

Niederdruckvergasung von Restholz

Diplomarbeit V 10/2000

an der

FACHHOCHSCHULE ERFURT

Fachbereich Versorgungstechnik

vorgelegt von

SANDRA BÖHME

geb. am 02.12.1977

4. Studienjahr

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. J. Mischner

Prof. Dr.-Ing. W. Wienrich

Aufgabenstellung

AUFGABENSTELLUNG DER DIPLOMARBEIT

cand.-ing.: Sandra Böhme

Matrikel: 6105 0809

Thema: Niederdruckvergasung von Restholz

Erläuterungen zum Thema:

Im Rahmen der Diplomarbeit sind die Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Holz systematisch zu untersuchen. Basis hierfür sollte eine gründliche Literaturrecherche zu diesem Thema sein. Hier sind technologische Verfahren ebenso von Interesse, wie Fragen der Verwertung der Verfahrensprodukte sowie wirtschaftliche Erfahrungen.

Die Verfahren zur Holzvergasung sind ausführlich darzustellen, verfahrenstechnische Lösungen sollen angegeben und hinsichtlich ihrer Eignung zur Vergasung von Rest- und Schnittholz bewertet werden. Fragen der Luftreinhaltung sind jeweils zu betrachten.

Im Rahmen der Diplomarbeit sind in einem experimentellen Teil die Hauptcharakteristika eines vorhandenen Holzvergasers zu ermitteln. Hierzu gehören die Gasqualität (Brenngascharakteristik) sowie das Betriebsverhalten des Vergasers. Notwendige Tests sind zu konzipieren, durchzuführen und nachvollziehbar auszuwerten.

1. Gutachter Prof. Dr.-Ing. J. Mischner 2. Gutachter Prof. Dr.-Ing. W. Wienrich

Ausgehändigt am : 28.08.2000 Einzureichen am : 28.11.2000

Reg.-Nr.: V 10/2000



Dekan

RA

Vorwort

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist es, mit Hilfe bisheriger Erkenntnisse einen Überblick über die Verwendung der regenerativen Energie „Biomasse“, im speziellen Holz zu geben. Im ersten Teil der Arbeit werden zunächst Funktionsweise von Holzvergasern beschrieben und umfassende Informationen über Herstellung und Einsatz der Vergasungsprodukte gegeben. Im zweiten Teil wird ein Festbett-Gleichstrom-Vergaser der Marke „Imbert“ auf sein Betriebsverhalten und seine Kennwerte geprüft, die im theoretischen Teil dargestellt wurden. Dabei werden Tabellen und Abbildungen auf einer CD geliefert, die im Text blau gekennzeichnet sind.

In dieser Arbeit möchte ich einen Teil meiner Ideologie zum Thema: „Wir sind nur ein Teil eines ganzen Systems und sollten versuchen dieses im Gleichgewicht zu halten“ zum Ausdruck bringen. Sie hat mich angeregt, meine berufliche Tätigkeit und somit partiell meinen Lebensinhalt auf die Umwelt auszurichten. Außerdem hilft sie beim Publizieren alternativer Energien, allein durch verblüffend entstandene Diskussionen und Menschen, die ich dadurch kennenlernen durfte.

In dem Sinne möchte ich allen danken, die mich fachlich und moralisch bei der Bearbeitung meiner Diplomarbeit unterstützten. Insbesondere gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Mischner von der Fachhochschule Erfurt und Herrn Dr. Schilling von der Firma DJS-Anlagen- und Oberflächentechnik.

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	2
Vorwort	4
1 Kurzfassung	7
1.1 Deutsch	7
1.2 Spanisch	8
2 Einleitung	9
3 Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Holz/Biomasse	12
3.1 Jährliches Aufkommen von Holz/Biomasse in Deutschland	12
3.2 Zusammensetzung von Holz/Biomasse	12
3.3 Energiegehalt von Holz/Biomasse in Abhängigkeit der Materialfeuchte	14
3.4 Thermochemische und biochemische Umwandlungsverfahren	16
4 Grundlagen der Holzvergasung	18
4.1 Das Prinzip der Vergasung	18
4.2 Anforderungen an den Brennstoff Holz/Biomasse	22
4.3 Vergasungsmittel	22
4.4 Wirkungsgrad einer Vergasung	23
4.5 Vergasungssysteme	25
4.5.1 Festbettvergasung	25
4.5.2 Wirbelschichtvergasung	27
4.5.3 Flugstromvergasung	29
4.5.4 Weitere Vergasungssysteme	29
4.6 Rauchgasreinigung	29
4.6.1 Anforderungen an die Vergasungsprodukte/TA-Luft	29
4.6.2 Abhängigkeit der Vergasungsprodukte	31
4.6.3 Vergleich der Schadstoffemissionen von Holz und Erdgas/-öl	32
4.6.4 Reinigung für den Einsatz in Motoren	32
4.7 Verwertung der gasförmigen Produkte	36
4.7.1 Motoren für das Produktgas	36
4.7.2 Turbinen für das Produktgas	37

4.7.3	Der Stirlingmotor	38
4.7.4	Korrosionen	39
4.8	Pyrolyse	40
4.9	Technische Beurteilung von Vergasungsanlagen	41
4.10	Internationale Bestrebungen	42
5	Experimentelle Untersuchungen zur Holzvergasung	43
5.1	Technische Beschreibung der Versuchsanlage	43
5.2	Durchführung der Versuche	44
5.2.1	Auswahl des Bestückungsmaterials	44
5.2.2	Produktgasmessung	45
5.2.3	Betriebsverhalten und Volumenstrombestimmung	45
5.2.4	Betriebsverhalten mit Brenntest/mit Benzinmotor	46
6	Auswertung der experimentellen Untersuchungen	47
6.1	Berechnungsverfahren zur Beurteilung eines Holzvergasers	47
6.2	Bewertung der Meßergebnisse	48
6.2.1	Bestimmung des Bestückungsmaterials	48
6.2.2	Produktgasbestimmung	50
6.2.3	Volumenstrom- und Leistungsbestimmung des Vergasers	51
6.2.4	Betriebsverhalten im Motorbetrieb, Rußabdruck	53
6.3	Energie- und Massenbilanz des Imbert-Vergasers	55
6.4	Schlußfolgerungen zu den Untersuchungen	56
7	Anhang	57
7.1	Verzeichnis der Formelzeichen, Symbole, Indizes, Abkürzungen	57
7.2	Erläuterungen	58
7.3	Selbständigkeitserklärung	60
7.4	Quellenverzeichnis	61

1 Kurzfassung

1.1 Deutsch

Niederdruckvergasung von organischen Materialien lautet das Thema meiner Diplomarbeit. Es sind in der folgenden Diplomarbeit Verfahren dargestellt, wie man Biomasse, speziell Holz, aber auch Brennstoffe wie Halm- und Hartschalengüter effektiv wiederverwerten bzw. nutzen kann. Dazu werden die Anforderungen an den Brennstoff im Zusammenhang mit der Art der Vergasung beschrieben. Weiterhin werden die Vergasungsprodukte bezeichnet und eine Übersicht über ihre möglichen Verwendungszwecke gegeben.

Über die chemische Zusammensetzung des Holzes wird ein anlagenspezifischer Wirkungsgrad bestimmt. Darauf Bezug nehmend wird ein vor 40 Jahren produzierter Festbett-Gleichstrom-Holzvergaser auf die Tauglichkeit nach heutigem Stand der Technik getestet. Beinhaltet sind Experimente an der Versuchsanlage, Laboranalysen über den Brennstoff und die gasförmigen Produkte, sowie Berechnungen der Anlagenkennwerte. Anschließend wurden Schlußfolgerungen gezogen über den Einsatz dieses Vergasers gekoppelt mit einem Generator zur Stromerzeugung auf kohlendioxid-neutraler Basis. Damit konnten auch Angaben über die Leistung der Anlage gemacht werden, die primär dazu dienen, Örtlichkeit und Verwendungszweck nach Bedarf zu bestimmen.

1.2 Spanisch

Gasificación de presión baja de materiales orgánicos está el tema de mi diploma. En la redacción siguiente se presentan métodos como utilizar o reemplazar materiales orgánicos, especial lena pero también combustibles como sustancias de tallo y cáscaras. Para eso están escritas las exigencias del combustible en relación con la manera de la gasificación. Además están designadas los productos de la y una mirada sobre las posibilidades del uso.

Sobre la composición química de la lena se fija un rendimiento específico para la instalación. Refiriéndose para la teoría había probado un carburador del sistema de la corriente continua en una cama permanente producida 40 años antes a la aptitud según la norma de la técnica. Se incluye ensayos con la instalación, análisis sobre el combustible y los productos gaseosos así como cálculos de valores de la instalación. Se dedujo entonces las cargas de este carburador acoplado con un generador por la corriente a la base neutral de ácido carbónico. Ahora se pueden hacer declaraciones sobre la potencia de la instalación. “Primeramente fijándose un lugar útil y el fin del uso según fuera preciso”.

2 Einleitung

In den ersten 20 Jahren des dritten Jahrtausends wird die Weltbevölkerung auf etwa 100 Milliarden Einwohner ansteigen. Angesichts deren ständig zunehmenden Lebensqualität und der daraus folgenden Industrialisierung steigt auch der Primärenergieverbrauch kontinuierlich.

Dies hat zur Folge, daß die Weltvorräte an Kohle, Erdgas und Erdöl vermutlich im nächsten Jahrhundert zur Neige gehen. Zudem sind die wohlmerklich klimaverändernden Wirkungen (Treibhauseffekt) ein „Hilferuf“ dafür, nicht alle fossilen Energieträger zu verbrauchen. Das bedeutet, geringere Kohlendioxidemissionen zu verursachen, sowohl durch technische Verbesserungen als auch durch Änderungen des Lebensstils und des allgemeinen Bewußtseins, um die natürlichen Voraussetzungen für Flora und Fauna zu erhalten.

Man wird zukünftig die alternativen und erneuerbaren Energien effektiver nutzen müssen. Hierfür bietet sich innerhalb der regenerativen Möglichkeiten die Nutzung nachwachsender Rohstoffe wie naturbelassenes und belastetes Holz, Stroh, Energiepflanzen, Hanf, Topinambor, Nuß- und Kakaoschalen und weiterer Biomasse besonders an. Denn diese Rohstoffe sind gespeicherte Sonnenenergie [01/S.2]. Daher sind sie CO₂-neutral. Sie binden atmosphärisches Kohlendioxid, welches bei Verbrennung oder Vergasung bzw. beim biologischen Abbau wieder abgegeben wird und es entstehen kurze, geschlossene Stoffkreisläufe (Kohlendioxidkreislauf) [02].

Des weiteren ist Biomasse, speziell Holz eine heimische Energiequelle, die ausreichend zur Verfügung steht. Vom jährlichen Zuwachs in heimischen Wäldern werden nur etwa zwei Drittel genutzt.

Allein in Deutschland wird das verfügbare Biomassenpotential zur Energiesubstitution auf insgesamt ca.775 PJ/a (26 Mio.SKE) beziffert. Damit stellt sie ein wesentliches Potential an regenerativen Energien dar, womit mindestens 10 % des Gesamtenergiebedarfs Deutschlands gedeckt werden können. Des weiteren würden die CO₂-Emissionen um 60 Millionen Tonnen im Jahr verringert, das entspricht bei einer Gesamt-CO₂-Emission in Deutschland von 857,2 Millionen Tonnen pro Jahr genau 7 %.

Zur Strom- und Wärmeerzeugung aus Biomasse bietet sich somit die Holzvergasung an [03/S.12]. Die Vorteile der Biomassevergasung sind :

- Erzeugnisvielfalt (Kraft, Wärme und Brennstoff, sowie Synthesegas und Kohlenstoff hohen Reinheitsgrades als Rohstoff für weitere Produkte)
- Möglichkeit der Herstellung von Kraft- und Treibstoffen, sowie anderer chemischer Endprodukte
- Höherer energetischer Umsatz bezogen auf den Energieinhalt des Vergasungsstoffes als die Verbrennung, damit mindestens doppelt so hoher elektrischer Wirkungsgrad als bei Dampfprozessen und dem erreichbaren Wirkungsgrad einer Kraft-Wärme-Kopplung
- Eignung des Brenngases für unterschiedliche Antriebsmaschinen (Schwachgasmotoren, -turbinen, Wärmemotoren, Stirlingmotoren, Brennstoffzelle)
- Einsatz unterschiedlicher biogener Vergasungsstoffe wie Holz und andere Biomasse, Klärschlamm, Müllfraktionen, singular oder als Mischmengen
- Multivalente Verwendung als Energie-, Stoffherzeugungsanlage und Anlage zur Verwertung von Reststoffen
- Leichtere Beherrschung des Emissionsverhaltens
- Eignung für zentralen Einsatz in Groß- oder verteilter Einsatz in kleinen, auch mobilen Anlagen
- Holzgas ist speicherbar und transportabel [04/S16]

Dazu muß die Holzgasanlage/Biogasanlage ($P_{el} < 2 \text{ MW}$) nach heutigem Stand der Technik folgende Bedingungen ohne Einschränkung und nachweislich erfüllen [04/S.8, 05]:

- Wirtschaftlicher Betrieb
- Mindestens 4000 Vollaststunden (Betriebszeit) im vollautomatischen Betrieb und automatischer Beschickung
- Einhaltung aller gesetzlicher Bestimmungen (TA-Luft, dazu zählt teerfreies Gas ohne Kondensat und wenigen Reststoffen) und
- Der Hersteller übernimmt die im Anlagengeschäft übliche Haftungsgarantie

Das Hauptproblem ist die Inkompatibilität der Vergasungsqualität und die angeforderte Menge an Gas , die für Motoren- und Turbinen erforderlich sind.

Das scheint umso erstaunlicher, als doch in Deutschland zu Ende des zweiten Weltkrieges und in der unmittelbaren Nachkriegszeit 40.000 stationäre und mobile Holzvergaser in Betrieb waren.

Allerdings wurde zur damaligen Zeit nicht auf umweltbeeinflussende Faktoren geachtet und Energie war rar, so daß ein Vergaser eine effektive und kostengünstige Möglichkeit darstellte, sich diese zu eigen zu machen.

Da die Wertmaßstäbe einer Mangel- und Notgesellschaft nicht vergleichbar mit denjenigen einer sozialen Hochtechnologiegesellschaft mit entwickelter ökologischer Erkenntnis sind, müssen heute die Prioritäten bewußter gesetzt und nach dieser Erkenntnis gehandelt werden, um somit die negativen Konsequenzen unserer Taten für unsere Nachwelt zu verringern.

3 Chemie und Energiegehalt von Holz/Biomasse

3.1 Jährlicher Anfall an Holz/Biomasse in Deutschland

Allein in Deutschland wachsen jährlich ca. 30 Millionen Tonnen nutzbaren Holzes nach, wovon 20 Mio.t verwertet werden. Somit verbleiben 10 Mio.t ungenutztes Waldholz. Aus Be- und Verarbeitung der Holzindustrie fallen 10-12 Mio.t Sägewerksnebenprodukte und Holzabfälle an. Hinzu kommen geschätzte 8 Mio.t Gebrauchthölzer. Davon werden 7 Mio.t in der Span- und Faserplattenindustrie verwertet und ein geringer Teil in Kultursubstrate umgesetzt [03]. Weitere Teile werden zur Gewinnung von Heiz- und Prozessenergie in der Holz- und Möbelindustrie genutzt. Der Rest wird über Deponie- oder Müllverbrennungsanlagen entsorgt, was wieder zu zusätzlichen Emissionen führen kann.

3.2 Zusammensetzung von Holz/Biomasse

Naturbelassenes Holz besteht aus einem heterogenen und kolloiden System, welches aus einer Vielzahl von Zellen mit unterschiedlichen physikalischen und mechanischen Aufgaben zusammensetzt. Diese Bestandteile können über verschiedene chemische Strukturen verfügen und sind durch chemische Verbindungen miteinander gekoppelt. Chemische Änderungen, z.B. Zerstörung der Bindungen, Kondensations- oder Polymerisationsvorgänge, Abspaltungen funktioneller Gruppen, führen zu neuen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Holz-, generell der Biomasseninhaltsstoffe.

