

Der Dampfvergasungsprozess – eine umfangreiche Parameterstudie

Dipl.-Ing. Günther Schuster; Dipl.-Ing. Klaus Weigl; Dipl.-Ing. Sebastian Kaiser;
Ao.Univ.Prof. Dr. Anton Friedl; Univ.Prof. Dr. Hermann Hofbauer

Institut für Verfahrens-, Brennstoff- und Umwelttechnik
Getreidemarkt 9/159
A-1060 Wien (Österreich)

Summary

A module for a fluidized bed biomass gasification based on chemical equilibrium is developed and integrated into an existing module library of a process simulation tool for thermal power plants. Thereby simulations on a biomass power plant with simple design (gasifier, district heating and gas turbine) are carried out. Equilibrium composition in product gas is compared to a composition adapted to the values of a laboratory plant. The effects of gasification temperature, water content of fuel and fuel composition on heating value, product gas composition and efficiencies of a simple thermal power cycle are examined. Finally fluidization with steam and product gas is compared.

1 Einleitung

Die Gaserzeugung aus Biomasse erlebt in den letzten Jahren einen technologischen Aufschwung, diese Entwicklung ist vor allem auch auf die Möglichkeit zurückzuführen, annähernd CO₂ - neutral elektrische Energie gewinnen zu können. Neben Technikums- und Pilotanlagen stellt die Prozess - Simulation einen wichtigen Teil der Forschungsarbeiten dar, da in Vorstudien die Einflüsse unterschiedlicher Prozessparameter auf die zu erwartenden Wirkungsgrade untersucht werden können.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit konzentrieren sich auf ein Gaserzeugungsverfahren, für welches im Technikumsmaßstab (100 kW_{th}) praktische Untersuchungen durchgeführt worden sind und zur Zeit 2 Pilotanlagen (2 und 8 MW_{th}) in Planung respektive in Bau sind. Bei diesem Verfahren erfolgt die endotherme Vergasung des Brennstoffes in einer stationären Wirbelschicht. Diese ist über einen Sifon mit einem Verbrennungsteil, der als zirkulierende Wirbelschicht ausgeführt ist, verbunden. Dort wird mit der mit dem Bettmaterial transportierte, unvergaste Brennstoffanteil (Kohlenstoff) nahezu vollständig verbrannt. Das dadurch aufgeheizte Bettmaterial wird ausgetragen, in einem Zyklon abgeschieden und

wieder in den Vergasungsteil gebracht. Daraus leitet sich der Name des Verfahrens ab: FICFB (Fast Internally Circulating Fluidized Bed) [1, 2, 3]. Die für die Vergasungsreaktion benötigte Wärme wird somit durch Verbrennen von mit dem Bettmaterial in den Verbrennungsteil gebrachtem Kohlenstoff und durch Zufeuern von Produktgas (oder Diesel im Fall der Technikumsanlage) erzeugt. Der Vergasungsteil wird mit Dampf, der Verbrennungsteil mit Luft fluidisiert und die Gasströme getrennt abgezogen. Dadurch wird ein annähernd stickstoffreies Produktgas mit Heizwerten über 10000 kJ/Nm³ (trocken) erzeugt. Weitere Vorteile dieser Prozessvariante sind die kompakte Bauweise und, durch die Verwendung von Dampf als Vergasungsmedium, ein geringerer Teergehalt des Produktgases im Vergleich zur Vergasung mit Luft.

2 Modellierung des Gaserzeugungsprozesses

2.1 Allgemeines

Die Modellierung des Gaserzeugers wird mit IPSEpro™ durchgeführt, einem kommerziellen Prozess - Simulationsprogramm, welches vor allem für den Bereich der thermischen Kraftwerkstechnik konzipiert ist [4]. Es handelt sich dabei um ein stationäres gleichungsorientiertes Simulationsprogramm mit modularem Aufbau, mit dem mittels eines Editors benutzerdefinierte Module erstellt werden können. Damit besteht die Möglichkeit ein Gaserzeugungsmodul zu entwickeln, das in eine bestehende Modellbibliothek integriert wird. Beim Gaserzeugungsmodul wird chemisches Gleichgewicht im Produktgas angesetzt, da für eine genauere Modellierung eine detaillierte Beschreibung der Anlagengeometrie und der fluiddynamischen Verhältnisse im Gaserzeuger erforderlich sind und damit die Ergebnisse nur auf eine bestimmte Vergasergeometrie zutreffen. Bei den Berechnungen wird zusätzlich zur Gaserzeuger Erzeugung von elektrischem Strom mit einer Gasturbine und Abgabe von Fernwärme betrachtet.

