Die Erzeugung teerfreien Gases in einem Gleichstrom-Festbett-Vergaser *

M. J. Groeneveld, P. E. Gellings und J. J. Hos

Energy Equipment Engineering B.V., Oldenzaal, Niederlande

In der vorliegenden Arbeit werden die Grundbegriffe, der Maschinenbau und die Praxis der Gleichstrom-Festbett-Vergasung beschrieben. Für das technische Verfahren ist es wichtig, den Vergaser so zu entwerfen, daß er teerfreies Gas produziert. Basierend auf den Eigenschaften des Brennstoffs, an die der Glutherd entsprechend angepaßt werden muß, wird im Falle höherer Kapazitäten und feinen Brennstoffs ein kreisrunder Brennkammer-Hals angewandt. Es werden Modelle zur Berechnung der maximalen Kapazität unter Berücksichtigung der Teerproduktion und für den Entwurf der Reduktionszone angegeben. Für den Maschinenbau wird über die Brennstoffbehandlung, die Auswahl des Materials, die Beseitigung der Asche, über Behandlung und Gebrauch des Gases und die Sicherheitsaspekte berichtet. Der Stand der praktischen Anwendung von Vergasern wird dargestellt. Aus der wirtschaftlichen Bewertung folgt, daß die Vergasung eine rentable Möglichkeit sowohl für die direkte Beheizung als auch für die Wärme/Kraft-Kopplung ist.

Production of a tar-free gas in an annular co-current moving bed gasifier

This paper discusses the fundamentals, mechanical engineering and commercialisation of co-current moving bed gasifiers. The process engineering aspect stresses that gasifiers can be designed to obtain tar-free product gas. Based on the fuel properties, the fire hearth has to be adjusted, with an annular throat concept applied in the case of larger capacities and fine fuel. Models are presented for maximum capacity calculations of gasifiers with respect to tar production and for reduction zone design. From a mechanical engineering aspect fuel handling, materials selection, ash removal, gas treatment and utilization as well as safety risks are discussed. The present state of gasifier commercialization is given. The economic evaluation leads to the conclusion that gasification is a viable option for direct heating and co-generation.

1 Einleitung

Gleichstrom-Festbett-Vergaser werden seit Anfang dieses Jahrhunderts zur Vergasung von Biomasse eingesetzt und auch heute noch sind diese Reaktor-Typen im Vergleich mit anderen Vergasertypen durchaus interessant. Ihre Hauptvorteile sind darin zu sehen, daß der Reaktor einfach in Handhabung und Kontrolle ist und daß ein teerfreies Gas hergestellt wird, das zur Kraft- und/oder Wärmeerzeugung benutzt werden kann.

Die klassischen Konstruktionen sind jedoch für die Vergasung von Brennstoffen mit kleiner Teilchengröße oder hohem Aschengehalt ungeeignet und sie sind nur schwer zu vergrößern. Das derzeitige Wiederaufleben des Interesses an der Biomasse-Vergasung macht die Nutzung von Brennstoffen, variierend in Teilchengröße, Feuchtigkeit und Aschengehalt etc. vorstellbar. Zur Vergasung dieser Brennstoffe muß für die Vergaser-Konstruktion die Analyse der physikalischen und chemischen Vorgänge während der Vergasung berücksichtigt werden. Die Analyse führt zu dem Brennkammer-Hals-Konzept, das die Herstellung teerfrei arbeitender Vergaser für viele Brennstoffarten mit Kapazitäten von 10 ... 1 000 kg/h ermöglicht.

Die Vergasung selbst ist ein komplexer Prozess. Der feste Brennstoff trocknet, verschwelt und reagiert mit O_2 , CO_2 und H_2O wie nachstehend in vereinfachter Form dargestellt:

Im Vergaser (Bild 1) findet man die einzelnen Schritte des Prozesses in verschiedenen Zonen, die sich normalerweise überlappen. Der Festbrennstoff wird oben in den Vergaser eingeführt und strömt nach unten, wobei er zunächst in Holzkohle und schließlich in Asche umgewandelt wird.

Das Trocknen und die Schwelgasbildung finden während des Wärmeaustausches mit der Oxidationszone in der Nähe des Lufteinlasses statt. In der Oxidationszone haben die Re-

Bild 1. Schema des Gleichstrom-Festbett-Vergasers
Fig. 1. Co-current moving bed gasifier

* Die Untersuchungen wurden größtenteils an oder in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Twente, Enschede, Niederlande, durchgeführt. Die augenblickliche Entwicklungsarbeit wird von der Maschinefabrik Oldenzaal und dem niederländischen Wirtschaftsministerium finanziert.

aktionen mit Sauerstoff einen starken Anstieg der Temperatur bis ca. 1700 K zur Folge. Abgesehen von der Wärmeerzeugung ist die Umwandlung aller kondensierbaren, organischen Produkte (Teer) aus der Verschwelungszone eine wichtige Funktion der Oxidationszone. In einem richtig entworfenen Vergaser sind Holzkohle und ein heißes Gas, das reichhaltig an CO_2 und H_2O ist, jedoch keinen Teer enthält, die Produkte. In der Reduktionszone wird die fühlbare Wärme der heißen Holzkohle und Gase in der endothermen Reaktion von CO_2 und H_2O mit Kohlenstoff absorbiert. Folglich wird ein Gas hergestellt, das N_2 , H_2 , CO_2 , CO , H_2O und etwas CH_4 enthält.

