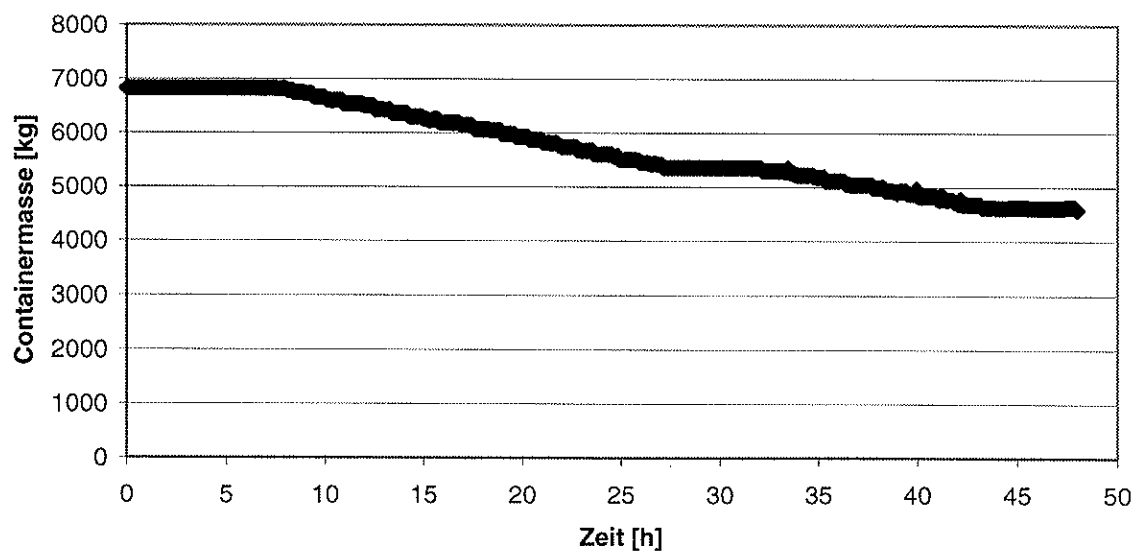


Abbildung 6.20: Abnahme der Masse des Schnitzelcontainers während des Versuches

In den Abbildungen 6. 21 und 6. 22 sind die Konzentrationen der Gaskomponenten dargestellt.

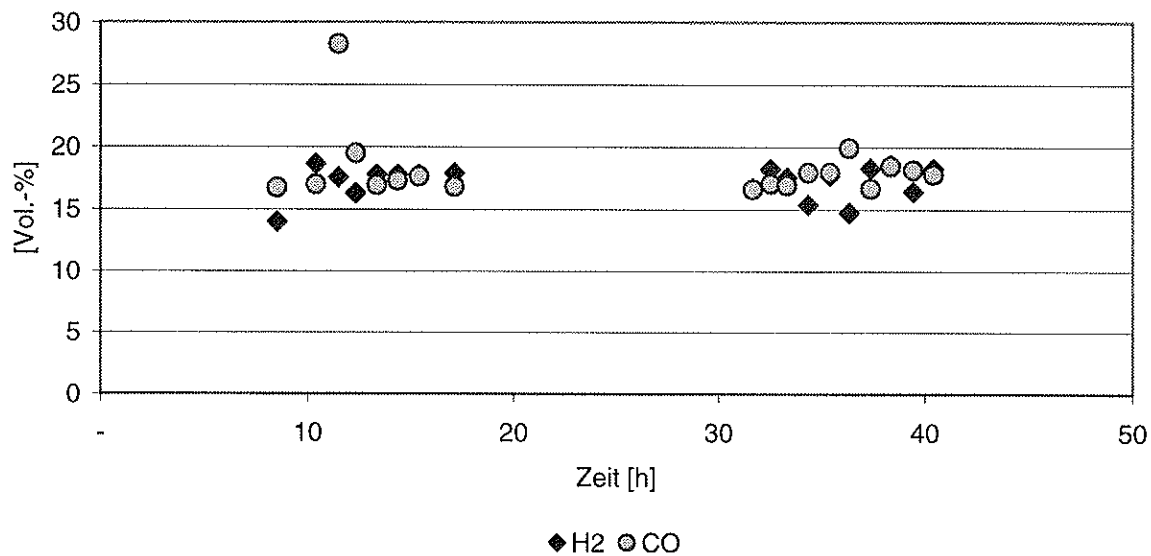


Abbildung 6.21: Verläufe der Konzentrationen von Wasserstoff und Kohlenmonoxid

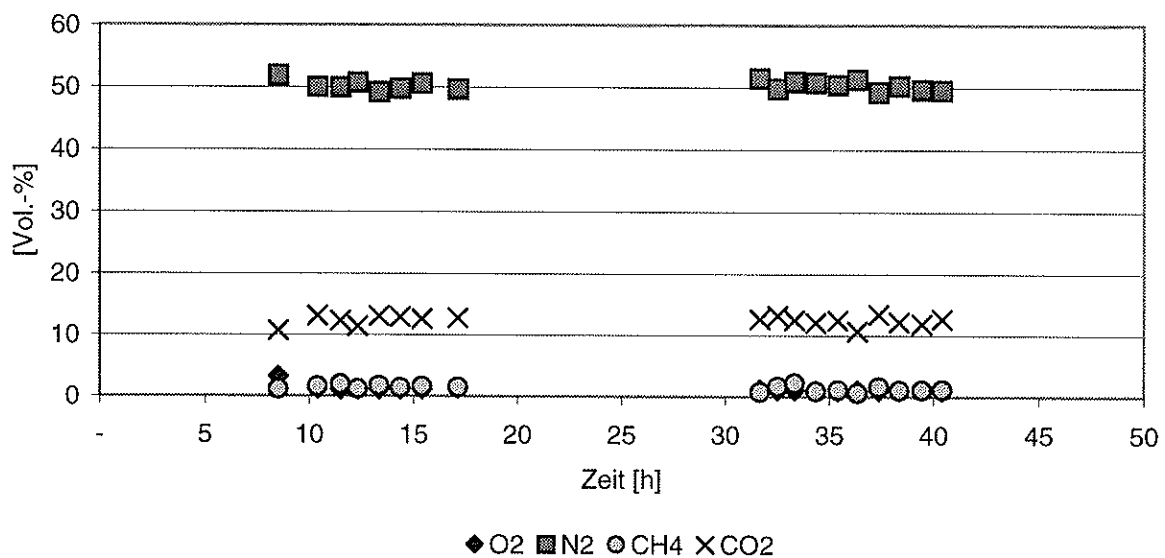


Abbildung 6.22: Verläufe der Konzentrationen von Sauerstoff, Stickstoff, Methan und Kohlendioxid in Volumenprozenten

Die Abbildungen zeigen eine sehr konstante Gasqualität, die auch zwischen den beiden Messtagen kaum variiert.

### 6.3.2 Teere und Partikel

Wie berichtet, wurde die Teer- und Partikelprobenahme am 22. April im Rohgas durchgeführt. Die Schwermetallmessungen im Roh-, Rein- und Motorenabgas sowie die Dioxin-Messungen im Motorenabgas erfolgten aus den erwähnten Gründen erst am 28. und 29. April 1997. Daher können diese Werte nicht direkt verknüpft werden.

Die Teer- und Partikelmessung erfolgte am 22. April 1995 zwischen 12<sup>53</sup> Uhr und 15<sup>53</sup> Uhr. Folgende Resultate wurden ermittelt:

Tabelle 6.14: Ergebnisse der Teer- und Partikelmessung am 22. April 1997. Das Reingas wurde abgefackelt und nicht motorisch genutzt.

Probenahmeort	Rohgas
Zeit seit Zündung [h]	17.8
Vergaserleistung [kW]	280
Partikel gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	588
Heavy Tars [mg/Nm <sup>3</sup> ]	94
Phenole gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	57
Summe PAK [mg/Nm <sup>3</sup> ]	59
davon Naphthalin [mg/Nm <sup>3</sup> ]	49

Bei diesen Ergebnissen fällt sofort auf, dass die Werte mit Ausnahme der Partikelkonzentrationen sehr gering sind. Dies ist sicherlich auf die geringen Gasgeschwindigkeiten zurückzuführen.

### 6.3.3 Schwermetalle

Schwermetalle wurden im Roh-, im Rein- und im Motorenabgas gemessen. Die Probenahme wurde an beiden Messtagen jeweils zweimal durchgeführt. Die angegebenen Konzentrationen beziehen sich auf das trockene Gas im Normalzustand (1013 mbar, 273.15 K). Die Ergebnisse der Schwermetallmessungen sind in den folgenden Tabellen 6.15 und 6.16 dargestellt:

Tabelle 6.15: Zusammenfassung der gefundenen Schwermetallkonzentrationen bei Vollastbetrieb. Die angegebenen Konzentrationen beziehen sich auf das trockene Gas im Normalzustand.