2.2 Beschreibung der Gaserzeugungsmodule

Entsprechend dem FICFB - Prozess wird der Gaserzeuger in einen Vergasungsteil und einen Verbrennungsteil aufgespaltet. Zwischen den beiden Modulen zirkuliert Bettmaterial, wobei das in den Verbrennungsteil eintretende Bettmaterial einen Teil des Kohlenstoffs der Biomasse enthält. Gemäß Messungen in der Technikumsanlage wird dieser Anteil mit 15 m% des Gesamtkohlenstoffs im Brennstoff angenommen. Für die Berechnung des Gleichgewichtes werden die Komponenten CH₄, CO, CO₂, H₂ und H₂O im Produktgas berücksichtigt.

Da für alle Variationen ein Überschuss an Vergasungsmedium angenommen wird, bleibt im Gleichgewicht kein Kohlenstoff zurück; zusätzlich wird davon ausgegangen, dass der Kohlenstoffanteil, der mit dem Bettmaterial den Vergasungsteil verlässt, nicht an den Gleichgewichtsreaktionen teilnimmt. Eine Systemanalyse ergibt, dass das Gleichgewicht durch drei Teilmassenbilanzen (je für C, H und O) und durch zwei Gleichungen für das chemische Gleichgewicht (Methanzerersetzung, homogene Wassergasreaktion) beschrieben werden kann.

In der Enthalpiebilanz über den Vergasungsteil wird der Brennstoff in Form der Standardbildungsenthalpie h^f gemäß

$$h_{Brsst}^f = b \cdot h_{CO_2}^f + c \cdot h_{H_2O}^f - (H_u + a \cdot h_{O_2}^f) \quad (1)$$

berücksichtigt. Der Heizwert H_u wird nach der Gleichung von Boie [5] ermittelt, die Koeffizienten a, b und c ergeben sich aus der Verbrennungsrechnung. Im Modul für den Verbrennungsteil ist die klassische Verbrennungsrechnung implementiert. Sowohl im Vergasungsteil wie auch im Verbrennungsteil ist ein Wärmeverlust berücksichtigt, dieser wird mit je 2,5% der thermischen Leistung (Massenstrom \times Heizwert des Brennstoffs) in den Gaserzeuger angenommen.

2.3 Beschreibung des Prozesses

Der Prozess wird für 10 MW thermische Leistung in den Gaserzeuger ausgelegt. Als Vergasungstemperatur für die Basisvariante werden 800°C festgelegt. In Abbildung 1 ist das Fließbild des Prozesses dargestellt. Die Vergasungszone wird mit 400°C heißem Dampf fluidisiert (0,20 kg/kg feuchtem Brennstoff). Zur Verdampfung und Überhitzung des Fluidisierungsdampfes wird Produktgas nach dem Gaserzeuger verwendet (*WT 1*). Nach dem Wärmetauscher *WT 1* wird das Produktgas unter Fernwärmeauskopplung auf 100°C abgekühlt (*FW 1*), danach gereinigt (*RE*), in einem dreistufigen Verdichter mit Zwischenkühlung komprimiert (*V 1*) und in eine Gasturbine (*GT*) mit rekuperativer Luftvorwärmung (*WT 4*) geleitet. Bei der Gasturbine werden Brennkammer, Turbine, Rekuperator und Luftverdichtung (dreistufig mit Zwischenkühlung) mit jeweils eigenen Modulen simuliert. Die Luftüberschusszahl in der Gasturbine wird so gewählt, dass sich eine Turbineneintrittstemperatur von 1150°C einstellt; der Turbineneintrittsdruck beträgt 12 bar (absolut). Im Rekuperator (hier als Gegenstromwärmetauscher ausgeführt) wird eine Grädigkeit von 100°C angenommen. Abgas aus der Verbrennungszone der Gaserzeugungseinheit wird benutzt um rückgeführtes Produktgas zu erwärmen (auf 400°C) und um die Verbrennungsluft (auf 300°C) vorzuwärmen. Anschließend wird es mit dem