Die Beschreibung von klassischen Vergasern kann aus der Literatur entnommen werden.

Im folgenden werden die Grundbegriffe der Verfahrenstechnik kurz zusammengefaßt und durch die neuesten Ergebnisse, in bezug auf die Verschwelungszone, erweitert. Weiter werden Aspekte des Maschinenbaus diskutiert und schließlich ein Vergaser für verschiedene Zwecke und Kapazitäten beschrieben.

2 Grundbegriffe der Verfahrenstechnik

Bei vorausgesetztem chemischem Gleichgewicht und Wärmeverlust können thermodynamische Modelle benutzt werden, um aus den Brennstoffeigenschaften die Zusammensetzung der Produktgase zu berechnen. Für den Entwurf des Vergasers sind komplexere Modelle, welche die Geschwindigkeit der verschiedenen chemischen und physikalischen Prozesse einbeziehen, erforderlich.

2.1 Verschwelung

Nachdem ein Brennstoffteilchen getrocknet ist, beginnt es zu verschwelen. Organische Gase und Flüssigkeiten werden herausdestilliert und der feste Rückstand erreicht einen höheren Kohlenstoffgehalt. Um ein teerfreies Produktgas zu erhalten, muß der Verschwelungsprozeß in der Oxidationszone, im sog. Halsteil, abgeschlossen sein. Gelangen unvollständig verschwelte Teilchen in die Reduktionszone, entsteht Teer, der zum größten Teil nicht umgewandelt im Produktgas verbleibt. Teer, der in oder über dem Halsteil produziert wurde, wird gekrackt, und/oder verbrannt, wenn der Lufteinlass und der Hals richtig entworfen sind.

Der Verschwelungsprozeß großer Teilchen wird, sowohl durch die Kinetik der Verschwelung als auch durch das Eindringen von Wärme in das Teilchen gesteuert. Kinetische Messungen für Holz wurden umfassend veröffentlicht. Für Holz, Papier und DRDF (= Densified Refuse Derived Fuel)¹ wurden thermogravimetrische Analysen durchgeführt. Die Resultate, basierend auf einer einfachen Reaktions-Geschwindigkeitskonstanten 1. Ordnung:

$$\frac{\delta m}{\delta t} = k(m - m_e) \exp(-E/RT)$$

sind in Bild 2 dargestellt.

¹ Pelletierter, aus Müll gewonnener Brennstoff

a	Fourier-Zahl	m_e	Endmasse, kg
d_p	Teilchen-Durchmesser, m	R	Gasgehalt, J/mol K
E	Aktivierungsenergie, J/mol	t	Zeit, s
k	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante	T	Temperatur, K
		x, y, z	Raumkoordinaten, m
		X	Umwandlung
m	Masse, kg	Z	Entfernung vom Lufteinlaß, m
m_0	Anfangsmasse, kg

Bild 2. Arrhenius-Diagramm nach thermogravimetrischer Analyse
Fig. 2. Arrhenius-plots from TGA measurement

Bild 3. Berechnete und experimentell ermittelte Verläufe bei der pyrolytischen Umwandlung von Holzteilchen in einer Thermowaage
Fig. 3. Calculated and experimental pyrolysis conversion for wood particles heated up in a thermobalance

Obgleich die Wärmeeindringung ziemlich kompliziert ist, u. a. aufgrund sich verändernder physikalischer Eigenschaften während der Umwandlung, wird hier eine einfache, dreidimensionale Fourier-Wärme-Eindringungs-Funktion angenommen:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right)$$

Die thermische Diffusivität wird somit hinsichtlich Umwandlung, Richtung und Erwärmungsgeschwindigkeit als konstant angenommen.

In Bild 3 werden Ergebnisse für Holzschnitzel in einer Thermowaage gezeigt. Die Temperatur der Außenseite des

Teilchens steigt linear mit der Zeit an. Die Gewichtsabnahme wurde sowohl experimentell gemessen als auch mittels einer Integration über die örtliche Umwandlung innerhalb des Teilchens errechnet. Die thermische Diffusivität in der Fourier-Gleichung wird durch die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Dieser numerische Wert trifft für verschiedene Erwärmungsgeschwindigkeiten und Teilchengrößen zu und hängt nur vom Brennstofftyp ab.

Der Temperaturanstieg für ein Teilchen innerhalb des Vergasers verläuft jedoch nicht, wie in thermogravimetrischen Experimenten, linear. Aus experimentellen Temperaturmessungen über der Oxidationszone und der Teilchengeschwindigkeit, kann das Temperaturprofil der Außenseite des Teilchens wie folgt beschrieben werden:

$$T = T_0 + \alpha \exp(\beta t).$$

Die Werte für α und β sind mit der Methode der kleinsten Quadrate mit experimentell gemessenen Temperaturen und Feststoffströmungen berechnet. Die örtliche Umwandlung innerhalb eines Teilchens kann nur anhand einer analytischen Lösung durch Fourier-Analyse des Integrals über Wärmeindringung und Kinetik berechnet werden:

$$\ln = \left(\frac{m - m_e}{m_b - m_e} \right) = k \int_0^t \exp(-E/RT) dt$$

mit T als $f(x, y, z, t)$.

Es wird angenommen, daß die maximale Kapazität des Vergasers erreicht ist, wenn die Verschwelungs-Umwandlung des Brennstoffteilchens zu 99% auf der Höhe des Lufteinlasses stattgefunden hat. Für den Fall der Holzvergasung in einem klassischen Imbert-Vergaser wurde die Verschwelungs-Umwandlung eines Teilchens (45 mm × 60 mm × 80 mm) bei maximaler Kapazität berechnet (Bild 4).

