



Solo Stirling GmbH

Entwicklung einer Holz- Pellets- Feuerung für Stirling Blockheizkraftwerke

Abschlußbericht zum Vorhaben

Zeitraum: 1.1.2003 bis 31.12.2005

Aktenzeichen der Umweltstiftung: 20631-24/0

**Verfasser:
Dipl.-Ing. Andreas Baumüller
Dipl.-Ing. Andreas Laug**



Inhalt

Inhalt	2
Zusammenfassung	3
1. Einleitung	4
1.1 Strom- und Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien	4
1.2 Vorhandene Technik- Gasbetriebene Maschine	5
1.3 Ziel des Vorhabens.....	8
1.4 Projektpartner	9
2 Projektverlauf	10
2.1 Konzeption Feuerung.....	10
2.2 Erste Versuche mit aufsteigendem Vergaser bei Hoval.....	11
2.3 Verbessertes Brenner für Schwachgas und Test im Kessel.....	12
2.4 Konzept mit integriertem Vergaser	15
2.5 Versuche mit absteigendem Vergaser	16
2.6 Automatisierung	19
2.7 Dauerversuche	20
3 Ergebnisse	22
3.1 Erreichter technischer Stand.....	22
3.2 Energetische Bilanzierung	24
3.3 Ökologische Bilanzierung.....	25
3.4 Ökonomische Betrachtung.....	26
4 Anhang.....	28
4.1 Anlagenschema	28
4.2 Messstellen an der Anlage	29
4.3 Literatur	30

Zusammenfassung

Die Nutzung von Holzpellets in einem Modul zur Kraft- Wärme- Kopplung ist ökologisch sehr sinnvoll und auch ökonomisch interessant. Bis jetzt gab es dazu aber keine dezentrale Technik. Ein durch beliebige Wärme angetriebener Stirlingmotor mit entsprechender Feuerung aber kann diese Aufgabe erfüllen.

Solo Stirling beschäftigt sich seit über 15 Jahren mit Stirlingmotoren und hat ein gasbetriebenes Stirling KWK- Modul von 9 kW_{el}/ 26 kW_{th} in Serienproduktion.

Auf dieser Basis wurde eine Variante für Holzpellets als Brennstoff entwickelt. Als Konzept dazu wurden eine Holzvergasung und ein spezieller Brenner mit Luftvorwärmung ausgewählt. Der Projektpartner Hoval entwickelte zunächst einen aufsteigenden Gegenstrom- Vergaser, Solo modifizierte den Brenner der Gasmaschine für den Betrieb mit schwachkalorigem Holzgas. Brennersuche fanden zuerst mit einem wassergekühlten Erhitzer und danach auf der kompletten Stirlingmaschine statt. Später wurde der Vergaser in eine absteigende Konzeption umgebaut, hierdurch erhielt man eine deutlich bessere Gasqualität. Schwierigkeiten machten weiter die automatische Pelletzufuhr, der bewegliche Ascherost, die automatische Ascheabfuhr sowie Undichtigkeiten am Vergaser.

Start und Stopp gelingen jetzt allgemein relativ rasch, die Regelvorgänge sind automatisiert. Dauerbetrieb wurde mehrmals über 30 Stunden durchgeführt. Eine Leistung von 8 kW_{el} und 22 kW_{th} konnte erreicht werden. Bei Hoval wurden etwa 150, bei Solo weitere 400 Betriebsstunden akkumuliert.

Die Schadstoffemissionen liegen ähnlich wie bei einer guten Pelletsheizung, die Wirkungsgrade lagen bei 18 % elektrisch und 71 % insgesamt und können noch verbessert werden. Hier sind zwar bei Holz gewisse Grenzen gesetzt, dennoch sollten 20- 22 % elektrischer und über 80 % Gesamtwirkungsgrad erreichbar sein.

Das grundsätzliche Problem von Schlacke- Ablagerungen am Erhitzer trat nur minimal auf, Asche- Verstopfung im Luftvorwärmer gab es bei keinem der Versuche. Das vorliegende Konzept umgeht also dieses in früheren Versuchen fatale Phänomen und stellt im Wesentlichen noch Entwicklungsaufgaben an peripheren Bauteilen zur weiteren Optimierung. Die Entwicklung und Erprobung soll mit hoher Priorität weitergehen.

1. Einleitung

1.1 Strom- und Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien

Bei der Erzeugung elektrischer Energie oder Wärme aus kohlenstoffhaltigen Brennstoffen wird über das Abgas CO₂ ausgestoßen. Ein Weg zur Vermeidung dieser klimarelevanten Emissionen in die Atmosphäre ist unter anderem die Verwendung biogener anstelle fossiler Brennstoffe. Damit kann der CO₂- Kreislauf während des Wachstums der Pflanzen wieder geschlossen werden.

Auch der weltweite Anstieg an Verbrauch und der Preisanstieg fossiler Brennstoffe drängen zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen.

Der biogene Brennstoff mit der längsten Tradition ist Holz. Eine in letzter Zeit sehr erfolgreiche Produktform von Holz als Brennstoff sind Pellets, sie werden für automatisch arbeitende Holz- Zentralheizungen und Einzelöfen verwendet, das Versorgungsnetz entwickelt sich zunehmend seit der Preis energiebezogen mit dem des Heizöls vergleichbar ist.

Da die derzeit zur Verfügung stehenden Biobrennstoffe die fossilen mengenmäßig nicht ersetzen können, ist weiter eine möglichst effiziente Ausnutzung nötig. Die beste energetische Nutzbarmachung von Brennstoffen ist die Kraft- Wärme- Kopplung (KWK), das heißt das Erzeugen von Strom und gleichzeitiger Verwendung der dabei abfallenden Wärme. Auf diese Weise ist 75- 85 % der eingesetzten Energie nutzbar.

Kraft- Wärme- Kopplung setzt den Einsatz der Wärme in naher Umgebung voraus, also relativ kleine, dezentrale Anlagen. In Leistungsgrößen ab etwa 1 MW elektrischer Leistung stehen Dampfturbinenanlagen zur Verfügung. Die Verteilung der thermischen Leistung von 3-4 MW auf umliegende Gebäude ist aber bereits schwierig. Für kleinere Leistungen von 100- 1000 kWel gibt es Entwicklungstendenzen, Lösungen mit Holzvergasern/ Gasmotoren und mit Kolben- Dampfmaschinen zu realisieren.

Für Leistungen unter 100 kWel steht heute keine Technik zur Kraft- Wärme- Kopplung aus fester Biomasse Verfügung.

Es ist aber möglich Stirlingmotoren in Blockheizkraftwerken mit festen Brennstoffen zu betreiben. Da Stirlingmotoren mit äußerer Verbrennung, also mit Wärme arbeiten, können diese grundsätzlich mit beliebigen Wärmequellen betrieben werden, auch durch direkte Beheizung mit Holz. Probleme und Lösungsansätze werden im Folgenden beschrieben.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

1.2 Vorhandene Technik- Gasbetriebene Maschine

Das Prinzip des Heißgas- oder Stirlingmotors ist seit langem bekannt. Die Besonderheit dieses Motors ist, dass ein Arbeitsgas zwischen zwei Zylindern hin- und her geschoben wird, ohne den Motor zu verlassen (geschlossener Gaskreislauf). Die Wärmeenergie, die letztendlich in Bewegungsenergie der Kurbelwelle umgewandelt wird, wird dem Arbeitsgas von außen über einen Wärmeaustauscher zugeführt, allgemein Erhitzer genannt. Die Wärmezufuhr kann durch beliebige Wärmequellen erfolgen, etwa durch Brenner, aber auch durch Solarstrahlung.

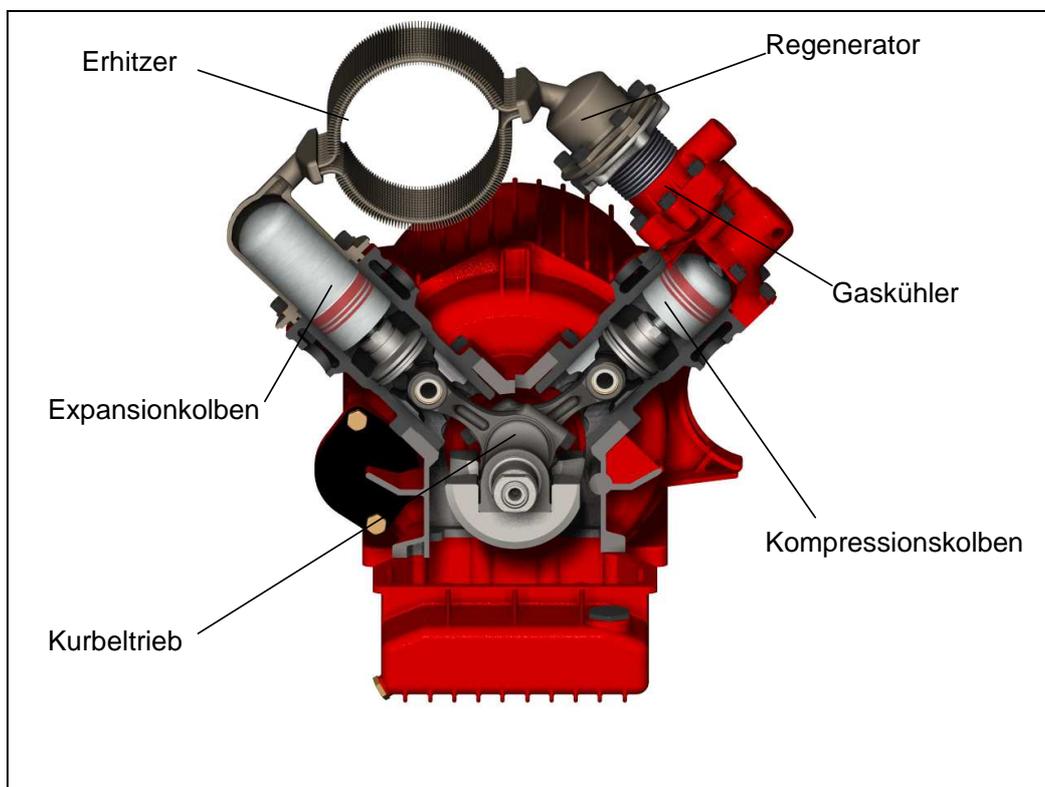


Bild 1: Funktion des Solo Stirling 161

Der von Solo eingesetzte Motor Stirling 161 ist als 90°-V-Zweizylinder mit einem einfach wirkenden Kompressions- und Expansionszylinder konzipiert. Zwischen den Zylindern befinden sich der Erhitzer, der Regenerator und der Gaskühler. Die Wellenleistung liegt bei 10 kW/ 1500 min⁻¹. Wie bei einem herkömmlichen Verbrennungsmotor hat auch der Stirling Kolben. Diese schieben das Arbeitsgas (gewöhnlich Helium) zwischen den beiden Zylindern hin- und her, wobei dies bei niedriger Temperatur komprimiert wird und nach der Erhitzung bei hoher Temperatur expandiert.

