

10. Vergasung und andere Kraft/Wärmetechniken

Die Kraft/Wärme-Kopplung in kleinerem Maßstab bietet sich an für Fernwärmewerke, größere Institutionen und Industriebetriebe. Ein Marktpotential besteht im In- wie auch im Ausland. Ein wesentlicher Ansporn zur Entwicklung von Vergasungsanlagen besteht in der Aussicht auf höhere Stromwirkungsgrade als z.B. Dampfturbinenanlagen in der gleichen Anlagengröße leisten können. Im Folgenden werden dänische Entwicklungsprojekte mit Pilot- und Demonstrationsanlagen beschrieben, die u.a. von der Energiebehörde im Rahmen des Entwicklungsprogramms für Regenerative Energie bezuschusst werden. Die Projekte arbeiten an der Kraft/Wärme-Kopplung mit verschiedenen Systemen wie Gegenstromvergasung, mehreren Formen der Gleichstromvergasung, Stirlingmotoren und Dampfmaschinen.

Kraftwärme mit thermischer Vergasung

Man lasse einen Verbrennungsmotor einen Stromgenerator antreiben und nutze die Abwärme des Motors für die Fernheizung. So einfach ist der Bau kleinerer Heizkraftwerke mit Erdgas als Brennstoff. Weniger einfach geht es mit Holz als Brennstoff. Nicht einmal als Pulver lässt sich Holz direkt als Brennstoff in einem Verbrennungsmotor oder etwa einer Turbine verwenden. Das Holz muss zuerst in Gas umgewandelt werden, beispielsweise durch einen Vergasungsprozess in einem Gasgenerator, auch Vergaser genannt. Die Kunst bei der Vergasung ist die Umwandlung von Holz in Gas bei möglichst geringen Verlusten und so, dass so sauberes brennbares Gas - das Produktgas - wie möglich erzeugt wird. Der Gasmotor nimmt Schaden, wenn das Gas Teer und Partikel enthält. Außerdem darf das Abwasser aus dem Prozess keine Probleme bereiten. Viele Anforderungen, die gleichzeitig erfüllt werden müssen.

Als Autoantrieb wurden während des Zweiten Weltkriegs getrocknete Buchenblöcke in Tabakdosengröße verwendet. Ein solcher Brennstoff lässt sich heutzutage nur in sehr begrenzten Men-

gen zu erschwinglichen Preisen beschaffen. Auf dem heutigen Markt gibt es insbesondere Hackschnitzel, das aber in der Regel feucht ist, wenn es direkt aus dem Wald kommt. Allerdings kostet Hackschnitzel so viel weniger als Gas und Öl, dass sich Investitionen in die umfassende Technik rentieren, die für die vergasungsbasierte Kraft/Wärme-Kopplung benötigt wird.

Zur Herstellung von brennbarem Gas muss das Holz zunächst erhitzt werden. Dies erfolgt in der Regel durch Verbrennung eines geringeren Anteils des Holzes. Durch die Erhitzung wird das Brenngut getrocknet, und erst danach kann die Temperatur erhöht werden. Bei einer Temperatur von rund 200°C beginnt die sogenannte Pyrolyse, bei der die flüchtigen Bestandteile des Holzes entweichen. Sie bestehen aus einem Gemisch aus Gasen und Teerstoffen. Nach Abschluss der Pyrolyse ist das Holz in flüchtige Bestandteile sowie einen festen Kohlenstoffrückstand (Koks) umgewandelt.

Der Koks lässt sich durch Zusatz eines Vergasungsmittels, in der Regel Luft, Kohlendioxid oder Wasserdampf, in Gas umwandeln. Bei der Verwendung von CO₂ oder H₂O erfordert dieser Prozess Wärme und verläuft nur bei Temperaturen über ca. 800°C mit ausreichender Geschwindigkeit. Die brennbaren Bestandteile des Produktgases sind hauptsächlich Kohlenmonoxid, Wasserstoff und etwas Methan. Zusammen machen

sie ca. 40% des Gasvolumens aus, wenn Luft zur Vergasung verwendet wird, der Rest besteht aus unbrennbaren Gasen wie Stickstoff und Kohlendioxid. Der Großteil der Teerstoffe aus der Pyrolyse lässt sich durch Erhitzung auf 900-1200°C in Gas umwandeln, beispielsweise durch die Passage durch eine warme Koksvergasungszone.

Seit Bekanntwerden der Technik vor etwa 100 Jahren wurden viele verschiedene Typen von Gasgeneratoren entwickelt. In der Regel unterscheidet man Gasgeneratoren nach der Art, in welcher Brennstoff und Luft im Verhältnis zueinander zugeführt werden. Im Folgenden werden Entwicklungsprojekte behandelt, die Gegenstromvergasung und Gleichstromvergasung nutzen. Es gibt auch noch andere Vergasungsprinzipien, beispielsweise Wirbelschicht-Vergasung, deren Stärke sich insbesondere in großen Anlagen zeigt. Die atmosphärische Wirbelschicht-Vergasung von Holz in großen Anlagen ist im Ausland als voll entwickelt anzusehen. Auch Wirbelschicht-Vergasung unter Druck wird im Ausland in teuren Demonstrationsanlagen eingesetzt. Die ausländische Entwicklung wird verfolgt, momentan ist jedoch nicht geplant, diesen Anlagentyp für Holz in Dänemark einzuführen.