Messstelle	Rohgas	Reingas	BHKW-Abgas	Rohgas	Reingas	BHKW-Abgas	Reingas	BHKW-Abgas	Maximale rel. Messunsicherheit	Maximale abs. Messunsicherheit
Datum Zeit	28. 4. 1997 11 <sup>08</sup> -13 <sup>12</sup>	28. 4. 1997 11 <sup>08</sup> -13 <sup>12</sup>	28. 4. 1997 11 <sup>08</sup> -13 <sup>12</sup>	28. 4. 1997 13 <sup>48</sup> -15 <sup>57</sup>	28. 4. 1997 13 <sup>48</sup> -15 <sup>57</sup>	28. 4. 1997 13 <sup>48</sup> -15 <sup>57</sup>	28. 4. 1997 13 <sup>48</sup> -15 <sup>57</sup>	28. 4. 1997 13 <sup>48</sup> -15 <sup>57</sup>		
Cadmium [mg/m <sup>3</sup> ]	0.146	0.014	0.003	0.202	0.017	< 0.004			< ± 20 %	± 0.002
Quecksilber [mg/m <sup>3</sup> ]	0.009	0.007	0.005	0.010	0.005	0.006			< ± 25 %	± 0.002
Chrom [mg/m <sup>3</sup> ]	0.005	< 0.007	< 0.005	0.012	< 0.008	< 0.006			< ± 25 %	± 0.002
Kupfer [mg/m <sup>3</sup> ]	0.219	0.102	0.025	0.260	0.083	0.024			< ± 25 %	± 0.002
Nickel [mg/m <sup>3</sup> ]	0.007	< 0.007	0.019	< 0.006	< 0.008	< 0.008			< ± 25 %	± 0.002
Blei [mg/m <sup>3</sup> ]	22.1	1.6	0.165	30.3	1.7	0.237			< ± 25 %	± 0.002
Zink [mg/m <sup>3</sup> ]	102.1	5.6	0.823	140.2	6.5	1.184			< ± 25 %	± 0.002
Summe Blei und Zink [mg/m <sup>3</sup> ]	124.2	7.2	0.987	170.5	8.2	1.421			< ± 25 %	± 0.04

Tabelle 6.16: Zusammenfassung der gefundenen Schwermetallkonzentrationen bei Teillastbetrieb. Die angegebenen Konzentrationen beziehen sich auf das trockene Gas im Normalzustand.

Messstelle	Rohgas	Reingas	BHKW-Abgas	Rohgas	Reingas	BHKW-Abgas	Reingas	BHKW-Abgas	Maximale rel. Messunsicherheit	Maximale abs. Messunsicherheit
Datum	29. 4. 1997	29. 4. 1997	29. 4. 1997	29. 4. 1997	29. 4. 1997	29. 4. 1997	29. 4. 1997	29. 4. 1997		
Zeit	10 <sup>06</sup> -12 <sup>10</sup>	10 <sup>06</sup> -12 <sup>10</sup>	10 <sup>06</sup> -12 <sup>10</sup>	12 <sup>37</sup> -14 <sup>47</sup>	12 <sup>37</sup> -14 <sup>47</sup>	12 <sup>37</sup> -14 <sup>47</sup>	12 <sup>37</sup> -14 <sup>47</sup>	12 <sup>37</sup> -14 <sup>47</sup>		
Cadmium	[mg/m <sup>3</sup> ]	0.065	0.010	0.006	0.068	0.007	0.014	0.007	< ± 20 %	± 0.002
Quecksilber	[mg/m <sup>3</sup> ]	0.008	0.005	0.006	0.007	0.006	0.005	0.006	< ± 25 %	± 0.002
Chrom	[mg/m <sup>3</sup> ]	0.004	< 0.007	< 0.006	< 0.005	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< ± 25 %	± 0.002
Kupfer	[mg/m <sup>3</sup> ]	0.109	0.040	0.045	0.068	0.076	0.024	0.076	< ± 25 %	± 0.002
Nickel	[mg/m <sup>3</sup> ]	0.004	< 0.007	< 0.006	< 0.005	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< ± 25 %	± 0.002
Blei	[mg/m <sup>3</sup> ]	12.8	1.0	0.196	16.8	1.0	1.0	0.275	< ± 25 %	± 0.002
Zink	[mg/m <sup>3</sup> ]	58.6	4.3	1.515	86.4	7.1	7.1	2.750	< ± 25 %	± 0.002
Summe Blei und Zink	[mg/m <sup>3</sup> ]	71.4	5.4	1.712	103.2	8.2	8.2	3.025	< ± 25 %	± 0.04

Die Tabellen zeigen, dass die Belastung des Reingases mit Schwermetallen wesentlich geringer ist, als diejenige des Rohgases. Die Belastung des Abgases ist am geringsten. Der Unterschied zwischen Roh- und Reingas ist jedoch auch auf die unterschiedlichen Wasserdampfanteile und die unterschiedlichen Temperaturen zurückzuführen. Bei der Verbrennung werden Wasserstoff, Kohlenmonoxid und Methan zu Wasser und Kohlendioxid oxidiert und das Verbrennungsabgas wird durch den Luftstickstoff verdünnt.

#### **6.3.4 Dibenzodioxine und Dibenzofurane**

Die gemessenen Konzentrationen der verschiedenen Dioxine und Furane werden mit den ihnen zugeordneten Toxizitätsäquivalenten verrechnet und summiert. Anders als in der Schweiz existieren in der Bundesrepublik Deutschland bundesweit gültige Grenzwerte für Dioxine. Die Summe der Toxizitätswerte darf diesen Grenzwert nicht überschreiten.

Die gefundenen Dioxin-Konzentrationen im Motorenabgas betragen gesamthaft  $0.383 \text{ ng/m}^3$  (Toxizitätsäquivalente). Umgerechnet auf einen Sauerstoffanteil von 11 Vol.-% sind dies  $0.209 \text{ ng/m}^3$ . Der Grenzwert der deutschen BimSchV. beträgt demgegenüber  $0.100 \text{ ng/m}^3$ . Da diese Grenzwertüberschreitung nicht sehr hoch ist ( $0.1 \text{ ng/m}^3$  sind ein zehnmilliardstel Gramm), müsste die Messung für einen behördlichen Entscheid wiederholt werden. Dennoch ist der Wert für einen Vergaser hoch, da bei Sauerstoffunterschuss gearbeitet wird und somit ein wichtiger Faktor für die Dioxinbildung fehlt. Daher muss ein Luft Eintritt in der Rohrleitung mit den Messstutzen als Ursache in Betracht gezogen werden.

Die vollständige Auflistung der Verbindungen ist der folgenden Tabelle 6.17 zu entnehmen:

Tabelle 6.17: Probenahme vom 28. April 1997, 10<sup>00</sup> – 16<sup>33</sup> Uhr: Ergebnisse der Messung von polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen

Verbindung	Toxizitätsfaktor	Bezogen auf 5.0 Vol.-% Sauerstoff	Ohne Sauerstoffbezug
2,3,7,8 TCDD	1	0.027	0.031
1,2,3,7,8 PCDD	0.5	0.082	0.094
1,2,3,4,7,8 HXCDD	0.1	0.019	0.022
1,2,3,6,7,8 HXCDD	0.1	0.036	0.041
1,2,3,7,8,9 HXCDD	0.1	0.022	0.025
1,2,3,6,7,8 HPCDD	0.01	0.100	0.114
OCDD	0.001	0.183	0.210
2,3,7,8 TCDF	0.1	0.410	0.470
1,2,3,7,8 PCDF	0.05	0.231	0.264
2,3,4,7,8 PCDF	0.5	0.344	0.394
1,2,3,4,7,8 HXCDF	0.1	0.105	0.120
1,2,3,6,7,8 HXCDF	0.1	0.099	0.113
2,3,4,6,7,8 HXCDF	0.1	0.103	0.118
1,2,3,7,8,9 HXCDF	0.1	0.004	0.005
1,2,3,4,6,7,8 HPCDF	0.01	0.105	0.120
1,2,3,4,7,8,9 HPCDF	0.01	0.008	0.009
OCDF	0.001	0.021	0.024
Summe PCDD/F	-	14.500	16.6
Summe I-TEQ	-	0.334	0.383

### 6.3.5 Analyseresultate von Kondensat und Abwasser

Das Waschwasser wurde kurz nach Beginn des Versuches und nach dessen Abschluss beprobt. Beide Proben wurden bei eingeschalteter Zirkulationspumpe gezogen, um eine gute Homogenisierung des Waschwassers zu gewährleisten. Die Waschwasserbilanz ist aufgrund des trockenen Materials negativ. Das heisst, dass während den beiden Versuchstagen 355 l Frischwasser aus dem Behälter auf dem Containerdach nachgespiesen wurden. Dagegen fielen lediglich 60 l Kondensat an.