Der Erhitzer befindet sich in einer Brennkammer, in der unabhängig vom Motor die Verbrennung des Treibstoffes stattfindet, Verbrennungsrückstände dringen daher nicht in den Motor ein. Damit ergeben sich wichtige Vorteile:



Abschlußbericht Pellets- Stirling

- Es können Brennstoffe genutzt werden, die in konventionellen Otto- oder Dieselmotoren nicht verwendbar sind, zum Beispiel feste Biomasse.
- Verbrennungsrückstände belasten weder Schmierstoffe noch die Umwelt, damit entfällt der Austausch von Motoröl und Filter; Stirlingmotoren können wartungsfrei 5.- 8.000 Stunden laufen, unabhängig vom Brennstoff.
- Der Wirkungsgrad des Stirlingmotors ist wegen des günstigen thermodynamischen Prozesses relativ gut. Auch bei kleinen Motoren sind 30% und mehr erzielbar.

Die Firma SOLO beschäftigt sich seit 1990 mit der Stirling-Technologie. Nach Recherchen und Versuchen mit SPS V 160 in Erdgas- und Solarausführung wurde 1994 eine Neukonstruktion erarbeitet. Diese wurde im von der DBU geförderten Vorhaben „Felderprobung“ mit 16 BHKW bzw. „Micro- KWK- Modulen“ über 100.000 Stunden sehr ausführlich getestet und weiterentwickelt. Die Entwicklung zu dieser hohen Zuverlässigkeit und den Laufzeiten war schwierig und zeitintensiv, konnte aber erfolgreich abgeschlossen werden (siehe Abschlußbericht hierzu, Förderkennzeichen 03873/ 01,02).

SOLO Stirling verfügt also mit dem Stirling 161 über die am längsten und gründlichsten getestete Stirlingmaschine überhaupt. Sie ist relativ einfach und fertigungsgünstig sowie für stationären Einsatz mit langen Laufzeiten konzipiert.

Das Erdgas- Stirling - KWK- Modul wurde auf der Hannover Messe 2001 vorgestellt und ist zertifiziert. Danach wurden die Voraussetzungen für eine Serienproduktion geschaffen, inzwischen sind etwa 100 Geräte produziert und vertrieben. Abmessungen und Kennwerte stellen sich folgendermaßen dar:

Außenabmessungen		
Länge	1280	mm
Breite	700	mm
Höhe	980	mm
Gewicht	450	Kg
Leistung und Wirkungsgrad *		
Elektrische Leistung	2 - 9	kW
Elektrischer Wirkungsgrad	24	%
Thermische Leistung	8– 26	kW
Thermischer Wirkungsgrad (bez. auf Hu)	65 – 75	%
Emissionen		
Stickoxid max.	50	mg/m ³
Kohlenmonoxid max.	80	mg/m ³
Schalldruckpegel in 1 m Abstand	55	dBA
Wartungsintervall		
Austausch Kolbenringe, Stangendichtung	über 5000	h
Motordaten		
Bauart	V 2-Zylinder	
Hubraum	160	ccm

SOLO Stirling GmbH Postfach 600152 71050 Sindelfingen

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Mittlerer Arbeitsdruck	30 – 150	bar
Arbeitsgas	Helium	
Obere Arbeitsgastemperatur	640	°C
Nenn Drehzahl	1500	U/min

* bez. auf Kühlwasservorlauf von 50 °C

Da die Wärmeeinkopplung am Erhitzer von Stirlingmotoren auf hohem Temperaturniveau erfolgen muss, wird für einen guten feuerungstechnischen Wirkungsgrad Luftvorwärmung nötig. Das Abgas nach dem Erhitzer ist über 800 °C heiß und überträgt diese Energie in einem Gegenstrom- Wärmeübertrager auf die Frischluft. Es kühlt sich dabei auf etwa 250 –300 °C ab, die Luft wird auf über 600 °C vorgewärmt. Zur Nutzung der Restwärme im Abgas ist noch ein wasserdurchströmter Wärmeübertrager nachgeschaltet, der es auf etwa 20 °C über die Rücklaufemperatur abkühlt und dabei Kondensat erzeugt.

Eine wesentliche Weiterentwicklung am Stirling 161 betrifft die Brennkammer und den Brenner. Hier findet ein modernes Verfahren mit flammloser Oxidation (Flox®, WS- Wärmeprozessestechnik) Verwendung, um die Schadstoffemissionen zu minimieren.

Die Entwicklung geschah zunächst 1998/ 99 in Zusammenarbeit mit der Firma WS- Wärmeprozessestechnik in einem DBU- Vorhaben (Az.: 10370; „Entwicklung eines Regenerativbrenners...“), später arbeitete Solo unter Nutzung von WS- Lizenzen und eigenen Patenten selbstständig weiter.

Auf der technischen Basis industrieller Ofenheizungen wurde ein entsprechender Gas- Brenner entwickelt, der mit sehr hohen Abgasrezirkulationsraten arbeitet. Dadurch lassen sich die Stickoxidemissionen, die bei hoher Luftvorwärmung zum Problem werden, wirksam begrenzen: Durch die für Stirlingmotoren notwendige Luftvorwärmung lassen sich stabile Oxidationsbedingungen einstellen, wobei die Reaktion Brennstoff- Luft „flammlos“, also räumlich verteilt stattfindet. Durch den hohen Abgasanteil wird die Grenztemperatur der thermischen NOx- Bildung (ca. 1500 °C) nicht erreicht. Der Brenner ist im Verhältnis 1: 3 modulierbar.

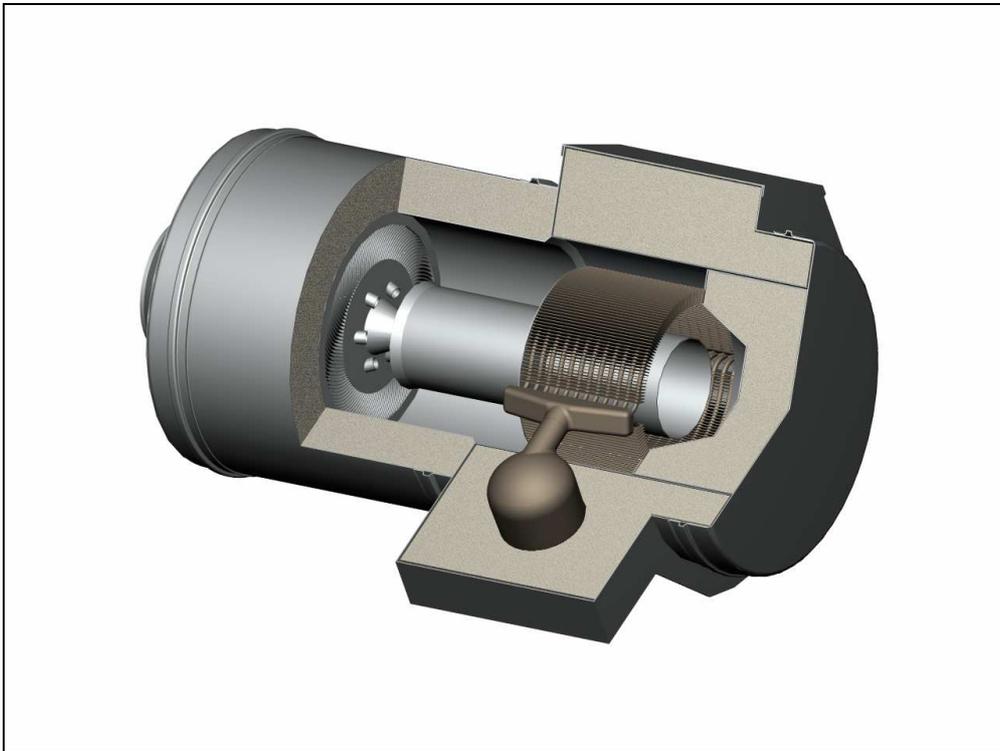


Bild 2: Gasbrenner für Stirling 161 mit flammloser Oxidation

1.3 Ziel des Vorhabens

Es sollte auf Basis des vorhandenen, in Serie produzierten KWK- Moduls eine Version mit einer Pellets- Feuerung entwickelt werden. Das wesentliche zu lösende Problem betraf die extreme Asche- bzw. Partikelarmut der Feuerung, da diese den filigranen Erhitzer und auch den Luftvorwärmer zusetzen würden.

Der Erhitzer muss mit Rippen zur Vergrößerung der Oberfläche bestückt sein, da das Innenvolumen zur Schadraum- Minimierung sehr gering bleiben muss. Asche von Temperaturen über ca. 1100 °C kann erweicht und damit klebrig sein, es besteht dann die Gefahr eines Anbackens am Erhitzer.

Der Luftvorwärmer ist bei dieser Feuerung mit einer Nutzttemperatur von rund 700 °C für einen guten Feuerungs- Wirkungsgrad unerlässlich, auch hier werden für gute Wärmeübergänge enge Kanäle benötigt.

Daher muss die Verbrennung mit gestufter Luftzufuhr durchgeführt werden, durch eine geringe Primärluftzufuhr zur Vergasung des Brennstoffs kann die Asche kaum aufgewirbelt werden, die eigentliche Verbrennung findet unter Sekundärluftzufuhr statt.

Weiter muss eventuell die Verbrennungstemperatur begrenzt werden, um eine Ascheerweichung zu vermeiden. Dies kann durch eine Abgasrezirkulation entsprechend dem Flox- Verfahren geschehen.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Die Verbrennungsverfahren sollte also nahe dem mit Luftvorwärmung und Abgasrezirkulation arbeitenden Flox- Brenner liegen, um die vorhandenen Komponenten zu nutzen. So wurde entschieden, die Pellets in einem Vergaser mithilfe von Primärluft in ein brennfähiges Holzgas umzusetzen, das danach mit Sekundärluft in einem modifizierten Floxbrenner vollständig verbrannt wird.

Die Brennerleistung sollte ähnlich der des Gasbrenners bei knapp 40 kW liegen, die Kennwerte werden wegen des für Biomasse höheren Luftüberschusses und einer wegen Verschmutzung schlechteren Luftvorwärmung etwas unter der Gasversion liegen:

Die elektrische Leistung sollte modulierbar 4-8 kW betragen, die thermische dabei 10- 20 kW. Ein elektrischer Wirkungsgrad von 20 % war das Ziel, der thermische sollte bei 60 % liegen.