Gegenstromvergasung

In einem Gegenstrom-Gasgenerator wird die Verbrennungsluft unter dem Rost am Boden angesaugt und durchströmt das

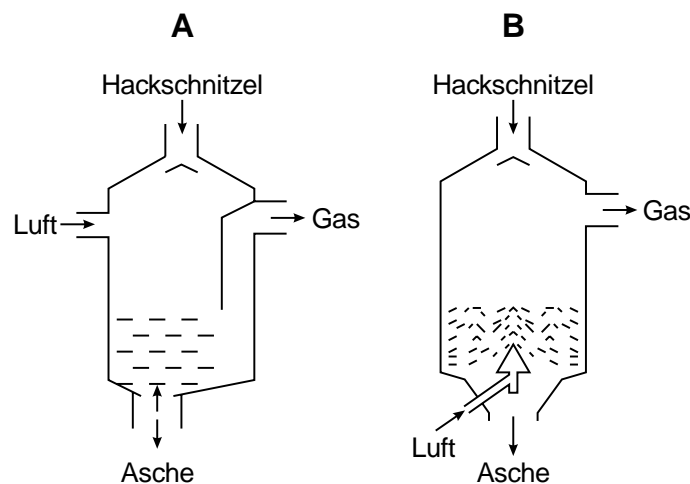
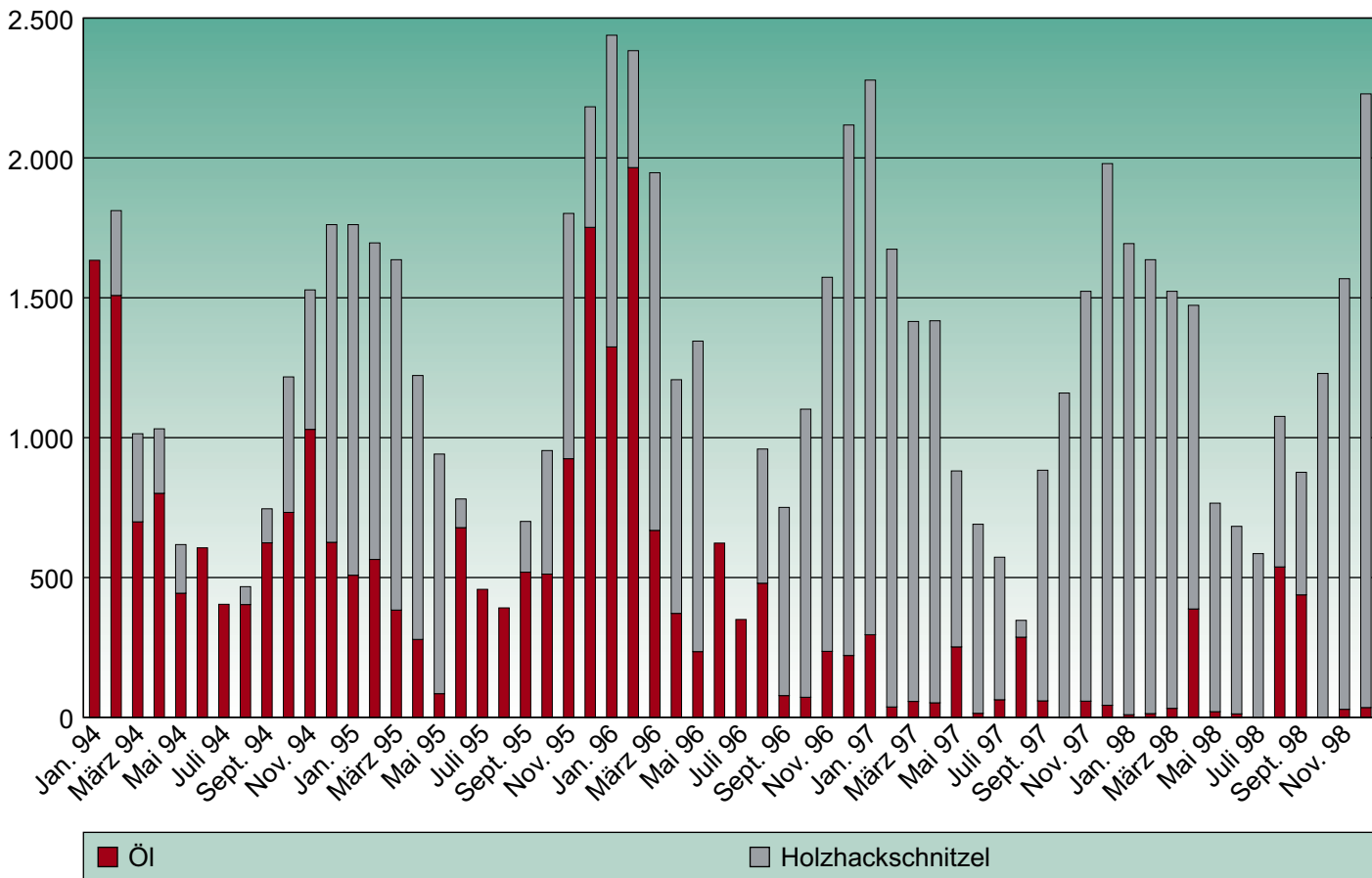