Tabelle 6.18 a: Waschwasserparameter während der Altholzvergasung

Zeit [h]	pH [ ]	Ammonium [mg <sub>N</sub> /l]	Cyanid [mg/l]	TOC [mg/l]	Phenole [mg/l]
28.4.1997 09:20	8.5	3470	17.0	4400	366
29.4.1997 17:35	8.5	2220	17.0	4000	89

Tabelle 6.18b: Schwermetallbelastungen des Waschwassers während der Altholzvergasung

<b>Zeit</b> [h]	<b>Cadmium</b> [mg/l]	<b>Blei</b> [mg/l]	<b>Chrom</b> [mg/l]	<b>Nickel</b> [mg/l]	<b>Kupfer</b> [mg/l]	<b>Zink</b> [mg/l]
28.4.1997 09:20	0.6	94	0.1	0.4	1	338
29.4.1997 17:35	0.8	128	0.2	0.5	1.7	551

Wie schon in den vorhergehenden Versuchen nimmt die organische Belastung des Waschwassers vom Beginn zum Ende ab. Dies gilt auch für das Cyanid. Hingegen nimmt die Belastung des Waschwassers mit Schwermetallen im Laufe des Versuches zu, wie Tabelle 6.18 b zu entnehmen ist.

Das Kondensat wurde während der gesamte Versuchsdauer gesammelt und am Ende des Versuches quantifiziert und analysiert. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 6.19 a und 6.19 b dargestellt.

Tabelle 6.19 a: Belastung des Kondensats von der Vergasung von Altholz

<b>Menge</b> [l]	<b>pH</b> [ ]	<b>Ammonium</b> [mgN/l]	<b>Cyanid</b> [mg/l]	<b>TOC</b> [mg/l]	<b>Phenole</b> [mg/l]
60	8.8	1330	1.7	310	95

Tabelle 6.19 b: Schwermetallbelastungen des Kondensats während der Altholzvergasung

<b>Menge</b> [l]	<b>Cadmium</b> [mg/l]	<b>Blei</b> [mg/l]	<b>Chrom</b> [mg/l]	<b>Nickel</b> [mg/l]	<b>Kupfer</b> [mg/l]	<b>Zink</b> [mg/l]
60	< 0.1	3.3	< 0.1	< 0.1	1.1	18

Die Belastung des Kondensates ist vergleichsweise tief. Ein grosser Teil der Schwermetalle wird in der Gaswäsche abgeschieden und findet sich im Waschwasser wieder, während die Schwermetallbelastung des Kondensates eher gering ist. Die Abnahme der organischen Belastung lässt sich dadurch erklären, dass ein Teil der flüchtigen Phenole in die Gasphase gelangt und im Motor verbrannt wird. Die Phenole tragen einen bedeutenden Teil zum organischen Kohlenstoff im Abwasser und im Kondensat bei. Da sie wasserdampflich sind, können sie aus dem Waschwasser in das Reingas und in das Kondensat transferiert werden. Die Schwermetalle sind vergleichsweise schwerflüchtig. Daher nimmt ihre Konzentration im Waschwasser zwischen Anfang und Ende des Versuches zu.

### 6.3.6 Analyse der Asche

Am Ende des zweiten Versuchstages wurde die produzierte Asche durch Wägung quantifiziert. Eine repräsentative Probe der Asche wurde gezogen und analysiert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 6.20 zusammengestellt:

Tabelle 6.20: Analyseresultate der Ascheprobe der Vergasung von Altholz

Menge	[kg]	34.2
Trockenrückstand	[Gew.-%]	99.9%
Glührückstand	[Gew.-%]	99.2%
Brennwert	[MJ/kg]	nicht gezündet
Kohlenstoff	[Gew.-%]	4.0%
Stichstoff	[Gew.-%]	< 2.0%
Schwefel	[Gew.-%]	0.40%
Chlor	[Gew.-%]	0.20%
Cadmium	[mg/kg]	< 10
Blei	[mg/kg]	40
Chrom	[mg/kg]	210
Nickel	[mg/kg]	70
Kupfer	[mg/kg]	450
Zink	[mg/kg]	750

Wiederum betragen die Trocken- und Glührückstände nahezu 100%. Der Kohlenstoffgehalt ist mit 4% niedrig. Der Brennwert konnte nicht ermittelt werden, da die Asche nicht mehr gezündet werden konnte. Sie enthält keine Energie mehr.

### 6.3.7 Betrachtungen zum Stofffluss

Anhand der verbrauchten Schnitzelmenge und der angefallenen Aschemenge sowie der darin enthaltenen Schwermetallkonzentrationen können die Transferkoeffizienten der Schwermetalle in die Asche berechnet werden. Jedes Schwermetall hat einen unterschiedlichen Transferkoeffizienten. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Menge des Metalls, das sich in der Asche wiederfindet zur gesamthaft mit dem Brennstoff zugeführten Metallmenge. Insgesamt wurden während den beiden Versuchstagen 1906 kg Altholz vergast. Dabei fielen 34.2 kg Asche an.

Die errechneten Transferkoeffizienten sind in der folgenden Tabelle 6.21 zusammengestellt:

Tabelle 6.21: Transferkoeffizienten der Schwermetalle in die Rostasche

Element	Transfer- koeffizient
Chrom	15%
Nickel	42%
Kupfer	101%
Zink	37%
Cadmium	-
Quecksilber	-
Blei	7%

Kupfer findet sich also vollständig in der Rostasche wieder, während Nickel und Zink mehrheitlich in das Rohgas transferiert werden. Chrom und Blei gelangen fast vollständig in das Rohgas. Der Cadmium-Gehalt des Altholzes ist mit 3 mg/kg vergleichsweise gering. In der Asche liegt die Konzentration dann unterhalb der Analysegrenze. Dies bedeutet, dass Cadmium tendenziell eher in das Rohgas gelangt als in die Asche. Quantitative Angaben sind hingegen nicht möglich. Da Quecksilber bereits im Altholz nicht quantifiziert werden konnte, sagen die Ergebnisse nichts über das Schicksal von Quecksilber aus. Aufgrund der hohen Flüchtigkeit von Quecksilber ist anzunehmen, dass dieses vollständig in das Rohgas gelangt.

Die Gasvolumenströme werden anhand der Kohlenstoffbilanz berechnet. Dabei wird der Anteil des Kohlenstoffes, der in die Asche gelangt wegen des sehr guten Ausbrandes und der geringen Aschemenge vernachlässigt. Zur Analyse der Schwermetallströme werden die gemessenen Ströme, Schnitzelverbrauch, Ascheanfall, Rein-, Roh- und Abgasflüsse sowie die Stoffströme, die ins Abwasser gelangen berücksichtigt.

Setzt man die Schwermetallfrachten, die den Vergaser in Roh-, Rein- und Abgas passieren mit den Frachten in Beziehung, die mit dem Altholz zugeführt werden, so erhält man für den 28. April 1997 folgende Werte.

Tabelle 6.22a: Vergleich der Schwermetallfrachten in Roh-, Rein- und Motorenabgas mit der im Brennstoff zugeführten Schwermetallfracht für den 28. April 1997.

	<b>Rohgas/Altholz [g/g]</b>	<b>Reingas/Altholz [g/g]</b>	<b>Abgas/Altholz [g/g]</b>
Cadmium	14.3%	1.3%	0.3%
Quecksilber	-	-	-
Chrom	0.1%	-	-
Kupfer	7.4%	2.9%	0.8%
Nickel	0.6%	-	1.6%
Blei	587.1%	37.0%	4.6%
Zink	829.5%	41.4%	7.0%

Die Tabelle für den zweiten Messtag zeigt die gleichen Tendenzen. Allerdings weichen die Messwerte deutlich von denen des ersten Messtages ab.

Tabelle 6.22b: Vergleich der Schwermetallfrachten in Roh-, Rein- und Motorenabgas mit der im Brennstoff zugeführten Schwermetallfracht für den 29. April 1997.

	<b>Rohgas/Altholz [g/g]</b>	<b>Reingas/Altholz [g/g]</b>	<b>Abgas/Altholz [g/g]</b>
Cadmium	5.7%	1.1%	0.6%
Quecksilber	-	-	-
Chrom	0.0%	-	-
Kupfer	2.8%	1.1%	2.0%
Nickel	0.3%	-	-
Blei	344.8%	24.4%	5.8%
Zink	516.1%	43.1%	16.0%

Die Ergebnisse für Blei und Zink bedeuten, dass von diesen Metallen bis zu achtmal grössere Mengen aus dem Vergaser austreten, als diesem zugeführt werden. Dies ist physikalisch nicht möglich. Die Berechnungen basieren auf den Analysen des Brennstoffes, des Roh-, des Rein- und des Abgases. Zusätzlich fließen der Brennstoffverbrauch und die Gasgeschwindigkeiten in die Rechnung mit ein. Von diesen Parametern sind vor allem die Schwermetallbelastungen des Brennstoffes und des Roh-, Rein- und Abgases mit Unsicherheiten belastet. Zwar wurden vom Brennstoff zu verschiedenen Zeiten Proben gezogen und zu einer Mischprobe vereint. Wurde aber bei einer dieser Proben eine aussergewöhnlich schwach belastete Teilmenge entnommen, so wird die Brennstoffbelastung allgemein zu tief geschätzt. Die Vermutung von zu tiefen Schwermetallanteilen im Brennstoff wird auch durch die Betrachtung der Gesamtstoffströme in das Abwasser und das Kondensat bekräftigt. Tabelle 6.23 zeigt, dass danach mehr

Blei und Zink ins Abwasser gelangt sein müsste, als aufgrund der Bilanz mit dem Brennstoff zugeführt wurde. Jedoch wird festgestellt, dass Blei und Zink in die Gasphase transferiert wird und aus dem Gas gut abgeschieden.