Da es unmöglich ist, den Vergaser rasch genug abzukühlen, kann dieses Profil nicht experimentell bestätigt werden. Hier können nur Experimente, bei denen die Teerproduktion mit der Erhöhung der Kapazität stark ansteigt, herangezogen werden, um die beschriebenen Phänomene zu bestätigen.

Schlöpfer beschreibt gut dokumentierte Versuche mit einem klassischen Imbert-Vergaser. Er berichtet, daß die Kapazität, infolge der Teerproduktion, für Holzstücke von 45 mm × 60 mm × 80 mm auf 50 kg/h begrenzt ist. Unsere Modellberechnungen sagen ein maximales Fassungsvermögen von 47,9 kg/h voraus. In einer Versuchsanlage der Twenter Universität für Technologie wurde die Kapazität von 18 kg/h auf 23 kg/h mit Holzstücken von 20 mm × 20 mm × 20 mm erhöht. Dies führte zu einem Anstieg der Teerproduktion mit dem Faktor 5. Die berechnete maximale Kapazität betrug 19,8 kg/h. Ähnliche Erscheinungen wurden für DRDF (20 mm, rd. 40 mm lang) beobachtet, wenn man die Kapazität in einer E.E.E.-Versuchsanlage mit ständiger Aschenbeseitigung von 30 auf 42 kg/h erhöhte. Die errechnete maximale Kapazität betrug hier 32,5 kg/h. Demnach beschreibt das hier vorgestellte Modell das maximale Fassungsvermögen eines Vergasers erstaunlich gut.

2.2 Oxidation

Der Oxidationsprozeß ist die Wärmequelle für den Verschwelungsprozeß über, und den Reduktionsprozeß unter dem Lufteinlaß. Neben der Wärmeerzeugung ist es die Hauptaufgabe dieser Zone, die kondensierbaren, organischen Verschwelungsprodukte (z. B. Teer) in nicht-kondensierbare Stoffe umzuwandeln. Letztere Funktion wird haupt-

Bild 4. a Pyrolysedigramm für einen Imbert-Vergaser. Die pyrolytische Umwandlung wurde auf der Basis experimentell ermittelter Temperaturen bei maximaler Kapazität berechnet, b Temperaturprofil in einem Holzteilchen, das sich durch die Mitte eines Imbert-Vergasers bewegt

Fig. 4. a Pyrolysis in an Imbert gasifier. Pyrolysis conversion is calculated based on experimental temperatures at maximum capacity, b temperature profile in a wood particle flowing through the centre of an Imbert wood gasifier

Bild 5. Schema der Gasbewegungen im Brennkammerhals des Vergasers

Fig. 5. Gasflow patterns in the throat section of a gasifier

sächlich bestimmt durch die Gas-Strömungs-Muster und das Temperaturprofil innerhalb des Vergasers. Aufgrund von Tracer-(CH₄)-Injektionsversuchen und Kaltströmungs-Modell-Versuchen werden die Strömungs-Muster in Bild 5 vorausgesetzt. Die Größe der Strömungsmodelle hängt weitgehend von Faktoren wie Teilchengröße und -verteilung, Lufteinlaßgeschwindigkeit etc. ab. Daher ist der genaue Entwurf des Halses für jeden Brennstoff mehr oder weniger empirisch. Das kreisrunde Brennkammer-Hals-Konzept ermöglicht die Erhöhung des Volumens und des Querschnittes des Halses, während die Größe des Strömungs-Musters unverändert bleibt.

Auf diese Weise können Sägespäne, Holzspäne und landwirtschaftliche Abfallprodukte teerfrei vergast werden und es ist möglich, den Vergaser bis zu einer Kapazität von wenigstens 1000 kg/h zu vergrößern. Experimentelle Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt.

2.3 Reduktion

Durch die Reduktion von CO₂ und H₂O mit Kohle erhält man die brennbaren Komponenten CO und H₂ im Produktgas. Dabei wird die fühlbare Wärme aus der Oxidation verbraucht.

Die Geschwindigkeit des Verfahrens kann begrenzt werden durch: die Massen- und Wärmeübertragung von der Gasphase zu den Teilchen, die Diffusion der gasförmigen Reaktionsteilnehmer in das poröse Teilchen,

Tabelle 1. Masse und Energiegehalt verschiedener Brennstoffe

	Festbrennstoffe				
	Holz-Hack- schnittzel	Sägespäne Hobelspäne	DRDF	Hafer- spreu	Mais- kolben
Mittlere Korngröße, cm	1,0	0,3	3,0	0,2	5,0
Feuchte, Gew.-%	18,0	8,0	10,0	15,0	8,0
Aschengehalt, Gew.-%	0,2	0,2	26,5	5,0	3,8
Einsatz, kg/h:					
Feststoff	32,0	18,4	32,0	26,7	24,9
Luft	57,8	28,11	40,78	45,9	49,8
Ausbeute, kg/h:					
Trockengas	81,53	44,44	55,92	60,3	68,3
Kondensat	7,65	1,57	6,89	10,7	5,2
Asche	—	0,5	9,97	1,5	1,1
Reingas-Zusammensetzung, Vol.-%:					
Co	17,1	17,6	15,9	24,3	16,5
H ₂	18,6	18,2	12,0	11,1	16,9
CO ₂	14,4	16,4	14,8	8,4	14,1
N ₂	47,6	44,2	53,8	54,9	51,3
CH ₄	2,3	3,1	2,4	2,2	2,2
C ₂ +	—	0,5	1,1	0,2	0,1
Energiegehalt:					
Brennstoffe, MJ/kg	14,69	16,79	13,28	16,0	16,85
Reingas, MJ/kg	4,33	5,02	4,02	4,77	3,99
Therm. Effiz., %	75,1	72,0	53,0	67,3	65,0