Die wichtigsten Hauptbestandteile von naturbelassenem Holz sind :

- 1 Cellulose mit etwa 47 %, als Gerüstbaustanz fungierend
 - Cellulose besteht aus großen Molekülen mit hohem Molekulargewicht, die ein monoklines Kristallgitter bilden, was durch Hauptvalenzkräfte und Wasserstoffverbindungen stabilisiert wird.
 - Cellulose gehört zur Gruppe der Polysaccharide (Kohlehydrate, verknüpft durch Monosaccharide (einfache Zucker))
- 2 Polyosen (Hemicellulosen) mit etwa 25 %, als Grund- und Gerüstbaustanz
 - ebenfalls Polysaccharide mit einem schwächeren Polymerisationsgrad (Molekulargewichtsdifferenz in einem Produkt gleicher Zusammensetzung)
- 3 Lignin mit etwa 24 %, als Versteifungssubstanz wirkend

- Lignin ist amorph, thermoplastisch, biochemisch schwer abbaubar und zeichnet sich durch hohe Lichtabsorption aus
 - Lignin ist ein dreidimensional vernetztes aromatisches Molekül, das in unterschiedlichsten substituierten Phenylpropan-Struktureinheiten im Holz vorkommt
- 4 Organische und anorganische Nebenbestandteile mit etwa 4 %, wie Harze, ätherische Öle oder Mineralstoffe
- Anorganische Verbindungen bestimmen den Aschegehalt von Hölzern
 - Eine Vielzahl organischer Verbindungen werden noch nachgewiesen
 - Beim Vergasen/-brennen von Holz sind die aschebildenden anorganischen, stickstoffhaltigen organischen Verbindungen und organische Begleitstoffe von Bedeutung für Siedepunkte, thermische Stabilität, Abbrandversorgung und Abbrandverlauf

Diese makromolekularen Hauptbestandteile des Holzes sind vorwiegend aus den Elementen Wasserstoff H_2 zu 6 Massen-%, Kohlenstoff C zu 50 Massen-% und Sauerstoff O_2 zu 44 Massen-% aufgebaut. Dabei unterscheiden sich die Holzarten in ihrer Zusammensetzung nur geringfügig. Vereinfacht ergibt sich die elementare Zusammensetzung wie folgt [06/S.20]:

$$Holz \approx CH_{1.4}O_{0.7}$$

$$Biomasse \approx C_xH_yO_z$$

Auch enthält Holz geringe Anteile an Stickstoff N_2 und Schwefel S. Der Schwefelgehalt kann vernachlässigt werden, da er größtenteils in die entstehende Asche eingebunden wird. Die Stickoxide, die durch Oxidation des Holzstickstoffs gebildet werden können, liegen in vernachlässigbarer Größenordnung, bzw. bei optimaler (vollständiger) Vergasung werden keine Stickoxide entstehen.

In Abschnitt 6.1 liegt eine Auswahl an biogenen Brennstoffen und deren chemischen Zusammensetzungen vor.

3.3 Energiegehalt von Holz/Biomasse in Abhängigkeit der Materialfeuchte

All die Bestandteile (Abschnitt 6.1) des naturbelassenen Holzes haben unterschiedliche Heizwerte, deshalb sollte der Heizwert von trockenem Holz experimentell genauer bestimmt werden (s. Meßprotokoll 6.3.1).

Er läßt sich auch aus der Elementarzusammensetzung näherungsweise wie folgt abschätzen (Näherungsformel nach BOIE) [26/S.227, 35]:

$$H_{u,Gas} = 34,8 \cdot C + 93,9 \cdot H + 10,5 \cdot S + 6,3 \cdot N + 10,8 \cdot O \quad (3.3-00)$$

$$H_{u,Gas} = V_i \cdot H_{u,i} \quad (\text{für Produktgas}) \quad (3.3-00)$$

$$H_{u,Gas} \left(\frac{kJ}{m^3} \right) \quad \text{Heizwert des Schwachgases}$$

$$V_i (-) \quad \text{Volumenanteil der Komponente i im Gas}$$

$$H_{u,i} \left(\frac{kJ}{m^3} \right) \quad \text{Heizwert der Komponente i}$$

Unberücksichtigt ist bei dieser Rechnung der Gehalt an mineralischen Stoffen und Wasser. Dabei hat der Wassergehalt einen erheblich höheren Einfluß auf den Heizwert als die Art des biogenen Brennstoffes.

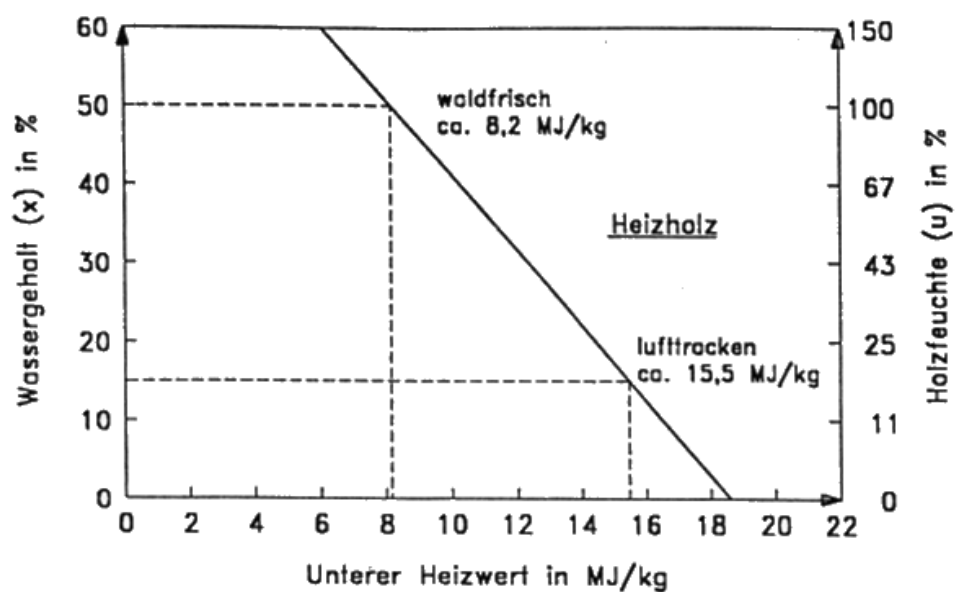


Abbildung 3.3-01: Heizwert in Abhängigkeit von Wassergehalt und Holzfeuchte [05/S.13]

Der Wassergehalt w (Relative Feuchte) wird wie folgt definiert:

$$\text{Wassergehalt} = w(\%) = \frac{m_w(\text{kg}) \cdot 100}{m_{f,\text{Holz}}(\text{kg})} \quad (3.3-03)$$

Weiterhin kann die Holzfeuchte u (atro Feuchte) bestimmt werden, die die Gaszusammensetzung maßgeblich beeinflusst. Bei hohen Temperaturen dissoziiert der Wasserdampf zu H- und OH-Radikalen, die zur Verringerung ungecrackter Verbindungen beitragen. Ebenfalls unterstützt er die Temperatursteuerung und verbessert den Vergaserwirkungsgrad [32/S.76]. Im Diagramm 3.3-01 ist der direkte Zusammenhang zum Heizwert dargestellt.

$$\text{Holzfeuchte} = u(\%) = \frac{m_w(\text{kg}) \cdot 100}{m_{tr,\text{Holz}}(\text{kg})} \quad (3.3-04)$$

$m_w(\text{kg})$ Gewicht des Wassers

$m_{f,\text{Holz}}(\text{kg})$ Gewicht des feuchten Holzes

$m_{tr,\text{Holz}}(\text{kg})$ Gewicht des trockenen Holzes

Der Energiegehalt einiger biogener Brennstoffe wird in den folgenden Tabellen aufgeführt. In der Praxis gilt als Faustregel, daß rund 2.5 kg lufttrockenes Holz ca. einem Liter Heizöl entsprechen.

Heizwerte der wichtigsten Holzbestandteile

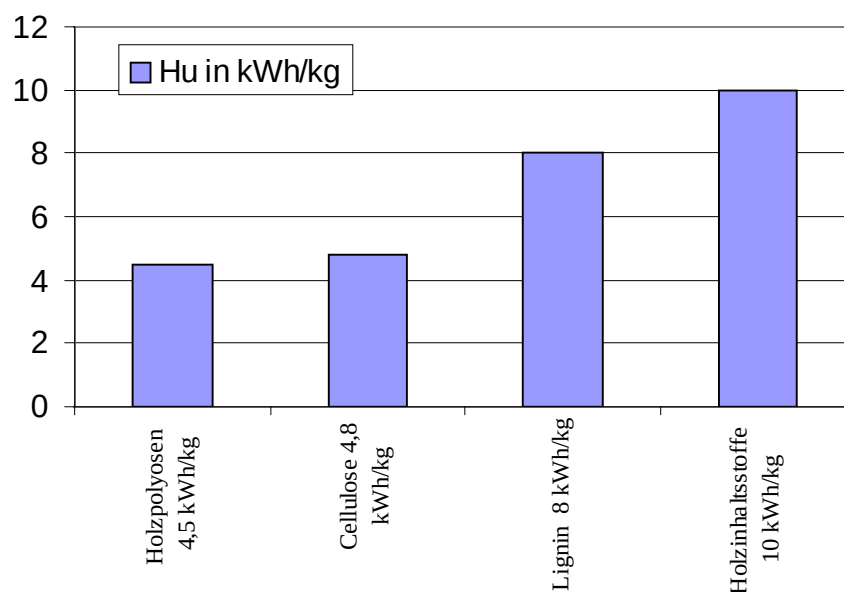


Abbildung 3.3-02: Heizwerte der Holz-bausteine [06/S.28]

Die Tabelle 3.3-01 zeigt einige Heizwerte bestimmter Biomasse. Weitere Angaben sind unter 6.1 zu finden.

Biomasse	Heizwert in kWh/kg bezogen auf wasserfreie Substanz
Waldhackschnitzel aus Laubholz	5,17
Waldhackschnitzel aus Nadelholz	5,17
Produktionsreste der holzverarbeitenden Industrie	-
Straßenbegleitgrün, Baum-, Heckenschnitt	4,67
Energiewald aus Pappeln, Weiden	5,11
Abbruchholz	-
Miscanthus	4,86
Stroh	4,86
Nußschalen	-
Fossile Brennstoffe	Heizwert in kWh/kg bezogen auf wasserfreie Substanz
Heizöl EL	11,86
Erdgas	13,94

Tabelle 3.3-01: Der Heizwert H_u [07/S.114; 08/S.10]

3.4 Thermochemische und biochemische Umwandlungsverfahren

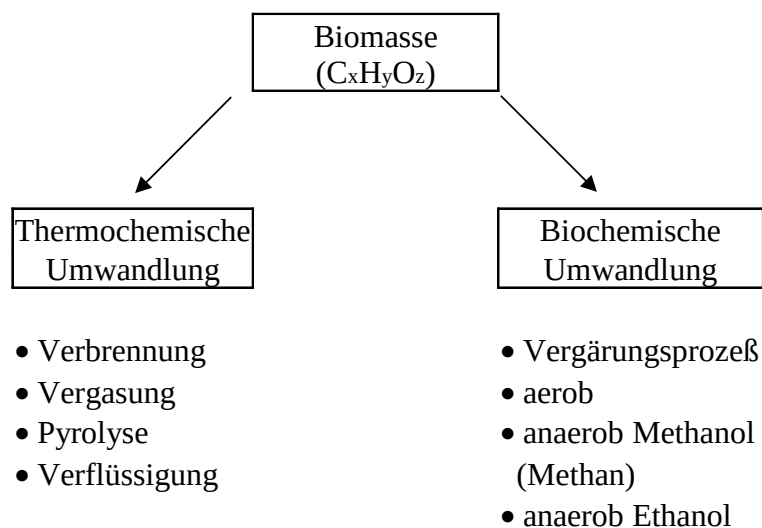


Abbildung 3.4-01: Umwandlungsverfahren zur energetischen Nutzung von Biomasse [06/S.3]

In dieser Diplomarbeit wird die Thermische Verwertung der „Vergasung“ näher behandelt. Dazu eine Darstellung der Hauptprodukte aus den Verfahren in der Tabelle 3.4-01.

Verfahren	Luftüberschuß λ	Hauptprodukt
Verbrennung	> 1	Heißes Abgas
Autotherme Vergasung	$0,2 - 0,5$	Schwachgas
Allotherme Vergasung	$< 0,2$ (Zugabe H_2O , Q)	Mittelgas
Thermolyse, Pyrolyse, Flashpyrolyse	$< 0,2$	Holzkohle, Teer, andere organische Stoffe Koks (5 – 10 %), Pyrolyseöl (60 – 70 %), Pyrolysegas (20 – 30 %)
Verflüssigung	0 (Zugabe H_2)	Organisches Öl/Gas

Tabelle 3.4-01: Thermische Verwertungsverfahren für Holz/Holzabfälle [11/Tab.1]

4 Grundlagen der Holzvergasung

4.1 Das Prinzip der Vergasung

Bei der Vergasung wird dem Brennstoff eine mindere Menge an Oxidationsmittel (meistens Luft, seltener Wasserdampf oder Sauerstoff) zugeführt. Dabei verbrennt ein Anteil des Holzes. Die damit erzeugte Wärme wird für die thermische Zersetzung der restlichen Holzmenge verwandt.

Das bei der Vergasung erzeugte Produktgas, wegen des niedrigen Heizwertes als Schwachgas bezeichnet, liefert im wesentlichen ein Gasgemisch aus Wasserstoff H_2 , Kohlenmonoxid CO , Kohlendioxid CO_2 , Wasserdampf H_2O , Methan CH_4 und Luftstickstoff N_2 . Als Folge unvollständiger Vergasung enthält dieses Produktgas zusätzlich geringe Mengen unerwünschter Teerverbindungen (höhersiedende Kohlenwasserstoffe) sowie Phenole und Kohlenstoff.

Bei der Vergasung wird eine möglichst hohe Ausbeute an heizwertreichen Produktgasen erstrebt. Dies wird bei entsprechend hoher Vergasungstemperatur erreicht. Zur Erzeugung dieser hohen Vergasungstemperaturen muß aber zuviel Holz verbrannt werden, was nicht erwünscht ist [06].

Der Vergasungsprozeß

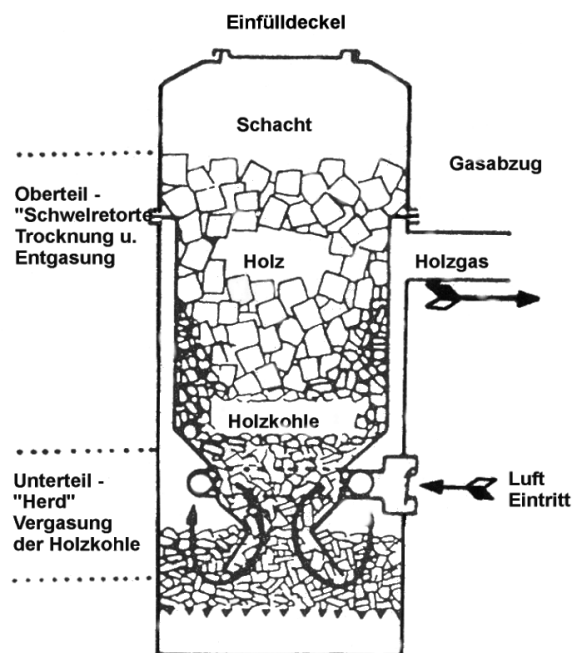


Abbildung 4.1-01: Querschnitt durch Kessel eines Holzgaserzeugers, in der „Schmelretorte“ steigt Temperatur von oben nach unten von 100 auf 250°C, im „Herd“ vergast die Holzkohle bei 1100 bis 1400°C, die Holzkohle bildet sich aus darüberliegendem Holz, Gasaustrittstemperatur am Generator ca.450°C, wird bis zum Motoreintritt auf 40 bis 50°C heruntergekühlt [10]

Die Vergasung beruht auf einer unvollständigen Verbrennung, da sie unter Luftunterschuß abläuft. Gegenüber steht die vollständige Verbrennung, welche mit einem Luftüberschuß arbeitet. Der feste Brennstoff Holz wird in gasförmigen Kraftstoff Holzgas umgewandelt. Dazu sind folgende drei chemische Reaktionen und eine Trocknung erforderlich:

- Brennstofftrocknung

Holz hat in der Regel einen Anteil zwischen 10 und 30 Gewichts-% Wasser, wenn es dem Vergasungsreaktor zugeführt wird. Bei Temperaturen bis 200°C verdampfen Wasser und chemisch nicht gebundene, flüchtige Bestandteile. Nach Art der Prozeßführung kann Wasserdampf dem Prozeß entzogen oder als Kondensat aufgefangen werden (Problem der Kondensatableitung), oder es vermischt sich mit den flüchtigen Pyrolyseprodukten. Der Brennstoff wird in der Trocknungsphase nicht zersetzt [10/S.26].