Schaubild 28: Gas-generatorprinzipien, A - Gleichstromgenerator, B - Gegenstromgenerator /Ref. 77/

Brennstoffleistung (MWh)



grafik: ansaldo vølund

Schaubild 29: Bei der Inbetriebnahme des Heizwerks Harboøre wurde viel Öl und wenig Hackschnitzel für die Wärmeversorgung verwendet, aber die Zeiten sind vorbei. Der monatliche Brennstoffverbrauch von Öl und Hackschnitzel veranschaulicht, wie sich das Bild 1996 deutlich wendete. Seit einigen Jahren deckt die Anlage über 90% des Wärmebedarfs der Stadt. Die Statistenrolle wurde dem Ölkessel überlassen.

Brenngut von unten nach oben (Schaubild 28). Das Brenngut wird oben im Vergaser zugeführt, so dass es sich gegen den Luft- und Gasstrom bewegt. In herkömmlichen Typen verlassen alle bei der Erhitzung des Brenngutes entstehenden Stoffe, darunter Teer und Essigsäure, den Gasgenerator ohne vorherige Aufspaltung. Bis zu 20-40% der Energie können in diesen Fällen im Teer gebunden sein. Erst nach intensiver Reinigung eignet sich das Gas zum Antrieb von Motoren, die Holzvergasung im Gegenstromverfahren stellt daher hohe Anforderungen an die Gasreinigungsanlage. Aus diesem Grund wurde die Gegenstromvergasung in den 40er Jahren vor allem für teearme Brennstoffe wie Anthrazit und Koks eingesetzt (77). Der große Vorteil der Gegenstromvergasung besteht in der Fähigkeit, Brennstoffe mit sehr hohem Feuchtegehalt (bis zu 50%) und Brennstoffe mit niedrigem Schlackeschmelzpunkt wie beispielsweise Stroh zu vergasen.

Gleichstromvergasung

Der holzbefeuerte Gleichstrom-Gasgenerator war während des Zweiten Weltkrieges das vorherrschende Prinzip zum Fahrzeugantrieb. Das Brenngut wird oben im Vergaser zugeführt und bewegt sich im Zuge des Prozesses nach unten. Die Luft wird entweder im Mittelstück des Generators oder über der Brennstoffschicht (Open-Core-Prinzip) zugeführt und bewegt sich nach unten in dieselbe Richtung wie das Brenngut und das entwickelte Gas (Schaubild 28). Für teerbildende Brennstoffe wie Holz ist dieses Prinzip besonders gut geeignet, da Teer, organische Säuren und andere Pyrolyseprodukte durch die Verbrennungszone geleitet und in leichte, brennbare gasförmige Verbindungen aufgespalten werden.

Das Prinzip der Gegenstromvergasung hat den Nachteil, dass es in seiner herkömmlichen Form bei Brennstoffen mit niedrigem Ascheschmelzpunkt nicht gut arbeitet. Stroh ist daher ungeeignet,

Holz hingegen lässt sich mit gutem Ergebnis verwenden. Eine weitere Schwäche besteht darin, dass ein relativ trockener Brennstoff mit einem Feuchtegehalt von max. 25-30% erforderlich ist. Direkt aus dem Wald geliefertes Holz muss daher zunächst getrocknet werden, bevor es in einem Gleichstrom-Gasgenerator vergast werden kann. Eine modifizierte Ausgabe eines Gleichstrom-Gasgenerators wird an der Dänischen Technischen Universität (Danmarks Tekniske Universitet) nach einem Zweistufenprinzip entwickelt. Mit dieser Konstruktion ist es gelungen, den Gleichstrom-Gasgenerator in seinen schwachen Punkten zu verbessern.