Bild 6. Lokale Kohleumwandlung in einem Holzkohlenpartikel, vergast mit CO₂ beginnend bei L = 0. Das Stufendiagramm zeigt die experimentell ermittelten, die Kurve die berechneten Werte

Fig. 6. Local carbon conversion in a linear wood char particle gasified with CO₂ from L = 0. The stepped curve is experimental, the other calculated

die chemische Reaktion an der aktiven Oberfläche des Teilchens, die Diffusion und Konvektion der gasförmigen Produkte aus dem Teilchen in die Gasphase.

Auf einer Thermowaage wurde die Kinetik der Reaktionen bestimmt. Für die letzten drei die Geschwindigkeit begrenzenden Schritte wurde ein Teilchen-Modell entwickelt und verifiziert. Das Modell berücksichtigt, daß sowohl der Diffusionskoeffizient als auch die chemische Reaktionsgeschwindigkeit eine Funktion der örtlichen Kohlenstoffumwandlung und damit auch eine Funktion von Zeit und Ort innerhalb des Teilchens ist. Das Modell beschreibt auch die Schwindung der Teilchen während der Umwandlung. Es wurden Teilchen-Experimente durchgeführt, um die Richtigkeit des Modells zu beweisen. Typische Beispiele sind in Bild 6 dargestellt.

Bild 7. Berechnete und experimentell ermittelte Verläufe in der Reduktionszone eines Vergasers

Fig. 7. Calculated and experimental profiles in the reduction zone of a gasifier

Das Teilchen-Modell ist kombiniert mit Wärme- und Massen-Übertragungsgleichungen, Wärme- und Massen-gleichgewichten und Strömungsgleichungen für die Gas- und Festphase, wobei letztere bestimmt wird durch das Schwinden der Teilchen und die Aschenbeseitigung. Experimentelle und berechnete Daten sind in Bild 7 angegeben. Demnach kann das Reduktionszonen-Modell benutzt werden, um die Länge und das Volumen dieser Zone zu berechnen. Auch sagt es die Temperaturen im Vergaser sehr gut voraus. Dies ist wichtig für Brennstoffe, die Asche mit einer Tendenz zur Zunder- oder Schlackenbildung haben. Für die verschiedenen Schritte des Verfahrens wurden Modelle entwickelt, die, basierend auf den Brennstoffeigenschaften, die Prozeß-Daten und -Begrenzungen beschreiben. Diese Brennstoffeigenschaften können aus thermogravimetrischen Analysen entnommen werden. Damit kann ein Verfahren für die verschiedenen Brennstoffe entwickelt werden, dessen Realisierung jedoch noch sehr viele Aspekte des Maschinenbaus beinhaltet.

3 Maschinenbauliche Aspekte

Die Grundabmessungen des Vergasers wurden aus den Berechnungen der Verfahrenstechnik entnommen. Um den Vergaser konstruieren zu können, müssen die Regeln des Maschinenbaus zugrundegelegt werden, mit Rücksicht auf Brennstoff-Handhabung, Vergaser-Konstruktion, Handhabung der Asche, die Behandlung und schließlich die Nutzung des Gases.

3.1 Handhabung des Brennstoffs

Aus dem Brennstofflager muß der Brennstoff entweder automatisch oder manuell in den Vergaser gebracht werden. Da sowohl ein Eindringen von Luft in den Vergaser, als auch ein Austreten von Gas aus dem Vergaser aus Sicherheitsgründen nicht akzeptabel ist, muß die Zuleitung des Brennstoffs so gasdicht wie möglich erfolgen. Bei kleinen Anlagen kann eine gasdichte Tür benutzt werden, solange das einzuleitende Brennstoffvolumen relativ klein ist und die Tür daher nur für kurze Zeit geöffnet werden muß. Dies trifft generell für manuell betriebene Vergaser zu. Für kleine, automatisch betriebene Anlagen können doppeltürige Spülkanäle oder ein, mit einer Tür kombinierter Schneckenförderer eingesetzt werden.

Die gasdichten Türen werden zwar durch Teer und klebende Brennstoffteilchen angegriffen, sind aber billig und einfach zu konstruieren. Größere Anlagen benötigen allerdings einen so großen Volumenstrom des Brennstoffes, besonders im Fall von Sägespänen und landwirtschaftlichem Abfall, daß rotierende Spülkanäle unvermeidlich sind. Diese Spülkanäle müssen bei verschiedenen Temperaturen gasdicht sein, gegen Verschmutzung mit Teer und Staub immun sein, bei feinen und bei groben Materialien, also auch für zähe und faserige Biomasse und deren Verunreinigungen anwendbar sein.

Ähnliche Probleme treten bei der Brennstofflagerung und am Bunker des Vergasers auf, wenn Abfälle extrem schlechte Strömungseigenschaften zeigen. Für die Brennstofflagerung gibt es in der Literatur viele Lösungsvorschläge. Für den Vergaserbunker jedoch herrschen andere Bedingungen. In den meisten Fällen reichen Rührwerke und Brückenbrecher aus, um die Strömung der Feststoffe zu verbessern, aber sie erfordern sich bewegende Apparaturen innerhalb des Vergasers.