- Pyrolyse

Sie ist die thermische Zersetzung von Holz in verschiedene Bausteine.

200 – 300°C Zersetzung der Hemicellulose

325 – 375°C Aufspaltung der Cellulose, als Produkte sind Kohlendioxid, Methanol, leichtflüchtige Teere und organische Säuren

> 375°C aus Lignin entstehen schwerflüchtige Teere (Pyrolyse-Öle) und höhere gasförmige Kohlenwasserstoffe

> 700°C Bildung von Holzkohle (Kohlenstoff, Pyrolysekoks)

bis 1400°C Maximal erreichbare Temperatur

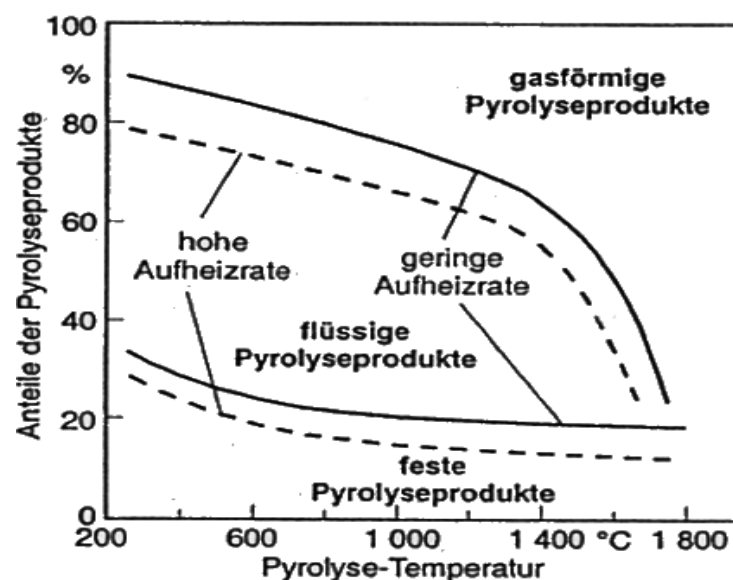
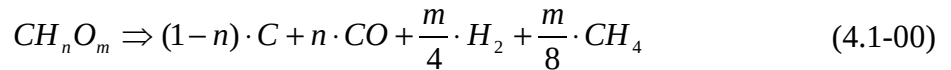
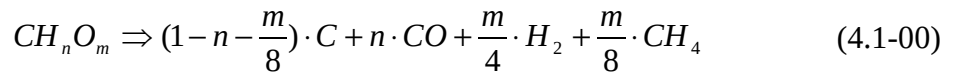


Abbildung 4.1-02: Phasen der thermochemischen Umwandlung am Beispiel Holz [26/S.242]

Chemisch ausgedrückt unter Vernachlässigung des Stickstoffs ergeben sich:



n Anteil des Wasserstoffs

m Anteil des Sauerstoffs

Neben der Zusammensetzung des Vergasungsstoffes hat die Geschwindigkeit [s.Abs.4.2.3] großen Einfluß auf den Pyrolyseprozeß.

Eine langsame Erwärmung ermöglicht eine Trocknung des Holzes und die Abspaltung von Wasser und Kohlendioxid, der Kohlenstoffgehalt erhöht sich. Schwere Kohlenwasserstoffe können bei den nun ansteigenden Temperaturen zersetzt werden. Die langsame Pyrolyse ist $> 280^\circ\text{C}$ exotherm, damit läuft die Entgasung ohne Aufnahme von Wärme selbständig weiter.

Eine schnelle Erwärmung (Flash-Pyrolyse) gibt der Feuchtigkeit keine Verdampfungszeit, die Wassermoleküle reagieren mit dem organischen Material. Die schnelle Pyrolyse verhält sich endotherm, es muß ihr also Wärme zugeführt werden. Diese Energie wird durch Oxidation frei.

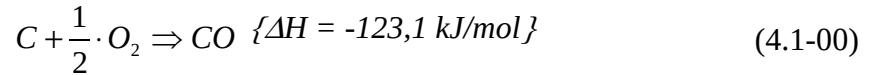
- Oxidation

Die Oxidationszone bildet sich im Bereich der Primärluftdüsen (Sauerstoffzufuhr) des Vergasungsreaktors. Die Reaktionsenthalpie, freiwerdende Energie $\Delta H = 648 \text{ MJ/kmol}$ wird benötigt, um:

- das Kohlenstoffbett auf erforderlichem Temperaturniveau (möglichst 1400°C) zu halten,
- den Wärmebedarf der endothermen Reaktionen zu decken,
- die Aufspaltung der Kohlenwasserstoffe aus der Pyrolysezone in kleinere gasförmige Moleküle (CO , H_2 , H_2O , CO_2 und CH_4) zu ermöglichen und
- einen wesentlichen Teil der Wärmeenergie für die Brenngasproduktion in der Reduktionsstufe zu nutzen.

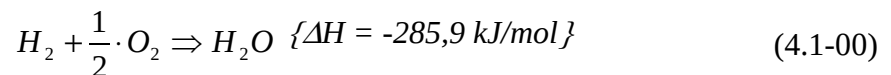
Folgende chemische Reaktionen laufen ab

- Holzkohle wird aus der Pyrolyse vollständig verbrannt (exothermer Vorgang)



$\Delta H \{ \text{kJ/mol} \}$ freiwerdende Energie, Reaktionsenthalpie

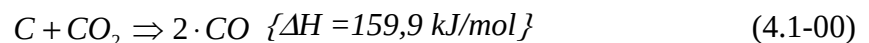
- Wasserstoffverbrennung (Knallgasreaktion) findet ebenfalls in der Oxidationszone statt, ist aber unerwünscht, da sie zu einer Heizwertminderung des Schwachgases führt.



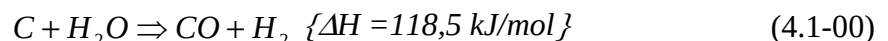
- Reduktion

In der Reduktionszone entsteht das eigentliche Produktgas. Dabei verlaufen vier parallele Reaktionen

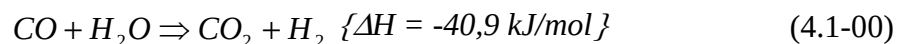
- Boudouardreaktion (endotherm)



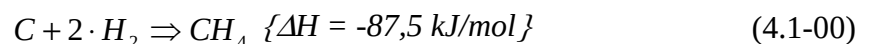
- Heterogene Wassergasreaktion (endotherm)



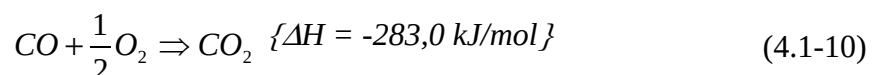
- Homogene Wassergasgleichgewichtsreaktion



- Methanreaktion



Durch Luftzufuhr erfolgt eine weitere unerwünschte exotherme Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid, die den Heizwert vermindert.



4.2 Anforderungen an den Brennstoff

Holz kann als Scheitholz, Hackschnitzel, Briketts, Pellets, Späne oder Sägemehl vorliegen. Das oberflächenbezogene spezifische Volumen V_A wird gebildet aus Quotient des Volumens V zur geometrischen Oberfläche A_o .

$$V_A = \frac{V(mm^3)}{A_o(mm^2)} \quad (4.2-00)$$

Dies eignet sich zum Kennzeichnen des Zusammenhangs zwischen Größe, Volumen und Form eines Körpers.

Die Verflüchtigungsdauer t_F (Massenstrom flüchtiger Stoffe, Gase) hängt von der Oberfläche zum Massenvolumen, Feuerraumtemperatur, Holzfeuchtigkeit, Holzart und Primärluftzufuhr ab. Das bedeutet je größer die Oberfläche des Brennstoffes, desto geringere Abbrandzeiten [06/S.52].

4.3 Vergasungsmittel

Die gebräuchlichsten Vergasungsmittel, die in Vergasungssystemen Einsatz finden, sind Luft-Wasserdampfgemische und Luft.

Luft-Wasserdampfgemische werden als Vergasungsmittel der in der Reduktionszone stattfindenden Reaktionen verwendet, um diese zu unterstützen (Gleichungen 4.1-07, -09), da der in der Trocknungszone entstehende Wasserdampf nicht genügend zur Verfügung steht.

Luft dient dabei zur Einhaltung des Temperaturniveaus in der Oxidationszone, um ausreichend Wärme für weitere Prozeßstufen bereitstellen zu können. Eine Luftzahl λ von 0,3 ist günstig für den Vergasungsprozeß [09].

Das Produktgas ist stark abhängig vom Luftüberschuß, der bei vollständiger Verbrennung mindestens eins betragen muß. Realisiert man aber eine unterstöchiometrische Verbrennung, also Luftüberschußzahl unter eins (d.h. Luftunterschluß), erhält man eine höhere Motorleistung (maximale Leistung von Otto-Motoren bei Luftunterschluß), allerdings schädliche Emissionen einer unvollständigen Oxidation. Beim thermochemischen Prozeß der Vergasung, bei der die Luftunterschlußzahlen zwischen null und eins liegen, ist dies aber erwünscht. Ist die Luftüberschußzahl gleich null, d.h. ohne Sauerstoffzufuhr spricht man von

pyrolytischer Zersetzung, die die Aufspaltung in gasförmige, flüssige und feste Sekundärenergieträger unter Einfluß von Wärme bewirkt.

4.4 Wirkungsgrad einer Vergasung

Die „Qualität“ von Konversionsanlagen kann durch den Wirkungsgrad beschrieben werden. Der Wirkungsgrad η_v der Vergasung definiert die Energienutzung bei der Umwandlung des Brennstoffes in chemische Bindungsenergie des entstehenden Gases. Zugeführte Prozeßenergien sind nicht in der Kalkulation enthalten [10/S.25]. Der Wirkungsgrad beläuft sich zwischen 55 % bis zu 88 %, die dabei auftretenden Verluste setzen sich durch Wärmeverlust zwischen 10 und 15 % und chemisch gebundenen Verlusten zwischen 10 und 35 % zusammen. Der Wirkungsgrad wird errechnet mit

$$\eta_v = \frac{H_{u,Gas} \cdot \dot{V}_{Gas}}{H_{uH} \cdot \dot{m}_H} \quad (4.4-00)$$

$$H_{u,Gas} \left(\frac{kJ}{m^3} \right) \quad \text{Unterer Heizwert des Gases}$$

$$\dot{V}_{Gas} \left(\frac{m^3}{s} \right) \quad \text{Volumenstrom des Gases}$$

$$\dot{m}_H \left(\frac{kg}{s} \right) \quad \text{Massenstrom Holz}$$

$$H_{u,H} \left(\frac{kJ}{kg} \right) \quad \text{Heizwert Holz}$$

Der Wirkungsgrad verschlechtert sich durch

- unvollständige Vergasung
- Entstehung flüchtiger Bestandteile (Verdampfungsenthalpie)
- Wärmeverluste durch Aufheizen der Vergasungsprodukte
- Wärmeverluste durch Wärmestrahlung/-leitung an die Umgebung

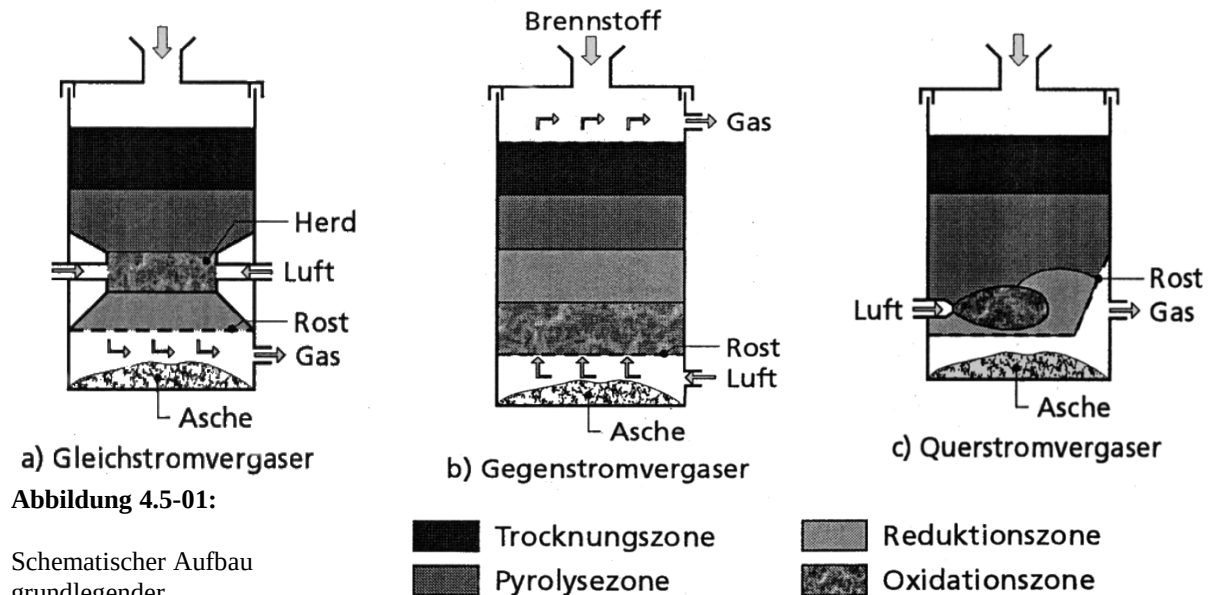
Der Wirkungsgrad verbessert sich durch

- Anpassung der Brennstoffeigenschaften an jeweiligen Vergasungsreaktor (Festbett-, Wirbelschichtvergasung: Bestückungsmaterial, optimale Luftzufuhr, bestenfalls reinen Sauerstoff als Vergasungsmittel, damit erfolgt eine Verdoppelung des Heizwertes, etc.)
- Rückführung der Wärme in den Prozeß, die durch Abkühlung der Vergasungsprodukte entsteht
- Wärmedämmung um den Reaktor, dadurch höhere Reaktortemperaturen und reineres Gas

Alle dem Reaktor beiwohnenden Prozesse, wie Materialtrocknung, Gasreinigung, Gaskühlung, werden in den energetischen Wirkungsgrad mit einberechnet.

4.5 Vergasungssysteme

4.5.1 Festbettvergasung



Die Festbettvergasern werden nach ihrer Brennstoff- und Vergasungsmittelführung in

a) Gleichstromvergaser (s. Abb. 4.5-01, a)

Brennstoff und Vergasungsmittel fließen von oben nach unten. Das erzeugte Schwachgas strömt dabei durch die Reduktionszone (Koksbed), wodurch Teile der schwerflüchtigen Verbindungen (Kohlenwasserstoffe, Teere) gecrackt werden. Bei optimaler Prozeßführung ist das Produktgas nahezu teerfrei. Damit erhöht man den Heizwert und vereinfacht die Gasaufbereitung durch erhöhte Gasqualität.

Allerdings ist die Wärmeübertragung zwischen den beiden Massenströmen, bedingt durch gleiche Strömungsrichtung, nicht so günstig wie bei Gegenstromvergasern. Die Wärme dient der Aufwärmung der Pyrolyseprodukte, dadurch steht weniger Wärme dem Vergasungsprozeß zur Verfügung. Das hoch temperierte Produktgas (800-1300°C) beeinflusst den thermischen Wirkungsgrad somit negativ [7/S.36] und fördert die Verschlackung [8/S.4].

Der technische Aufwand ist im Gegensatz zur aufsteigenden Vergasung höher, da Vergasungsmittel und Produktgas durch ein Koksbed geführt werden. Die Schwierigkeit dabei ist, eine gleichmäßige Kohleschicht auszubilden mit gleichmäßigem Scale up (Temperaturprofil).

Kältere Stellen führen zu verschiedenen Reaktionsgeschwindigkeiten und beeinflussen somit die Gasqualität und deren Wirkungsgrad.

Dies hängt stark vom eingesetzten Brennstoff ab, deshalb erfolgt beim Gleichstromvergaser eine Anpassung an einen bestimmten Brennstoff.