Anlagen in der Entwicklung

Gegenstrom-Vergasungsanlage in Harboøre

Die Ansaldo Vølund A/S hat eine Vergasungsanlage in vollem Maßstab in

Harboøre errichtet, die sie selbst betreibt. Die Anlage ist für gewöhnliches Waldhackschnitzel ohne vorherige Trocknung ausgelegt. Sie hat eine Brennstoffleistung von 4 MW und besteht aus einem Gegenstrom-Gasgenerator, Gasreinigung und einem kesselmontierten Gasbrenner, in dem das Gas zur Wärmezeugung verbrannt wird. Abnehmer der Wärme ist das Heizwerk Harboøre. Das Werk ist mit reiner Wärmezeugung seit 1993 in Betrieb und ist die Vergasungsanlage, die weltweit die meisten unbemannten Betriebsstunden mit Waldhackschnitzel aufweist. Außerdem hat sich die Betriebssicherheit der Anlage ständig positiv entwickelt und nähert sich jetzt sogar einem Punkt, wo sie die Betriebssicherheit herkömmlicher hackschnitzelbeförderter Werke übertrifft.

Die Anlage dient sowohl der Strom- als auch der Wärmezeugung. Dies erfordert eine umfassende Gas- und Wasserreinigung, da feuchtes Hackschnitzel ein Gas mit einem relativ hohen Gehalt an teerhaltigem Kondensat produziert. Es haben konzentrierte Bemühungen stattgefunden, das Gas auf ein für Gasmotoren geeignetes Niveau zu reinigen. Dieses Ziel scheint jetzt erreicht zu sein, weshalb 1999 zwei Gasmotoren mit einer Gesamtleistung (Garantiedaten) von 1,3 MW_{el} installiert werden. Der Stromwirkungsgrad - vom Brennstoff zum Strom gerechnet - wird anhand der Betriebsdaten der Vergasungsanlage und der Angaben des Motorlieferanten auf ca. 32% geschätzt. Die Betriebsergebnisse sollen danach zeigen, ob die Technik der Gegenstromvergasung für die Kraft/Wärme-Kopplung jetzt marktreif ist.

Zweistufen-Gleichstromvergasungsanlage

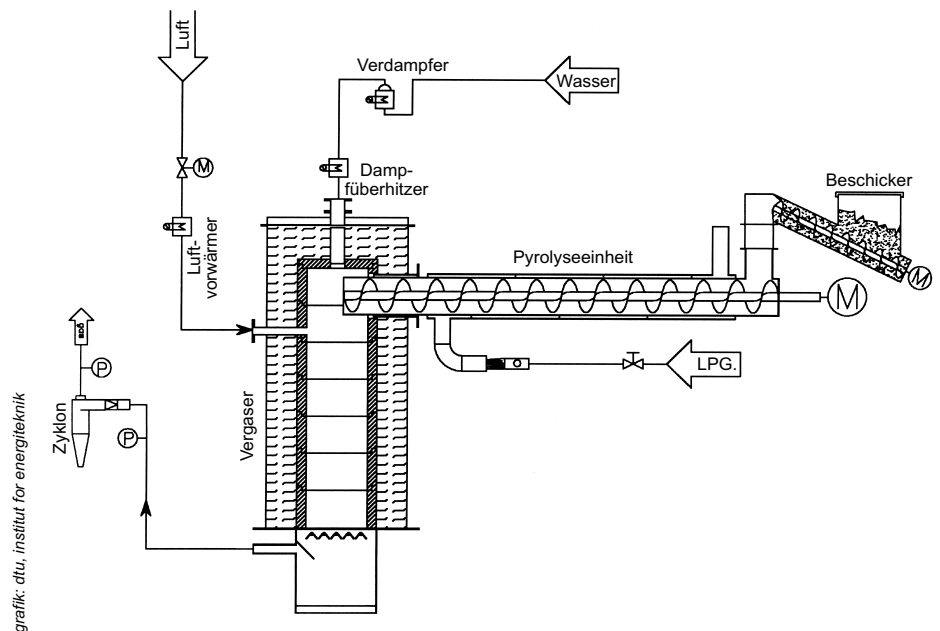
Seit Mitte der 80er Jahre arbeitet man an der Dänischen Technischen Universität (Danmarks Tekniske Universitet, DTU) mit der Vergasung von Biomasse. Anfangs konzentrierten sich die Aktivitäten auf die Vergasung von Stroh, und es wurden neue Prozesse entwickelt. Seinen Namen hat der Zweistufenprozess durch die getrennte Pyrolyse und Koksvergasung erhalten. Es wurde eine Anlage mit 50 kW Brennstoffleistung gebaut, in der es erstmals gelang, Motorbetrieb mit Stroh zu demonstrieren. Die Entwicklung richtete sich danach auf Holz.