Extrem geringe Staubemissionen weit unter 100 mg/m^3 sind auch aus funktionellen Gründen nötig, die CO- Emissionen wird ähnlich wie Gasbrenner um 200 mg/m^3 abgeschätzt. Stickoxidemissionen erwarten wir wegen der Stickstofffracht im Brennstoff um 200 mg/m^3 . Alle Werte liegen damit deutlich unter der TA Luft.

1.4 Projektpartner

Die Hoval AG ist ein Liechtensteiner Hersteller von Heizkesseln und Heizsystemen und auf dem Schweizer, österreichischen und süddeutschen Markt präsent. Etwa 1000 Mitarbeiter fertigen in Vaduz und Werken in den Nachbarländern. Die Kompetenz speziell bei Biomassefeuerungen ist allgemein anerkannt. Hoval hat bereits eigene Versuche mit einem prototypischen 1- kW Stirlingmotor in einer Stückholzfeuerung gemacht.

So kam der Kontakt zustande. Die Hoval AG hat als Unterauftragnehmer den Holzvergaser für dieses Projekt entwickelt und dabei einen Eigenanteil von 70 % der Kosten übernommen.

2 Projektverlauf

2.1 Konzeption Feuerung

Eines der entscheidenden Probleme einer Holzpellet- Feuerung für leistungsfähige Stirlingmotoren ist die Aschebelastung am Erhitzer und im Luftvorwärmer.

Zuerst wurden deshalb grundlegende Literaturrecherchen zum Abbrandverhalten, Reaktionen, und Aschebildung durchgeführt. Bei Hoval wurden verschiedene Feuerungskonzepte getestet und Erfahrungen damit verglichen. Resultat ist, dass die Ausfilterung der Asche aus dem Rauchgas nicht sicher beherrschbar ist, die Rückhaltung im Glutbett ist günstiger. Um dort möglichst wenig Asche aufzuwirbeln, muss die Verbrennungsluft konsequent gestuft zugeführt werden, also zum kleinen Teil zur Vergasung des Brennstoffes (Primärluft) und der Rest später zur vollständigen Verbrennung des Gases (Sekundärluft).

Zur Erlangung eines guten Wirkungsgrades des Motors muss außerdem die Verbrennungsluft aus der Abgasenergie auf 500- 650 °C vorgewärmt werden. Dies sollte sich möglichst auf alle Stufen der Luftzufuhr beziehen.

Wird die Primärluft vorgewärmt, so kann auch die nötige Menge zur Erzeugung des Pyrolysegases gering bleiben und so das Austragen von Asche und Teeren noch mal minimiert werden.

Wenn durch die Luftvorwärmung die Verbrennungstemperatur über die Grenze der Ascheerweichung steigen sollte, kann zur Kühlung eine erhebliche Menge Abgas rezirkuliert werden.

Der Erhitzer des Stirlingmotors wird eventuell so zu verändern sein, dass sich möglichst wenig Asche ansammeln kann. Ebenso verhält es sich mit dem Luftvorwärmer.

Zunächst wurden verschiedene Konzepte untersucht:

1. Anbau einer Vorverbrennung der Pellets mit vorgewärmter Primärluft unter Luftmangel hinter dem Luftvorwärmer des Floxbrenners, weiterführen zur Hauptbrennkammer und Verbrennen mit vorgewärmter Sekundärluft dort
2. Vorschubbrenner in Rinnenform mit schraubenförmig zirkulierender Luftzufuhr in mehreren Stufen
3. Vergaser mit Primärluft vorgeschaltet vor leicht modifizierten Gasbrenner

Kriterien für die Entscheidung waren vor allem minimale Ascheemissionen und Übernahme vorhandener Komponenten wie Brennkammer und Luftvorwärmer. Das Brennerkonzept wurde daher als klar gestufte Feuerung mit Vergasung unter Primärluft und Verbrennung unter Sekundärluft festgelegt Die Entscheidung fiel deshalb auf die dritte Variante. Das Risiko, einen Holzvergaser zum Funktionieren zu bringen, wurde nicht so hoch eingeschätzt, da die Teerprobleme in einer Stirling- Brennkammer nicht relevant sind. Deshalb wurde auch der aufsteigende Gegenstrom- Vergaser vorgesehen, der das Holzgas durch die absinkende Brennstoff- Füllung nach oben abführt und als sehr Asche- arm aber Teer- reich bekannt ist. Der Brenner basiert auf dem Gasbrenner im Flox[®]- (Flammlose Oxidation, WS Wärmeprozessestechnik) Verfahren mit Luftvorwärmung.

2.2 Erste Versuche mit aufsteigendem Vergaser bei Hoval

Die Komponenten Vergaser und Brenner wurden zunächst separat aufgebaut und weiterentwickelt und danach zu einer Einheit zusammengeführt.

Hoval baute einen aufsteigenden Gegenstromvergaser mit doppelter Wandung und verschiedenen Möglichkeiten, Primär- Luft zuzuführen und die Abgaswärme zur Vergaser/ Brennstoffvorwärmung zu verwenden. Die Pelletzufuhr geschah automatisch aus einem Reservoir. (Bild) Die Vorwärmung der Primärluft war bei diesem Konzept leider nur schwer auszuführen.

Solo modifizierte den Erdgas- Floxbrenner so, dass die größere Menge des im Vergleich zu Erdgas sehr niederkalorigen Holzgases zugeführt werden konnte. Die Möglichkeit eines Brennerstarts mit Flüssiggas blieb erhalten.

Der erste Versuch im Februar 2003 in Liechtenstein mit Hoval- Vergaser und Stirlingmotor zeigte die noch zu lösenden Probleme: Die Verbrennung des Holzgases in der Brennkammer verlief deutlich langsamer als bei Erd- oder Flüssiggas, die Reaktion war nach dem Erhitzer und auch im Luftvorwärmer noch nicht abgeschlossen. Kondensat in Form weißen Rauches trat aus dem Abgasrohr, schließlich regierte auch Kondensat innerhalb des Luftvorwärmers und schmolz das Metall.

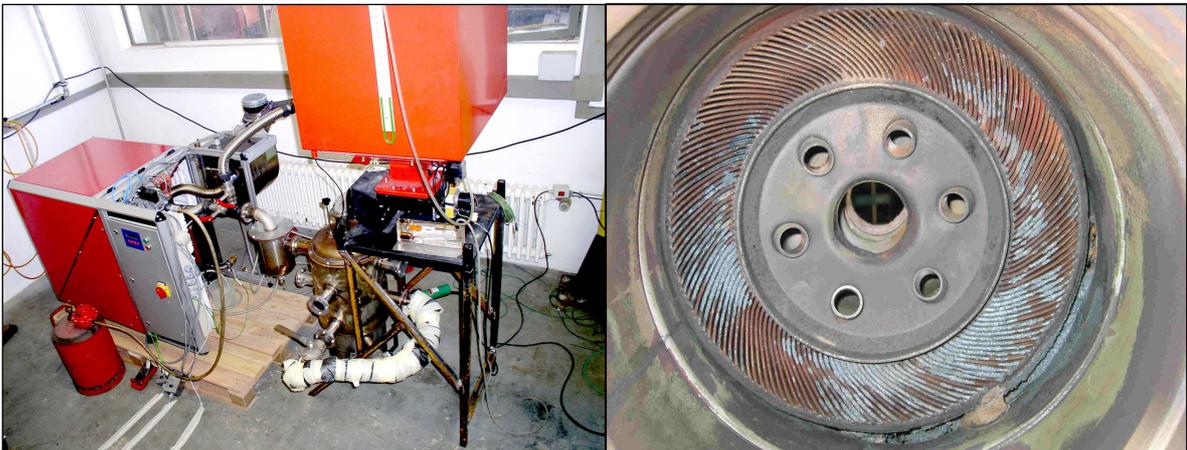


Bild 3: Aufbau Versuch mit Vergaser und BHKW, Brennerfront mit defektem Luftvorwärmer. Gaslanze im Zentrum demontiert

Auch die Gasqualität war zeitabhängig, eine frische Füllung Pellets erzeugte gutes Holzgas, nach etwa 30 Minuten war die Reaktionsfähigkeit des Gases wesentlich geringer, die Leistung sank. Grund ist die zunächst rasche Vergasung des Lignins und die wesentliche langsamere Umsetzung des Kohleskeletts. Bei jeder Nachfüllung gab es deutliche Schwankungen der Gasqualität. Die Temperaturen im Vergaser waren im unteren Bereich mit über 1000 °C bedenklich hoch.

Damit war klar, dass für die Verbrennungseigenschaften des niederkalorigen Holzgases deutliche Änderungen am Erdgasbrenner nötig sind und dass die Gasleistung und -qualität des Vergasers sehr unterschiedlich sein kann.

2.3 Verbesserter Brenner für Schwachgas und Test im Kessel

Vor weiteren Versuchen wurde sowohl der Vergaser bei Hoval als auch der Brenner bei Solo weiterentwickelt. Gleichmäßigere Brenngasqualität und raschere Verbrennung waren das Ziel. Hoval machte Vorversuche mit einem modifizierten Vergaser und einem extra gebauten Rohbrenner. Ein Öl-Heizkessel wurde für die Versuche entsprechend umgebaut und mit einem Sichtfenster versehen.