Abgas aus der Gasturbine gemischt und unter weiterer Fernwärmeauskopplung auf 90°C

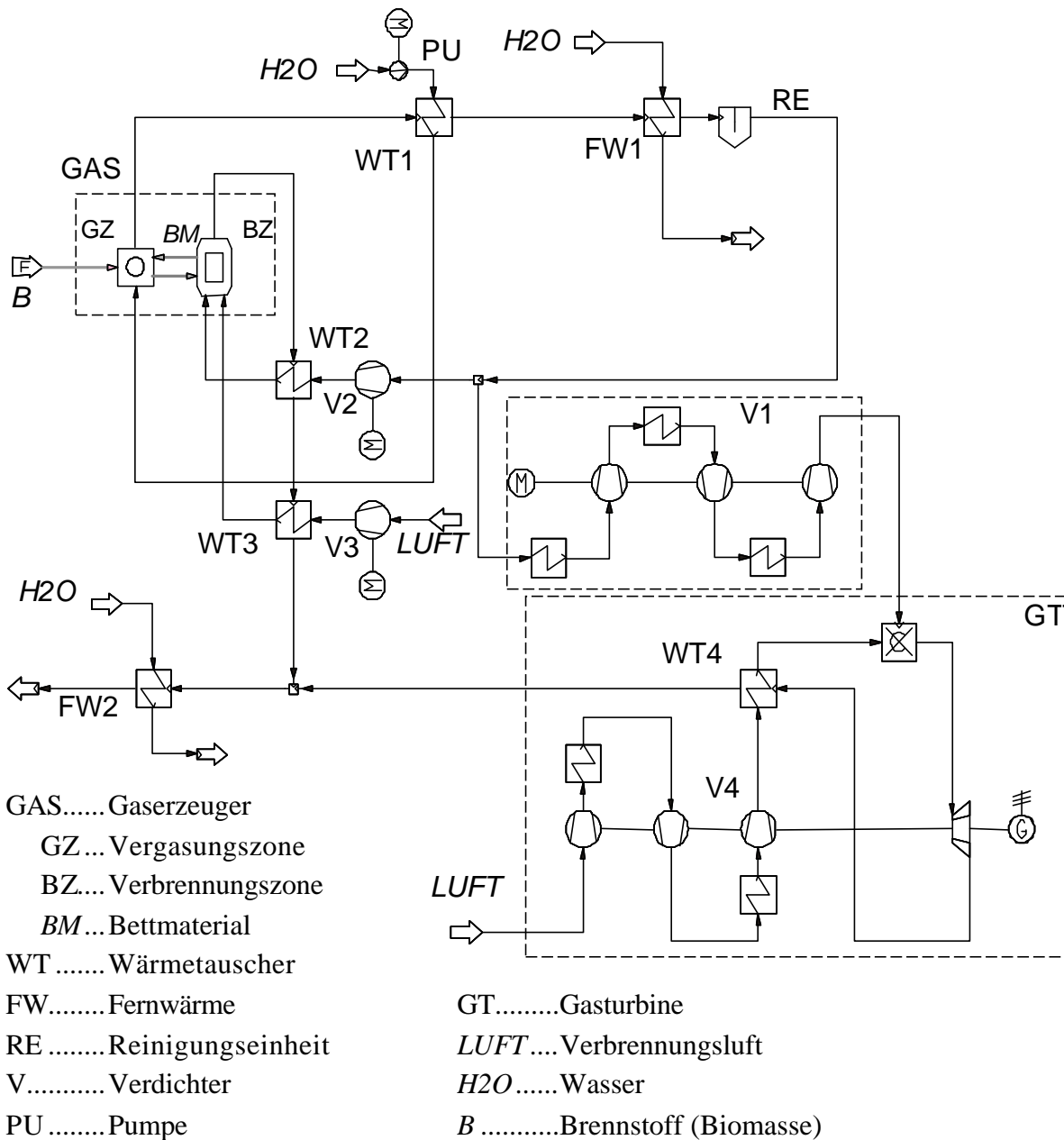


Abbildung 1: Fließbild des Prozesses zur Biomasse - Vergasung

(45°C über Sättigungstemperatur) abgekühlt (FW 2).