An der DTU steht momentan eine Anlage mit 100 kW Brennstoffleistung, gekoppelt mit einem Versuchsmotor. Gemeinsam mit der Maskinfabriken REKA A/S wurde außerdem eine komplette Anlage mit 400 kW Brennstoffleistung und einem 100-kW-Gasmotor in einem landwirtschaftlichen Betrieb in Blære errichtet. Diese Anlage hat mehrere hundert Stunden mit Kraftwärmeproduktion vom Gasmotor gearbeitet. Die DTU hat den angewandten Vergasungsprozess detailliert theoretisch beschrieben und praktisch nachgewiesen, so dass er jetzt als fertigentwickelt anzusehen ist. Die praktischen Erprobungen haben gezeigt, dass die Anlage das vielleicht reinste Gas produzieren kann, das jemals in einer Vergasungsanlage festgestellt wurde. Es zeichnet sich außerdem durch einen hohen Wasserstoffgehalt aus. Die Zweistufenanlage kann Brennstoffe mit höherem Feuchtegehalt als bei anderen Arten der Gleichstromvergasung anwenden. Zudem ist das Kondensat aus der Gasreinigung dank des effektiven Vergasungsprozesses so rein, dass es vermutlich ohne weitere Behandlung abgeleitet werden kann. Durch die Verwendung von Auspuffwärme aus einem angekoppelten

Motor als Energiequelle für die Pyrolyse weist dieser Vergaser einen hohen Energiewirkungsgrad auf.

Gleichstromvergasung in Høgild

Das Fernwärmenetz in Høgild wird hauptsächlich von einer Gleichstromvergasungsanlage versorgt. Die Anlage wurde von den Stadtwerken Herning errichtet. Nachdem das Gas aus dem Gasgenerator einen Nasswäscher und ein Feinfilter passiert hat und dabei gereinigt wurde, wird es als Brennstoff in einem Gasmotor mit gekoppeltem Stromgenerator verwendet. Wie in den ursprünglichen Gleichstromvergasern wird die Luft in den mittleren Teil der Anlage eingeleitet. Befeuert wird die Anlage mit trockenen Blöcken aus Industrieholz. Die Nutzung von Waldhackschnitzel hat noch kein gutes Ergebnis erbracht. Der Gasgenerator wurde ursprünglich 1993 in Frankreich erworben, mußte Ende 1997 jedoch praktisch komplett ausgetauscht werden. Nur der Gasmotor und die Feinfilter aus der französischen Lieferung blieben erhalten. Als Ersatz wurde eine neue dänische Konstruktion eines Gleichstromvergasers von der Hollesen Ingeniør- og Keldfirma ApS installiert. Das umgebaute



grafik: dtu, institut for energiteknik

Schaubild 30: Der 100-kW-Zweistufenvergasers mit Beschicker, beheiztem Pyrolyserohr, Vergasungsreaktor sowie Luft- und Dampfungabe. Das Hackschnitzel wird mit einer Schnecke in das Pyrolyserohr befördert, das mit Gas aus einem LPG-Gasbrenner erwärmt wird (in „richtigen“ Anlagen wird Auspuffgas genutzt). Die Pyrolyseprodukte werden oben in den Vergaser geleitet, in den eine Schnecke auch den Koks aus der Pyrolyseeinheit befördert. Luft wird eingeblasen und vermischt sich mit dem Pyrolysegas. Das produzierte Gas wird durch den Koks aus dem Vergasungsreaktor abgeleitet, die größten Partikel werden in einem Zyklon abgeschieden.

Werk wurde im Januar 1998 in Betrieb genommen und hat bereits über 1.500 Betriebsstunden mit Stromerzeugung hinter sich (78). Damit ist es die dänische Vergasungsanlage mit den bislang (November 1998) meisten Betriebsstunden mit Stromproduktion. Die Brennstoffleistung beträgt ca. 500 kW, die abgegebene Leistung ca. 120 kW. Der Stromwirkungsgrad wird mit 19-22% angegeben.

Open-Core-Gleichstromvergasung

Ausgangspunkt des Entwicklungsprojekts - ursprünglich ein Skizzenprojekt unter Verantwortung der Firma dk-TEKNIK, ENERGI & MILJØ - waren die Brennstoffeigenschaften von Waldhackschnitzel und das Vergasungsprinzip Open Core, das im Ausland vielversprechende Ergebnisse mit Hackschnitzel erbracht hat.

Das Anlagenkonzept ist für gewöhnliches feuchtes Waldhackschnitzel ausgelegt, das in einem Durchlauftrockner mit Restwärme vom Gasmotor getrocknet wird, bevor es in den Gasgenerator gelangt. 1995 wurde auf Seeland die Herstellung und Erprobung einer Pilotanlage mit Gasgenerator und Gasreinigung in Angriff genommen. Die Anlage hat eine Brennstoffleistung von 210 kW und kann einen Gasmotor mit einem ca. 50-kW-Stromgenerator versorgen. Im entwickelten Open-Core-Gasgenerator wird die Luft dem Prozess in mehreren Stufen zugeführt, so dass ähnlich wie beim Zweistufenvergaser der DTU eine teilweise Verbrennung des Pyrolysegases stattfindet, bevor es durch die Koks-schicht strömt.