Tabelle 6.23: Vergleich der Schwermetallmenge aus dem Brennstoff mit den Mengen in Abwasser und Kondensat

	<b>Altholz [g]</b>	<b>Abwasser [g]</b>	<b>Kondensat [g]</b>	<b>Asche [g]</b>
Cadmium	5.7	0.2	-	-
Blei	21.0	27.2	0.2	1.4
Chrom	47.7	0.1	-	7.2
Nickel	5.7	0.1	-	2.4
Kupfer	15.2	0.6	0.1	15.4
Zink	68.6	170.4	1.1	25.7

Es muss festgehalten werden, dass die gewählten Analysemethoden für eine schlüssige Beurteilung der Stoffflüsse zu wenig genau sind. Trotzdem können Aussagen gemacht werden.

Cadmium wurde in der Asche nicht gefunden. Ein grosser Teil geht in die Gasphase über und wird in der Gaswäsche relativ schlecht abgetrennt. Die Reduktion vom Rohgas zum Reingas und zum Motorenabgas ist wohl auch auf die Ablagerung cadmiumhaltigen Staubs in den Rohrleitungen zurückzuführen. Quecksilber konnte im Altholz nicht quantifiziert werden. Der grösste Anteil des Chroms aus dem Altholz wurde in der Asche gefunden. Lediglich ein kleiner Teil des zugeführten Chroms verliess den Vergaser mit dem Rohgas. Im Waschwasser lag daher nur eine sehr kleine Menge vor. Die Bilanz für Chrom ist bei weitem nicht geschlossen. Bei Nickel wurden die selben Beobachtungen gemacht. Auch bei Nickel wurde der grösste Anteil in der Asche wiedergefunden. Praktisch das gesamte Kupfer aus dem zugeführten Altholz wurde in der Rostasche gefunden. Grosse Mengen Zink wurden im Waschwasser gefunden. Zink gelangt offensichtlich bei der Vergasung in das Rohgas, wird aber in der Wäsche gut abgeschieden. Die Situation beim Quecksilber kann anhand der vorliegenden Daten nicht geklärt werden. Die Quecksilberfrachten sind zu gering. Quecksilber ist jedoch leichtflüchtig und kann aus dem Gas mit den vorhandenen Einrichtungen kaum abgeschieden werden.

Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Messtage ist auf die kleinere Vergaserleistung am zweiten Messtag zurückzuführen. Die Leistung war am zweiten Messtag geringer als am ersten, weshalb auch die Gasgeschwindigkeiten geringer waren. Daher wurden am zweiten Messtag wahrscheinlich weniger schwermetallbelastete Partikel mitgerissen. Dies lässt sich jedoch nicht überprüfen, da bei der Messung nicht zwischen dem filtergängigen und dem nichtfiltergängigen Anteil unterschieden wurde.

## 6.4 Rinde

### 6.4.1 Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen

Die Versuche zur Vergasung von getrockneter Rinde wurden am 1. und 2. Mai 1997 durchgeführt. Am ersten Tag wurde Vollast gefahren, während am zweiten Tag Teillast gefahren wurde. Die Ergebnisse der Gasanalyse und die aus diesen berechneten Wirkungsgrade sind in den Tabellen 6.24 a und 6.24 b zusammengestellt.

Tabelle 6.24a: Zusammenstellung der Gasanalyseresultate der Rindevergasung

Rinde	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Summe
1.5.1997 8 <sup>27</sup> -0 <sup>29</sup>	16.3%	1.3%	13.8%	14.9%	1.4%	52.4%	100.1%
2.5.1997 8 <sup>43</sup> -15 <sup>49</sup>	14.3%	1.1%	14.0%	14.5%	1.4%	54.0%	99.3%

Tabelle 6.24 b: Zusammenstellung der errechneten Wirkungsgrade

Rinde	Brennstoff- verbrauch [kg/h]	Gasfluss trocken [Nm <sup>3</sup> /h]	Dampf- fluss [Nm <sup>3</sup> /h]	Gasheiz- wert [kJ/Nm <sup>3</sup> ]	Kaltgas- Wirkungs- grad	Elektrische Leistung [kW]	Elektrischer Wirkungs- grad	BHKW- Wirkungs- grad
1.5.'97 8 <sup>27</sup> -0 <sup>29</sup>	75.5	178.5	21.0	-3979	71%	45	16%	23%
2.5.'97 8 <sup>43</sup> -15 <sup>49</sup>	58.9	140.9	19.5	-3721	67%	32	15%	22%

Die Mittelwerte der wichtigsten Vergasungsparameter sind in Tabelle 6.25 zusammengefasst

Tabelle 6.25: Mittelwerte der Vergasungsparameter während der Vergasung von trockener Rinde

Zeit [h]	Druck im Rohgas [mbar]	Rohgas- temperatur [°C]	Reingas- temperatur [°C]	Elektrische Leistung [kW]	BHKW-Ab- gastemp. [°C]
1.5.'97 8 <sup>27</sup> -2.5.'97 0 <sup>29</sup>	-14.36	488.39	62.08	44.74	478.16
2.5.'97 8 <sup>43</sup> -15 <sup>49</sup>	-12.19	509.12	59.67	31.94	380.75

In Abbildung 6.23 sind die zeitlichen Verläufe der Temperaturen dargestellt.

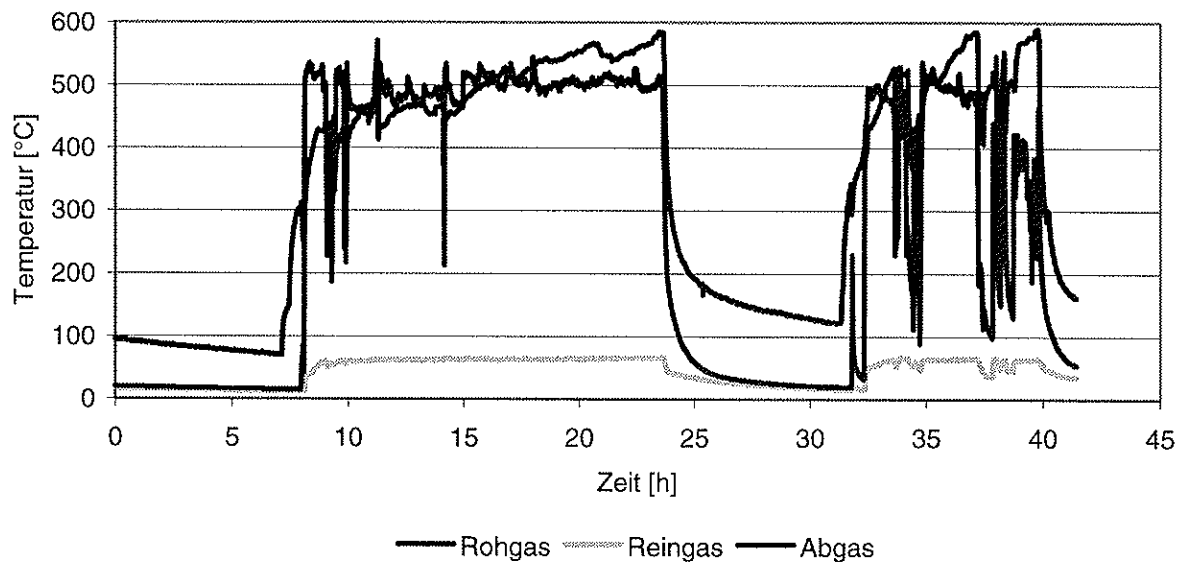


Abbildung 6.23: Verlauf der Roh- und Reingastemperaturen sowie die Temperatur des Motorenabgases während der Vergasung von Rinde. Die Zeitachse reicht von 0<sup>00</sup> Uhr des ersten Messtages bis 24<sup>00</sup> Uhr des zweiten Messtages.

Die Abbildung zeigt, dass am ersten Versuchstag ein stabiler Betrieb gewährleistet war. Am zweiten Versuchstag lief der Motor sehr instabil. Dies ist zumindest teilweise auf die hohen Druckverluste über das Reaktorbett zurückzuführen, die in Abbildung 6.24 dargestellt sind.