2.4 Brennstoff

Für die Basisvariante wurde Fichtenholz herangezogen. Die Daten hierfür sind aus [6] entnommen. Immediatanalyse und Elementaranalyse sind in Tabelle 1 angeführt. Der Wassergehalt (bezogen auf den feuchten Brennstoff) wird mit 20 m% angenommen.

Tabelle 1: Immediat- und Elementaranalyse des Brennstoffs

Immediatanalyse		Elementaranalyse (waf)	
Heizwert H_u	14235 kJ/kg	C	51,06 m%
Brennwert H_o	15727 kJ/kg	H	5,75 m%
Wassergehalt	20 m%	O	43,08 m%
Aschegehalt (wf)	0,77 m%	N	0,11 m%

3 Ergebnisse der Basisvariante

Die Ergebnisse aus der Basisvariante sind in Tabelle 2 angeführt. Die Wirkungsgrade h sind jeweils bezogen auf die thermische Leistung in den Gaserzeuger, der elektrische Wirkungsgrad berücksichtigt den Eigenverbrauch durch Pumpen und Verdichter, der Gesamtwirkungsgrad bezieht die Fernwärmeabgabe mit ein und der Kaltgaswirkungsgrad beschreibt den Anteil der thermischen Leistung des Produktgases, der in die Gasturbine geleitet wird.

Tabelle 2: Ergebnisse der Basisvariante

		Einstellung des Gleichgewichtes	angepasste Zusammensetzung
Produktgaszusammensetzung (feucht)	CH ₄	0,20 Vol%	7,83 Vol%
	C ₂ H ₆		2,07 Vol%
	CO	34,97 Vol%	37,50 Vol%
	CO ₂	9,40 Vol%	11,36 Vol%
	H ₂	55,38 Vol%	41,16 Vol%
	H ₂ O	12,07 Vol%	25,78 Vol%
Heizwert des Produktgases (feucht)		13349 kJ/kg 9196 kJ/Nm ³	12173 kJ/kg 9870 kJ/Nm ³
Volumenstrom des feuchten Produktgases bezogen auf feuchten Brennstoff		1,13 kg/kg 1,64 Nm ³ /kg Anteil davon in die Gasturbine 66,0 %	1,13 kg/kg 1,38 Nm ³ /kg 76,0 %
Wirkungsgrade	$h_{\text{elektrisch}}$	19,7 %	20,9 %
	h_{Kaltgas}	69,9 %	72,9 %
	h_{Gesamt}	61,5 %	61,2 %

Die Berechnung wird, neben der Gleichgewichtszusammensetzung, auch mit einer Zusammensetzung, die an die Technikumsanlage (mit relativ kurzer Verweilzeit des Produktgases) angepasst ist, durchgeführt. Somit wird die Bandbreite, die verschiedene

Gaserzeuger ergeben können, von Einstellung des Gleichgewichts bis hin zu Anlagen, bei denen die Verweilzeit des Produktgases nicht zur Einstellung des Gleichgewichtes ausreicht, abgedeckt.

Wie zu sehen ist, unterscheiden sich die Konzentrationen – vor allem in den CH_4 und H_2 Konzentrationen – teilweise erheblich, der Einfluß auf den elektrischen Nettowirkungsgrad und auf den Kaltgaswirkungsgrad liegt jedoch nur bei wenigen Prozentpunkten. Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf das Gleichgewichtsmodell.

4 Einfluß der Vergasungstemperatur

In Abbildung 2 sind Produktgaszusammensetzung (trocken) und Heizwert des Produktgases in Abhängigkeit von der Vergasungstemperatur dargestellt. Über 800°C liegt kaum mehr Methan im Gleichgewicht vor. Der Heizwert des feuchten Produktgases ist nahezu konstant (zwischen 9200 kJ/Nm^3 und 9400 kJ/Nm^3), der Heizwert des trockenen Produktgases bewegt sich zwischen 10400 kJ/Nm^3 und 10800 kJ/Nm^3 .