Bisher hat die Pilotanlage rund 350 bemannte Betriebsstunden in Verbindung mit Erprobungen hinter sich. Im November 1998 wurde ein Gasmotor angekoppelt, um auch praktische Erfahrungen mit Motorbetrieb zu gewinnen. Beim ersten eigentlichen Start des Motors wurden 24 Stunden ununterbrochener Motorbetrieb gefahren, bevor man sich zur Beendigung der Erprobung entschloss. Darauf erfolgte eine Betriebserprobung über fünf volle Tage im Dezember 1998, wobei ein 100stündiger ununterbrochener Versuchsbetrieb mit der Anlage erfolgreich durchgeführt wurde, davon 86 Stunden mit Motorbetrieb.

Neue Vergasungsprojekte

Ende 1998 laufen mehrere neue Vergasungsprojekte.



foto: biopress/torben skøtt

Die Vergasungsanlage in Høgild wurde jetzt komplett umgebaut, um dem dänischen Standard zu entsprechen. Preben Jensen von den Stadtwerken Herning vor dem neuen Vergaser.

Die Thomas Koch Energi A/S entwickelt einen Zweistufen-Open-Core-Gleichstromvergaser, der auf dem Prinzip De La Cottes beruht. Der Vergaser soll von 50 bis 1.000 kW_{el} produzieren und verwendet Hackschnitzel als Brennstoff. Der Vergaser besteht aus einer intern erwärmten, über einer Brennkammer und einem Koksvergaser angeordneten Pyrolyseeinheit. In der Pyrolyseeinheit wird das Hackschnitzel in teerhaltiges Gas und Koks aufgespalten. Das teerhaltige Gas wird in der Brennkammer verbrannt, der Koks mit Hilfe der Wärme aus der Gasverbrennung vergast. Gas wird über einen Zyklon, einen Kühler und ein Filter in einen Motor geleitet, der Strom und Wärme erzeugt. Die 60 kW_{el}-Anlage wird von der Energiebehörde und der Thomas Koch Energi A/S finanziert und voraussichtlich im August 1999 in Betrieb genommen.

Die Danish Fluid Bed Technology ApS (DFBT) und die Dänische Technische Universität, Institut für Energietechnik, arbeiten mit Unterstützung der Energiebehörde an der Erprobung und Weiter-

entwicklung eines innovativen zirkulierenden Wirbelschicht-(CFB-)Vergasers. Zunächst ist vorgesehen, den Vergaser als sogenannten vorgeschalteten Vergaser einzusetzen, d.h. zur Befuerung zusammen mit Stroh in Kraftwerken. Der Vergaser kann bei relativ hohen Temperaturen arbeiten, so dass problematisches Ascheschmelzen und Rohgaskühlung vermieden werden. Voraussichtlich ist das Konzept auch für andere Arten Biomasse, darunter zerkleinertes, trockenes Holz, geeignet. Die Bauhöhe wird erheblich geringer als in normalen CFB-Vergasern, wodurch der Vergaser eventuell auch in Größen bis zur unteren Grenze von 1-2 MW Brennstoffleistung wettbewerbsfähig wird. So lässt sich u.a. brennbares Gas für kleinere Kessel, indirekt befeuerte Gasturbinen und (größere) Stirlingmotoren produzieren. Zur Zeit wird an der DTU eine Versuchsanlage mit einer Brennstoffleistung von 50-75 kW errichtet, die ersten Betriebserfahrungen mit Stroh werden im Frühjahr 1999 vorliegen.

Der KN Consult ApS ist von der Energiebehörde ein Betrag bewilligt wor-

den zur Auslegung, Errichtung und zum Testbetrieb eines 150-kW-Testvergasers zum Vergasen von Stroh nach dem Gegenstromvergasungsprinzip. Der Testvergaser ist ein Vorprojekt des eigentlichen Projektes „Gegenstromvergasung von Stroh“, bei dem es sich um die Auslegung und Inbetriebnahme einer 500-kW-Testanlage für die Strohvergasung handelt. Die Arbeiten werden in Zusammenarbeit mit der KN Consult Polska Sp. z o.o. in Polen durchgeführt, die Ergebnisse der 150-kW-Anlage werden im Laufe des Jahres 1999 vorliegen.

Kraftwärme mit Verbrennung

Die heißen Rauchgase aus der normalen Verbrennung von Biomasse in Feuerungsanlagen lassen sich auch zur Kraft/Wärme-Kopplung im kleineren Maßstab verwenden. Zwei laufende Entwicklungsprojekte mit einem Stirlingmotor, bzw. einem Dampfmotor sollen dies in der Praxis beweisen.

Stirlingmotor

In den Zylindern eines Stirlingmotors befindet sich kein brennbares Gasgemisch, sondern nur ein Gas als Arbeitsmedium, das wechselweise erwärmt und gekühlt wird. Die Wärme für das Arbeitsmedium des Stirlingmotors entstammt einem Verbrennungsprozess, wie aus normalen rostbefeuerten Anlagen bekannt. Die Übertragung der Wärme aus dem Verbrennungsprozess auf das Arbeitsmedium des Stirlingmotors erfolgt über einen Wärmetauscher.