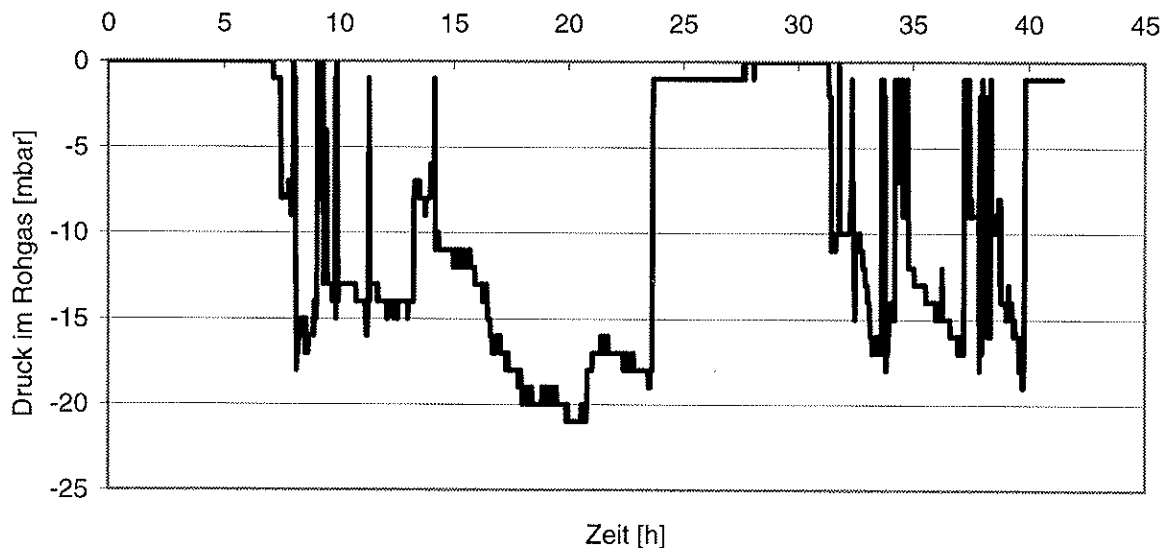


Abbildung 6.24: Druck im Rohgas

Der instabile Motorenbetrieb schlägt sich naturgemäss am deutlichsten in der Darstellung der elektrischen Leistung gegen die Zeit nieder. Am zweiten Versuchstag konnte kaum mehr ein kontinuierlicher Motorenbetrieb aufrecht erhalten werden.

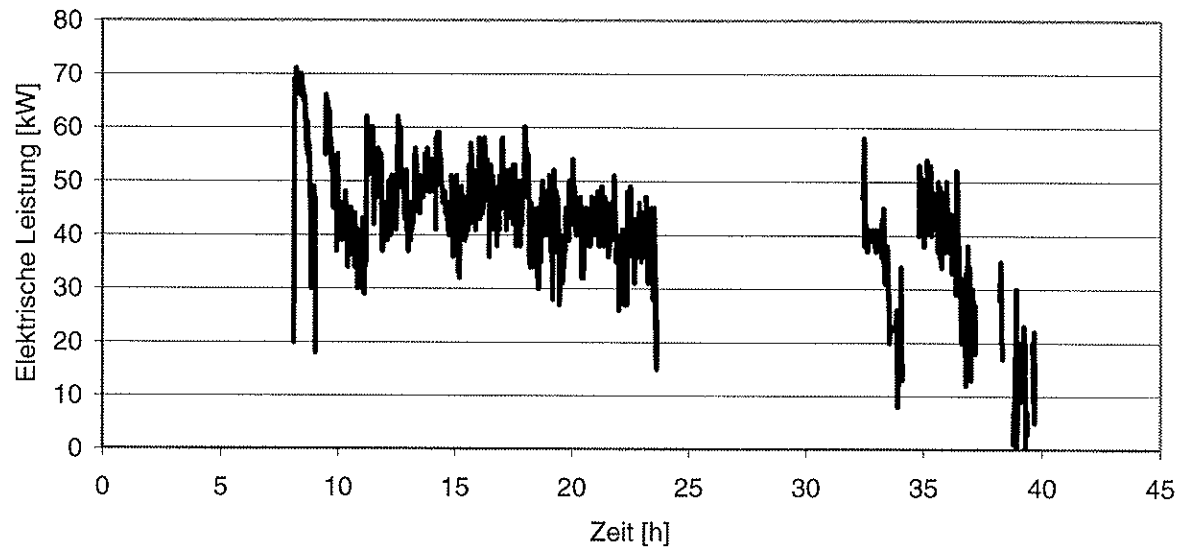


Abbildung 6.25: Elektrische Leistung des BHKW

Die Auftragung der Masse des Schnitzelcontainers gegen die Zeit zeigt eine kontinuierliche Abnahme während des ersten Tages und einen nur kurzen Betrieb während des zweiten Tages.

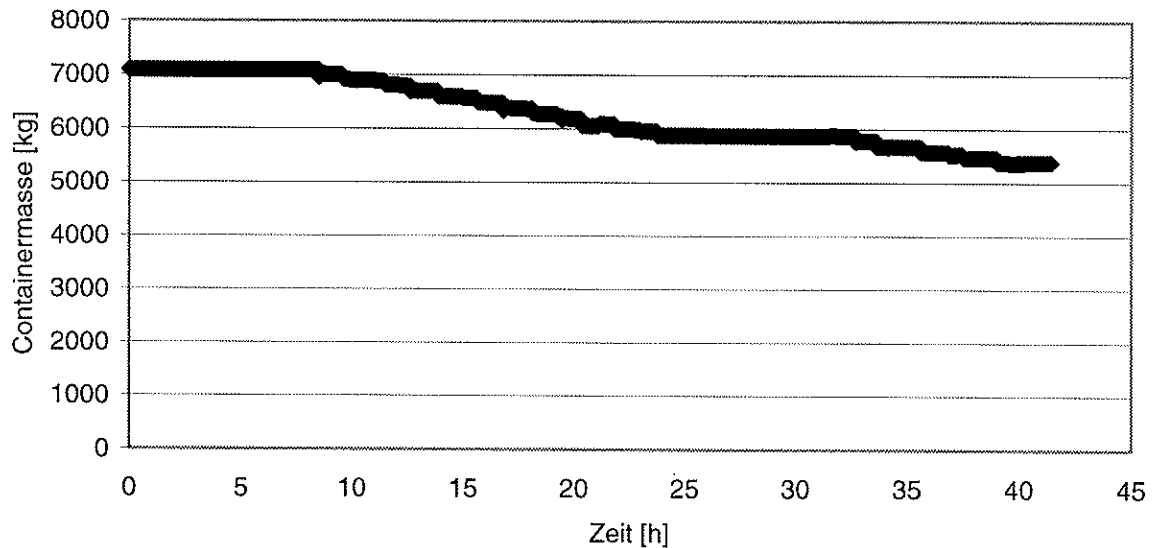


Abbildung 6.26: Darstellung der Masse des Brennstoffcontainers gegen die Zeit. Die negative Steigung der Containermasse entspricht dem Brennstoffverbrauch.

Abbildung 6.27 zeigt die Wasserstoff- und Kohlenmonoxidgehalte des trockenen Reingases während dem Vergasungsversuch.

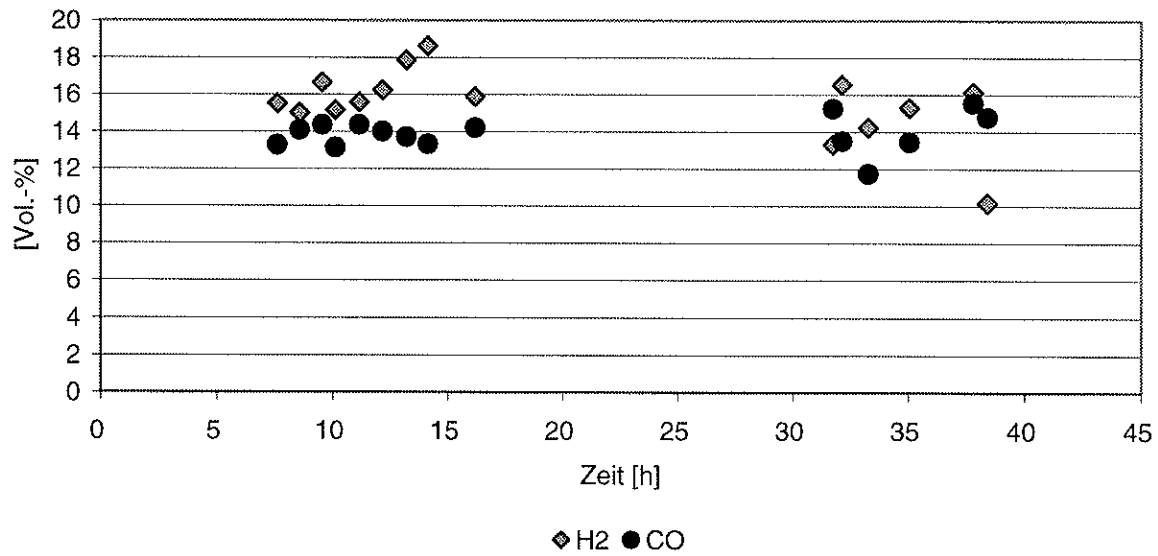


Abbildung 6.27: Volumenanteile von Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Kohlenmonoxid (CO) im trockenen Reingas

Abbildung 6.28 zeigt die weiteren gemessenen Konzentrationen. Die Gehalte an Wasserstoff und Kohlenmonoxid sind im Vergleich zu den Ergebnissen der anderen Versuche deutlich geringer. Die Sauerstoffkonzentration ist sehr gering. Der Stickstoffgehalt liegt bei ca. 50 %.