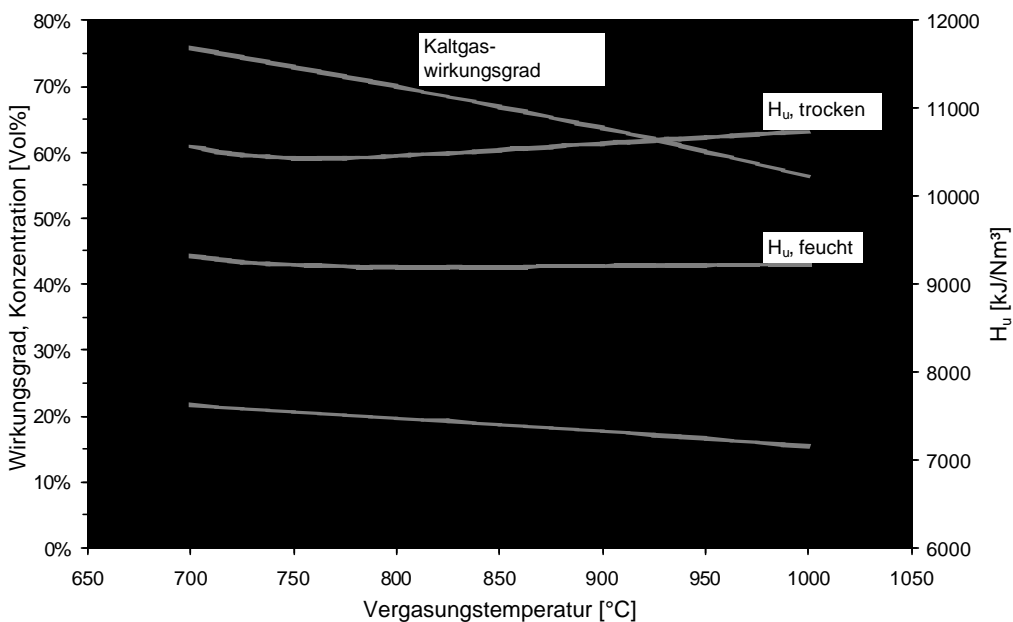


Abbildung 2: Variation der Vergasungstemperatur

Die Auswirkung der Temperatur auf den Heizwert ist gering, jedoch nimmt der Kaltgaswirkungsgrad und damit der auch der elektrische Wirkungsgrad mit steigender Vergasungstemperatur ab. Dies ist darin begründet, dass bei höheren Temperaturen das Produktgas mehr aufgeheizt werden muss und daher mehr Produktgas in den Verbrennungsteil des Gaserzeugers zurückgeführt werden muss, um die Vergasungstemperatur zu erreichen.

5 Einfluß des Wassergehaltes des Brennstoffs

Der Einfluß vom Wassergehalt der Biomasse auf Produktgaszusammensetzung (trocken), Heizwert und Kaltgaswirkungsgrad ist in Abbildung 3 zu sehen. Das Wasser in der Biomasse verschiebt das Gleichgewicht im Produktgas in Richtung H_2 und CO_2 ; CO und CH_4 nehmen ab. Höhere Wassergehalte verursachen ein Absinken des Kaltgaswirkungsgrades. Das ist darauf zurückzuführen, dass das Wasser aus dem Brennstoff verdampft werden muss und daher mehr Produktgas in den Verbrennungsteil zurückgeführt werden muss. Bei einem Wassergehalt von ungefähr 68% muss sämtliches Produktgas wieder in den Gaserzeuger zurückgeführt werden, um den Vergasungsprozess aufrecht zu erhalten, wodurch der Kaltgaswirkungsgrad auf Null absinkt und somit auch keine elektrische Energie erzeugt werden kann (diese theoretische Extrapolation stellt den Fall einer reinen Verbrennung dar).