Bild 4: Vergaser- Prüfstand bei Hoval mit Stirling- Brenner in Heizkessel

Bei Solo wurde ein variabler Brenner gebaut, bei dem die Luftzufuhr in die Brennkammer teilweise mit Drall (um die Reaktion zu beschleunigen und teilweise mit Injektor- Düsen (um Abgas zu rezirkulieren wie dem Original Floxbrenner) erfolgt, die Anteile sind veränderbar. Bei Versuchen mit Erdgas wurde außerdem das Mischrohr (in das Luft und Brenngas einströmt) so variiert, dass die Mischstrecke und der Anteil der Abgasrezirkulation ausgetestet werden konnte. Über die CO- und NOx- Bildung sowie Temperaturen konnte der Einfluss von Veränderungen auf die Reaktionsgeschwindigkeit beurteilt werden.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

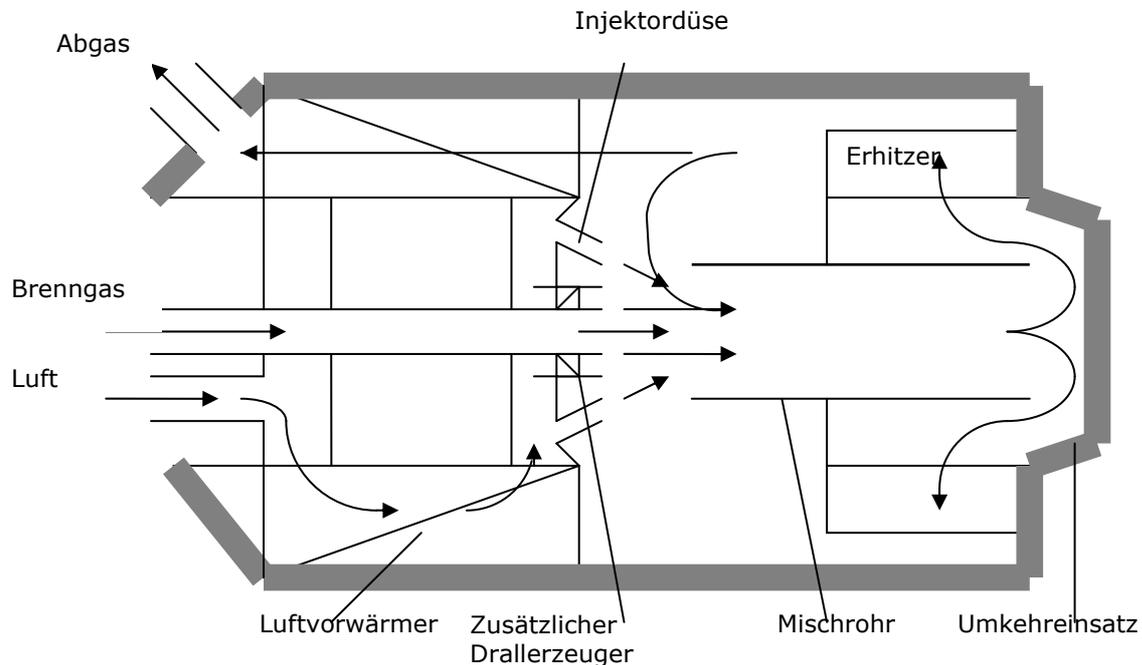


Bild 5: Variabler Brenner für niederkalorige Gase

Dieser Brenner wurde zunächst in verschiedenen Varianten mit Erdgas auf seine Funktion und Emissionen getestet. Die notwendige Änderung am Zünder stellte keinen Nachteil dar, die Stickoxidemissionen lagen bei verminderter Abgasrezirkulation wie erwartet höher, werden aber mit reaktionsträgem Holzgas wieder sinken.

Im Juli 2003 wurden dann der weiterentwickelte Vergaser und der Solo Brenner im Heizkessel bei Hoval getestet. Der Brenner konnte mit Flüssiggas gestartet werden und feuerte zunächst ohne Erhitzer in den Brennraum. Das Abgas wurde noch aus dem Kesselstutzen herausgeführt, damit war keine Luftvorwärmung möglich.

Nach Umschalten von Flüssiggas auf Holzgas konnte die veränderte Flamme durch das Fenster beobachtet werden, sie ist dann wesentlich länger. Es zeigten sich einige Probleme:

- Es ist immer noch schwierig, die reine Holzgas- Flamme stabil zu halten, sie neigt zum Pulsieren und Abreißen.
- Teer und Wasserkondensat sammelt sich in der Leitung vom Vergaser zum Brenner, dies stört die Gaszufuhr oder tritt schwallartig in den Brenner und stört die Verbrennung.
- Teer- Kondensat kann auch als Schaum „aufkochen“ und dann die Holzgaszufuhr blockieren, speziell wenn es wieder verfestigt.

- Nebenluft tritt in den Vergaser (wird im Unterdruck betrieben) und stört die Kontrolle über die Gasbildung und die anschließende Verbrennung.

Weitere Versuche im August 2003 wurden mit einem besser abgedichteten Vergaser und einer isolierten und verkürzten Verbindungsleitung zum Brenner gemacht.

Am Brenner wurden die Injektor- Luftdüsen noch steiler zur Längsachse gestellt um die Durchmischung und Reaktion zu verbessern. Eine Prallplatte wurde auf die Gaslanze gesetzt um ebenfalls die Durchmischung von Brenngas und Luft zu fördern.

Jetzt wurde auch ein wassergekühlter Stirling- Erhitzer montiert, die ganze Einheit aus Brenner, Mischrohr, Erhitzer und Umkehreinheit in die Kesselbrennkammer eingesetzt. Das Abgas wurde jetzt durch den Luftvorwärmer abgeführt, so konnte die Frischluft vorgewärmt werden. Die Verhältnisse kamen denen auf dem Motor sehr nahe.

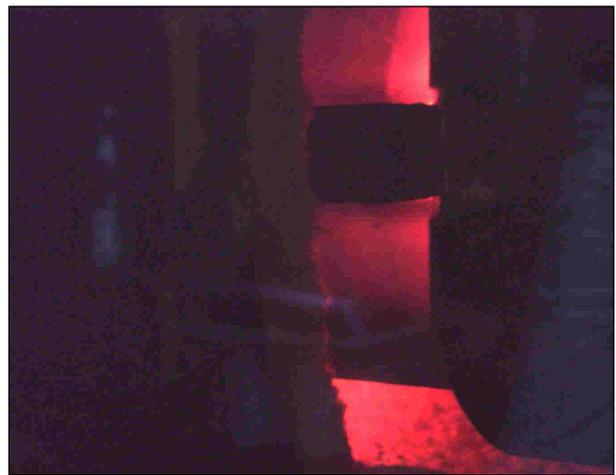
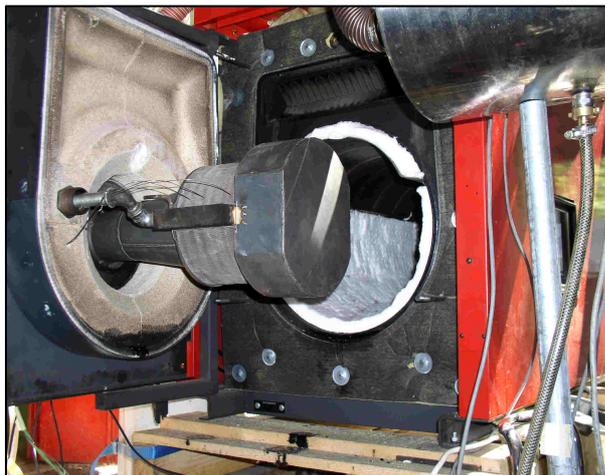


Bild 6: Brennereinheit mit wassergekühltem: Erhitzer und Umkehrplatte, rechts in Betrieb (Ausschnitt)

Durch die Luftvorwärmung konnte nun die Holzgasflamme stabil gehalten werden. Der Brenner lief befriedigend und die Emissionen waren gut, Ablagerungen waren nicht erkennbar. Eine Abgasrezirkulation ist nicht erforderlich.

Probleme machte weiterhin die Empfindlichkeit auf Falschlufte am Vergaser, das konnte schließlich behoben werden. Auch durch Einblasen von Wasserdampf in den Vergaser, der als chemischer Hilfsstoff wirkt, konnte die Gasqualität verbessert werden, eine Analyse der Gasqualität war aber nicht möglich.

Kritisch war aber nach wie vor der Vergaserbetrieb, folgende Probleme treten auf:

- Teerschaum kann sich in der Zuleitung bilden
- Ein Abstellen des Vergasers mit einigen Litern Pellets ist nicht in akzeptabel kurzer Zeit möglich

Abschlußbericht Pellets- Stirling

- Die Gasqualität schwankt über die Betriebszeit und bei Zufuhr frischer Pellets
- Hohe Temperaturen und Produktgas im Vergaser können sogar Inconel-Thermoelemente innerhalb von Stunden korrodieren.

Angesichts der unbefriedigenden Ergebnisse wurden alternative Konzepte untersucht:

2.4 Konzept mit integriertem Vergaser

Der Vergaser wird bei diesem Konzept auf ein Rohr reduziert, das in der Brennkammerachse angeordnet ist. Das Volumen ist sehr gering. Die Pellets werden von hinten –wo sonst die Gaszufuhr ist- eingeschoben und erreichen in der Brennkammer Pyrolysetemperatur. Die Asche wird auf der entgegen gesetzten Seite entnommen. Zusätzlich wird Wasser (-dampf) auf dieser Seite eingedüst. Damit formiert sich Holzgas ohne weitere Primärluft, die Reaktion ist endotherm, die Temperaturen liegen unter der Brennkammertemperatur. Das Holzgas tritt aus dem Vergaserrohr etwa in der Mitte aus, wo es mit der vorgewärmten Luft vermischt und verbrannt wird.

Damit wird erwartet, dass folgende Probleme gelöst werden können:

- Teerkondensat kann während des Betriebs im Vergaser nicht entstehen, die Temperaturen sind zu hoch
- Übertemperatur und Korrosion kann nicht entstehen, da die Vergasung endotherm abläuft
- Nebenluft kann nur von der Pellet- Zufuhr her eintreten, hier gibt es Maßnahmen zur Abdichtung
- Die Gasmenge kann über die Wasserdampfmenge gesteuert und konstant gehalten werden
- Start und Stopp sind wegen der geringen Pelletmengen relativ rasch möglich

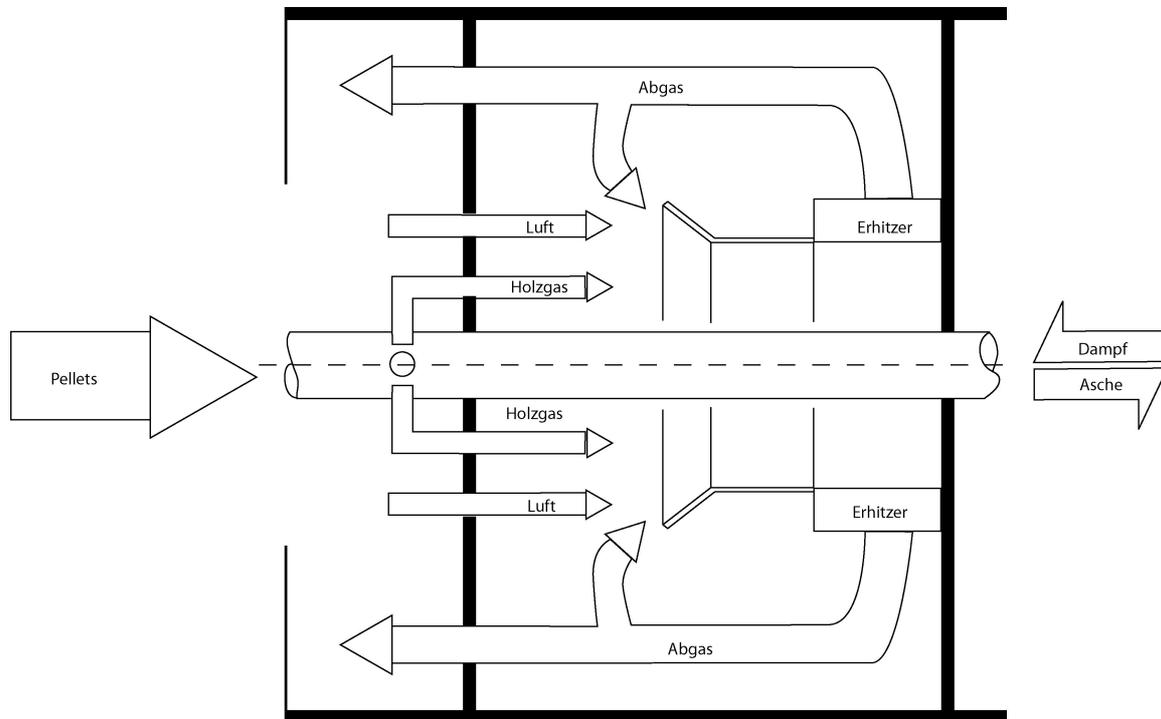


Bild 7: Konzept integrierter Vergaser

Ein solcher Vergaser innerhalb der Brennkammer wurde aufgebaut, auch eine zweite Versuchsmaschine in vertikaler Anordnung wurde gebaut. Im Sommer 2004 wurden erste Tests gefahren, die allerdings noch keine klaren Ergebnisse zeigten. Es gab Schwierigkeiten mit der Pellets- Zufuhr und Dampfblasung, die eingebrachten Pellets vergasten aber vollständig.