An der Dänischen Technischen Universität (DTU) arbeitet man in drei gesonderten Projekten an der Entwicklung von drei Motoren mit Leistungen von 9, 35 und 150 kW. Der 9-kW_{el}-Motor ist für gasförmige Brennstoffe, z.B. Erdgas und Biogas, vorgesehen und wird hier nicht weiter behandelt. Die Entwicklung des 35-kW_{el}-Motors wird von der Energiebehörde bezuschusst und in Zusammenarbeit mit den Firmen Danstoker a/s, I.B. Bruun und Klee & Weilbach durchgeführt. Die Maskinfabriken REKA A/S hat das Verbrennungssystem für die erste Anlage in Zusammenarbeit mit der Planenergi A/S entwickelt. Ansaldo Vølund R&D entwickelt das Verbrennungssystem für die nächste Anlage.

Das Design eines 150-kW-Motors ist mit Unterstützung der ELKRAFT

a.m.b.a. durchgeführt worden, das Projekt wurde jedoch 1998 zurückgestellt. Die Entscheidung über die eventuelle Herstellung eines Prototyps hängt u.a. von den Erfahrungen mit den 35-kW_{el}-Motoren ab.

Der Stirlingmotor der DTU ist direkt im Hinblick auf die Anwendung von Biomasse entwickelt worden. Die Gestaltung der Heizfläche erfolgte aufgrund der Erfahrungen mit den Typen von Biomasseanlagen, die bei hohen Temperaturen arbeiten. Charakteristisch für den DTU-Motor ist es, dass er genau wie ein hermetischer Kühlkompressor hermetisch ist. Das Elektrokabel ist die einzige externe Verbindung, und auch die Kabeldurchführung ist abgedichtet. Im unter Druck gesetzten Motormantel befinden sich sowohl die mechanischen Teile des Motors mit fettgeschmierten geschlossenen Lagern als auch der eigentliche Stromgenerator. Die von anderen Herstellern von Stirlingmotoren erlebten Schwierigkeiten mit Leckagen von Arbeitsgas und Öl in den Arbeitsvolumina wurden hier vermieden.

Eine hohe Temperatur an den Heizflächen ist für den hohen Wirkungsgrad des Motors entscheidend. In der Praxis heißt das 650-700°C. Somit enthält das Rauchgas beim Verlassen der Heizfläche noch viel Energie. Das warme Rauchgas nach dem Motor wird zum Vorwärmen der Verbrennungsluft verwendet, erst danach kommt die Restwärme des Rauchgases in einem Kessel zur Anwendung. Die warme Verbrennungs-

luft erhöht das gesamte Temperaturniveau im Verbrennungssystem und stellt besondere Anforderungen an die Gestaltung der Brennkammer und an die Materialwahl. Besondere Berücksichtigung fand bei der Gestaltung des Verbrennungssystems für den Motor die Gefahr von Schlackenbildung und Ablagerungen an den Heizflächen des Motors. Die Heizfläche wurde auch unter Berücksichtigung des Partikelgehalts der Rauchgase entworfen. Große Abmessungen und Abstände zwischen den Rohren der Heizfläche sollen die Verstopfung durch Ablagerungen verhindern.

Eine komplette Demonstrationsanlage mit dem 35-kW_{el}-Motor zur Befeuerung mit Waldhackschnitzel ist entwickelt worden und in Betrieb genommen. Die Anlage steht in einem landwirtschaftlichen Betrieb bei Salling und hat bisher (September 1998) ca. 700 Betriebsstunden mit Kraft/Wärme-Kopplung gearbeitet. Wahrscheinlich ist es der erste Stirlingmotor weltweit, der über längere Zeit unbemannten, vollautomatischen Betrieb mit Waldhackschnitzel als Brennstoff demonstriert hat. Der gemessene Stromwirkungsgrad bei Betrieb mit Waldhackschnitzel mit 49% Feuchtegehalt beträgt 18-19%. Der gesamte Nutzungsgrad des Brennstoffes wurde auf über 90% gemessen. Die Reinigung der Heizflächen des Motors ist nur einmal nach ca. 500 Betriebsstunden erforderlich gewesen (79). Durch die Konstruktion konnten somit Probleme mit Staub und Schlacken vermieden werden, die die Heizflächen