Anforderungen an die Brennstoffeigenschaften [10/S.38]:

- Feuchte $w = 5 - 25\%$
- Feinmaterialanteil $\leq 15\%$ (zu geringe Körnung führt zum Hohlbrennen oder zum Druckabfall im Reaktor)

b) Gegenstromvergaser (s.Abb.4.5-01, b)

Der Brennstoff läuft entgegen dem Vergasungsmittel mit gravimetrischer Brennstoffbewegung aufsteigend. Der von oben eingeführte Brennstoff durchläuft zuerst die Trocknungszone, danach Pyrolyse-, Reduktions- und Oxidationszone. Die Vergasungsluft wird dabei mit Wasser angereichert, was die Temperatur der Oxidationszone konstant hält, da das Trocknungswasser aus der oben gelegenen Trocknungszone nicht in die Oxidationszone gelangt. Kohlendioxid und Wasserdampf aus der Verbrennung spalten sich an der Holzkohle zu CO und H₂ auf in der Reduktionszone (Gleichung 4-07). Flüchtige Anteile der Pyrolysezone können durch das Produktgas mitgerissen werden, deshalb enthält dieses Gas hohe Teeranteile und organische Substanzen. Des weiteren fällt Kondensat, was aus der Trocknung mit dem Produktgas entweicht.

Gegenstromvergaser erreichen gute Energiebilanzen, da die heißen Gase ihre Wärme an die darüberliegenden Pyrolyse- und Trocknungszonen abgeben, jedoch schlechte Vergaserwirkungsgrade aufgrund des niedrigen Heizwertes des Schwachgases.

Die Vergasung verläuft äußerst langsam, große Brennstoffmengen sind erforderlich. Durch Zusetzen des Rostes mit Asche oder Schlacke kann ein Druckabfall im Reaktorraum verursacht werden [11/S.5].

Allerdings ist dieser Typ relativ brennstoffunempfindlich, Anforderungen [10/S.36]:

- Feuchte $w \leq 40\%$

- Feinmaterialanteil $\leq 30\%$

c) Querstromvergaser (s.Abb.4.5-01, c) unterteilt.

Der Querstromvergaser wurde speziell für Fahrzeuge entwickelt und zeichnet sich durch schnelle Betriebsbereitschaft sowie zügige Anpassung an Lastwechsel aus. Durch kurze Verweilzeiten der Gase im Reaktor kommt es zu einer unvollständigen Gleichgewichtseinstellung der Boudouard-Reaktion (Gleichung 4.1-06) und somit zu einer geringen Ausbeute an Kohlenmonoxid. Da die Schwelprodukte die heiße Oxidationszone nicht mehr passieren, verursacht durch kurze Verweilzeiten des Gases, kann nur eine schlechte Spaltung dieser erreicht werden. Es empfiehlt sich daher die Verwendung bereits verschwelter Brennstoffe (Holzkohle, Koks). Die Vergasungsprodukte sind stark verunreinigt, werden deshalb auch nur zur direkter Wärmegewinnung verwendet [9/S.68].

d) Weitere Typen sind teils in der Forschung begriffen

- Kombination Gleichstrom-/Gegenstromvergaser
- Aufsteigende Gleichstromvergasung
- Trommelverfahren

4.5.2 Wirbelschicht- oder Fließbettvergasung

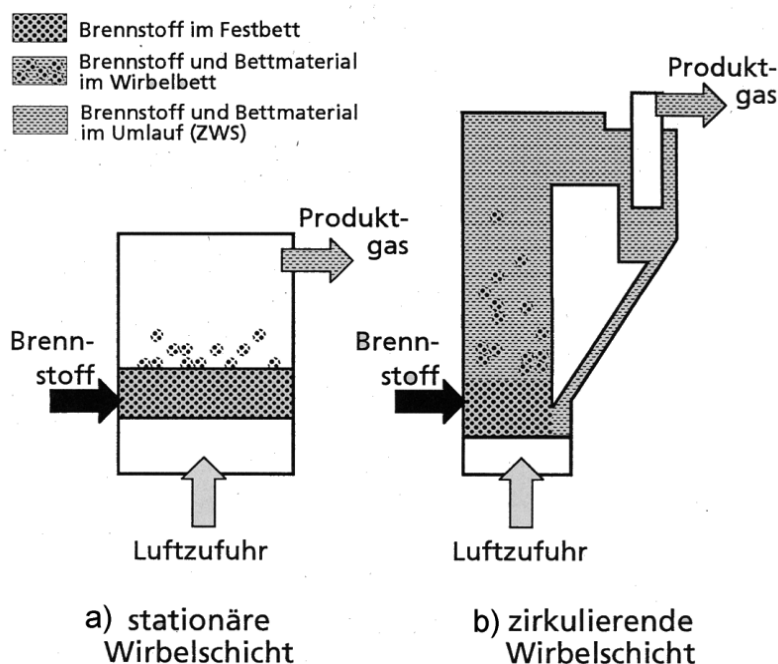


Abbildung 4.5-02: Schematische Darstellung der grundlegenden Fließbettvergasung [11/Bild 5]

Der Wirbelschichtreaktor wird mit feinkörnigen, teilweise mit Inertmaterial (Sand, Dolomit) vermischten Brennstoffen eines engen Größenspektrums betrieben. Dies unterstützt u.a. die Teer crackung im Wirbelbett, somit eignet sie sich für den Einsatz von Hackschnitzeln, Spänen und staubförmigen Materialien [12/S.69].

Die Wirbelschicht entsteht, wenn das Vergasungsmittel durch den Düsenboden das Schüttgut infolge hoher Geschwindigkeit mitreißt, dabei gelangen hohe Staub- und Ascheanteile in das Produktgas.

Da die Geräte unter Druck betrieben werden können, kann eine kompakte Anlagengröße produziert werden, das Temperaturgefälle ist damit konstant erreichbar und es können große Mengen verwertet werden, je nach Gasgeschwindigkeit.

Man unterscheidet im wesentlichen

a) Stationäre Wirbelschichtvergasung (s.Abb.4.5-02, a)

Diese weist eine ortsfeste Lage und eine konstante Dicke des Wirbelbettes auf. Damit wird sie mit einer mittleren Vergasungsgeschwindigkeit auf ihre Betriebsdicke ausgedehnt und kann stationär betrieben werden. Darum werden wenig grobe Festpartikel mit dem Schwachgas ausgetrieben. Stationäre Wirbelschichtvergaser weisen im Vergleich zu zirkulierenden niedrige Investitions- und Betriebskosten auf. Sie eignen sich für Brennstoffe mit begrenztem Wassergehalt, niedrigem Ascheghalt und hohem Ascheschmelzpunkt. Biobrennstoffe haben allerdings gegensätzliche Eigenschaften. Deshalb tritt Verschlackung des Düsenbodens auf, was die Vergasung erheblich verschlechtert. Der Teergehalt im Schwachgas einer stationären Wirbelschichtvergasung liegt zwischen dem der Gleichstrom- und Gegenstromvergasung [10].

b) Zirkulierende Wirbelschichtvergasung (s.Abb.4.5-02, b)

Die Austragungsgeschwindigkeit des Vergasungsmittels wird überschritten, damit wird das gesamte Reaktorvolumen genutzt, Verschlackung tritt dabei nicht auf. Allerdings werden durch hohe Geschwindigkeit Teile des Bettmaterials und Reststoffe mit dem Schwachgas ausgetragen. Diese Stoffe werden über Zyklonen teils abgeschieden. Der Aufwand der Gasreinigung steigt. Der Teergehalt ist aufgrund höherer Vergasungsrate niedriger als bei stationärer Vergasung.

4.5.3 Flugstromvergasung

Die Flugstromvergasung setzt staubförmige Brennmaterien $< 0,1$ mm Partikelgröße voraus. Diese werden mit Hilfe von Inertgasen (Stickstoff) fluidisiert. Durch die Inertgaszufuhr kann sich ein Anlagendruck p_A zwischen 2 und 35 bar aufbauen, je nach Einsatzzweck.

Der Vergasungsprozeß selbst findet in einem wassergekühlten, rohrummantelten Reaktor statt. Das Vergasungsmittel ist technisch reiner Sauerstoff. Über einen Vergasungsbrenner wird das Brennmaterial, samt Sauerstoff und einem Brenngas, eingeblasen. Die organischen Substanzen wandeln sich in einer Flammenreaktion um, wobei ein Synthesegas reich an Kohlenmonoxid und Wasserstoff und frei von langkettigen Kohlenwasserstoffen entsteht.

Dieses Verfahren hat einen hohen Durchsatz und ein gutes Scale-up-Potential (Temperaturprofil im Vergaser) [11]. Damit ist die Reaktionstemperatur so einstellbar, daß mineralische Bestandteile aufgeschmolzen werden und die entstandene Schlacke und heiße Rohsynthesegase durch eine Bodenöffnung entweichen können.

4.6 Rauchgasreinigung

4.6.1 Anforderungen an die Vergasungsprodukte

Das Produktgas wird in der Regel verbrannt und zur Erzeugung von Heißwasser oder Prozeßdampf benutzt. Durch eine direkte gasmotorische Nutzung des produzierten Schwachgases kann ein 10 % höherer elektrischer Wirkungsgrad erreicht werden gegenüber dem der Verbrennung [12]. Falls anstelle von Luft als Vergasungsmittel reiner Sauerstoff bzw. Wasser eingesetzt wird, erhält man ein höher energetisches Gas mit etwa doppelt so hohem Heizwert (s.Abs.3.3, 4.4), da eine Verdünnung durch Stickstoff somit ausgeschlossen ist.

Angaben der Zulässigkeit nach TA-Luft sind unter Abschnitt 4.7 zu finden.

Die Einteilung der Gaszusammensetzung ist in der Tab.4.6-01 dargestellt.

Gasförmige Komponenten	Anteil in Volumen-%	
CO	10 – 15	
H ₂	15 – 20	
CH ₄ und höhere KW	3 – 5	
CO ₂	15	
N ₂	50	
Wasserdampf	10	
	Rohgaswerte in mg/m_N³	Reingasanforderungen in mg/m_N³
Partikel	100 – 1000	Mind. < 50
Teer	100 - 500	Möglichst < 5 Mind. < 100 Möglichst < 50
Heizwert des Schwachgases Zum Vergleich Erdgas	4 – 6 MJ/m ³ 34 MJ/m ³	
	Aufsteigender Gegenstromvergaser	Absteigender Gleichstromvergaser
Kaltgaswirkungsgrad (exkl. Teer)	ca. 50 %	70 – 80 %
Kaltgaswirkungsgrad (inkl. Teer)	ca. 90 %	
Partikelgehalte	gering	mittel
Teergehalte	> 20 g/m ³	< 1 g/m ³
Ascheausbrand	Gut	mittel
Aschegehalt Holz	0,1 – 1,8 Gew.-%	
Stroh	6 – 13 Gew.-%	
Anforderungen an Brennstoffstückigkeit	unempfindlich	einheitl., ideal
Brennstofffeuchte	< 50 %	5 x 6 x 8 cm 5 – 15 %
Betriebsverhalten	unempfindlich	Brücken- und Kanalbildung
Anlagengröße	100 kW _{th} – 10 MW _{th}	100 kW _{th} – 2MW _{th}

Tabelle 4.6-01: Typische Zusammensetzung des Primärgases aus der Holzvergasung [13, 10/S.33]

4.6.2 Abhängigkeit der Vergasungsprodukte

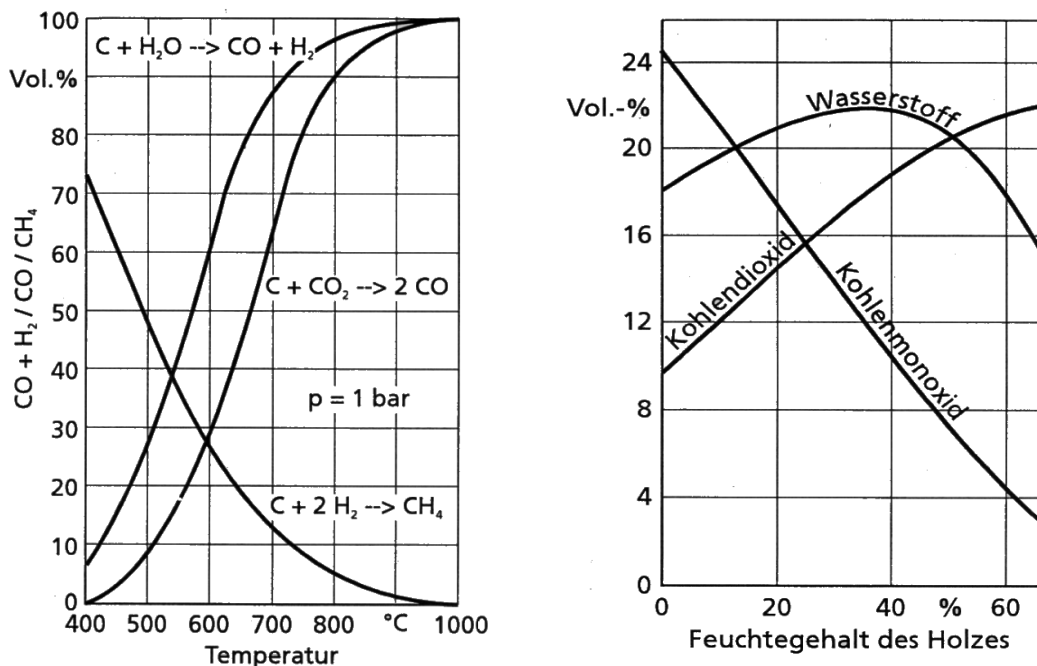


Abbildung 4.6-01: links: Temperaturabhängigkeit der Vergasungsprodukte bei $p = 1$ bar [11/B.1] rechts: Holzgaszusammensetzung als Funktion der Holzfeuchte [11/Bild 2]

Die Zusammensetzung des Schwachgases ist abhängig vom Reaktortyp (angegebene Werte für Festbettvergaser s.Tab.4.6-01), den Betriebsbedingungen und dem Brennstoff in Abhängigkeit der Brennstofffeuchte und der Vergasungstemperatur (s.Abb.4.6-01). D.h. die endotherme Boudouard- (Gleichung 4.1-06) und die Wassergasreaktion (Gleichung 4.1-07) erreichen bei Temperaturen über 800°C hohe Ausbeuten an CO-Gehalten, bei Temperaturen über 1000°C liegt das Reaktionsgleichgewicht fast vollständig auf der Seite von CO und Wasserstoff, weshalb der Methangehalt relativ gering ist. Die Abnahme des Methangehaltes setzt schon zwischen 400 und 600°C ein, dargestellt in Abb. 4.6-01, links. Bei hohen Temperaturen dissoziiert der Wasserdampf zu H- und OH-Radikalen, was zum Abbau höherwertiger Verbindungen, wie zyklische und ungesättigte KW, beiträgt. Die dafür optimale Holzfeuchtigkeit u beträgt ca. 20 %, dargestellt in ABB. 4.6-01, rechts.

Auch in der Produktpalette enthalten sind Anteile von Schwermetallen, Chlor und Alkali (Hervorrufen von Korrosions- und Ablagerungserscheinungen), Schwefelverbindungen, Stickoxide (bei unvollständiger Vergasung), Gesamtkohlenstoff und Staub. Der Hauptanteil der Schadstofffracht des eingesetzten Brennstoffs ist in der Asche/Schlacke gebunden und

liegt unter Nachweisgrenze bei der Einhaltung gesetzlicher Vorschriften für Inertstoff-Deponien in der Schweiz und Mineralstoff-Deponien in Deutschland. Werden dabei Industrierest- und Gebrauchthölzer zur Energiegewinnung durch Vergasung genutzt, so ist die Einbindung anfallender Schwermetalle in die inerten Rückstände durchaus erwünscht.

Kondensatanalysen von Holzgas nach DIN 51872 [35] ergaben ebenfalls niedrigere Werte als erforderlich.

Eine genaue Analyse des Produktgases und der Inertanteile (Asche) ist allerdings nur experimentell möglich.

4.6.3 Vergleich der Kohlenstoffemission von Holz mit Erdöl [06]

Die Tabelle 4.6-02 zeigt einen Vergleich der Kohlenstoffemission bei der Heizung mit 1 t Holz bzw. 229 kg Heizöl.