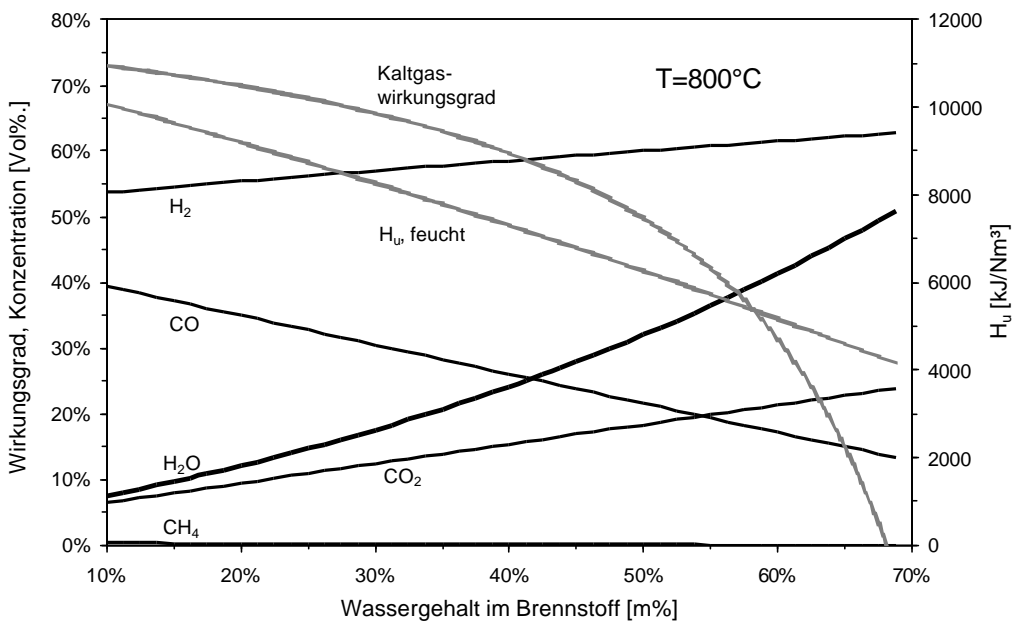


Abbildung 3: Variation des Brennstoffwassergehaltes

6 Einfluß der Brennstoffzusammensetzung

Der Einfluß von unterschiedlichen Brennstoffzusammensetzungen auf den Heizwert H_u und den Kaltgaswirkungsgrad (Abbildung 4) wird auf die Weise untersucht, dass einerseits der Sauerstoffgehalt (in m%, waf) und andererseits das C/H - Verhältnis (m% / m%, waf) variiert wird. Diese Variation erfolgt in einem weiten Bereich, um eine große Anzahl von möglichen Brennstoffen abzudecken: im Sauerstoffgehalt von 0 bis 60 m% und beim C/H - Verhältnis von 3 (entspricht reinem Methan) bis 100 (annähernd Zusammensetzung von Koks). Auf

Grund des daraus folgenden stark variierenden Bedarfes an Vergasungsmedium wird das Verhältnis aus Kohlenstoff im Brennstoff zu Wasser, das in die Gaserzeugungszone – aus Brennstoff und durch Fluidisierung – gebracht wird (H_2O/C - Verhältnis) konstant belassen. Aus der Simulation mit den Parametern der Basisvariante ergibt sich ein Wert von 0,98 kg/kg. Hier muss berücksichtigt werden, dass in diesem Fall die Vergasergeometrie nicht als konstant angenommen werden kann.