2.5 Versuche mit absteigendem Vergaser

Bei Hoval in Liechtenstein baute man den Vergaser im Herbst 2004 in eine absteigende Version um, die bekanntlich eine bessere Gasqualität liefert, jedoch Asche im Gas mitführt. Die Nachteile des separaten Vergasers sind damit nicht vollkommen gelöst aber der neue Ansatz war interessant genug, weiter mit Hoval zusammenzuarbeiten, zumal die ersten Versuche dort sehr gut verliefen. Vergaser dieses Typs sind auch allgemein bekannt als Imbert- Vergaser.

Bis zur Beendigung des Projekts wurden alle Versuche mit dieser Vergaserbauart gefahren.

Bis Ende 2004 wurde mit einem Umbau des ursprünglich aufsteigenden Vergasers gearbeitet. Das folgende Bild zeigt diesen Umbau beim letzten Versuch am 4.11.2004:

Abschlußbericht Pellets- Stirling



Bild 8: In der Mitte der Vergaser, links das Stirling- Modul

Es stellte sich jedoch schnell heraus, daß die Zuverlässigkeit des Vergasers nicht ausreichend war:

- Die Dichtungen hielten nicht
- Ein kontinuierliches Austragssystem der Asche war nicht vorgesehen
- Die Pelletzufuhr versagte
- In der Gasführung gab es Verteerungen

Dennoch waren große Fortschritte erreicht worden, denn erstmals konnte im Stirlingbetrieb ein Maschinendruck von 120 bar gefahren werden, was 6,5 kWe entspricht. Der in 2003 entwickelte Brenner arbeitete im Stirlingbetrieb hervorragend und es konnten auch sehr gute Emissionen nachgewiesen werden. Die Versuchsdauer verlängerte sich mit dem neuen Vergasertyp ebenfalls.

Hoval hatte zu diesem Zeitpunkt bereits einen Diplomanden für das Projekt eingestellt. Er konstruierte über die Winterpause einen neuen Vergasertypen, mit dem Ziel die wesentlichen Schwachstellen des ersten Prototyps auszumerzen. Am 21.2.2005 konnte der erste Versuch mit diesem Vergaser gefahren werden:

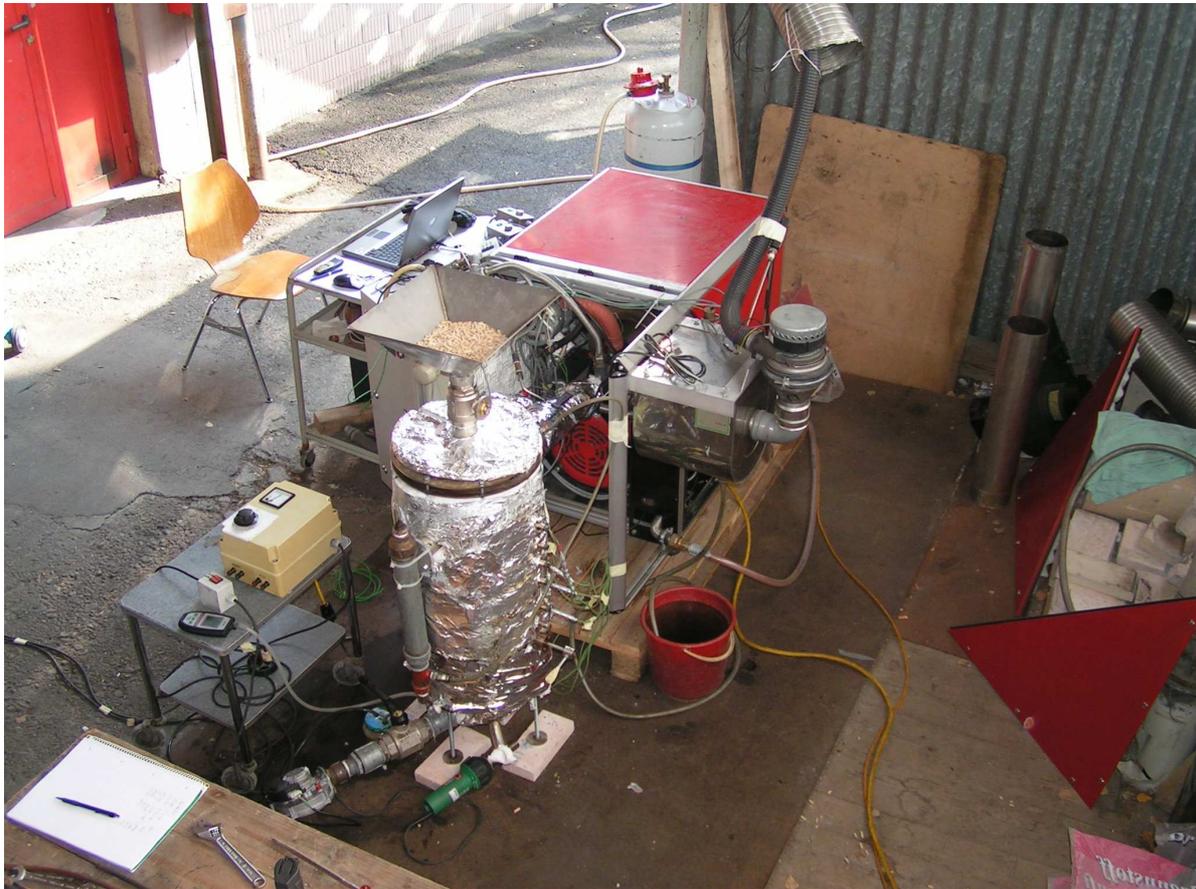


Bild 9: Neuer absteigender Vergaser, noch mit manueller Pelletzufuhr

Es wurden bis Juni 2005 mehrere Einzelversuche gefahren. Arbeitsschwerpunkt war in erster Linie die Pelletschleuse. Hier gab es enorme Schwierigkeiten ein zuverlässiges und sicheres System zu finden. Aufgrund des Überdrucks im Vergaser waren selbst minimale Undichtigkeiten im Schleusenbereich Grund für ein Verstopfen der Zufuhr. Die hohe Feuchtigkeit des austretenden Gases verklebte den Staub, die Pellets selbst quollen auf und zerfielen innerhalb der Schleuse. Der Versuchsbetrieb konnte nur durch ständiges manuelles Gängigmachen aufrechterhalten werden. Mehrere Schleusenvarianten wurden gebaut.

Die Temperaturen im Vergaser zeigt das folgende Diagramm1. Im Zuge dieser Phase wurde auch eine automatische Erfassung der Holzgasqualität mit den Messpunkten HC, CO und CO₂ von Hoval eingerichtet, siehe Diagramm 2 unter 3.1.

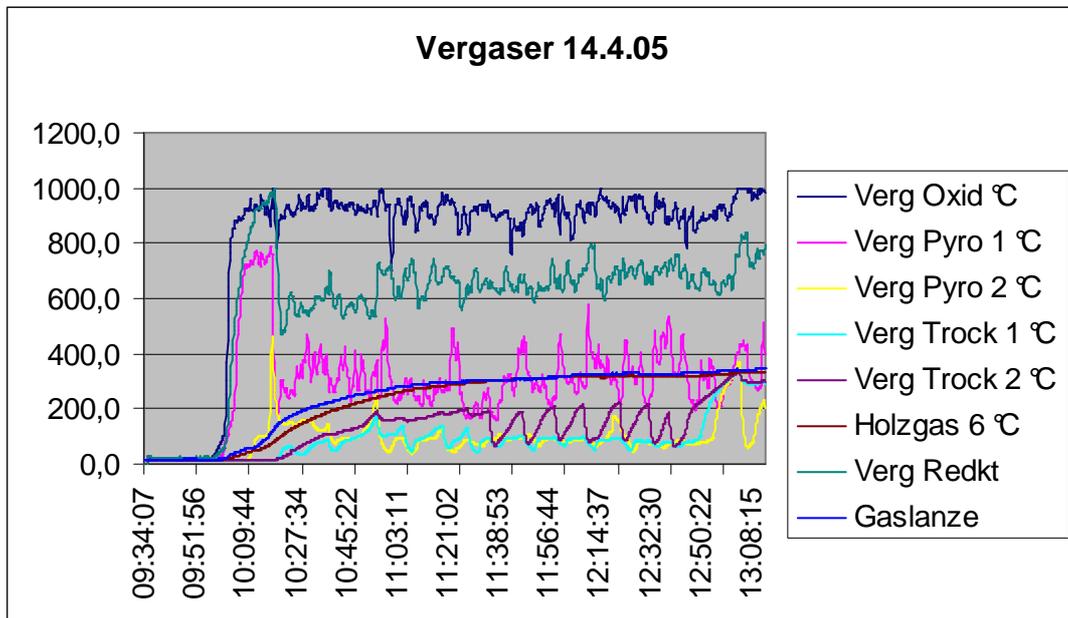


Diagramm 1: Temperaturschichtung im Vergaser

2.6 Automatisierung

Im Juni 2005 wurde erstmalig ein Schritt hin zur Automatisierung unternommen. Stellmotoren wurden angebracht für:



- Ascheaustrag
- Rüttelmechanismus
- Pelletschleuse

Als Steuerung wurde eine SPS der Firma WAGO eingesetzt. Durch deren modulare Bauweise konnten alle Aufgaben flexibel gelöst werden.