Sich drehende Apparaturen müssen natürlich gasdicht eingeführt werden und auch unter hoch-korrosiven Bedingungen einsatzfähig bleiben.

3.2 Materialauswahl für den Vergaser

Das größte Problem hierbei ist, passendes Material für den Hals und wenn nötig, hitzebeständige Rührwerke auszuwählen.

Um im Hals eine hohe Temperatur zu erreichen, ist es nötig, diesen zu isolieren. Auch wenn der klassische Imbert-Vergaser mit einem Hals aus Stahl arbeitet, ist es schwierig, damit ausreichende Lebensdauer, hohe Leistungsfähigkeit und einen teerfreien Betrieb zu erzielen. Deshalb wird ein isolierter Keramik-Hals bevorzugt. Die Keramik muß sowohl den Temperaturen in der Oxidationszone als auch dem thermischen Schock, der während des Startens auftritt, standhalten. Die Düsen des Lufteinlasses sind mehr oder weniger luftgekühlt und können aus passendem Stahl oder Keramik hergestellt werden. Alle Materialien, die innerhalb des Vergasers eingesetzt werden, müssen resistent gegen Säure-Komponenten wie Teer, Essigsäure etc. sein.

3.3 Beseitigung der Asche

Die Asche muß periodisch oder kontinuierlich beseitigt werden. Dies hängt von der Kapazität des Vergasers und dem Aschengehalt des Brennstoffes ab. Das Aschenbeseitigungssystem entfernt nicht nur die Asche, sondern muß auch dazu imstande sein, den Druckabfall über dem Vergaser zu reduzieren, den Staubgehalt im Brennstoffgas auf ein Mindestmaß zu beschränken, sowie entweder die Schlacke- und Zunderbildung zu verhindern, oder diese Produkte zu zerkleinern und zu verhindern, daß Löcher in das Brennstoffbett unterhalb des Halses gebrannt werden.

Für die Holz-Vergasung in kleinem Maßstab sind sehr einfache Lösungen, wie z. B. ein Schüttelrost mit gasdichtem Aschenbehälter gefunden worden. Für Brennstoffe mit höherem Aschengehalt wurden häufig exzentrisch rotierende Roste vorgeschlagen, die dem Kerpely-Rost der Kohlen-Vergaser weitgehend gleichen. Mit einem solchen Rost hat Jenkins Brennstoffe mit einem maximalen Aschengehalt von ungefähr 6% vergast. Die E.E.E.-Vergaser verwenden, abhängig vom Brennstofftyp, modifizierte, exzentrisch rotierende Vorrichtungen. Dadurch ist es möglich, DRDF mit einem hohen Silika-Aschengehalt von 26% auf akzeptable Weise zu vergasen (Tabelle I). Bei den meisten Anlagen bevorzugt man, die Asche aus dem Vergaser zu spülen. Bei geringer Kapazität reichen ein Aschenbehälter und ein gasdichtes Ventil aus, bei größerer Kapazität wird ein rotierender Spülkanal eingesetzt.

3.4 Gasbehandlung und Gasnutzung

Die Gasbehandlung muß so entworfen werden, daß sie sowohl den Anforderungen der Gasnutzer (z. B. Boiler, Motor), als auch der Umwelt gerecht wird. Viele Probleme bei der Gasbehandlung haben ihre Ursache in einem fehlerhaften Vergaser-Entwurf. Besonders die Beseitigung von Teer und Staub kann durch einen geeigneten Vergaser-Entwurf stark vereinfacht werden. Wie von Hos bewiesen wurde, können auch saure Gase, wie Chlorwasserstoff während der Vergasung beseitigt werden. Dies geschieht durch Zuführung sehr kleiner Mengen z. B. von Kalkstein in den Vergaser.

Für direkte Erwärmungsprozesse ist eine Gasbehandlung unnötig, sofern ein Schwachgas-Brenner benutzt wird. Diese Brenner können so entworfen werden, daß sie heißes Gas, das kleine Mengen Teer und Staub enthält, annehmen. Hierbei ist der Umbau von konventionellen oder bestehenden Boilern

und Feuerungen möglich. Für die Kraft oder die Wärme/Kraft-Erzeugung sind Gaskühlung und -reinigung unumgänglich. In diesem Fall wird das Gas in einem Gas- oder Dieselmotor verbrannt, wodurch Kraft und Wärme entstehen. Der Motor benötigt kaltes Gas, um den Füllungsgrad des Zylinders und sauberes Gas, um die Lebensdauer des Motors zu erhöhen. Die Kühlung kann auf 2 Arten stattfinden: durch einen mit Wasser oder Luft gekühlten Wärmeaustauscher, oder durch die Einspritzung von kaltem Wasser in das Gas. Für die Gasreinigung kann eine Kombination aus Zyklon, Naßabscheider, Naßfilter, Trockenfilter und/oder Elektrofilter benutzt werden. Produziert der Vergaser etwas Teer, so sind diese Systeme für Verstopfungen anfällig. Vorausgesetzt, daß ein passender Gas/Luft-Mischer eingesetzt wird, können im Prinzip alle Gas- und Dieselmotoren mit sauberem, kaltem Holzgas angetrieben werden. Dieselmotoren können entweder als Zweistoffmotoren, die 50 ... 75% Dieselöl ersetzen, oder als Pilotinjection-Motoren betrieben werden, die dann 80 ... 90% Dieselöl ersetzen. Der Umbau zu einer Pilotinjection ist in jedem Fall komplizierter und teurer, als der Umbau zum Zweistoffmotor. Der direkte Gebrauch von Gasturbinen müßte prinzipiell möglich sein, wurde aber in der Literatur bis jetzt noch nicht beschrieben.