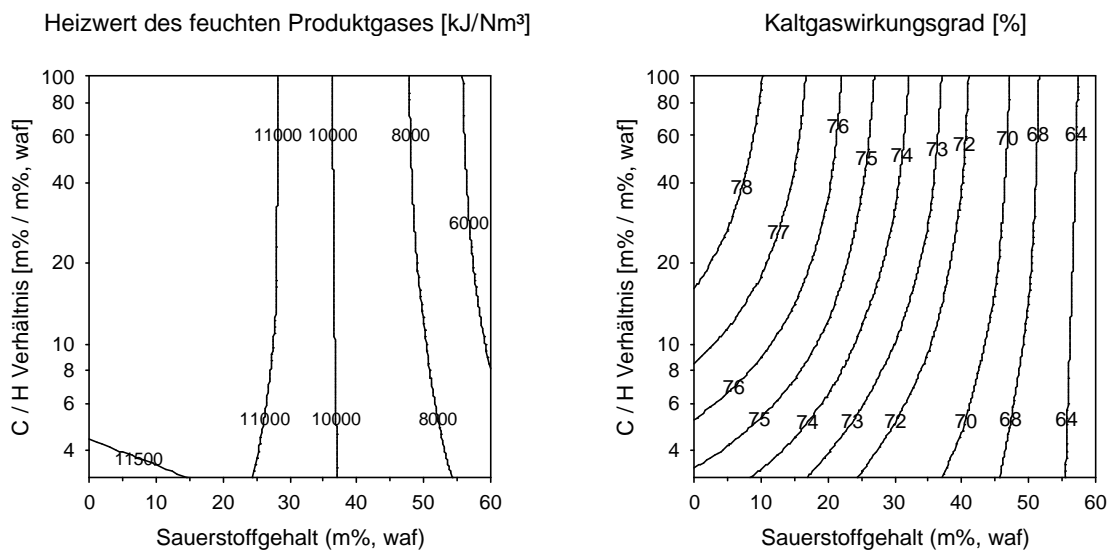


Abbildung 4: Variation der Brennstoffzusammensetzung

Je größer das C/H - Verhältnis ist, desto höhere Kaltgaswirkungsgrade werden erreicht. Das lässt sich dadurch erklären, dass bei höheren C/H - Verhältnissen auch mehr Kohlenstoff aus der Biomasse direkt in die Verbrennungszone transportiert wird und somit weniger Produktgas in den Verbrennungsteil des Gaserzeugers zurückgeführt werden muss, was thermodynamisch von Vorteil ist.

7 Fluidisierung mit Produktgas als Alternative zur Dampffluidisierung

Bei hohem Wassergehalt des Brennstoffs ist als Alternative zur Fluidisierung mit Dampf auch eine Fluidisierung mit Produktgas denkbar; das für den Vergasungsprozess notwendige Wasser stammt dabei nur aus dem Brennstoff. Der Vorteil dieser Variante liegt darin, dass kein Verdampfer für das Fluidisierungsmedium nötig ist, wodurch die Investitionskosten niedriger gehalten werden können. Wie sehr diese Alternative auch energetische Vorteile bringt, soll im folgenden aufgezeigt werden.

Eine solcher Prozess könnte so aufgebaut sein, dass abgekühltes Produktgas nach der Reinigung verdichtet wird, in einem Wärmetauscher mit heißem Produktgas nach dem

Gaserzeuger (wiederum auf 400°C) erhitzt wird und in die Vergasungszone des Gaserzeugers geleitet wird. Der Massenstrom an zurückgeführtem Produktgas wird so gewählt, dass ein gleich großer Volumenstrom wie bei der Dampffluidisierung gewährleistet ist (0,54 pro kg feuchtem Brennstoff). Sämtliche anderen Parameter entsprechen jenen der Dampffluidisierung.

Abbildung 5 zeigt den Vergleich zwischen den beiden Varianten (Fluidisierung mit Dampf beziehungsweise mit Produktgas) in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Brennstoffs. Für die Vergasungsreaktion ist eine ausreichende Menge an Vergasungsmedium nötig. Aus diesem Grund ist im Diagramm zusätzlich das Verhältnis von in der Vergasungszone wegreaktiertem Wasser zum Gesamteintrag an Wasser dargestellt. In der Basisvariante erreicht man bei einem Wassergehalt von 20 m% im Brennstoff ein Verhältnis von 0,60 (Punkt 1). Bei der Produktgasfluidisierung benötigt man für dieses Verhältnis einen Wassergehalt im Brennstoff von 30,6 m% (Punkt 2).