Während der Rüttler und der Ascheaustrag nur nach einem Zeitintervall arbeiteten, so wurde die Vergaserbeschickung nach dem Temperaturprofil geregelt. Diese Vorgehensweise hat sich auch in den weiteren Versuchen bewährt. Der Vorteil auf mechanische Komponenten bei der Füllstandsregelung verzichten zu können ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den bisher bekannten Paddelfühlern. Eine Patentierung des Verfahrens wird geprüft.

Bild 10: Vergaser mit Beschickung vor Stirling Modul

Die Excel-Software zur Messdatenerfassung konnte auf Mod- Bus umgestellt werden. Außerdem konnten deutliche Schritte hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit der Makros gemacht werden.

Die Leistung der Stirlingmaschine wird nicht über den eingestellten Helium-Druck sondern über die dem Brenner zugeführte Sekundärluft geregelt. Eine Lamdamessung im Abgas dient der SPS dazu, die nötige Holzgasmenge über eine Motorklappe in der Primärluft bereitzustellen. Die Stirling- Regelung passt schließlich den Helium- Druck so an, dass die Erhitzertemperatur konstant bei 740 °C bleibt.

Diese Betriebsweise war Anfangs sehr schwankend, durch Verfeinerungen der Regelalgorithmen konnte sie aber erheblich beruhigt werden.

2.7 Dauerversuche

Im Juni 2005 wurde aufgrund der positiven Ergebnisse beschlossen, nun parallel sowohl in Vaduz als auch in Sindelfingen Versuche zu fahren um möglichst viele Betriebsstunden zu erreichen.

Hoval baute darum auf der Basis des vorhandenen Vergasers einen weiteren Prototyp, während in Sindelfingen ein eigener Prüfstand eingerichtet wurde. Der Stirling wurde wieder nach Sindelfingen geschickt, während der wassergekühlte Stirling-Erhitzer im Ölkessel bei Hoval für deren Versuche als Holzgasabnehmer blieb.



Bild 11: Versuchsaufbau in Sindelfingen

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Am 14.10.2005 konnte erstmalig in Sindelfingen die Anlage in Betrieb genommen werden.

Bei den Dauerversuchen traten deutlich folgende Arbeitsfelder ans Licht:

- Die Abdichtung des Vergasers über Flanschdichtungen mit Dichtschnüren aus Keramik versagte regelmäßig. Am oberen Deckel konnte durch den Einsatz von Stirling Brennkammerteilen schnell und sicher Abhilfe geschaffen werden.
- Die Abdichtung des Rüttlerantriebs war thermisch zu hoch belastet. Hier trat ständig Holzgas aus. Durch eine konstruktive Verlegung in einen kälteren Bereich und Auslegung als O-Ring-Dichtung wurde der Fehler behoben.
- Die Ascheschnecke versagte regelmäßig. Da sie als seelenlose Schnecke ausgebildet war, reichte die Festigkeit bei den hohen Temperaturen nicht aus und sie verformte sich. Der Vergaser lief dann mit Asche voll.
- Der Antrieb der Ascheschnecke war thermisch einer zu hohen Belastung ausgesetzt. Eine Verlegung in einen kälteren Bereich war erforderlich.
- Die Pelletschleuse arbeitete äußerst unzuverlässig. Nachdem mehrere Klappenschleusen schon nach kürzester Zeit ausgefallen waren wurde ein metallisch dichtendes Sitzventil mit pneumatischer Ansteuerung konstruiert. Das Ventil arbeitete sehr zuverlässig auch unter den widrigen Bedingungen.

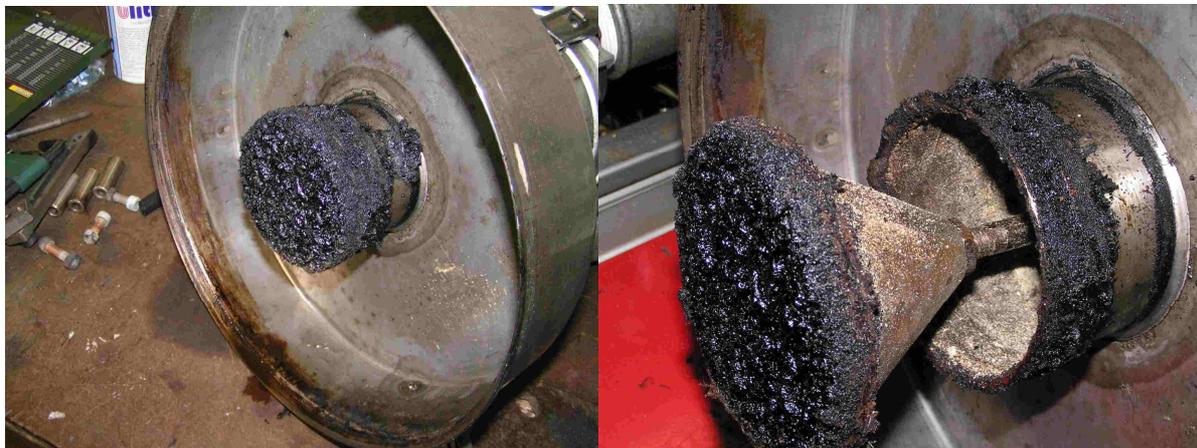


Bild 12: Sitzventil der Pelletschleuse Zu/ Offen, arbeitet trotz der Teerablagerungen

Die Dauerversuche wurden auch nach Ablauf des Projekts weiter fortgesetzt. Der erste Schwerpunkt war durch Verbesserung der Einzelkomponenten einen dauerhaften Versuchsablauf zu erreichen. Außerdem sollte der ständig beaufsichtigte Betrieb durch weitere Sicherheitsketten und Automatisierungsmaßnahmen in einen selbständigen Betrieb geführt werden.

Diese Ziele sind inzwischen auch erreicht worden.

3 Ergebnisse

3.1 Erreichter technischer Stand

Das System ist mit Erd- oder Flüssiggas im Brenner und durch ein Heißluftgebläse am Vergaser allgemein gut zu starten. Während der Brenner aufgewärmt wird, mischt sich immer mehr im Vergaser produziertes Holzgas zu, nach ca. 15 Minuten erreicht die Maschine Normalbetrieb mit reinem Holzgas. Über die Temperaturen im Vergaser kann die Lage der Glutzone im Vergaser beurteilt und entsprechend Brennstoff nachgefördert werden.

Die Sekundärluft für den Brenner wird nach gewünschter Leistung eingestellt. Die nötige Primärluft für den Vergaser wird über eine Lamda- Sonde im Abgas ermittelt. Letztlich wird dadurch die Menge der Gasproduktion beeinflusst. Zur Kontrolle der vollständigen Verbrennung wird die Abgastemperatur nach dem Erhitzeer ständig beobachtet.

Das Abstellen geschieht durch Beenden der Primärluftzufuhr und kann durch Wassereinspritzen beschleunigt werden, so dass nach 15- 20 Minuten am Motor Stillstand erreicht ist. Das Saugzuggebläse läuft noch nach.

Der Vergaser wird derzeit mit ca. 20 mbar über der Umgebung betrieben, in Zukunft wird ein druckneutraler Betrieb angestrebt, was aber ein regelbares, wärme und kondensatfestes Abgas- Absauggebläse nach dem Abgaswärmetauscher mit EMV- Zulassung erfordert, was serienmäßig nicht erhältlich ist.

Im Vergaser werden unterstöchiometrische Luftzahlen von etwa $\lambda = 0,4$ gefahren, im Abgas nach dem Brenner waren die Luftzahlen bei etwa 1,4. Diagramm 2 zeigt die Zusammensetzung des Holzgases. Man erkennt zunächst die noch sehr stark schwankende Gasproduktion, dies wurde durch bessere Regelung inzwischen deutlich gleichmäßiger. Der prozentuale Anteil von CO und CO₂ ist auf der linken Abszisse zu sehen und rechts der Anteil der HC-Verbindungen, oder auch der Teere. Allerdings wurde nach einer Gaswäsche gemessen um das Messgerät nicht durch übermäßige Teerbelastung zu zerstören. Diese Kurve ist also nur tendenziell auszuwerten. Für den Heizwert des Produktgases steht CO und H₂ im Vordergrund. Der Rest ist überwiegend unvermeidlicher Stickstoff aus der Primärluft und sehr geringe Mengen an Methan und anderen Kohlenwasserstoffen. H₂ konnte jedoch nicht erfasst werden. Der Heizwert des Gases liegt mit rund 8,5 MJ/m³ nur bei rund einem Viertel von dem des Erdgases.

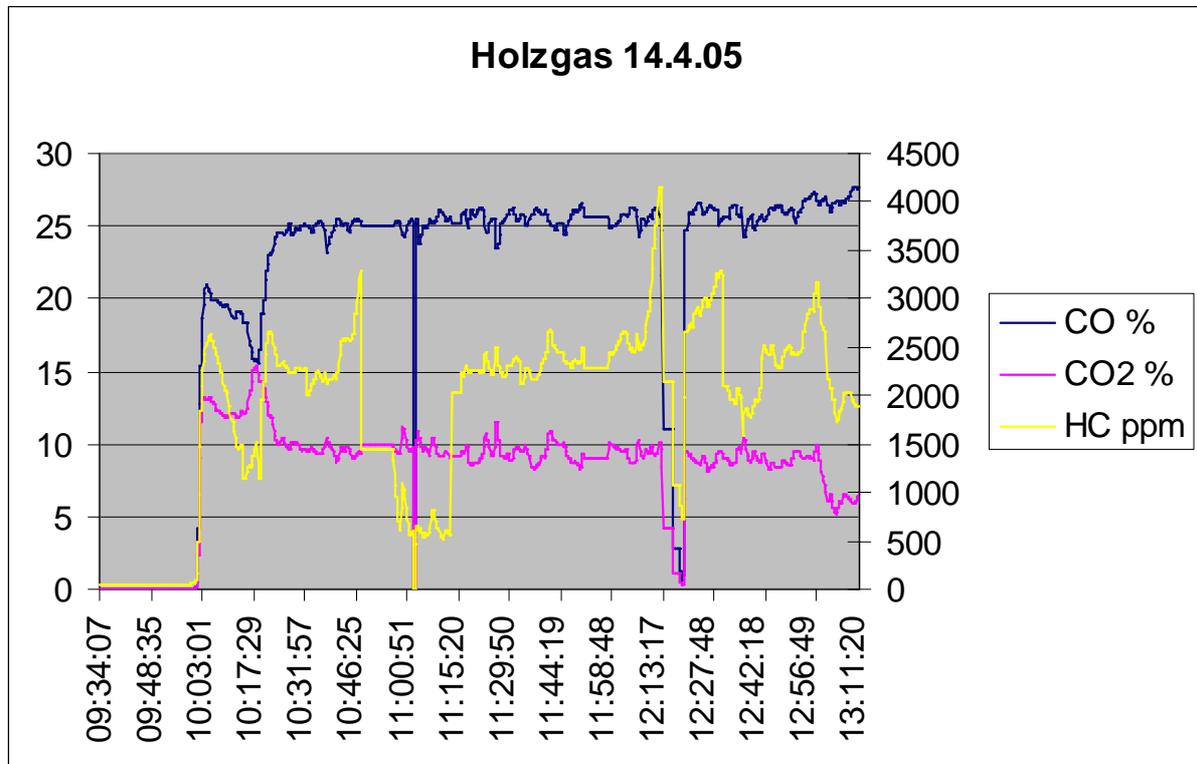


Diagramm 2: Aufschrieb der Holzgas- Zusammensetzung

Es konnten mehrere Dauerbetriebsphasen über 15- 30 Stunden gefahren werden. Insgesamt sind etwa 400 Betriebsstunden des Gesamt- Systems akkumuliert, weitere 150 Stunden mit Vergaser und Brenner im Kessel. Hier konnte das Ziel von Tausend Betriebsstunden nicht erreicht werden, Probleme mit der Vergaser- Peripherie hatten dies nicht erlaubt:

Im Betrieb werden entsprechend dem Temperaturprofil im Vergaser die Pellets über eine Schleuse zugeführt. Der Rost wird zyklisch bewegt und die Ascheschnecke eingeschaltet. Diese drei Komponenten erforderten noch weitere Erprobung, es gab hier immer wieder Ausfälle aber auch kontinuierlich Verbesserungen. Diese von Pellets- Feuerungen entnommenen Geräte waren offensichtlich mit den Dichtigkeit- Anforderungen und Teerbelastungen des Vergasers überfordert, sie konnten inzwischen auf zuverlässigen Laborbetrieb verbessert werden.

Teerablagerungen in der Gasleitung zum Brenner sind bei guter Isolierung und Leitungsführung kein Problem mehr. Es muss aber noch beobachtet werden, ob sich auf Dauer hier nicht trockene Ablagerungen absetzen.

Der Vergaser selbst soll nun konstruktiv überarbeitet und ähnlich der Stirling- Brennkammer aus Blech- Drückteilen und mit außen liegenden Dichtungen konzipiert werden.

Der Erhitzer und der Luftvorwärmer zeigen kaum Ablagerungen, dies war ein wichtiges Ziel des Vorhabens. Zwar stehen längere Betriebszeiten noch aus, aber der erreichte Stand ist um Größenordnungen besser als bei Direktfeuerungen.

Der Brenner arbeitet mit ganz unterschiedlicher Gasqualität und Mischungsverhältnissen sehr sicher und stabil.

3.2 Energetische Bilanzierung

Es ist noch nicht genau geklärt, welche Wirkungsgrade mit diesem System letztendlich erreicht werden können. Im Dauerversuch inklusive Start und Propangas waren über 30 Stunden elektrische Netto- Wirkungsgrade von rund 18 % und Gesamtwirkungsgrade von etwa 71 % gemessen worden. Die Wirkungsgrade im stationären Dauerbetrieb wären etwas höher.

Gegenüber der Erdgasversion müssen bei Biomassenutzung grundsätzlich sicher einige Kompromisse gemacht werden:

- Der Ausbrand in einem Vergaser wird oft mit maximal 95 % eingeschätzt, es bleibt ein Holzkohlerest im Aschekasten.
- Es gibt Wärmeverluste aus dem Holzvergaser und aus der Zuleitung zum Brenner, hier als Vergaser- Wärme- Wirkungsgrad bezeichnet.
- Der Luftvorwärmer des Brenners arbeitet weniger effektiv: Die Primärluft kann nicht einfach vorgewärmt werden da der Sekundärluftanteil nur höchstens 75 % der Gesamt- Luftmenge ist , kann das Abgas nach dem Erhitzer nur einen begrenzten Anteil seiner Energie auf die Sekundärluft übertragen. Die Abgasverluste liegen somit bei 25- 30 % der Brennerleistung, etwa doppelt so hoch wie beim Gasbrenner.
- Die Abgasverluste können zwar im Abgaswärmetauscher als Wärme genutzt werden, eine Brennwertnutzung wie bei Erdgas kann aber nicht im selben Maße erreicht werden, das mindert den Gesamtwirkungsgrad.

Die Einzel- Wirkungsgrade können etwa folgendermaßen abgeschätzt werden. Als verbesserter Pelletsvergaser wird hier eine an Isolierung und Rüttelrost optimierte Version verstanden, Primärluftvorwärmung ist ein größerer Schritt.

Wirkungsgrad	Erdgas	Vergaser heute	Vergaser verbessert	Mit Primärluftvorwärmung
Ausbrand	1	0,94	0,95	0,95
Vergaser- Wärme	1	0,85	0,9	0,9
Feuerungstechnisch	0,83	0,75	0,75	0,85
Stirling Wärme in Strom	0,3	0,3	0,3	0,3
Gesamt elektrisch	0,25	0,18	0,19	0,22
Gesamt Strom + Wärme	0,92	0,71	0,77	0,77

Der Vergaser- Wirkungsgrad setzt sich aus Ausbrand und nutzbarer Wärme aus der Vergasung zusammen. Hier sind bei Vergasern im Gegensatz zur Direktfeuerung allgemein Verluste unvermeidlich.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Der größere Verlust kommt vom feuerungstechnischen Wirkungsgrad des Brenners. Durch die hohe Nutztemperatur von über 700 °C am Erhitzer steckt im Abgas nach diesem noch sehr viel Wärme, es hat ca. 850- 900 °C. Beim Erdgasbrenner lässt sich diese Wärme zu fast 90 % an die Frischluft übertragen. Eine Vorwärmung des Erdgases lohnt nicht und würde dieses zersetzen, der Abgas-Kapazitätsmassenstrom ist hier nur ca. 10 % höher als der Luft- Kapazitätsmassenstrom.

Beim Holzgasbrenner kann nur die Sekundärluft Energie vom Abgas aufnehmen, hier ist der Kapazitätsmassenstrom nicht ausreichend. Der Abgas- Kapazitätsmassenstrom ist außerdem hoch, da das Abgas noch Ballast- Stickstoff aus dem Holzgas mitführt. Daraus resultiert eine hohe Abgastemperatur von über 450 °C nach dem Luftvorwärmer, die Energie aus der Feuerung mitführt und dann im Abgaswärmetauscher abgibt.

Die einzige Möglichkeit zu einer Verbesserung besteht in der Vorwärmung der Primärluft. Dies war geplant und durch einen Stutzen im Luftvorwärmer vorbereitet, aus dem ca. 650 °C heiße Frischluft entnehmbar ist. In der Praxis gab es allerdings erhebliche Probleme bei der Vergasung mit vorgewärmter Luft, so dass dieser Weg zunächst aufgegeben werden musste. Dies wird in Zukunft noch einmal diskutiert. So sollte ein elektrischer Wirkungsgrad von 20- 22 % machbar sein, der Gesamt- Wirkungsgrad ließe sich nur durch Minderung der ersten beiden Verluste weiter steigern.

3.3 Ökologische Bilanzierung

Zunächst ist natürlich klar, dass die Nutzung regenerativer Brennstoffe einen geschlossenen CO₂- Kreislauf ermöglicht, die Erzeugung von höherwertiger Energie wie Strom aus Biomasse ist bei dezentralen Anlagen bisher nicht möglich gewesen.

Da Erhitzer und Luftvorwärmer gegen Aschen empfindlich sind, musste ein extrem partikelarmes Verbrennungskonzept gewählt werden, mit Staubemissionen aus der Verbrennung wie in klassischen Holzfeuerungen ist daher nicht zu rechnen.

Die Schadstoffemissionen des verwendeten Brenners sind gering. Die Werte im Diagramm zeigen für CO etwa 200- 250 ppm und für NO zwischen 100 und 200 ppm.

Das entspricht 250- 312 mg/m_N³ für CO- und 135- 270 mg/m_N³ für NO- Emissionen bezogen auf 5% Restsauerstoff, für eine Holzfeuerung durchaus gute Werte. Die starken Schwankungen sind auf die damals noch unvollkommene Regelung des Vergasers zurückzuführen.

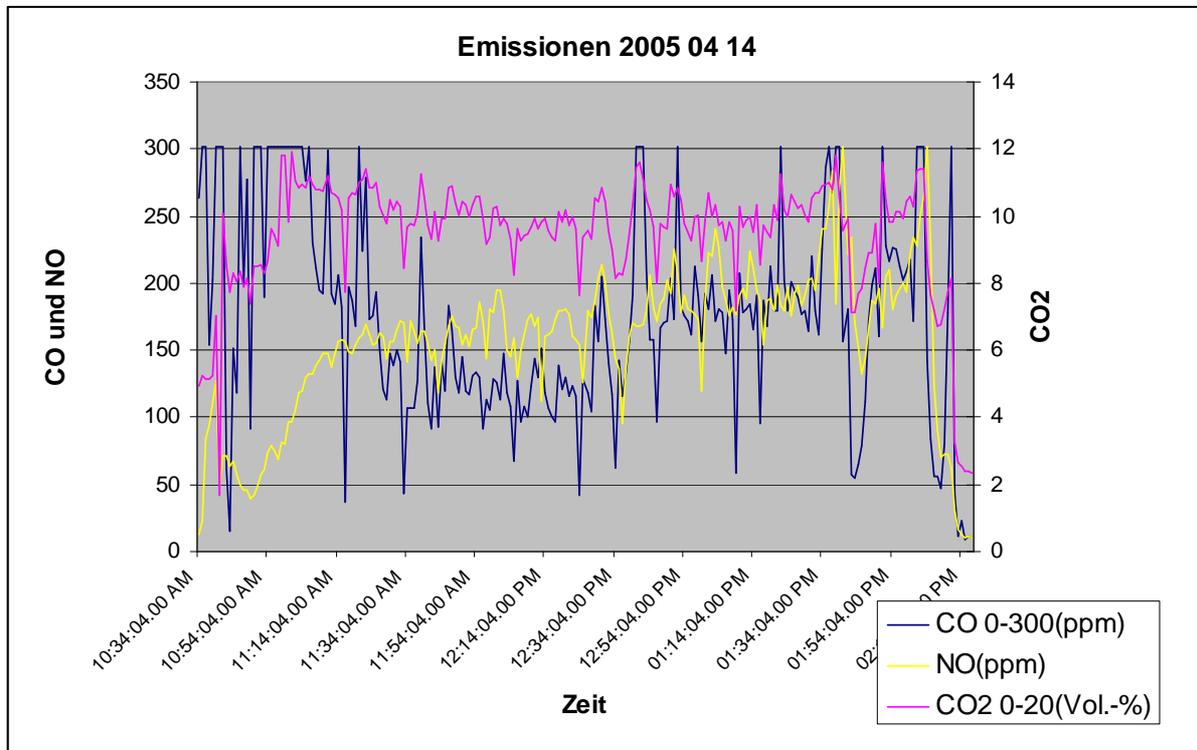


Diagramm 3: Schadstoffemissionen während eines Versuchslaufs

Ein Ausstoß von unverbrannten Kohlenwasserstoffen kann auch im Kaltstart nicht passieren, da mit Erd- oder Flüssiggas vorgeheizt wird. Im Betrieb sind alle Brennraumwände auf so hohem Temperaturniveau dass die Brennstoffumsetzung vollständig ist.