3.5 Sicherheit

Eine Vergasungsanlage produziert giftiges Gas (Kohlenmonoxid). Mit Luft vermischt, ist dieses Gas explosiv. Der untere Explosions-Grenzwert liegt bei schätzungsweise 4 Vol.-% Sauerstoff im Gemisch. Daher muß das System völlig gasdicht sein, so daß weder Gas entweichen, noch Luft angesaugt werden kann. Während des Startens wird das System mit Luft aufgefüllt und, soweit dann nicht mit inaktivem Gas gespült wird, besteht die Möglichkeit einer Explosion. Um diese Gefahr so klein wie möglich zu halten, ist es eine der wichtigsten Aufgaben, das freie Gasvolumen des Systems auf ein Minimum zu beschränken.

Bei dem direkt mit Wasser gekühlten System gibt es keine Explosionsgefahr. Sollte es jedoch nicht möglich sein, dieses System im Vergaser und bei der Aschenbeseitigung zu verwenden, muß der Gasbehälter so konstruiert sein, daß er dem maximalen Explosionsdruck von 6 bar standhält. Auch Sicherheitsventile oder Explosionsluken können verwendet werden, wobei dann allerdings die Gefahr von Gas-Emissionen besteht.

Besondere Vorsicht muß man bei handbefüllten Vergasern, die nur eine gasdichte Tür haben, walten lassen. Steht die Tür offen, können Flammen entweichen und nachdem die Tür dann geschlossen wurde, ist es möglich, daß es zu einer kleinen Bunker-Explosion kommt. Daher muß diese Tür nach dem Prinzip der Sicherheitsventile konstruiert sein. Allerdings ist eine Leckage in der Abdichtung auch dann noch möglich, wenn Staub und Brennstoffteilchen an ihr kleben bleiben. Diese Probleme sind dadurch zu lösen, daß die Bunker-Auffüllung mit ausreichender Betthöhe über dem Hals stattfindet. Nach kurzer Trainingsperiode kann eine manuelle Anlage sicher betrieben werden.

4 E.E.E.-Vergasungsanlagen

Die Entwicklungsarbeit wurde mit zwei Versuchsanlagen durchgeführt. Eine Anlage wird handbefüllt betrieben und hat eine Kapazität von 50 kg/h Abfall. Die andere arbeitet vollständig automatisch mit einem Fassungsvermögen von 300 kg/h. Besondere Aufmerksamkeit mußte gerichtet werden auf die Entwicklung des kreisrunden Brennkammer-Halses für möglichst viele, verschiedene Brennstoffarten und zur Vergrößerung geeignet, auf ein ständig rotierendes Aschenbeseitigungs-System und auf den vollständig automatischen Betrieb: Automatische Start- und Schließverfahren, gasdichte, rotierende Spülkanäle sowohl für die Brennstoffaufnahme als auch für die Aschenbeseitigung und Verfahrenskontrolle (u.a. die Einstellung der Kapazität auf den Motorverbrauch).

Tabelle 2. Daten zur Wirtschaftlichkeit einer Vergasungsanlage Bauart E.E.E. Modell 125 unter Zugrundelegung niederländischer Verhältnisse

	Reine Wärmeerzeugung 500 kW _{th}	Wärme/Kraft- Koppelung 125 kW _e /kW _{th}
Kapital- und Aufstellungskosten; US \$		
Brennstofflagerung	10000	10000
Vergasungsanlage	40000	50000
Umbau des vorhandenen Dampfkessels	20000	..
Wärme/Kraft-Einrichtung	-	70000
Installationskosten	4000	10000
Summe	74000	140000
Prämie für energiesparende Investition (Holland) 32%	24000	45000
	50000	95000
Nutzung; h/Jahr		
	2000	6000
Abschreibung, 10 Jahre	5000	5000
Zins, im Mittel 5%	2500	2500
Nutzung	3000	5000
Wartung	2000	4000
	12500	15500
Jährliche Ausbeute		
Wärme 0,028 \$/kWh	28000	84000
Strom 0,08 \$/kWh	-	20000
Amortisation Jahre	3,2	0,7
Kosten je kWh _{th} in US \$	0,0125	0,0005
Kosten je kWh _e in US \$	-	0,085
		0,036

5 Wirtschaftliche Aspekte

Die Investitionskosten für E.E.E.-Vergasungsanlagen hängen in hohem Maß von den Brennstoffeigenschaften und den Brennstoff-Behandlungskosten ab. Da größere Anlagen kompliziertere und teurere Behandlungsgeräte erfordern, bleiben die Investitionskosten pro kW für kleine und große Anlagen mehr oder weniger gleich. Nach einer ersten Berechnung kostet ein vollautomatischer Vergaser für die direkte Erwärmung ca. 75 \$ pro kW_{th}. Eine handbefüllte Anlage, inklusive Gaskühlung und Gasreinigung, kostet etwa 400 \$ je kW Elektrizität, wobei der Generator-Set mit ca. 350 \$ je kW_e nicht eingerechnet ist.