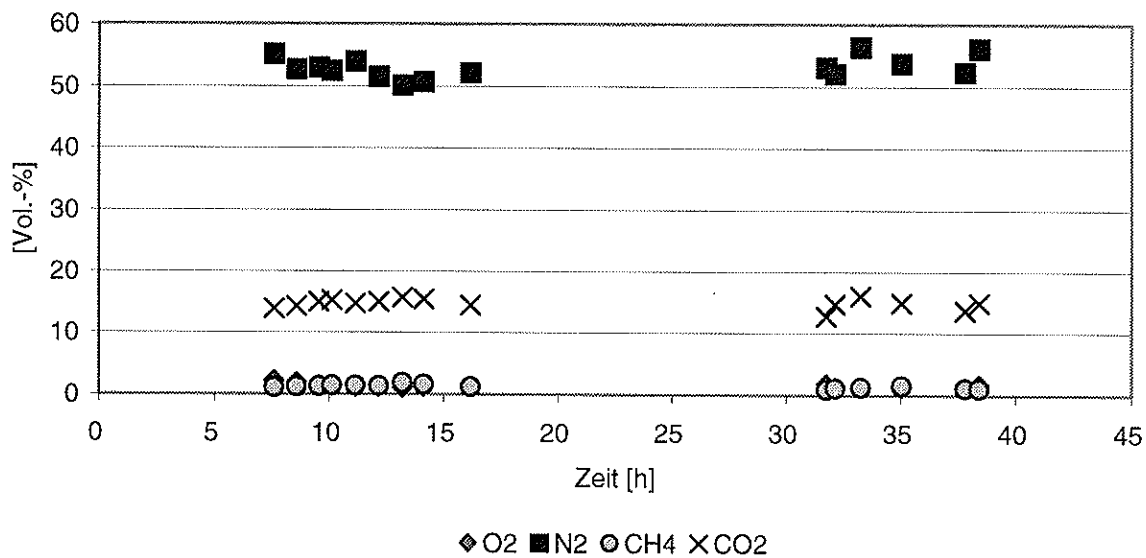


Abbildung 6.28: Gehalten von Sauerstoff, Stickstoff, Methan und Kohlendioxid im trockenen Reingas

Die Darstellungen der Konzentrationen gegen die Zeit zeigen, dass auch die Zusammensetzung des Gases ungewöhnlich starken Schwankungen unterworfen war. Die Schwankungen sind bei den Gasen am grössten, die den Heizwert des Gases ausmachen, nämlich beim Wasserstoff und beim Kohlenmonoxid.

#### 6.4.2 Ergebnisse der Probenahmen im Gas

Die Probenahme für die Bestimmung der Teer- und Partikelgehalte erfolgte am 1. Mai 1997 zwischen 11<sup>45</sup> Uhr und 15<sup>45</sup> Uhr im Roh- und im Reingas. In Tabelle 6.26 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 6.26: Ergebnisse der Teer- und Partikelmessung

Probenahmeort	Rohgas	Reingas
Zeit seit Zündung [h]	4.9	4.9
Vergaserleistung [kW]	280	280
Partikel gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	517	62
Heavy Tars [mg/Nm <sup>3</sup> ]	381	352
Phenole gesamt [mg/Nm <sup>3</sup> ]	95	54
Summe PAK [mg/Nm <sup>3</sup> ]	517	188
Davon Naphthalin [mg/Nm <sup>3</sup> ]	396	158

Die Reinigungsleistung der Wasch- und Reinigungseinrichtung war bei diesen Versuchen sehr gering. Dies ist auf Verstopfungen der Düsen der Sprühkolonne zurückzuführen.

#### 6.4.3 Analyseresultate von Kondensat und Abwasser

Das Waschwasser wurde kurz nach Beginn des Versuches und am Ende des ersten Versuchstages beprobt. Die Probe des zweiten Versuchstages wurde nicht analysiert, da kein stabiler Versuchsbetrieb vorlag. Beide Waschwasserproben wurden bei eingeschalteter Zirkulationspumpe gezogen, um eine gute Homogenisierung des Waschwassers zu gewährleisten. Während dem ersten Versuchstag wurden 200 l Frischwasser in den Waschwassertank nachgespiesen. Am zweiten Versuchstag waren es 120 l.

Tabelle 6.27: Waschwasserparameter während der Vergasung von Rinde

Zeit [h]	pH [ ]	Ammonium [mgN/l]	Cyanid [mg/l]	TOC [mg/l]	Phenole [mg/l]
1.5.1997 08:00	11.0	262	1.1	185	38
1.5.1997 17:30	8.7	968	2.5	650	242

Bei diesem Versuch liegt nun die Belastung des Waschwassers nach dem Ende des Versuches deutlich über derjenigen vom Beginn des Versuches. Dies entspricht den Erwartungen. Ein Grund für diesen

Sachverhalt liegt sicherlich in der geringen Belastung des Waschwassers zu Beginn des Versuches. Es ist jedoch auch festzuhalten, dass die Gaswaschung wegen verstopfter Düsen nicht optimal funktionierte. Aufgrund dieser Feststellungen kann vermutet werden, dass bei gut funktionierender Sprühkolonne der Stofftransfer auch vom Waschwasser ins Gas erfolgen kann.

Das Kondensat wurde während der gesamte Versuchsdauer gesammelt und am Ende des Versuches quantifiziert und analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.28 dargestellt.

Tabelle 6.28: Kondensat während des 150-Studentests

Menge [l]	pH [ ]	Ammonium [mg <sub>N</sub> /l]	Cyanid [mg/l]	TOC [mg/l]	Phenole [mg/l]
60	8.7	908	2.3	250	195

Die Belastung des Kondensats ist vergleichsweise gering. Dies entspricht den Beobachtungen beim Waschwasser.

#### 6.4.4 Analyse der Asche

Am Ende des zweiten Versuchstages wurde die produzierte Asche durch Wägung quantifiziert. Eine repräsentative Probe der Asche wurde gezogen und analysiert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 6.29 zusammengestellt:

Tabelle 6.29: Analyseresultate der Ascheprobe der Rindevergasung

Menge	[kg]	22.0
Trockenrückstand	[Gew.-%]	99.9%
Glührückstand	[Gew.-%]	84.9%
Brennwert	[MJ/kg]	6.2
Kohlenstoff	[Gew.-%]	20.0%
Stichstoff	[Gew.-%]	< 2.0%
Schwefel	[Gew.-%]	0.50%
Chlor	[Gew.-%]	0.20%

Der Brennwert der Rindenasche ist der höchste der gemessenen Aschebrennwerte. Der vergleichsweise schlechte Ausbrand wird durch den hohen Kohlenstoffgehalt der Asche und den vergleichsweise niedrigen Glührückstand angezeigt. Die Asche der Rindevergasung ist im Vergleich mit den anderen Aschen sehr schlecht ausgebrannt.

## 7. Diskussion und Ausblick

Das Grundkonzept der Anlage, nach dem jede Komponente die, durch die nachfolgende Komponente geforderte Leistung erbringt und die dafür benötigte Leistung vom vorhergehenden Verfahrensschritt anfordert, hat sich bestens bewährt. Aus diesem Prinzip ergibt sich eine einfache Steuerung der Gesamtanlage.

Die Erfahrungen und Messergebnisse der Versuche zeigen, dass die ersten beiden Schritte der Gesamtanlage, nämlich die Materialzufuhr und der Vergaser selbst sehr zuverlässig arbeiten. Es wird ein Gas mit hohem Energieinhalt erzeugt. Die Teer- und Partikelmessungen des 150-Studentests ergaben, dass beide Konzentrationen mit fortschreitender Betriebsdauer abnehmen. Die erste Messung des Langzeitversuchs zeigt sehr ähnliche Partikelgehalte im Rohgas wie die Messungen bei Waldhackschnitzeln, Altholz und Rinde ( $450-600 \text{ mg/Nm}^3$ ). Auch bei den Teeren sind ähnliche Beobachtungen zu machen, wobei die Rindeversuche etwa halb so hohe Konzentrationen aufwiesen, wie die erste Messung des 150-Studentests und die ohne Motorbetrieb durchgeführte Messung beim Altholz noch einen wesentlich geringeren Teergehalt aufweist. Im Laufe des Dauertests nehmen sowohl die Teer- als auch die Partikelgehalte signifikant ab. Daher kann auch von einer mit fortschreitenden Betriebsdauer abnehmenden Konzentrationen bei den anderen Brennstoffen ausgegangen werden.