Brennstoff	Holz	Heizöl
Brennstoffmenge	1000kg	229 kg
Heizwert	4 kWh/kg	11,8 kWh/kg
Wirkungsgrad	80 – 88 %	85 %
Aufbereitung	Holzernte, -transport, Hacken	Förderung, Raffinerie, Transport
Energieaufwand der Aufbereitung	0,095 kWh/kg	3,1 kWh/kg
Netto-C-Freisetzung	0 kg aus Holz 18,1 kg aus Aufbereitung	213,6 kg aus Heizöl 65,6 kg aus Aufbereitung
Gesamte Kohlenstoffemission	18,1 kg	279,2 kg
CO ₂ -Emission	66,4 kg	1.023 kg

Tabelle 4.6-02: Vergleich der Kohlenstoffemissionen Holz/Heizöl [06, S.66]

Diese Tabelle bestätigt die in der Einleitung benannte kohlenstoffarme, CO₂-neutrale „Verbrennung“ von Biomasse.

Weitere Emissionswertvergleiche sind auf Seite [Emissionswerte.xls](#) unter Abb.4.6-03 angegeben.

4.6.4 Reinigung für den Einsatz in Motoren

Produktgase aus Festbettvergasern können ohne Gasreinigung in einem Brenner zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden.

Aber generell ist das von den Vergasern produzierte Gas vor der motorischen Anwendung und für die Verwendung zu Synthesegas (z.B. katalytische Synthese von Methanol) abzukühlen und zu reinigen, da das Gas deutlich höheren Anforderungen unterliegt.

In Tab.4.6-04 sind die Anforderungen an das Produktgas in Abhängigkeit des Verwendungszweckes dargestellt.

Anforderungen an das Produktgas/Verwendungszweck	Partikelgehalt mg/Nm ³	Partikelgröße µm	Teergeh. mg/Nm ³	Alkaligeh. mg/Nm ³
Verbrennungsmotor	< 50	< 10	< 100	
Gasturbine	< 30	< 5		0,24
Methanolsynthese	< 0,02		< 0,1	
Brennstoffzelle			< 1	

Tabelle 4.6-04: Verwendungsspezifische Minimalanforderungen an Produktgase; Alkaligehalt als Na und K, leer = Anforderungen unbekannt [14/S.9]

Um einen möglichst hohen Motorwirkungsgrad zu erreichen, sollte das Gas auf 30 – 40°C heruntergekühlt werden. Dabei kondensieren je nach Vergasungsprozeß und Feuchtegehalt des Brennstoffs 300 g Wasser aus jedem Kilogramm Holz. Dieses Wasser dient den Wasserstoff produzierenden Reaktionen (Gleichung 4.1-07 bis –09). Restwasser fällt als Kondensat aus. Bei Vergasern mit 100 kW_{el} sind das ca. 200 l Kondensat/Tag (phenolhaltige Flüssigkeit, die schwer abbaubare organische Verbindungen enthält und damit die Grenzwerte überschreitet für die Einleitung in kommunale Abwässer [19, 09/S.12]).

Wird das Kondensat nicht als Vergasungsmittel zurück in den Vergaser gegeben, muß es ökologisch korrekt entsorgt werden [09/S.12].

Die Reinigung kann entweder im Naßreinigungsverfahren mit einem Wäscher oder trocken mit Filtern unterschiedlichster Bau- und Materialart durchgeführt werden.

Die Abscheidung von Partikeln bis etwa 10 mg/m³ bereitet keine großen technischen Schwierigkeiten. Das Problem liegt in der Teerabscheidung.

- Naßverfahren

Bei der nassen Reinigung wird Gas durch Einspritzen von Wasser oder mit Wärmetauscher abgekühlt. Ein Wäscher (z.B. Venturiwäscher, Membrananlage, Strahlwäscher, Waschtürme, Wirbelwäscher, Rotationswäscher) scheidet

Teerverbindungen, gasförmige wasserlösliche Verunreinigungen, wie Chlor und Partikel wirksam ab, solange der Teergehalt im Rohgas nicht mehr als 5 % überschreitet [09/S.12, 18/S.10].

Mit einem Sandbettfilter konnte schon Abscheidegrade für Partikel von 80 – 95 % und für Teer von 60 – 95 % erreicht werden. Er muß periodisch gereinigt werden.

Bei starker Kontaminierung können Aktivkohlefilter eingesetzt werden, die entweder wieder regeneriert oder durch Einspeisung in den Vergaser entsorgt werden.

- Trockene Verfahren

Die trockene Gasreinigung kann eingesetzt werden, wenn der Anteil an Chlor, Fluor, Schwefel und leichtflüchtigen Schwermetallen nicht so hoch ist, daß unzulässige Emissionen auftreten. Außerdem sollte die Filtertemperatur so hoch sein, daß durch auskondensierte, klebrige Teerverbindungen die Filter nicht verstopfen. Varianten sind:

(1) Heißgasreinigung

Das Gas wird unter geringen Temperaturverlusten direkt einer Prozeßanlage zugeführt [15].

(2) Gravitations- und Massenträgheitsabscheider

Diese Abscheidesysteme nutzen die Trägheit oder Gravitation, so daß sich Partikel und Aerosole an Bauteilen niederschlagen und somit vom Gas getrennt werden. Dazu gehören Wirbelfilter oder Zyklone, Prallblechbehälter. Der Wirkungsgrad ist von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Deshalb sollte ein Fliehkraftabscheider direkt nach dem Reaktor geschaltet sein, da somit hohe Gasgeschwindigkeiten gewährleistet sind und die flüssigen Bestandteile durch die noch hohen vorhandenen Reaktortemperaturen nicht auskondensieren.

(3) Gewebefilter, Tuchfilter kombiniert mit Korkfilter

Die Reinigung des Gases von Partikel und Aerosolen erfolgt durch die Adsorption in faserigen und porösen Filtern. Der Abscheidewirkungsgrad ist entsprechend hoch. Die Filtermaterialien sind anfällig für kondensierende Bestandteile, da die Poren verstopfen. Darum sollte der Filter direkt nach der Kühleinheit geschaltet werden. Zu Filtermaterialien zählen Holzwolle, Torf, Kohle und synthetische Gewebe, sowie Keramik.

(4) Aktivkohle

Seit über 100 Jahren wird auch technisch hergestellte Aktivkohle zur Gasreinigung eingesetzt. Sie ist unselektiv wirksam und scheidet ein großes Spektrum an

Inhaltsstoffen, Katalysatorgiften des Gases ab bzw. adsorbiert sie. Unter anderem halogenierte Kohlenwasserstoffe, Chlor, Fluor, Staubpartikel und Teer in bestimmten Mengen.

Aktivkohlen gibt es in spezifischen Oberflächen bis zu Größe 1200 m²/g, teilweise mit noch höheren Werten. Die große innere Oberfläche wird durch Mikro-, Meso- und Makroporenbereiche gebildet. Bei sehr feinporigen Kohlen ist selbst bei niedrigen Gleichgewichtsreaktionen die Beladekapazität relativ hoch [17/S.43].

Für die Gasreinigung mit Aktivkohle gilt:

- Niedrige Temperatur, hoher Druck begünstigen Adsorption
- Hohe Temperaturen, niedriger Druck begünstigen Desorption
- Hohe relative Feuchte $\phi \geq 50 \%$ vermindert die Standzeit der Aktivkohle nachhaltig

Aktivkohle zeichnet sich durch hohe Reinigungsleistung und geringe Investitions- und Betriebskosten aus.

(5) Elektrofilter

Dieses Prinzip lädt die Partikel und Aerosole elektrisch, die sich dann an der Gegenelektrode (z.B. Behälter) niederschlagen. Sie erreichen hohe Abscheidegrade und stellen geringe Betriebsanforderungen, werden aber erst ab Anlagen über 2,5 MW_{th} in Betracht gezogen durch ihre hohen Energiekosten.

Fazit: Eine wirtschaftlich tragbare, umweltverträgliche Gasreinigung ist eines der schwierigsten Probleme bei der Vergasung [17/S.41, 26/S.32-37].

4.7 Verwertung der gasförmigen Produkte

Die entstehenden Gasprodukte können in verschiedenen Verfahren genutzt werden. Einerseits zur thermischen Nutzung in einem Kessel, wobei dieses Verfahren schwierig gegenüber bestehenden Holzfeuerungsanlagen durchsetzbar ist. Da die Holzfeuerungsstechnik weitgehend technisch ausgereift ist, besteht kaum die Möglichkeit einer effektiven Nutzung. Andererseits zur mechanischen Stromerzeugung bzw. einem direktem Antrieb verschiedener Aggregate, möglichst gekoppelt mit Wärmenutzung. Hierzu ist der Einsatz in Motoren und Gasturbinen, (auch Brennstoffzellen) von Bedeutung.

Weitere Verwertungsmöglichkeiten sind die Nutzung als Synthesegas bei der Methanolherstellung dazu muß ein weitgehend inertfreies Gas zur Verfügung stehen. Zur Umsetzung zu Strom durch Brennstoffzellen, dabei muß das Gas soweit getrennt werden, daß der Wasserstoffgehalt 100 % beträgt.

4.7.1 Motoren für das Produktgas

Die Anforderungen für die motorische Nutzung sind in Tabelle 4.6-02 aufgeführt. Diese Werte dürfen für den störungsfreien Motorbetrieb nicht überschritten werden.

Weitere Anforderungen an die Gasqualität für den Motorbetrieb werden durch

- den Heizwert, der sich auf 4000 bis 6000 kJ/m³ beläuft, je nach Erzeugungsverfahren,
- den stöchiometrischen Luftbedarf, der bei Verbrennung in Motoren zwischen 0,8 und 1,2 m³Luft/m³Gas liegt und
- die Klopfestigkeit (Methanzahl) charakterisiert, welche durch die klopfreudigen Gaskomponenten H₂ (Methanzahl = 0), durch CO (Methanzahl = 73) und durch das klopfhemmende CO₂ bestimmt wird. Holzgase haben in der Regel eine Methanzahl zwischen 60 und 70 [15].

Die Motorleistung ist stark abhängig von Druck und Temperatur des Produktgases. Wie im Abschnitt 4.6.4 beschrieben, sollte das Produktgas mit Temperaturen zwischen 30 – 40 °C in den Motor geführt werden. Bereits bei 100 °C Gastemperatur treten Arbeitsverluste zwischen 9 % - 14 % auf. Bei 300 °C steigen diese auf ca. 30 % - 40 %. Diese Verluste sind auch nicht aufgrund der Nutzung langkettiger Kohlenwasserstoffe im Schwachgas zu kompensieren.

Als zuverlässige Motoren können Zündstrahl-Dieselmotoren, auf Fremdzündung (Zündkerzen) umgebaute Dieselmotoren oder Ottomotoren betrieben werden. Dabei werden durchschnittlich 30 % - 40 % Arbeitswirkungsgrad erreicht. Unter Berücksichtigung dieses erreichbaren Vergasungswirkungsgrades erhält man einen elektrischen Wirkungsgrad zwischen 15 % - 30 %.

Diese maximal erreichbare Arbeit hat Auswirkungen auf die Umdrehungszahl von schwachgasbetriebenen Motoren. Es werden Umdrehungszahlen von 2500 bis 3600 Umdrehungen pro Minute erreicht, deshalb auch als langsam laufende Motoren bezeichnet.

Bei der Verbrennung im Gasmotor kann allerdings eine 3- bis 5-fache Grenzwertüberschreitung für Kohlenmonoxid nach TA-Luft (650 mg/m^3) auftreten. Damit sollte das Gas katalytisch nachverbrannt werden, wobei der Schwermetall- und Alkaligehalt $0,5 \text{ mg/m}^3$ im Produktgas nicht überschreiten darf, da sonst Ablagerungen im Motor entstehen [16].

Um die Motorleistung und auch die Gasqualität zu erhöhen, sowie Schwankungen auszugleichen, kann ein Zusatzgas beigemischt werden. Damit kann der Motor im Dualfuel-Modus gefahren werden. Das bedeutet, eine bestimmte Benzin-/Dieselmenge wird mit dem verdichteten Gas eingespritzt. Bei Ausfall des Gassystems ist somit ein Umschalten auf reinen Benzin-/Dieselbetrieb möglich.

Durchgeführte Emissionsuntersuchungen ergaben allerdings, daß nicht aller beigemischter Brennstoff (Benzin/Diesel) verbrennt, so daß unzulässige Emissionen entstehen. Inwiefern mit Schwachgas angetriebene Motoren die Emissionsanforderungen erfüllen, kann mit dem heutigen Stand der Technik von Betriebserfahrungen nicht eindeutig beurteilt werden [09/S.13, 10/S.48].

4.7.2 Turbinen für das Produktgas

Im Gegensatz zur Nutzung im Motor muß bei Gasturbinen das Gas nur auf ca. $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt werden. Dazu ist allerdings eine Heißgasreinigung nötig [16].

Das Kondensatproblem entfällt, nur muß das Gas entsprechende Teer- und Staubgehalte vorweisen (s.Tab.4.6-02).

Das Problem bei der Verbrennung in Turbinen besteht im Gehalt an Alkalimetall-Verbindungen, die bei der Abkühlung in der Turbine auskondensieren und die Schaufeln beschädigen.

Entscheidend ist zur Erzeugung von Strom das Gelingen einer kostengünstigen Heißgasreinigung (s.Abs.4.6) [17].

Als typische Emissionen werden 60 ppm für Kohlenmonoxid und ebenfalls für Stickoxide bezogen auf 15 % Sauerstoff im Rauchgas angegeben.

4.7.3 Der Stirlingmotor

Stirlingmotoren arbeiten im geschlossenen Prozeß, wobei das gasförmige Arbeitsmittel einen Kreisprozeß durchläuft und die Maschine dabei nicht verläßt. Die Wärme wird mit Hilfe eines Wärmeübertragers in den Prozeß eingebracht und wieder entnommen. Damit hat sie folgende Vorteile gegenüber konventionellen Motoren:

- Motor arbeitet unabhängig von der Wärmequelle
- Eindringen von Verbrennungsrückständen wird vermieden.

Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Temperaturspreizung (Kühlwasser-/Lufttemperatur max. 65 °C und Erhitzertemperatur 650 °C – 800 °C, der Verbrennungsluft auf 700 °C vorwärmt). Stirlingbrenner arbeiten im Brennraum auf einem Temperaturniveau von 1200 °C bis 2000 °C. Dabei kann auf eine aufwendige Teer-Filterung verzichtet werden, da das Brenngas direkt in den Brennkammern mit auf 600 °C bis 700 °C vorgewärmter Luft gemischt und und samt Teer verbrannt wird. Das Gas muß allerdings mit einem Vordruck zur Verfügung stehen und sollte auf wenige mg Asche pro m³ Brennstoff reduziert werden, um Verstopfungen des Erhitzers zu vermeiden. Außerdem können Dichtheits- und Schmierungsprobleme auftreten, die jedoch lösbar sind [18/S.58, 18/S.18].

- Stirlingmotoren bieten einen stationären Einsatz in Leistungsklassen von ca. 10 kW_{el} für dezentrale Stromerzeugung.
- Die Vergasung nutzt den Vorteil der Luftvorwärmung am Stirlingbrenner und der Aschearmut.

4.7.4 Kondensat und Korrosionen

Bei der Vergasung unabhängig von der Vergasungsführung und der Bauart des Reaktors entstehen wäßrige und feste/teerige Kondensate (s.Abs.4.6).

- 1.) Je nach Prozeßführung entsteht Kondensat, welches stark mit organischen Bestandteilen verunreinigt ist.
- 2.) Das Gas kondensiert weiterhin bei Reinigung oder Kühlung aus bzw. an der Rohrleitung. Das entstehende Abwasser heißt ebenfalls Kondensat. Theoretisch kann dies vermieden werden, wenn die Gastemperatur auf 50 °C gehalten wird.

Die sehr starke Belastung mit organischen Verbindungen und toxischen Stoffen verbietet die direkte Einleitung ins Abwassersystem. Dadurch ist eine Vorbehandlung notwendig, die nach heutigem Standpunkt einen wirtschaftlichen Betrieb kaum ermöglicht.

Je nach Beschaffenheit des Holzes und Reaktortemperaturen entstehen auch schwefel- und alkalihaltige Verbindungen. Kondensieren diese im Motor aus, kann es zu Oxidations- und Verstopfungserscheinungen kommen. Demnach muß der Vergaser nach bestimmten Materialien ausgelegt werden, daß somit auch eine Korrosionsanfälligkeit und damit eine schnellere Abnutzung der gesamten Vergasungsanlage vermindert oder vermieden wird (s.Abs.4.7.1).