Eine vollständige Anlage, welche die Brennstofflagerung, den automatischen Betrieb des Vergasers und eine Kraft/Wärme-Anlage enthält, wird bei etwa 1000 \$ je kW_e liegen.

Bild 8. Handbesockte Vergasungsanlage, Typ EEE 65, für 65 kg/h Abfälle, Teilchengröße 1 ... 50 mm, Aschengehalt bis 30%; automatische Beschickung ist nachrüstbar

Fig. 8. Hand-loaded gasification plant EEE 65, for 65 kg/h of various wastes; particle size 1 ... 50 mm, ash content up to 30%; automatic fuelling is possible

Unter niederländischen, wirtschaftlichen Verhältnissen ist die letztgenannte Anlage für die Holz- und Möbelindustrie vorteilhaft, da sie aus deren Abfällen Energie produzieren kann. Abhängig vom Verwendungszweck, der Anzahl der Betriebsstunden pro Jahr und den Verkaufskosten oder dem Marktwert des Abfalls liegt die Amortisationszeit zwischen 1 und 5 Jahren (Tabelle 2).

Es hat sich gezeigt, daß die Gleichstrom-Festbett-Vergaser mit einem kreisförmigen Hals und kontinuierlicher Aschenbeseitigung mit verschiedenen Brennstoffarten (Teilchengrößen 1 ... 50 mm, Aschengehalt bis zu 30%) sehr gut arbeiten. Im Augenblick können Kapazitäten bis 200 kg/h gebaut werden, doch werden bereits größere Einheiten entwickelt.

Bis heute wurden drei Vergaser-Grundtypen entwickelt.

1. Eine einfache, handbefüllte Anlage für grobe Brennstoffe (Holzstücke, Maiskolben, etc.) in mehr oder weniger klassischer Technik, bestehend aus einem Vergaser mit zentral befestigtem Lufteinlaß, keramischem Hals, einem Schüttel-Rost, einem Rohkühler, Naßabscheider und Naßfilter, Fassungsvermögen 20 ... 100 kg/h.

2. Ein Vergaser kleinen Maßstabs, für verschiedene Brennstoffe. Diese Anlage ist sowohl handbefüllt, als auch automatisch für ein Fassungsvermögen von 50 ... 200 kg/h lieferbar. Ein Beispiel zeigt Bild 8, bestehend aus einer gasdichten Brennstoffaufnahme, Vergaser mit Rüttel-Bunker, kontinuierlicher Aschenbeseitigung in einen Behälter, Rohkühler, Naßabscheider, Naßfilter und Ventilator. Experimentelle Ergebnisse für verschiedene Brennstoffe (Teilchengröße 1 ... 50 mm, Aschengehalt bis zu 30%) wurden mit der 50 kg/h Versuchsanlage erzielt: sie sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

3. Ein automatischer Vergaser für Kapazitäten von 300 ... 1000 kg/h Holzabfälle. Da die Versuchsanlage ziemlich Material- und Konstruktionsprobleme aufwies und bis Herbst 83 erst 30 Stunden in Betrieb war, können hier keine genaueren Untersuchungsergebnisse angeführt werden. Diese Anlage besteht aus einer automatischen Brennstoff-Aufnahme, einem rotierenden Rührwerk im Bunker, einer kontinuierlichen Aschenbeseitigung mit wassergekühltem Spülkanal, einem Gas-Luft-Wärmeaustauscher, einem Zyklon und einem Wasserring-Kompressor (Bild 9). (1) Die Holzabfälle (Hackschnitzel, Späne, Sägemehl) werden oben in den Vergaser eingeführt. Ein automatisches Ventil sichert die ständige Materialzufuhr, kontrolliert durch einen Niveaumanzeiger. (2) Vorgewärmte Luft, die für den Vergasungsprozeß nötig ist, tritt durch ein Rohr in das Reaktorzentrum ein. (3) Ein kreis-

Bild 9. Pilotanlage für die Vergasung von 300 kg/h Holz in Betrieb bei E.E.E. in Oldenzaal, Holland

Fig. 9. Pilot plant for the gasification of 300 kg/h wood at Oldenzaal, Netherlands

rundes Feuerbett wird dicht über dem Brennkammerhals aufgebaut. Hier wird das Holz in Kohle, Teer, Kohlendioxid und Wasserdampf umgewandelt. Durch die hohen Temperaturen wird der Teer gekrackt und verbrannt. Einer der Vorteile des E.E.E.-Vergasers besteht in der kompletten Umwandlung des Teers. (4) Durch die Reaktion von Kohle mit Kohlendioxid und Wasserdampf, wird brennbares Gas, das Wasserstoff und Kohlenmonoxid enthält, erzeugt. (5) Das Generatorgas wird mit einer Temperatur von 500 °C zurückgeführt und in einem Wärmeaustauscher abgekühlt. Die Wärme wird zurückgewonnen für die Vorwärmung der Luft, die für den Vergasungsprozeß erforderlich ist (siehe 2). Das Generatorgas wird auf 200 °C abgekühlt. (6) Das Gas wird auf 30 °C gekühlt und nach der Staubbeseitigung gewaschen. (7) Das

saubere, kalte Generatorgas wird zu einer Kesselanlage oder zu einem Motor transportiert. (8a) Wird das Generatorgas in einer Kesselanlage verbrannt, so entstehen Wasserdampf oder heißes Wasser. (8b) Wird das Gas in einem Motor verbrannt, so wird dadurch Kraft erzeugt. (8c) Die Wärme des Kühlwassers und der Abgase kann für anderweitige Erwärmungsprozesse verwendet werden.