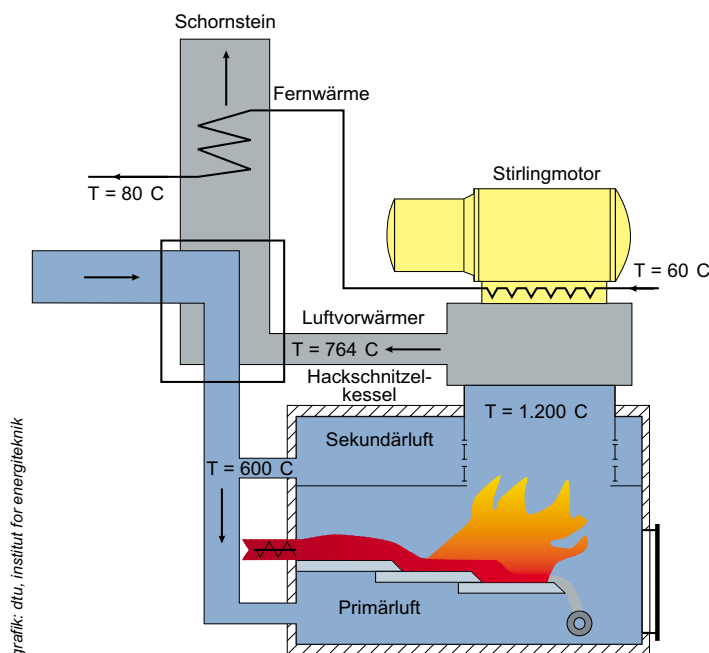


Schaubild 31: Die Feuerungsanlage für den ersten Stirlingmotor basiert auf einem gewöhnlichen Kessel, der so modifiziert wurde, dass die Aschepartikel sich nicht auf den Heizflächen des Motors ablagern. Der Stromgenerator ist in den Motor eingebaut, damit alle beweglichen Teile unter Druck stehen und Leckagen vermieden werden.

grafik: dtu, institut for energiteknik

sonst rasch durch Ablagerungen verstopfen können. Außerdem gibt es keine Anzeichen von Korrosion. Die positiven Erfahrungen mit dem Design der Hitzefläche gehören zu den wesentlichsten Teilzielen des Projekts. Die Erprobung hat auch ergeben, dass die Anlage Hack-schnitzel und Rinde mit bis zu 60% Feuchtegehalt nutzen kann. Wahrscheinlich trägt die kräftige Luftvorwärmung zur Toleranz der Anlage gegenüber dem Feuchtegehalt des Brennstoffes bei.

Unter Einrechnung der einleitenden Erprobungen des Motors mit Erdgas hat er insgesamt über 1.000 Betriebsstunden gearbeitet - eine Leistung, die als eigentlicher Durchbruch des Stirlingmotors bezeichnet werden kann. Der DTU-Motor zeichnet sich somit als wirklich vielversprechendes System zur Kraft/Wärme-Kopplung im kleinen Maßstab ab.

Mit Unterstützung der Energiebehörde befindet sich ein neuer 35-kW_{el}-Motor in der Herstellung. Das Design des Motors wurde auf der Grundlage der Erfahrungen mit dem ersten 35-kW_{el}-Motor revidiert. Herstellung und

Montage des neuen Motors wurden gegenüber dem ersten Prototyp erheblich vereinfacht. Gleichzeitig werden vom neuen Motor verbesserte Betriebseigenschaften erwartet. Der Motor wird mit einem Hochtemperatur-Gasbrenner und einem Gegenstromvergaser für Hack-schnitzel ausgerüstet, entwickelt von Ansaldo Vølund R&D. Die Anlage wird voraussichtlich in der zweiten Jahreshälfte 1999 zur Erprobung bereit sein.

Dampfmotor

Dampfmotoren stellen eine altbekannte Technik dar, die vor dem Verbrennungsmotor entstand. Tatsächlich wird sie als Initiator der gesamten Industrialisierung der westlichen Welt angesehen, weil sie effektiv - im damaligen Maßstab - mechanische Energie für die Industriemaschinen liefern konnte. Heute besitzt sie noch immer ein Potential für Kraftwärme im kleinen Maßstab.

Im Hinblick auf die Herstellung eines modernen Dampfmotors wird von der Milton Andersen A/S und dk-TEKNIK ENERGI & MILJØ ein Prototyp entwi-

ckelt. Das Ziel besteht in der Umschiffung der technischen Nachteile und geringen Wirkungsgrade, die sich früher mit Dampfmaschinen verbanden. Das Projekt wird von der Energiebehörde und der EU bezuschusst.

Die wesentlichen Nachteile der alten Motorentypen bestanden in der Beeinträchtigung der Dampfqualität durch Schmierölleckagen an den Zylindern und dem geringen Wirkungsgrad aufgrund der altmodischen Schiebersteuerung der Ventile.

Hergestellt wurde ein 2-zylindriger Prototyp mit 24 bar Dampfdruck und einer Dampftemperatur von 380°C mit öl-freien Kolbenringen aus Graphit und PC-kontrollierten, servohydraulisch gesteuerten Ventilen. Der Prototyp ist für eine Leistung von 500 kW_{el} ausgelegt. Die einleitenden Erprobungen des Prototyps sind durchgeführt. Zur Zeit wird in einem seeländischen Industriebetrieb im Hinblick auf einen Belastungstest sowie eine eventuell länger andauernde Erprobung des Motors eine Dampfversorgung abgeschlossen.