4.8 Pyrolyse

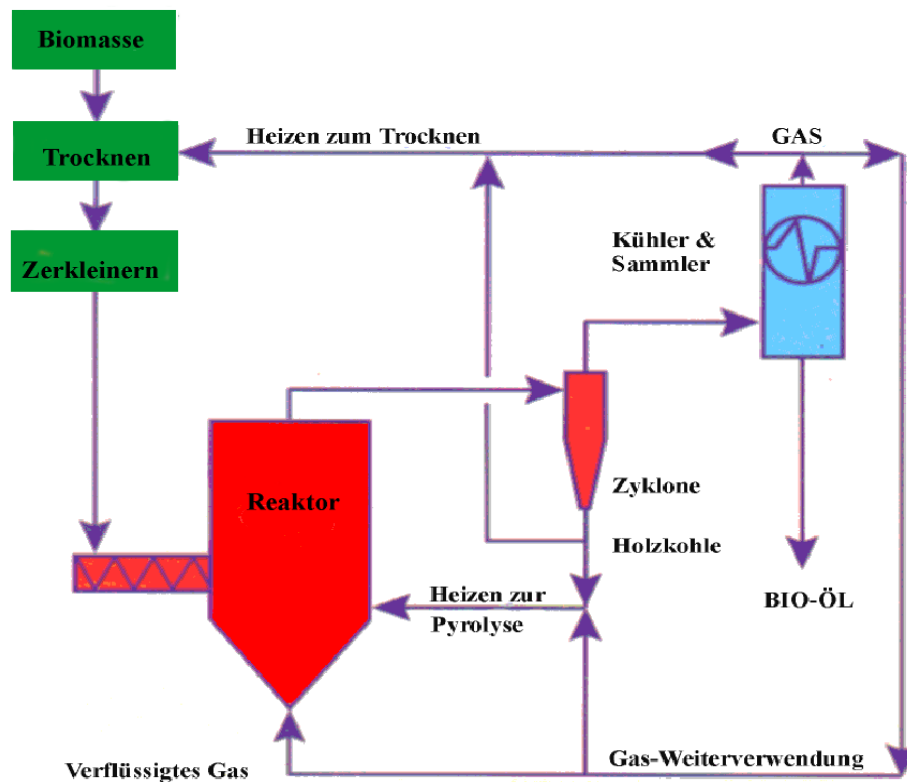


Abbildung 4.8-01: Konzept der Schnell-Pyrolyse „Fast Pyrolysis“ im Wirbelschichtvergaser [34/Heft 19/1]

Zur „Fast Pyrolysis“ benötigt man sehr feines Biomasse-Material (kleiner als 2 mm), damit sich eine gleichmäßige Wirbelschicht ausbilden kann (s.Abs.4.5.1). Der Prozeß wird unter genauer Kontrolle bis rund 500 °C gefahren, tritt weniger als zwei Sekunden in den dampfförmigen Zustand ein und wird sehr schnell herabgekühlt, um das kondensierte Bio-Öl-Produkt zu erhalten. Dabei entstandenes Gas wird mit der ebenfalls entstandenen Holzkohle genutzt, um Wärme für den fortlaufenden Pyrolyseprozeß und zur Trocknung des Biomasse-Materials zur Verfügung zu stellen. Damit ist die Pyrolyse ein unabhängiger Prozeß, der ohne zusätzlichen Energieaufwand autark funktioniert.

Das Bio-Öl wird als Diesel oder Kraftstoff-Öl, zur Beheizung von Kesseln, Schmelzöfen und in Motoren und Turbinen zur Elektrizitätserzeugung genutzt. Die Verwendung von Bio-Öl als Transportkraftstoff (wie Bio- Diesel) ist möglich, aber nicht sehr wirtschaftlich.

Andere Möglichkeiten zur Nutzung von Bio-Öl sind die Herstellung von Chemikalien, wie Geschmacksverstärker und Harze, die als Klebstoffe (z.B. Phenol-Foernaldehyd-Harz) Verwendung finden landwirtschaftliche Chemikalien, wie Düngemittel und Emissionen kontrollierende Wirkstoffe [34].

4.9 Technische Beurteilung von Vergasungsanlagen

Die Vergasung ist ein komplexes Verfahren aus verschiedenen Pyrolyse- und Verbrennungsprozessen. Parameter wie Temperatur, Verweilzeit, Aufheizgeschwindigkeit, Korngröße, Wassergehalt, Brennstoffzusammensetzung usw. beeinflussen die Vergasungsprodukte. Deshalb ist es nur mittels Langzeitversuchen (in weit über 1000 h) möglich, das Reaktions- und Betriebsverhalten eines Vergasers zusammen mit den Werten des Brennstoffes und der Gasqualität zu beurteilen.

In Tabelle 4.9-01 werden Zielwerte genannt, die ein Vergaser (Festbett) nach heutigen Maßstäben aufweisen sollte.

<u>Meßergebnisse</u> Gaszusammensetzung, Teer- und Partikelgehalt, Heizwert, Vergaserwirkungsgrad (Energiegehalt des gekühlten Schwachgases, bezogen auf die Brennstoffzufuhr)	$\text{CO} > 15\%$ $\text{H}_2 > 15\%$ $\text{CH}_4 = 3 - 5\%$ $\text{CO}_2 < 12\%$ $\text{Teer} < 500 \text{ mg/m}_\text{N}^3$ $\text{Partikel} < 1000 \text{ mg/m}_\text{N}^3$ $\text{Heizwert} > 5 \text{ MJ/m}_\text{N}^3$ $\eta_{\text{Vergaser}} > 70\% \text{ (Volllast)}$ $\eta_{\text{Vergaser}} > 60\% \text{ (50\% Teillast)}$	Wenn Wirkungsgrad kleiner 50%, wird elektr. Wirkungsgrad nicht größer 15% sein.
---	---	---

Tabelle 4.9-01: Zielwerte zur Beurteilung eines Festbett/Luft Vergasers [06]

4.10 Internationale Bestrebungen

Bei der thermochemischen Konversion von Holz und Biomasse können verschiedene Produktbereiche abgedeckt werden. So, wie man Produktgas zur Erzeugung von Strom und Wärme oder als Synthesegas zur Methanolgewinnung bzw. zur Umwandlung in Brennstoffzellen verwenden kann, gilt dies ebenso für Pyrolyseöl. Dieses dient der Pharmaindustrie zur Herstellung von Aromastoffen und anderer essenzieller Auszüge, der Chemischen Industrie zur Erzeugung von natürlichen Klebstoffen und Düngemitteln, etc.

Durch die Vielfältigkeit der Produktpalette und deren verschiedener Nutzung werden die Forschungen bezüglich Pyrolyse oder Vergasung in gleichem Maße fortschreiten.

Es ist zu überlegen, ob nicht aus Sicht der vorwiegenden Nutzung in Wärme und Strom die Ölproduktion zukunftsfähiger ist. Öl ist besser transportabel und lagerbar als Gas.

Im Anhang befinden sich einige Anschriften von Unternehmen (s.Abs.7.4), welche auf Holzvergasung bzw. Pyrolyse spezialisiert und im Sinne unserer Umwelt tätig sind.

5 Experimentelle Untersuchungen zur Holzvergasung

5.1 Technische Beschreibung der Versuchsanlage

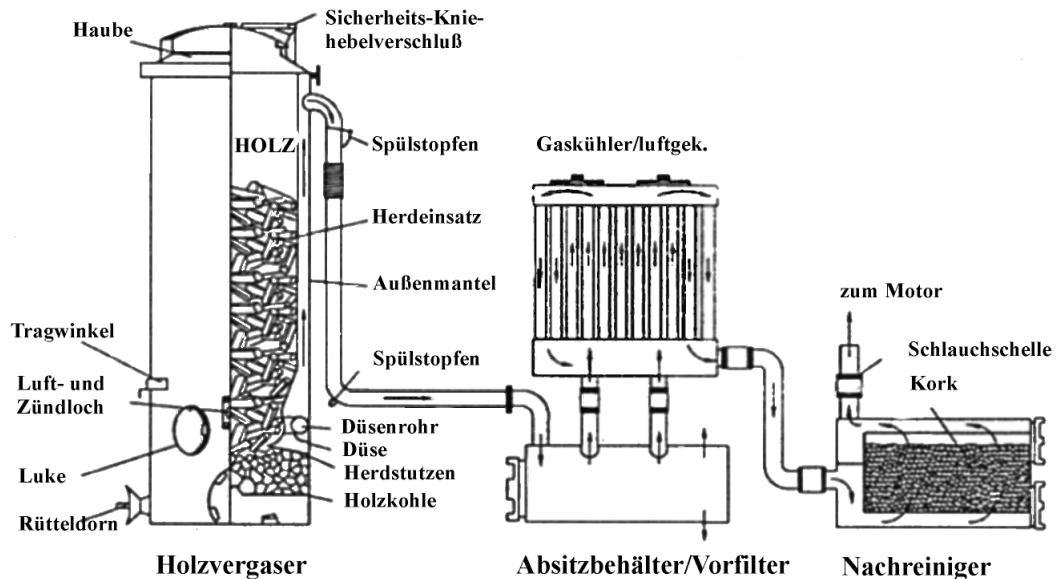


Abbildung 5.1-01: Imbert-Vergaser mit Gasaufbereitung zur motorischen Gasnutzung, bestehende Versuchsanlage bis auf Nachreinigung mit Gasmotor vorhanden [26/S.48]

Die bestehende Versuchsanlage, in Abb.5.1-01 dargestellt, befindet sich in Dornburg/Saale und wurde von der Firma DJS Anlagen und Oberflächentechnik, Apolda, im Rahmen der Diplomausarbeitung zur Verfügung gestellt.

Es ist eine Anlage vom Typ Imbert, die um 1940 fast ausschließlich für Kraftfahrzeuge konstruiert wurde, im Moment aber als stationäre Anlage Verwendung findet. Sie ist zusammengesetzt aus einem Gleichstromvergaser (s.Abs.4.5.1), einem Gaskühler und einem Teerabscheider (Vorfilter) aus Aktivkohle.

Beim Vergasungsreaktor handelt es sich um einen doppelwandigen Stahlblechzylinder mit Herdeinsatz, dessen Querschnitt in Höhe der Luftzufuhr konisch verläuft. Ein Rüttelrost dient zur Auflockerung des Holzkohlebettes. Er ist in der Versuchsanlage nicht funktionsfähig. Die Füllöffnung entspricht gleichzeitig dem Sicherheitsdeckel.

Die Anlage wird von Hand bestückt und gezündet und mit Holzkohle angefahren. Das Vergasungsmittel Luft wird durch die Düsen angesogen, in den Düsenrohren vorgewärmt und oxidiert den Kohlenstoff der Holzkohle zu Kohlendioxid. Dabei wird die freigegebene Wärme zur Trocknung und Aufheizung des Holzes, sowie zur pyrolytischen Zersetzung des Holzes in Holzkohle und flüchtige Pyrolyseprodukte benötigt. Weiterhin zur Spaltung von entstandenen langkettigen Kohlenwasserstoffen und der Reduktion von Kohlendioxid und Wasser. Dazu ist eine Mindesttemperatur in der Reduktionszone von ca. 700 °C erforderlich. Diese wird

gewährleistet durch die konische Verengung des Herdes, welcher ausreichend hohe Gasgeschwindigkeiten durch Luftvorwärmung hervorbringt. Das erzeugte Schwachgas tritt nach unten durch das Glutbett aus, durch den Doppelmantel wieder nach oben, wobei es gleichzeitig die Funktion eines Wärmeübertragers zwischen Produktgas und Brennstoff erfüllt. Danach gelangt es in den Teerabscheider (2 m Stahlrohr mit $\varnothing$ 230 mm), der mit Holzkohle gefüllt ist, durchläuft anschließend einen luftgekühlten Rippenkühler ohne Zwangsbelüftung, wobei teerhaltiges Kondensat anfällt, was in einem Kondensatsammelbehälter aufgefangen wird. Damit ist das nun vorgereinigte Produktgas auf motorisch nutzbarer Temperatur von 30 bis 40°C (s.Abs.4.1).

5.2 Durchführung der Versuche

5.2.1 Auswahl des Bestückungsmaterial

Zum Beschicken des Vergasers wurden zwei verschiedene Vergasungsmaterialien getestet.

1.) Pelletts	Material:	Späne aus Mischholz und Spanplatten, Papierreste Dicht gepreßt, sehr trocken
	Größe:	$\varnothing$ 50 mm, 50 mm lang
2.) Holz	Material:	Fichte, naturbelassen Abgelagert, sehr trocken
	Größe:	durchschnittlich 60 x 40 x 100 mm

Bei den Messungen wurde der Vergaser konstant mit 7,5 kg des jeweiligen Bestückungsmaterials und 1,0 kg Holzkohle als Anfahr-Material gefüllt.

Der Anfahrvorgang wurde mit Hilfe eines Propangasbrenners unter 10 minütiger Beflammung vorgenommen, wobei vorerst eine vollständige Verbrennung mit $\lambda > 1$ den Start ermöglicht. Nach ca. $\frac{1}{2}$ h ist der Prozeß in einem meßfähigen Betriebszustand.

Die Massen wurden mit einer kommunen Waage, deren Abweichungen im Bereich ± 20 g liegen, gemessen, siehe Meßprotokoll 6.2.1.

5.2.2 Produktgasmessung

Das Produktgas sollte sich aus den in den Abschnitten 3.2 und 3.3 benannten Komponenten zusammensetzen und damit brennbar sein. Es wird einmal direkt aus dem Vergasungsreaktor gezogen (I), die zweite Entnahmestelle sitzt direkt am Ausgang des Reaktors (II), vor dem Teerabscheider die dritte am Ausgangsstutzen des Vergasers (III), wobei Gas ein Teil des Gases durch einen Gaswäscher geschickt wurde (IV), siehe [Abbildung 5.2-01](#).

Eine entsprechende Gasanalyse wurde unter Entnahme von drei 10 Liter Teflon-Gasbeuteln in der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft am Institut für Holzchemie durchgeführt.

Die Proben wurden in jeweils 10 Messungen in einem Gaschromatographen, Marke Chrompack (NL) Micro-GC CP 2002 nach Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Methan, Ethen, Ethan, Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff untersucht und im Gaschromatographen Chrompack (NL) Model 438 A nach Methan, Ethan, Ethen, Ethin, Propan, Propen, n-Butan, iso-Butan, sowie cis-, trans- und iso-Buten quantifiziert, siehe Meßprotokoll 6.2.2 und Abschnitt 6.1. Das Berechnungsverfahren der Massenprozentverteilung der Produktgase wird nicht näher erläutert.

Eine zweite Produktgasmessung erfolgte durch eine Kohlenstoffanalyse, die das Umweltlabor Jäger vornahm. Die Werte sind ebenfalls in o.g. Abschnitten zu finden, sowie eine Rußmessung.

5.2.3 Betriebsverhalten und Volumenstrombestimmung

Durch die understöchiometrische Luftzufuhr bildet sich ein Unterdruck gegenüber der Atmosphäre im Gasgenerator, der durch die Saugwirkung eines Gebläses oder Motors unterstützt, einen künstlichen Zug entfacht. Dieser Unterdruck ist für das Funktionieren der Anlage lebenswichtig und läßt Schlüsse über Störungen ziehen. Sind alle Stellen gut gasdicht, was am Versuchsmodell nicht der Fall ist, kann nur durch die Lufteintrittsöffnung am Vergaser und durch die Verbrennungslufteintrittsöffnung am Gasmischer Luft einströmen. Bei Undichtheit wird dagegen Luft angesaugt, die das Gas verdünnt oder auch zur Bildung eines explosiven Gemischs (Verpuffungen und resultierende Kanalbildung) innerhalb der Anlage führt.

Je mehr Gas produziert werden soll, desto größer sollte die Differenz des Unterdruckes p_u zum atmosphärischen Druck p_a sein. Dieser wird zusätzlich durch Strömungswiderstände gemindert, bevor das Produktgas den Motor erreicht. Das ist notwendig, um Schwankungen in der Gasproduktion und den damit verbundenen instabilen Motorbetrieb auszuschränken [20/S.96].

Die Untersuchungen laufen unter zwei verschiedenen Bedingungen:

- 1.) Im Falle der Versuchsanlage ist es eine stationär, im Freien gelagerte Holz-Vergasungsanlage, welche ohne Energiezufuhr, auch ohne Motor auf ihre Tauglichkeit und ihr Betriebsverhalten getestet wurde und damit nur geringe Unterdrücke aufweist.
- 2.) Die zweite Stufe des Tests beinhaltet die Funktionsfähigkeit mit Motorbetrieb, somit ist ein höherer Unterdruck festzustellen und die Abbrandzeit der Anlage verkürzt sich (Meßprotokoll 6.2.4).