Nach weiterer Entwicklung wird diese Anlage in der Lage sein, auch andere Brennstoffe zu vergasen.

Hier wird nur die Art der Gaserzeugung beschrieben. Natürlich können diese Anlagen auch für direkte Erwärmungsprozesse verwendet werden. In diesem Fall sind Gaskühlung und Gasreinigung nicht erforderlich und anstatt eines Sauggebläses wird ein Luftkompressor am Lufterlaß eingesetzt.

Buchbesprechungen

Schweingruber, F. H.: Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. 234 S., 283 Bilder, 317 Zeichnungen. Pappband. Bern, Stuttgart: Paul Haupt Verlag. 125,- DM

Das Buch bietet eine umfassende, tiefgehende Darstellung über den Jahrring als Grundlage der Dendrochronologie. Dabei wird auch dem methodischen Vorgehen dieses Wissenschaftszweiges großer Raum geschenkt. Das Buch ist in folgende Kapitel gegliedert: Herkunft des Materials, Analyse des Materials, Jahrringwachstum und Standort, Angewandte Dendrochronologie, Geschichte der Dendrochronologie. Zahlreiche Fotos sowie gut gelungene zeichnerische Darstellungen und Übersichten ergänzen den oft sehr knapp gehaltenen Text. Dennoch oder gerade dadurch stellt das Buch an die Konzentration des Interessierten hohe Ansprüche. Beim Studium dieses Buches spürt man immer wieder das große Engagement des Autors. Besonders deutlich wird dies im Zusammenhang mit der Radiodensitometrie, aber auch bei der Entwicklung von Theorien (wie z. B. auf S. 142–145). Die Vielfalt der Auskünfte, welche die Analyse von Jahrringen vermitteln kann, wird in der angewandten Dendrochronologie deutlich, wenn Zusammenhänge zur Siedlungs- und Kunstgeschichte, zur Kriminalistik, zur Klimatologie sowie zu Waldschäden beschrieben werden. Der Optimismus über die Zukunftsmöglichkeiten dieses Arbeitsgebietes wird an vielen Stellen verdeutlicht. Für alle Interessierten bietet dieses Buch eine besonders umfassende Quelle von wertvollen Informationen. H. Schulz

Normenausschuß Bauwesen im DIN (NABau): DIN-Normen und Norm-Entwürfe „Bauwesen“. 272 S. Berlin, Köln 1983: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth Verlag. Bestellnr. 11496. Brosch. 22,- DM.

Der Normenausschuß Bauwesen im DIN legt sein Verzeichnis der DIN-Normen und Normentwürfe 1983 vor. Dieses Verzeichnis wendet sich an alle, die mit dem Bauen zu tun haben, vor allem an die Baupraxis, aber auch an diejenigen, die Bauaufträge erteilen. Das Verzeichnis ist folgendermaßen gegliedert: 1. Bauwesen: Hier sind die Normen und Entwürfe aufgeführt, die für Planung, Berechnung und

Konstruktion von baulichen Anlagen erforderlich sind. 2. Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB): In diesem Teil sind VOB Teile A, B und C zusammengefaßt. Jeder „Allgemeinen Technischen Vorschrift“ des Teiles C der VOB sind die dort zitierten Normen und Entwürfe zugeordnet. 3. Standardleistungsbuch für das Bauwesen (StLB): Hier sind alle vorliegenden Leistungsbereiche mit Ausgabedatum und die in den Leistungsbereichen (LB) jeweils für Vertragstexte zitierten Normen und Entwürfe aufgeführt. 4. DIN-Taschenbücher: Diese Übersicht unterrichtet über die Normen des Bauwesens, der Verdingungsordnung für Bauleistungen, und des Standardleistungsbuchs mit den in diesen Regelwerken zitierten Normen. Die Taschenbücher für Bauwesen und Bauleistungen enthalten unter dem jeweiligen Einzeltitel alle notwendigen z. Z. gültigen Normen. 5. Register: in einem ausführlichen Register sind alle aufgeführten Normen und Norm-Entwürfe nach DIN-Nummer und Stichworten zu finden. Mit diesem Verzeichnis will der Normenausschuß Bauwesen einen Beitrag zur leichteren Handhabung und Anwendbarkeit des DIN-Normenwerkes im Bauwesen leisten. Das Verzeichnis enthält deshalb auch DIN-Normen anderer Normenausschüsse.

K. A. Sorg

Commonwealth Forestry Bureau: Machine Stress Grading and Nondestructive Testing of Wood. Annotated Bibliography No. F 29. 46 S. Slough 1982: Commonwealth Agricultural Bureau. Brosch. 10,15£.

Verantwortlich für die Zusammenstellung: Anne Handley, Commonwealth Forestry Bureau, South Parks Road, Oxford OX1 3RD, U.K. Abgefragt wurden die Gebiete Forestry und Forest Products der CAB Datenbank, von 1973 bis 1982, sowie die Abstracts 1972. Die vorliegende Bibliographie stellt eine Fortsetzung der früher veröffentlichten Annotated Bibliography No. F 7: "Machine Stress-Grading of Timber" dar, welche die Literatur von 1961 bis 1971 umfaßte. Abgedruckt sind 194 Abstracts unter folgenden Headlines: General Methods, Particleboard, Glulam and Plywood, Joints, Standards and Grading Rules, Appendix (Literature Abstracted in 1972), Author Index.

K. A. Sorg