Die Messergebnisse im Reingas deuten darauf hin, dass die Wäsche nicht immer gleich gut funktionierte. Dies kann durch eine Verstopfung der Düsen in der Sprühkolonne erklärt werden. Die Abscheidung der Teerstoffe aus dem Rohgas vermag nicht zu befriedigen. Hingegen wird bei den Partikeln ein erheblich grösserer Abscheidegrad erreicht. Während der Altholzvergasung wurden bei den Schwermetallen Abscheidegrade von weit über 90 % erreicht. Dies ist erstaunlich, da der staubgebundene Anteil der Schwermetalle die Gasreinigung mit den Partikeln passiert und weder die leichtflüchtigen Phenole, noch die schwerflüchtigen Teere aus dem Rohgas in gleichem Masse abgeschieden werden wie die Schwermetalle in der Gasphase.

Es gilt nun aus diesen Erfahrungen Nutzen zu ziehen. Daher wurde die Lagerung des Drehrostes inzwischen überarbeitet. Das Waschwasser wird zur Abscheidung von Partikeln im Kreislauf filtriert. Dies verhindert die Verstopfung der Düsen und gewährleistet somit eine gleichbleibende Leistungsfähigkeit der Gaswäsche.

Die Rohgasaufbereitung ist dennoch der nächste Verfahrensabschnitt, der verbessert werden wird. Bei der Vergasung von Altholz muss eine nahezu vollständige Abtrennung der Schwermetalle gelingen, da diese den Katalysator schädigen, der bei modernen BHKWs eingesetzt wird. Die bisher eingesetzten Apparate können durch kommerziell erhältliche Apparate ergänzt werden. Die Gasreinigung wird um so einfacher, je weniger der Anlagebetrieb unterbrochen wird. Im industriellen Betrieb ist ohnehin der Dauerbetrieb angestrebt.

Der eingesetzte Verbrennungsmotor hat sich im Demonstrationsbetrieb bewährt. Da er aber weder über eine geregelte Gemischaufbereitung noch über einen, für dieses Gas optimierten Brennraum oder einen Abgaskatalysator verfügt ist er nicht mit einer zeitgemässen Maschine zu vergleichen. Bessere Maschinen sind schon längst auf dem Markt erhältlich.

Eine nach 1600 Betriebsstunden am Gasmotor durchgeführte endoskopische Untersuchung zeigte durchwegs gute Resultate, dies obwohl die Gasreinigung erst nach den im Rahmen des BEW-Projektes durchgeführten Tests verbessert werden konnte. Der Motorverträglichkeit des produzierten Holzgases ist also äusserst gut.

## 8. Literatur

- Bierter, W., Gaegauf, C. (1982) "Holzvergasung, umweltfreundliche und effiziente Energieholznutzung", Alternative Konzepte 39, Schriftenreihe der Georg Michael Pfaff Gedächtnisstiftung, Verlag C. Müller, Karlsruhe
- Bühler, R. (1994) "Stand der Technik von Holzvergaseren" in "Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz", Tagungsband zum 3. Holzenergie-Symposium, 21. Oktober 1994, ETH Zürich
- Chrysostome, G., Lemasle, J. M. (1986) "Fluidized Bed Oxygen Gasification of Wood" in "Advanced Gasification", Hrsg.: Bennackers, A. A. C. M, van Swaay, W., Solar Energy R&D in the European Community, Series E, Volume 8, Reidel Publishing Company, Dordrecht, NL
- Hamm, M. (1993) "Stoffliches Recycling von Shredderleichtgut durch Pyrolyse im Drehrohrofen", Diss. Universität - Gesamthochschule Essen
- Handbook of Chemistry and Physics, 73<sup>RD</sup> Edition 1992-1993, Special Student Edition, Herausg. D. R. Lide, CRC Press, Boca Raton, USA
- Hasler, P., Nussbaumer, T., Bühler, R. (1993) "Dioxinmissionen von Holzfeuerungen", Schriftenreihe Umwelt Nr. 208, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern
- Hasler, P., Nussbaumer, T. (1993) "Stofffluss bei der Verbrennung und Vergasung von Altholz" DIANE 8, Energie aus Altholz und Altpapier, EDMZ-Nr. 805. 172 d, Eidgenössische Drucksachen und Materialzentrale EDMZ, Bern
- Hofbauer, H. (1994) "Charakterisierung von biogenen Brennstoffen und Verwertung von Holzaschen" in "Neue Erkenntnisse zur thermischen Nutzung von Holz", Tagungsband zum 3. Holzenergie-Symposium, ENET, Bern
- Jüntgen, H., van Heek, K. (1981) "Kohlevergasung, Grundlagen und technische Anwendung" Verlag Karl Thieme, München
- Kurkela, E., Ståhlberg, P., Laatikainen-Lutama (1995) "Pressurized fluidized-bed gasification experiments with wood, peat and coal at VTT in 1991-1994", VTT Publications 249, Technical Research Center of Finland, 1-58
- Kurkela, E., Lappi, M., Pitkanen, P., Ståhlberg, P., Leppämäki, E. (1995) "Strategies for Sampling and Analysis of Contaminants from Biomass Gasifiers", IEA Bioenergy Agreement, Task VII Biomass Conversion, Activity 4 Thermal Gasification

Mehrling, P., Reimert, R. (1986) "Synthetic Fuel from Wood via Gasification in the Circulating Fluidized Bed" in "Advanced Gasification", Hrsg.: Bennackers, A. A. C. M., van Swaay, W., Solar Energy R&D in the European Community, Series E, Volume 8, Reidel Publishing Company, Dordrecht, NL

Nussbaumer, T. (1990 a) "Grundlagen der Holzvergasung" *HeizungKlima*, **7**

Nussbaumer, T. (1990 b) "Anlagentechnik der Holzvergasung und offene Fragen beim Einsatz von belastetem Altholz" *HeizungKlima*, **9**, 13-20

Nussbaumer, T., Bühler, R., Jenni, A. (1990) "Holzvergasungsanlagen in Europa im Bereich 2 bis 5 MWth", Forschungsprojekt Holzvergasung-Altholz Phase 1, Auftraggeber: Bundesamt für Energiewirtschaft, 3003 Bern

Reed, T. B. (1981) "Biomass Gasification, Principles and Technology", Reed, T. B. Herausgeber, Noyes Data Corporation, Park Ridge, N.J., USA

Salzmann, R., Kaufmann, H. P., Hasler, Ph. (1996) "Guideline for Sampling and Analysis of Tars, Condensates and Particulates from Biomass Gasifiers" ETH/Verenum guideline

Stassen, H. E. (1993) „UNDP/WP Small Scale Biomass Gasifier Monitoring Report“, World Bank, BTG Biomass Technology Group, September 1993

Stucki, S. (1994) "Methanol aus Abfall-Biomasse" *Neue Zürcher Zeitung*, **149**, 65 (9. Juni 1994)

Weissermel, K., Arpe, H.-J. "Industrielle organische Chemie", dritte überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 1-13, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim (BRD), 1988

## 9. Symbole und Abkürzungen

$\Delta H_{BW}$ :	Heizwert	[kJ/mol]
$n^*$ :	Molstrom	[mol/s]
$n^*_{Feuchte}$ :	Molstrom von Wasser, das in Form von Brennstofffeuchte vorliegt	[mol/s]
$n^*_{WD}$ :	Molstrom von Wasserdampf aus der Vergasungsreaktion	[mol/s]
$n^*_{BS,tr}$ :	Molstrom des Holzes mit der chemischen Zusammensetzung $CH_xO_y$ , (die stöchiometrischen Koeffizienten x und y werden später hergeleitet)	[mol/s]
$m^*_{BS,tr}$ :	gemessener Massenstrom des Holzes	[kg/s]
$M_{BS,tr}$ :	Molmasse von Holz (aus der Elementarzusammensetzung)	[kg/mol]
$w_{TS,BS}$ :	Trockenstoffanteil des Brennstoffes	[kg <sub>TS</sub> /kg <sub>tot</sub> .]
$w_C$ :	Kohlenstoffgehalt im Brennstoff	[kg <sub>C</sub> /kg <sub>tot</sub> .]