Das Betriebsverhalten wurde mit einem Druck- und Temperaturmesser geprüft, Beobachtungen und Zeitmessungen sind im Meßprotokoll 6.2.3 festgehalten.

5.2.4 Betriebsverhalten mit Brenntest/mit Benzinmotor

Hierbei wurde dem „Imbert“-Vergaser ein Benzin-Generator „Protect Nature“ von Tecumseh (Korea), Typ CenturaS, Modell 0713-0, Serie VT 1500, Leistung 1,3 kW angeschlossen und die Funktionsfähigkeit der Anlage geprüft werden. Dazu siehe Meßprotokoll 6.2.4.

6 Auswertung der experimentellen Untersuchungen

6.1 Berechnungsverfahren zur Beurteilung eines Holzvergasers

Die Berechnung ist ausgelegt zur Bestimmung des Heizwertes und des Wirkungsgrades eines Festbett-Gleichstromvergasers. Die [Tabelle](#) steht im Excel zur Verfügung und dient auch der Berechnung diverser Vergasersysteme, vorausgesetzt eine Gasanalyse und die benannten Meßwerte liegen vor.

6.2 Bewertung der Ergebnisse

Meßprotokoll 6.2.1

Datum	Bearbeiter	Seite
14.08.00	Sandra Böhme	1

Ziel :

Es soll der **Brennstoffinput** gemessen werden. Dabei dienen Massenstrom und Materialfeuchte der Berechnung des Heizwertes des Eingangsmaterials.

Durchführung :

Die Masse wird mit Hilfe einer Standard-Waage mit Abweichung von $\pm 20\text{g}$ ermittelt.

Die Holzfeuchtigkeit wird über das Erhitzen des Materials auf $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ und Auswiegen der Anfangs- und Endgewichte mit der Satorius-Labor-Waage mit Abweichung $\pm 0,001\text{g}$ gemessen.

Der Heizwert des Holzes wird über die Heizwertbestimmung nach DIN 51900 mit dem IKA-Bomben-Kalorimetersystem C4000A bestimmt, unter Laborbedingungen [28].

Meßergebnis :

1.) Nach 5.2.1 ist die Vergasung mit Pellets erfolgt. Aufgrund der zu dichten Pressung der Pellets konnte aber nicht vergast werden, der Prozeß erstickte nach 10-maligem Anfahren immer wieder.

2.) Die Vergasung mit Fichtenholz erfolgte je nach äußeren Betriebsbedingungen ohne Probleme. Die Brennstoffzufuhr eines jeden Prozesses belief sich auf $7,5\text{ kg}$. Die Prozeßdauer beläuft sich auf ca. 12 Stunden im stationären Prozeß.

Der Wassergehalt berechnet sich nach Gleichung 3.3-03.

$m_w\text{ (g)}$	$m_{tr,Holz}\text{ (g)}$	$m_{f,Holz}\text{ (g)}$
0,0831	0,9436	1,0267

$$w = \frac{0,0831\text{g} \cdot 100}{1,0267\text{g}} = 8,09\%$$

Somit beträgt der Wassergehalt $w = 8,1\%$, d.h. das Holz ist schon lang gelagert und hat einen sehr geringen Wassergehalt und muß auch nicht nachgetrocknet werden.

Meßprotokoll 6.2.1

Datum	Bearbeiter	Seite
14.08.00	Sandra Böhme	2

Die Holzfeuchte berechnet sich nach Gleichung 3.3-04.

$$u = \frac{0,0831g \cdot 100}{0,9436g} = 8,80\%$$

Damit ist der Heizwert direkt bestimmbar nach [Abbildung 3.3-01](#) und ergibt ca. 17,5MJ/kg.

Der Heizwert ergibt sich aus
$$H_u = \frac{c \cdot \Delta T - Q_{\text{Faden+Draht}} (-Q_{\text{Kapsel}})}{m_{f, \text{Holz}}}$$

Dabei ist c eine festgelegte kalorimetrische Größe, die der Verifizierung des Kalorimeters dient. Sie ist mit $c = 8989 \text{ J/K}$ festgelegt. Durch die Einbringung eines Fadens und eines Drahtes, die als Zündelemente dienen, muß deren Brennwert von zusammen 80 J abgezogen werden. Der Versuch wurde zwei Mal durchgeführt, beim zweiten wurde das Holz zusätzlich in eine Kapsel gebracht, um eventuelle Holzurückstände durch Verstreuen von Holzpartikeln in der Meßbombe zu vermeiden. Diese Kapsel wird auch mit 2224 J vom errechneten Heizwert abgezogen.

$m_{f, \text{Holz}} \text{ (g)}$	$T_1 \text{ (K)}$	$T_2 \text{ (K)}$
0,3803	-0,442	0,315
0,1332	0,269	0,781

Daraus ergibt sich ein Heizwert der 1.Messung von **17,7 MJ/kg**.

Daraus ergibt sich ein Heizwert der 2.Messung von 17,3 MJ/kg.

Das zeigt, daß bei der 1.Messung eine vollständige Verbrennung ausgelöst wurde (s.Abs.4.3) und dieser Wert folglich genauer ist. Der Wert gleicht den gemessenen anderen Werten von Fichtenholz, die auch in Abschnitt 6.1/1 vermerkt sind.

Weiterhin ist festzustellen, daß sich die Diagrammwerte von 17.5 MJ/kg sehr den gemessenen von 17,7 MJ/kg nähern und so eine ausreichende Genauigkeit gegeben ist.

Meßprotokoll 6.2.2

Datum	Bearbeiter	Seite
30.07.00	Sandra Böhme	1

Ziel :

Es sollen der **Heizwert** des Produktgases, der **Volumenstrom**, der **Wirkungsgrad** und die **Leistung** (Wärmebelastung) der Versuchsanlage bestimmt werden.

Durchführung :

Die Produktgasanalyse aus Abschnitt 6.1 ist notwendig zur Bestimmung des Heizwertes. Sie wurde mit Hilfe eines in Abs.5.2.2 beschriebenen Gaschromatographen aufgenommen. Der Volumenstrom wird errechnet durch eine Geschwindigkeitsmessung mit Hilfe eines Flügelradanemometers mit Durchmesser 30 mm. Aus der Querschnittsfläche und der gemessenen Geschwindigkeit ergibt sich so der Produktgasvolumenstrom (s.Meßprotokoll 6.2.3). Daraus kann der Wirkungsgrad der Anlage berechnet werden. Die Leistung multipliziert sich aus Volumenstrom und Heizwert des Produktgases, normiert.

Meßergebnis :

Aus der [Analyse 6.1](#) ist durch den Raumanteil eines Gases der Heizwert zu ermitteln. Gleichung 3.3-01

Der Heizwert beläuft sich auf 0,28 MJ/kg, das entspricht 0,327 MJ/m³.

Dieser Heizwert ist aufgrund der erstellten Gasanalyse nicht vertretbar. Das Gas besteht zu 85 % aus Luft. Das bedeutet, daß bei der Entnahme an der Anlage Luft angesogen wurde und somit die Messung verfälscht hat. Deshalb wurde eine zweite Kohlenstoffanalyse vom Umweltlabor Jäger in Weimar durchgeführt, die ergab([s.Abb.5.2-01](#)):

- (I) 1,8 % CO
- (II) 3,0 % CO
- (III) 11,5 % CO
- (IV) 1,5 % CO (nach dem Gaswäscher)

Das kohlenstoffreichste Gas wurde an Stelle III, Heißgas direkt hinter dem Reaktor, entnommen. Ausgehend von diesem Wert erfolgte die Annahme, den Prozentsatz CO vom Stickstoff abzuziehen und den Heizwert und somit den Wirkungsgrad neu zu berechnen.

Heizwert des Produktgases mit 11.5 % CO: 1,31 MJ/kg (= 1,602 MJ/m³)

Dieser neu errechnete normierte Heizwert nähert sich anderen Untersuchungen, bei denen nach Tab.4.9-01 ein Heizwert unter 5 MJ/m³ zu finden ist.

Meßprotokoll 6.2.2

Datum	Bearbeiter	Seite
30.07.00	Sandra Böhme	2

Aus dem Meßprotokoll 6.2.1, den Werten des Produktgases und dem Volumenstrom aus Meßprotokoll 6.2.3 ergibt sich der Vergaserwirkungsgrad nach Gleichung 4.4-01

Wirkungsgrad nach 6.1/1: 13,5 %

Wirkungsgrad nach III: **62,8 %**

Der Wirkungsgrad nach III mit 62,5 % kann praktisch als real betrachtet werden, er liegt im Bereich wie in Abs.4.4.1 beschrieben, zwischen 55 und 88 %.

Das beweist, daß "Imbert" unter optimalen Bedingungen funktioniert und relativ gute Werte bezogen auf Tabelle 4.9-01 annimmt.

Weiterhin ergibt sich eine Vergaser-Leistung nach folgender Gleichung im Normzustand [33/S.45}. Sie ist auf den Heizwert der Gasanalyse III berechnet, da wie o.g. die Werte als real angenommen werden.

$$\dot{Q} = \dot{V}_N \cdot H_{u,N}$$

$$\dot{Q} = 0,0015 \frac{m^3}{s} \cdot 1,602 \frac{MJ}{m^3} \cdot 1000 \frac{kJ}{MJ}$$

$$\dot{Q} = 2,362 kW$$

Der Vergaser hat eine Leistung von 2,4 kW, was aufgrund des geringen Volumenstromes zu erwarten war. Der Prozeß muß aufgerüstet und automatisiert, damit auch ein Durchsatz größeren Umfangs realisiert werden kann.

Meßprotokoll 6.2.3

Datum	Bearbeiter	Seite
15.08.00	Sandra Böhme	1

Ziel :

Es soll eine **Druck- und Temperaturmessung** erfolgen, durch die das Normvolumen des in Abs.6.2.2 aufgeführten Produktgases bestimmt wird.

Durchführung :

Temperaturmessungen im Inneren des Reaktors sind nicht repräsentativ, da die Temperaturen einer zu hohen Schwankungsbreite unterliegen aufgrund instabiler Außentemperaturen und Windverhältnisse.

Die Temperatur wird am Gasaustritt entnommen (s.Abb.5.1-01, 5.2-01 Stelle III). Eine Druckbestimmung könnte auch vernachlässigt werden, da der Unterdruck im Reaktor maximal 300 Pa umfaßt und das am Volumenstrom praktisch nur eine geringe Änderung verursacht. Die durchgeführte Druckmessung erfolgte am selben Stutzen wie die Temperaturmessung (III).

Meßergebnis :

Messung	p in Pa	w in m/s	p _u in bar
1	-245	0,92	1,0108
2	-243	0,89	1,0108
3	-235	0,86	1,0109
4	-239	0,89	1,0109
5	-240	0,92	1,0109
6	-246	0,82	1,0108
7	-250	0,86	1,0108
8	-246	0,83	1,0108
9	-245	0,85	1,0108
10	-246	0,88	1,0108
Mittelwerte	-243,5	0,87	1,0108

Über diese Meßwerttabelle, auch dargestellt in 6.1/5, läßt sich der Volumenstrom des Produktgases nach der Kontinuitätsgleichung errechnen.

Die Temperatur am Auslaßstutzen betrug rund 32 °C. Sie schwankte nur linear der Außentemperatur um ± 1 K.

Meßprotokoll 6.2.3

Datum	Bearbeiter	Seite
15.08.00	SSandra Böhme	2

$$\dot{V} = A \cdot w$$

$$\dot{V} = \frac{\pi}{2} \cdot (0,031m)^2 \cdot 0,87m/s$$

$$\dot{V} = 0,0013m^3/s$$

Dieser Volumenstrom muß normiert werden, wozu die Betriebsbedingungen gemessen wurden. Über die allgemeine Gasgleichung wird in den Normvolumenstrom umgewandelt.

$$\dot{V}_N = \dot{V} \cdot \frac{T_B}{T_N} \cdot \frac{p_N}{p_u}$$

$$\dot{V}_N = 0,0013 \frac{m^3}{s} \cdot \frac{(273+32)K}{273K} \cdot \frac{1,01325bar}{1,0108bar}$$

$$\dot{V}_N = 0,0015m^3/s$$

Somit ergibt sich ein Normvolumenstrom von 5,4 m³/h. Damit ist er zu gering, um eine effektive Nutzung möglich zu machen.

Er wird zur Berechnung des Wirkungsgrades benötigt, welcher unter 6.1 und 6.3 näher erläutert ist.

Meßprotokoll 6.2.4

Datum	Bearbeiter	Seite
20.08.00	SSandra Böhme	1

Ziel :

Hier wird das **Betriebsverhalten** geprüft und dabei wurde ein **Brenn- und Motortest** durchgeführt.

Durchführung :

Wie in Abs.5.2.4 beschrieben wird ein Benzin-Generator an den Vergaser „gehängt“, nachdem das Gas einem Brenntest unterzogen wurde. Das erfolgt mit Hilfe eines Zündholzes und wird durch fotografische Aufnahmen belegt.

Meßergebnis :

Der Vergaser benötigt einen Anfahrvorgang von ca. $\frac{1}{2}$ h, wobei alle Klappen des Reaktors geöffnet sind, um einen Zug und somit höhere Temperatur zu entfachen, damit ein gleichmäßiger Abbrand stattfinden kann.

Nachdem die Klappen geschlossen sind, bis auf die Rüttelrost-Luft-Öffnung, kann man das Produktgas am Auslaßstutzen entnehmen. Direkt an diesem wurde der Brenntest durchgeführt. Er wird von [Abbildung 6.2-01](#) bestätigt.

Durch einen Gasschlauch wurde nun der Auslaßstutzen mit dem Motor gekoppelt. Im Gegensatz zum Benzin-Betrieb, wurde eine deutliche Abnahme der Umdrehungszahl festgestellt und der Motor „stotterte“. Er lief nur 6 Minuten, danach wandelten sich die Windverhältnisse und der Prozeß erstickte wieder im Ruß, siehe [Abbildung 6.2-03](#).

Es war das einzige Mal, wo der Vergaser seine Funktionstauglichkeit bewies. Daraus läßt sich die Schlußfolgerung ziehen: Es ist notwendig, den Vergaser speziellen Versuchen zu unterziehen, wobei auch der stationäre Vergasungsprozeß unter anhaltenden äußeren Bedingungen zu absolvieren ist. Ein Umbau des Motors erscheint notwendig. Dazu muß die Luftzufuhr geregelt und Voreinstellungen, wie Umdrehungszahl auf den Holzvergaser abstimmen, getätigt werden. Weiterhin sollte ein Kompressor und eine dazu geeignete Speichereinheit den Druck und somit ausreichende Gaszufuhr (Volumenstrom) gewährleisten, um den Motor effektiv betreiben zu können. Die [Abbildung 6.2-02](#) zeigt sämtliche Komponenten meiner „Vergasungsanlage“.

Abbildung 6.2-03: Rußabdruck der im Gas enthaltenen Partikel

6.3 Energie- und Massenbilanz des Imbert-Vergasers

Input

Brennstoff (atro)	6,9 kg
Feuchtigkeit (w)	8 %
Heizwert (wf)	17,68 MJ/kg
Holzkohle	1,5 kg
Luft	konnte nicht bestimmt werden
Prozeßenergie	keine

Betriebsdaten

Druck	1-1,5 bar
Temperatur	500–700 °C
Lastregelbereich	nicht funktionierender Rüttelrostdorn dient als Luftzufuhr, je nach „Einfuhrtiefe“ ist Prozeß regelbar (s.Abs.6.4)

Output

Gasaustrittstemperatur	30-40°C
Gaszusammensetzung	brennbar, real siehe Abschnitt 6.1, berechnet
Heizwert (normiert)	32,97 MJ/kg
Teer	300 g
Kondensat (wäßrig)	nicht meßbar, da es aus undichten Stellen austrat
Holzkohle	keine oder maximal 1 kg übrig
Asche	800 g
Prozeßwärmeverluste	an Umgebung und durch „Nichtnutzung“ der Abwärme

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad, in den Abschnitten 6.1 und 6.2.2 berechnet.