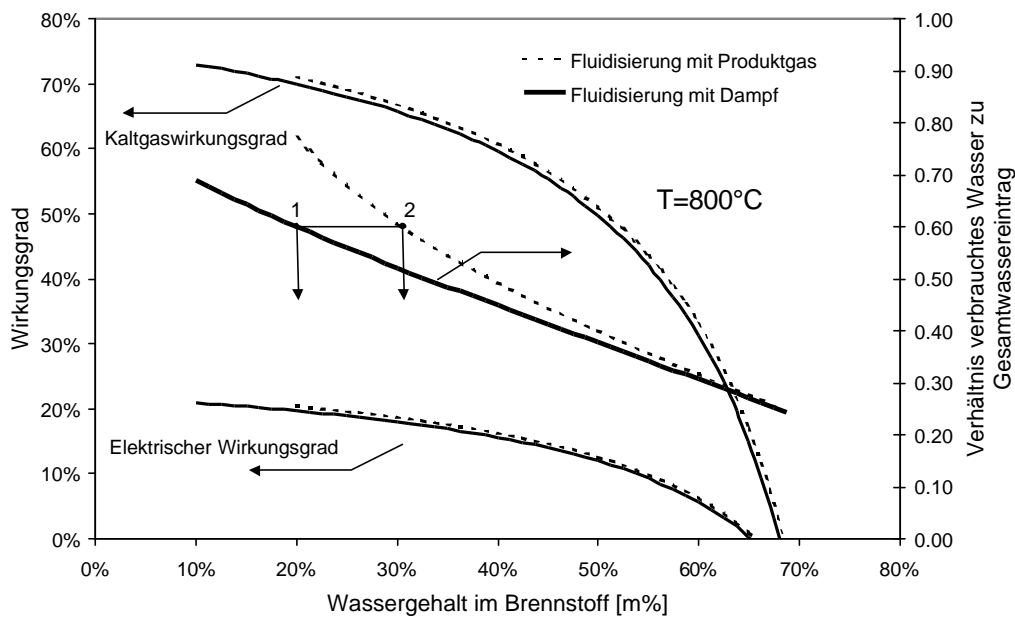


Abbildung 5: Vergleich von Fluidisierung mit Produktgas und mit Dampf

Wie zu sehen ist, liegt der Kaltgaswirkungsgrad – in einem Bereich im Brennstoffwassergehalt zwischen 20 m% und 50 m% – bei der Fluidisierung mit Produktgas um 1,1 bis 1,4 Prozentpunkte und der elektrische Wirkungsgrad um 0,65 bis 0,75 Prozentpunkte über jenen bei Fluidisierung mit Dampf.

8 Zusammenfassung

Für Gaserzeugung aus Biomasse in einer Dampfwirbelschicht wird in einem Prozesssimulationsprogramm ein Modul erstellt, welches die Produktgaszusammensetzung bei gegebener Temperatur über das chemische Gleichgewicht berechnet. Dieses Modul wird in eine bestehende Modulbibliothek für thermische Kraftwerkstechnik integriert und damit eine einfache Kraftwerksschaltung mit Gaserzeuger, Fernwärmeauskopplung und Gasturbine berechnet.

Bei der präsentierten Schaltung sind bei 20 m% Wassergehalt im Brennstoff ein elektrischer Wirkungsgrad von ungefähr 20% und ein Kaltgaswirkungsgrad von zirka 60% zu erwarten. Die mit der Gleichgewichtszusammensetzung berechneten Ergebnisse werden mit einer Zusammensetzung, die an die Technikumsanlage angepasst ist, verglichen. Weiters werden die Einflüsse von Vergasungstemperatur, Wassergehalt im Brennstoff und Brennstoffzusammensetzung auf Heizwerte, Produktgaszusammensetzung und Wirkungsgrade untersucht.

Ein Vergleich zu einer Prozessvariante, bei der anstatt mit Dampf mit Produktgas fluidisiert wird, zeigt, dass diese Variante im Kaltgaswirkungsgrad eine Verbesserung von 1 bis 2 Prozentpunkte bringt.

9 Literatur

- /1/ Hofbauer, H.; Stoiber, H.; Veronik, G.: Gasification of Organic Material in a Novel Fluidization Bed System, Proc. of the 1st SCEJ Symposium on Fluidization, Tokyo 291-299, 1995
- /2/ Fleck, T.; Hofbauer, H.; Rauch, R.; Veronik, G.: The FICFB Gasification Process, Proc. Of the IEA Bioenergy Meeting Banff (Canada), 1996
- /3/ Fercher, E.; Hofbauer, H.; Fleck, T.; Rauch, R.; Veronik, G.: Two Years Experience with the FICFB-Gasification Process, 10th European Conference and Technology Exhibition, Würzburg, 1998
- /4/ Perz, E.: A Computer Method for Thermal Power Cycle Calculation, ASME-Paper IGTI GT-351, 1990
- /5/ Netz, H.: Verbrennung und Gasegewinnung bei Festbrennstoffen. 1. Ausgabe, Technischer Verlag Resch KG, Gräfelfing 1982
- /6/ Reisinger, K.; Herger, M.; Hofbauer, H.; Haslinger, C.: BIOBIB - a Database for Biofuels. In: THERMIE - Conference: Renewable Energy Databases, Harwell (United Kingdom), 1996

05.06.2000, 7:55:02