BS:	Brennstoff
C:	Kohlenstoff
CH <sub>4</sub> :	Methan
CO:	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub> :	Kohlendioxid
H <sub>2</sub> :	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O:	Wasser oder Wasserdampf
N <sub>2</sub> :	Stickstoff
O <sub>2</sub> :	Sauerstoff
tr:	trocken
f:	feucht



## 10. Anhang

### 10.1 Emissionsmessungen im Motorenabgas



Analytical Support FD 2.12

**Tabelle 3**  
**Auftrag 212.97.600 / Hydrotest AG / Emmenbrücke**  
**Emissionsmessungen Motorenabgas**

Datum	Zeit	O <sub>2</sub> [Vol. %]	CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]
28.04.97	11:06	1.50	1'923	2'135
28.04.97	11:11	1.01	2'144	2'218
28.04.97	11:16	1.26	1'940	2'249
28.04.97	11:21	1.16	1'985	2'209
28.04.97	11:26	1.66	1'975	2'222
28.04.97	11:31	1.26	2'020	2'227
28.04.97	11:36	1.49	4'514	2'204
28.04.97	11:41	0.40	4'970	2'222
28.04.97	11:46	1.13	2'004	2'213
28.04.97	11:51	1.89	1'871	2'133
28.04.97	11:56	2.21	1'884	2'155
28.04.97	12:01	2.49	1'889	2'253
28.04.97	12:06	2.53	1'885	2'303
28.04.97	12:11	1.86	1'876	2'356
28.04.97	12:16	1.66	1'995	2'325
28.04.97	12:21	1.20	2'290	2'316
28.04.97	12:26	1.26	2'223	2'298
28.04.97	12:31	1.30	1'926	2'276
28.04.97	12:36	1.74	1'886	2'244
28.04.97	12:41	2.15	1'870	2'243
28.04.97	12:46	3.08	2'038	2'098
28.04.97	12:51	3.29	2'001	2'162
28.04.97	12:56	2.65	1'964	2'270
28.04.97	13:01	2.29	1'947	2'272
28.04.97	13:06	1.48	2'012	2'303
28.04.97	13:11	1.80	1'914	2'281
28.04.97	13:16	2.30	1'873	2'211
28.04.97	13:21	2.20	1'842	2'202
28.04.97	13:26	2.16	1'870	2'191
28.04.97	13:31	2.46	1'888	2'151
28.04.97	13:36	2.89	1'945	2'122
28.04.97	13:41	2.38	1'866	2'228
28.04.97	13:46	1.96	1'855	2'196
28.04.97	13:51	2.64	1'938	2'145
28.04.97	13:56	3.10	1'988	2'109
28.04.97	14:01	2.43	2'971	2'146
28.04.97	14:06	1.74	1'963	2'142
28.04.97	14:11	1.95	2'395	2'138
28.04.97	14:16	3.78	4'414	1'310
28.04.97	14:21	12.58	6'739	983
28.04.97	14:26	11.46	7'626	1'246
28.04.97	14:31	4.03	1'864	2'103
28.04.97	14:36	2.30	1'929	2'225
28.04.97	14:41	1.93	1'883	2'146
28.04.97	14:46	2.36	1'896	2'159

**Tabelle 3**
**Auftrag 212.97.600 / Hydrotest AG / Emmenbrücke**
**Emissionsmessungen Motorenabgas**

Datum	Zeit	O <sub>2</sub> [Vol. %]	CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]
28.04.97	14:51	2.16	1'869	2'138
28.04.97	14:56	2.48	1'915	2'095
28.04.97	15:01	2.70	1'937	2'096
28.04.97	15:06	2.49	1'964	2'141
28.04.97	15:11	1.65	2'007	2'165
28.04.97	15:16	2.09	1'954	2'113
28.04.97	15:21	2.54	1'974	2'082
28.04.97	15:26	2.49	1'977	2'052
28.04.97	15:31	3.24	2'166	1'973
28.04.97	15:36	2.91	2'008	2'038
28.04.97	15:41	2.86	2'000	2'027
28.04.97	15:46	2.99	2'031	2'027
28.04.97	15:51	2.61	1'970	2'034
28.04.97	15:56	3.31	1'981	1'976
28.04.97	16:01	3.79	2'056	1'925
28.04.97	16:06	3.66	2'029	1'956
28.04.97	16:11	3.45	2'025	1'956
28.04.97	16:16	3.58	2'016	1'924
28.04.97	16:21	4.03	2'123	1'899
28.04.97	16:26	3.81	2'063	1'891
28.04.97	16:31	4.00	2'060	1'890
28.04.97	16:36	3.56	2'013	1'898
28.04.97	16:41	4.03	2'082	1'878
28.04.97	16:46	3.95	2'078	1'878
28.04.97	16:51	4.08	2'106	1'836

**Tabelle 3**  
**Auftrag 212.97.600 / Hydrotest AG / Emmenbrücke**  
**Emissionsmessungen Motorenabgas**

Datum	Zeit	O <sub>2</sub> [Vol. %]	CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]
29.04.97	10:02	7.76	2'457	1'471
29.04.97	10:07	7.60	2'736	1'423
29.04.97	10:12	7.06	2'467	1'496
29.04.97	10:17	6.95	4'759	1'283
29.04.97	10:22	6.86	2'536	1'478
29.04.97	10:27	6.25	2'443	1'451
29.04.97	10:32	6.86	2'819	1'398
29.04.97	10:37	6.99	3'136	1'375
29.04.97	10:42	6.94	2'754	1'424
29.04.97	10:47	6.65	2'718	1'418
29.04.97	10:52	6.88	2'674	1'405
29.04.97	10:57	7.18	3'282	1'337
29.04.97	11:02	7.46	3'905	1'306
29.04.97	11:07	7.24	3'208	1'336
29.04.97	11:12	7.63	4'665	1'261
29.04.97	11:17	7.10	2'823	1'382
29.04.97	11:22	7.10	3'022	1'351
29.04.97	11:27	7.34	3'368	1'320
29.04.97	11:32	6.30	2'478	1'574
29.04.97	11:37	4.38	1'855	1'643
29.04.97	11:42	5.55	2'305	1'516
29.04.97	11:47	6.50	3'029	1'438
29.04.97	11:52	6.38	2'400	1'520
29.04.97	11:57	6.28	2'374	1'524
29.04.97	12:02	6.41	2'739	1'486
29.04.97	12:07	6.30	2'439	1'513
29.04.97	12:12	6.63	2'845	1'445
29.04.97	12:17	6.43	2'386	1'518
29.04.97	12:22	6.65	2'663	1'445
29.04.97	12:27	6.89	2'979	1'393
29.04.97	12:32	6.94	2'816	1'434
29.04.97	12:37	6.75	2'674	1'438
29.04.97	12:42	6.70	2'726	1'412
29.04.97	12:47	6.66	2'775	1'379
29.04.97	12:52	6.43	2'494	1'421
29.04.97	12:57	6.41	2'555	1'389
29.04.97	13:02	6.70	2'772	1'342
29.04.97	13:07	6.80	2'705	1'352
29.04.97	13:12	6.20	2'330	1'424
29.04.97	13:17	6.18	2'356	1'408
29.04.97	13:22	6.43	2'455	1'388
29.04.97	13:27	6.59	2'503	1'397
29.04.97	13:32	6.34	2'412	1'422
29.04.97	13:37	6.75	2'888	1'464
29.04.97	13:42	3.84	1'824	1'728

**Tabelle 3**  
**Auftrag 212.97.600 / Hydrotest AG / Emmenbrücke**  
**Emissionsmessungen Motorenabgas**

Datum	Zeit	O <sub>2</sub> [Vol. %]	CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [mg/Nm <sup>3</sup> ]
29.04.97	13:47	4.56	1'923	1'615
29.04.97	13:52	4.90	2'011	1'606
29.04.97	13:57	4.89	1'935	1'620
29.04.97	14:02	5.59	2'303	1'534
29.04.97	14:07	5.91	2'317	1'528
29.04.97	14:12	6.85	3'899	1'348
29.04.97	14:17	6.44	2'485	1'517
29.04.97	14:22	6.39	2'545	1'488
29.04.97	14:27	5.78	2'176	1'646
29.04.97	14:32	4.84	2'109	1'614
29.04.97	14:37	5.51	2'059	1'623
29.04.97	14:42	5.08	2'035	1'665
29.04.97	14:47	5.14	2'369	1'570
29.04.97	14:52	6.73	3'122	1'461
29.04.97	14:57	6.53	2'594	1'471
29.04.97	15:02	6.61	2'597	1'459
29.04.97	15:07	6.46	2'423	1'515
29.04.97	15:12	6.96	3'277	1'383
29.04.97	15:17	7.23	3'229	1'365
29.04.97	15:22	7.19	3'046	1'399
29.04.97	15:27	6.75	2'808	1'414
29.04.97	15:32	7.16	3'236	1'385
29.04.97	15:37	7.30	3'321	1'372
29.04.97	15:42	7.24	3'564	1'347
29.04.97	15:47	7.08	2'838	1'417
29.04.97	15:52	6.75	2'941	1'413
29.04.97	15:57	7.36	3'775	1'353

## 10.2 Beteiligte Firmen

Auftraggeberschaft:	Bundesamt für Energiewirtschaft Sektion Energietechnik CH-3003 Bern Herr U. Schärer Herr M. Hinderling	
Projektbegleitung:	Herr R. Bühler Dörfli 5 CH-8933 Maschwanden	
Projektdurchführung:	Hydrotest Ingenieurunternehmung AG Reusseggstrasse 17 CH-6020 Emmenbrücke Projektleitung: Durchführung und Bericht: Anlagebetreuung:	Herr W. Etschmann Herr Dr. B. Meyer Herr H. Gürber
Analytik:	Lobbe Sibag AG Reusseggstrasse 17 CH-6020 Emmenbrücke  Novartis Services AG Scientific Services CH-4133 Pratteln 1  Verenum Langmauerstrasse 109 CH-8006 Zürich	Frau Dr. I. Lüpke    Herr Dr. Brandt   Herr Dr. P. Hasler