Gasanalyse 1:	13,5 %
Gasanalyse 2:	65,8 %

Bei den Gasentnahmen traten einige Probleme auf, einerseits bei der Produktion des Gases (instabiler Vergasungsprozeß) und andererseits gab es Dichtheitsprobleme an der Anlage. Die Stellen I-IV wurden gewählt, da sie versprachen, gasdicht zu sein. Da die Anlage schon Gas an Stellen des Reaktors ausläßt (Deckel, Luftklappe), weiterhin am Kühler und am Kondensatauffangbehälter, ist daraus zu schließen, daß Luft während der Teflonbeutel-Füllung angesogen wurde und daß das Gas deshalb einen hohen Luftanteil aufweist.

Ein kohlenstoffreiches Gas (III) ergab sich aus weiteren Kohlenstoffanalysen, mit denen eine Umrechnung auf diese Gasanalyse vorgenommen und damit einen wesentlich höheren Wirkungsgrad der Anlage erreichte wurde. Auch der Motortest bestätigte diesen Wirkungsgrad. Folglich liegt der elektrische Wirkungsgrad zwischen 15 und 20 %.

6.4 Schlußfolgerungen zu den Untersuchungen

Die erfolgten Untersuchungen sind ausreichend, um einen Vergaser zu charakterisieren. Der „Imbert“-Vergaser ist prinzipiell eine noch gut funktionierende Vergasungsanlage. Folgende Aspekte sollten zur Dauerfahrweise der Maschine noch behandelt werden:

- die Wärmeisolierung des Reaktors
- geeignete Teer- und Partikelabscheidung ggf. durch Zyklone
- Automatische Beschickung
- Gasspeicherung
- Einsatz einer z.B. volumenstromabhängigen Zuluftregelung
- Motorumbau auf Dual-Fuel-Modus

Aufgrund des Alters der Holzvergasungsanlage ist es aus umwelttechnischer Sicht nicht ratsam, die Anlage zu betreiben und aus wirtschaftlicher Sicht wäre es ein zu großer Aufwand, die Anlage zu rekonstruieren und nach heutigem Stand der Technik auszustatten.

Da die Kosten zum Umbau der Anlage sehr hoch liegen und die Anlage so nicht in Betrieb gehen darf, ist es nicht sinnvoll, die Wirtschaftlichkeit zu untersuchen.

7 Anhang

7.1 Formelzeichen, Symbole, Indizes, Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Erläuterung
$\dot{m}$	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
$\dot{V}$	$\frac{m^3}{s}, \frac{m^3}{h}$	Volumenstrom
λ	-	(lambda) Luftverhältnis bei der Verbrennung
$\varnothing$	m, ch, mm	Durchmesser
π	-	3,14159 = Ludolfsche Zahl, beschreibt Verhältnis des Umfangs eines Kreises zu einem Durchmesser
ΔH_R	$MJ / kmol$	Reaktionsenthalpie
η_V	%	Vergaser-Wirkungsgrad
A	m^2	Fläche
A_o	mm^2	Oberfläche
C	-	Kohlenstoff
c	$kJ / kmol \cdot K$	Spezifische Wärmekapazität
CH ₄	-	Methan
Cl	-	Chlor
CO	-	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid Information: Die Dichte beträgt 2g/l also ergibt 1 t gleich 500m ³ , d.h. ein Volumen eines Einfamilienhauses vom Keller zum Dachboden.
Geh.	$\frac{g}{Nm^3}, \frac{mg}{Nm^3}$ Gew.-% Vol.-% m.-%	Gehalt eines Elementes bezogen auf ein Gas im Normvolumen Angaben über den Gehalt in Gewichts-, Volumen- oder Massenprozentanteil eines bestimmten Elementes in einem Gefüge/Mischung
H ₂	-	Wasserstoff
H ₂ O	-	Wasserdampf, Wasser
H _u	kWh / kg MJ / kg kJ / Nm^3	Unterer Heizwert in Kilowattstunden bzw. Megajoule pro Kilogramm (bei festem Aggregatzustand), pro Normkubikmeter (beigasförmigem), (Normzustand bei T=0°C, p=1013mbar)
KW	-	Kohlenwasserstoffe
m	t, kg, g	Masse
M	$kg / kmol$	Molare Masse
Mio.	-	Million
Mrd.	-	Milliarde
N ₂	-	Stickstoff
O ₂	-	Sauerstoff
p	1bar = 10 ⁵ Pascal	Druck

p_u		Unterdruck
p_N		Normdruck
P_{el}	kW, MW	Elektrische Leistung
ppm	-	parts per million
Q	kW, MW	Wärmebedarf, -strom, -leistung
R	$J / kg \cdot K$	Gaskonstante, allgemein
s	m, cm, mm	Strecke, Länge
S	-	Schwefel
SKE	$1kgSK = 29400 J$	Steinkohleeinheit, Technische Energieeinheit
T	$^{\circ}C, K$	Temperatur
T_B		Betriebstemperatur
T_N		Normtemperatur
$t_{A, E}$	s, h	Zeit, Anfangs-, Endzeit
u	%	Holzfeuchte
V	m^3, mm^3	Volumen, Rauminhalt
w	m / s	Geschwindigkeit
w, x	%	Wassergehalt
wf	-	wasserfeucht

7.2 Erläuterungen

Wort	Erläuterung
Abb.	Abbildung
Absorption	Aufnahme von Gasen durch Flüssigkeiten
Adsorption	Durch Molekularkräfte bedingte Anlagerung von Gasen oder gelösten Stoffen an der Oberfläche fester Stoffe
aerob/anaerob	mit Luft/unter Luftausschuß
Alkali	chemische Stoffgruppe, die basisch wirkt
amorph	form-, gestalt-, strukturlos
aromatisch	chemische Verbindungen, vom Benzol abgeleitet
atro	absolut lufttrocken
biogen	durch Tätigkeit von Lebewesen entstanden, z.B. Kohle, Erdöl
Brennstoffzelle	Sonderform der galvanischen Elemente. Sie kann mit konventionellen festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen, so gespeist werden, daß die bei der Oxidation des Brennstoffs frei werdende Energie vorwiegend als Elektrizität anstatt als Wärme zur Verfügung steht.
bzw.	beziehungsweise
Cracken	Spaltung höher siedender KW in niedermolekulare, z.B. Verarbeitung von Erdöl in klopfestes Benzin
Diagr.	Diagramm
Dualfuel-Modus	Betrieb eines Motors mit zwei verschiedenen Antriebsstoffen
Emission	Abgabe von Schadstoffen an die Umwelt
etc.	et cetera = und so weiter
fossil	in erdgeschichtlicher Vergangenheit entstanden

ggf.	gegebenenfalls
Gravitation	Allgemeine Massenanziehung, wobei die Kraft zwischen Massen umgekehrt proportional zum Abstandsquadrat ist.
heterogen	ungleichartig
homogen	in durchgehend gleicher Beschaffenheit
Hrsg.	Herausgeber
In- und Output	Ein- und Ausgang, z.B. der Massenströme eines Systems
Inertgas	Bezeichnung für Gase, die gegen chemische Einflüsse resistent sind, z.B. Stickstoff nimmt nicht an Reaktion teil.
Klopffestigkeit	Eigenschaft flüssiger Treibstoffe, sich im Explosionsmotor nicht vorzeitig zu entzünden.
Knallgas	hochexplosives Gemisch aus O_2 und H_2 , verbrennt zu Wasser
Kolloid	Disperses (wellenlängenabhängig) System, bei dem die feinen Teilchen eine Durchschnittsgröße von $10^{-5} - 10^{-7} \text{ cm}$ haben.
Kondensat	Gasförmige Stoffe wandeln sich in Flüssigkeit, was als Kondensat bezeichnet wird.
Lichtabsorption	Aufnahme bestimmter Wellenlängen von Licht in Atomen
makro	in Wortzusammensetzung „groß“
meso	in Wortzusammensetzung „mittel“
Methanolsynthese	Vorgang zur Gewinnung von Methanol, Einfachster Vertreter der Gruppe der Alkohole
Methanzahl (MZ)	Die Klopffestigkeit wird durch die Methanzahl angegeben, es dient der Prüfung von Motoren.
mikro	in Wortzusammensetzung „klein“
monoklin	eine der Kristallklassen
o.g.	oben genannt
PEV	Primärenergieverbrauch
Phenylpropan	einwertige chemische Gruppe in organisch-chemischen Verbindungen
Polymerisation	Vereinigung von Moleküle zu einem langkettigen Produkt, z.B. Kunststoffe
Radikale	Atome, die mit ungepaarten Elektronen sehr reaktiv sind und bei Kettenreaktionen (Gasexplosionen) eine Rolle spielen.
s.Abs.	Siehe Abschnitt
Scale up	Temperaturprofil, was sich während der Vergasung im Reaktor ausbildet.
stationär	ortsfest, gleichbleibend
Substitution	Ersetzung, Austausch
Synthesegas	Gas mit dem Aufbau chemischer Verbindungen aus ihren Elementen oder einfacheren Verbindungen
TA	Technische Anleitung
Tab.	Tabelle
Thermochem. Konversion	Chemische Umwandlung unter Einfluß von Wärme
Trägheit	Eigenschaft jedes Körpers, ohne Einwirkung äußerer Kräfte in seinem Bewegungszustand zu verharren.
Valenzkraft	Wertigkeit, Bindigkeit, gibt an, wieviel H_2 -Atome ein Atom zu binden, zu ersetzen vermag
Verifizierung	etwas als richtig bestätigen
z.B.	zum Beispiel

7.3 Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, die vorliegende Diplomarbeit nur mit den aufgeführten Hilfsmitteln und Quellen selbst angefertigt zu haben.

Hiermit erkläre weiterhin, daß meine Diplomarbeit der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden kann.

Erfurt, den 23.08.2000

Sandra Böhme

7.4 Quellenverzeichnis

- [021] Informationszentrum Energie (Hrsg.): *Heizen mit der Biomasse Holz*. Karlsruhe 1998.
- [022] FEE (Hrsg.): *Katalog „Forschungs- und Entwicklungsbedarf zur Vergasung nachwachsender Rohstoffe“*. Berlin 1997.
- [023] Färber, C.: *Diplomarbeit „Optimierung der Vergasungsbedingungen“*. Fachhochschule Erfurt (unveröffentlicht) 1998.
- [024] Informationszentrum Energie (Hrsg.): *2.Fachsymposium „Stand der Holzvergaser-Technik mit Anpassung an den Stirlingmotor“*. Karlsruhe 1999.
- [025] Oettel, E.: *Final Report on Task1 „System Definition“ in the EU Joule-Project JOR3-CT95-0084 „Development of an Integrated Small Scale Combined Heat and Power Fixed Bed Gasification System Fuelled by Standart Gasifier Fuel“*. Berlin 1999.
- [026] Informationszentrum Energie (Hrsg.): *Physikalische und technische Feuerungsgrundlagen für den Brennstoff Holz*. Karlsruhe 1998.
- [027] Flaig, H.: *Biomasse – nachwachsende Energie*. Renningen-Malmsheim 1998.
- [028] Informationszentrum Energie (Hrsg.): *Technische Grundlagen zum Einbau von Hackschnitzelfeuerungen*. Karlsruhe 1998.
- [029] Rapp, S.W.: *Stand der Technik von Holzvergasanlagen*. Stuttgart 1998.
- [30] Walter, J.: *Vergasung von Biomasse in Kleinanlagen*. Bingen-Darmstadt 1994.
- [31] Marutzky, R.: *Energetische Verwertung von Holz und Holzabfällen durch Vergasung*. Braunschweig 1998.
- [32] Denger, Schöppe, Erich: *Stand der Vergasungstechnik für die thermische Nutzung von Biobrennstoffen am Beispiel Holz*. Duisburg 1998.
- [33] Hasler, Nussbaumer, Bühler: *Vergasung von Biomasse für die Methanol-Synthese*. Bern 1994.
- [34] Tidow, F.: *Diplomarbeit „Stand der Technik und Entwicklungsperspektiven“*. Universität Hamburg (unveröffentlicht) 1994.
- [35] Nussbaumer, Th.: *Anlagentechnik der Holzvergasung und offene Fragen beim Einsatz von Altholz*. Heizung, Klima 9(1990).
- [36] Bühler, R.: *Stand der Technik von Holzvergasanlagen*. Zürich 1994.
- [37] Bergakademie Freiberg (Hrsg.): *5.Internationale Fachtagung 1999 „Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe“*. Freiberg 1999.
- [38] Informationszentrum Energie (Hrsg.): *1.Fachsymposium „Stand der Holzvergasertechnik“*. Stuttgart 1998.
- [39] Klöckner, P.: *Vergasung von Biomasse zur Energieerzeugung*. Köln 1986.

-
- [40] Pyrogas VertriebsGmbH (Hrsg.): *Gaserzeugung aus Biomasse und Abfallstoffen*. Bergisch-Gladbach 2000.
 - [41] Informationszentrum Energie (Hrsg.): *Highlights aus der Holzvergasungstechnik*. Stuttgart 1998.
 - [42] Kaufmann: Vortrag „Vergasung von Holz und Gras in Festbettvergasern“. Zürich 1994.
 - [43] Mael, K.: *Die Rivalität zwischen Heißluftmaschine und Verbrennungsmotor als Kleingewerbemaschinen zw.1860 und 1890. Der Sieg des Verbrennungsmotors und seine Gründe*. VDI-Verlag Düsseldorf 1967.
 - [44] Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
 - [45] Bundesimmissionsschutzverordnung
 - [46] Kaltschmidt, Hartmann, Meier: *Energie aus Biomasse*. Hamburg, in Bearbeitung.
 - [47] Weber, F.O.: *Das Buch vom Generator*. Bern 1942.
 - [28] Deutsches Institut für Normung: *DIN 51900 (Prüfung fester Brennstoffe – Bestimmung des Brennwertes mit Bombenkalorimeter)*. Beuth, Berlin 1977.
 - [29] Marutzky, R.: *Erkenntnisse zur Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz und Spanplatten*. Braunschweig 1991.
 - [30] Bridgewater & Hogan: *Bio-Oil, Production & Utilization*. Berkshire, UK 1996.
 - [31] Tobler, J.: *Die Herstellung und Verwendung von Holzgas zu motorischen Zwecken*. Bern 1936.
 - [32] Wulzinger, P.P.: *Doktorarbeit „Untersuchungen zum Einsatz von Katalysatoren bei Flash-Pyrolyse von Holz“*. Universität Hamburg 1999.
 - [33] Cerbe, G.: *Grundlagen der Gastechnik*. Hanser-Verlag, München-Wien 1999.
 - [34] Guide 01, Pyrolysis Network (Hrsg.): *PyNE-Information*. Aston University, UK 1999.
 - [35] Deutsches Institut für Normung: *DIN 51731 (Prüfung fester Brennstoffe – Presslinge aus naturbelassenem Holz)*. Beuth, Berlin 1996.
 - [36] Ihle: *Tabellenbuch –Sanitär, Heizung, Lüftung*. Gehlenbuch, Bad Homburg 1996.
 - [37] [www.Kohlendioxid\(CO2\).htm](http://www.Kohlendioxid(CO2).htm): *DIW-Wochenbericht 6-99, CO₂-Emissionen in Deutschland*. 5.06.2000.
 - [38] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *DIN 51872 (Kondensatanalysen)*. Beuth, Berlin

Informationen und Kontaktadressen

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Osterfelder Str. 3
46047 Oberhausen
Tel.: 0208/8598-0
Internet: www.umsicht.fhg

Technische Bergakademie Freiberg
Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen
Institut für Wärmetechnik und Technische Thermodynamik
Ansprechpartner: Herr Morgenstern
Frau Dombois
Gustav-Zeuner-Straße 7
09596 Freiberg
Tel.: 03731/39-3490

Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V.
Ansprechpartner: Herr Oettel
Innovationspark Wuhlheide
Köpenicker Str. 325
12555 Berlin
Tel.: 030/65762706
Internet: www.FEE-eV.de

Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft
Institut für Holzchemie und chemische Technologie des Holzes
Ansprechpartner: Dr. Dietrich Meier
Dipl.Chem. Christian Gerdes
Leuschnerstr. 91
21027 Hamburg-Bergedorf
Tel.: 040/73962-517
E-Mail: dmeier@aixh0501.holz.uni-hamburg.de

PyNE
Energy Research Group, Aston University
Ansprechpartner: Claire Humphreys
Tony Bridgewater
Birmingham B4 7ET
Tel.: 0044-121-359 3611
Internet: www.ceac.aston.ac.uk/PyNE/

Informationszentrum Energie
Landesgewerbeamt Baden Württemberg
Ansprechpartner: Hr. Rapp
Karl-Friedrich-Str. 17
76133 Karlsruhe
Tel. 0721/926-4010