Die Staubemissionen konnten leider nicht gemessen werden. Sie müssen aber schon aus den unter 3.1 genannten funktionellen Gründen der Staubanlagerung am Erhitzer sehr gering sein und weit unter den Vorschriften liegen.

Die Herstellung von KWK- Modulen ist wegen deren energetisch nicht aufwändigen Aufbaus aus Eisenwerkstoffen und ihrer Langlebigkeit ökologisch anerkannt günstig. Dies trifft auch für Stirlingmotoren und den Vergaser zu. Die Rücknahme gebrauchter KWK- Module durch den Hersteller ist zugesichert, die Wiederverwertung der hochwertigen Hochtemperatur- Werkstoffe ist möglich.

3.4 Ökonomische Betrachtung

Strom aus Biomasse wird nach dem EEG mit folgenden Vergütungen bezahlt:

- Gesamteinspeisevergütung für elektrische Energie 2006: 0,136
 - Bonus für Kraft- Wärme- Kopplung von 0,08
 - Bonus für Innovative Verfahren 0,04
- Gesamtvergütung Summe 0,2516 €/kWh

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Der erzeugte Strom wird deshalb vollständig eingespeist. Die Wärme kann allgemein genutzt werden und hat einen Wert von 0,035 €/kWh (bezogen auf eine Holzpellettheizung, 0,16 €/kg Pellets, $H_u = 5,2 \text{ kWh/kg}$, $\eta = 0,9$). Die Wartungskosten sind mit 0,04 €/kWh gut zweimal höher angesetzt als beim Erdgas-Modul.

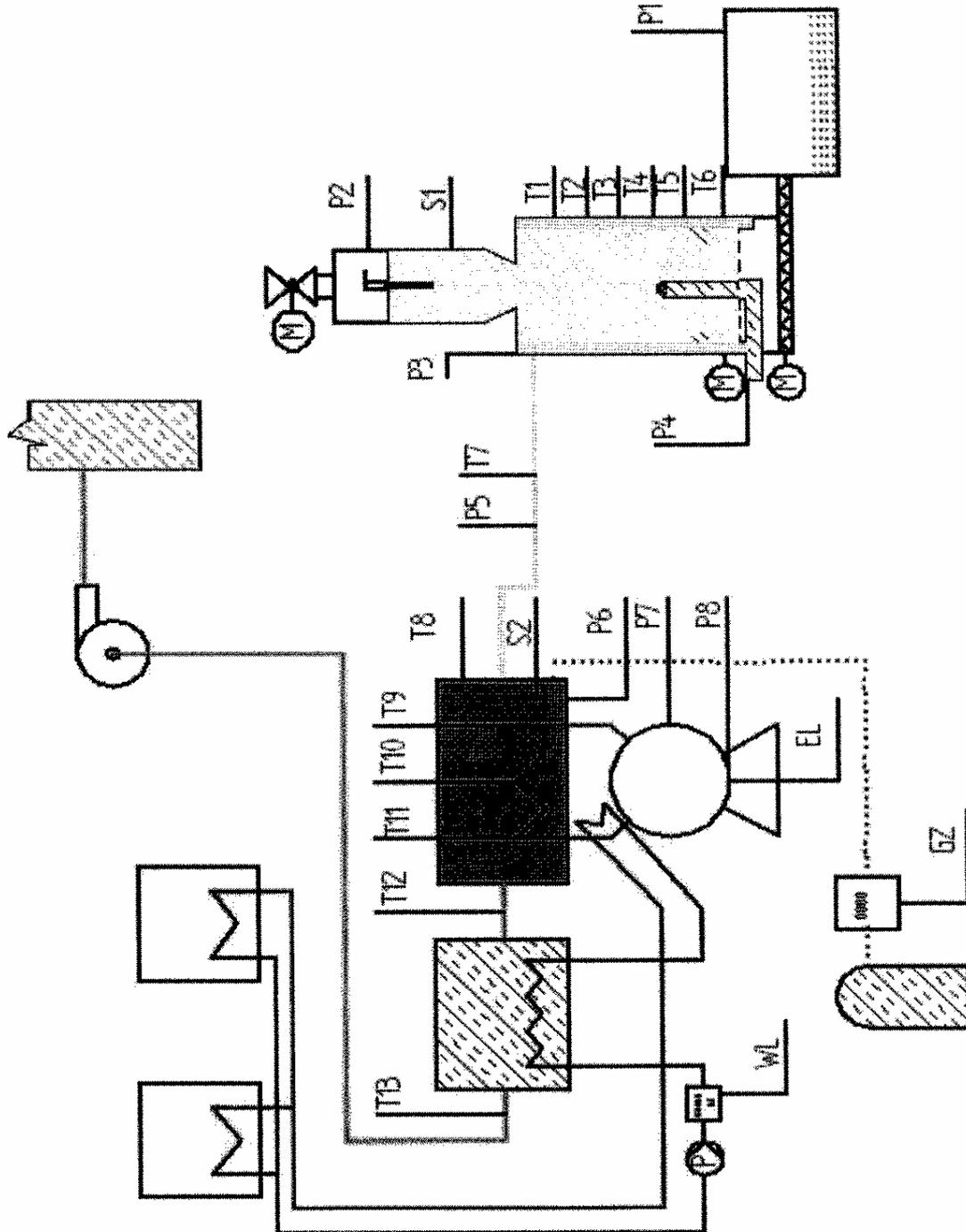
Bei einer vorsichtig angesetzten Leistung und Jahreslaufzeit ergibt sich:

					Kosten, Nutzen, /Jahr
Stromproduktion	7,5	kW	7000	h	13.209 €
Wärmeproduktion	22	kW	7000	h	5.929 €
Wartungskosten	-0,03	€/kWh	52500	kWh	-1.575 €
Brennstoffkosten	-0,035	€/kWh	275333	kWh	-9.637 €
Erlös ohne Investment und Zinsabzug					7.926 €

Bei einer angenommenen Investitionssumme von 38.000 € liegt die Abschreibungszeit bei 5 Jahren, ein realistischer Wert für Kraft- Wärme- Kopplung.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

4.2 Messstellen an der Anlage



4.3 Literatur

Bernstein, Wolfgang et al.:

Energetische Aspekte bei der Verbrennung und Vergasung von Holz; Vortrag Internationaler und Interdisziplinärer Kongress Paderborn, 20.-22. 11. 2000

Carlsen Hendrik et al.:

Results from tests of a Stirling engine and wood chips gasifier plant, Vortrag Europäisches Stirling Forum 2004, Osnabrück

Schotte, Eyck:

Untersuchungen zur Verbrennung von Gasen und Biomassen...
Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; 2002

Carlsen Hendrik et al.:

Stirling Engines for Biomass – what is the problem?; Proceedings of the 12th Int Stirling Engine Conference 2005, Durham, UK



Solo Stirling GmbH

Entwicklung einer Holz- Pellets- Feuerung für Stirling Blockheizkraftwerke

Abschlußbericht zum Vorhaben

Zeitraum: 1.1.2003 bis 31.12.2005

Aktenzeichen der Umweltstiftung: 20631-24/0

**Verfasser:
Dipl.-Ing. Andreas Baumüller
Dipl.-Ing. Andreas Laug**

Inhalt

Inhalt	2
Zusammenfassung	3
1. Einleitung	4
1.1 Strom- und Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien	4
1.2 Vorhandene Technik- Gasbetriebene Maschine	5
1.3 Ziel des Vorhabens.....	8
1.4 Projektpartner	9
2 Projektverlauf	10
2.1 Konzeption Feuerung.....	10
2.2 Erste Versuche mit aufsteigendem Vergaser bei Hoval.....	11
2.3 Verbesserter Brenner für Schwachgas und Test im Kessel.....	12
2.4 Konzept mit integriertem Vergaser	15
2.5 Versuche mit absteigendem Vergaser	16
2.6 Automatisierung	19
2.7 Dauerversuche	20
3 Ergebnisse	22
3.1 Erreichter technischer Stand.....	22
3.2 Energetische Bilanzierung	24
3.3 Ökologische Bilanzierung.....	25
3.4 Ökonomische Betrachtung.....	26
4 Anhang.....	28
4.1 Anlagenschema	28
4.2 Messstellen an der Anlage	29
4.3 Literatur	30

Zusammenfassung

Die Nutzung von Holzpellets in einem Modul zur Kraft- Wärme- Kopplung ist ökologisch sehr sinnvoll und auch ökonomisch interessant. Bis jetzt gab es dazu aber keine dezentrale Technik. Ein durch beliebige Wärme angetriebener Stirlingmotor mit entsprechender Feuerung aber kann diese Aufgabe erfüllen.

Solo Stirling beschäftigt sich seit über 15 Jahren mit Stirlingmotoren und hat ein gasbetriebenes Stirling KWK- Modul von 9 kW_{el}/ 26 kW_{th} in Serienproduktion.

Auf dieser Basis wurde eine Variante für Holzpellets als Brennstoff entwickelt. Als Konzept dazu wurden eine Holzvergasung und ein spezieller Brenner mit Luftvorwärmung ausgewählt. Der Projektpartner Hoval entwickelte zunächst einen aufsteigenden Gegenstrom- Vergaser, Solo modifizierte den Brenner der Gasmaschine für den Betrieb mit schwachkalorigem Holzgas. Brennersuche fanden zuerst mit einem wassergekühlten Erhitzer und danach auf der kompletten Stirlingmaschine statt. Später wurde der Vergaser in eine absteigende Konzeption umgebaut, hierdurch erhielt man eine deutlich bessere Gasqualität. Schwierigkeiten machten weiter die automatische Pelletzufuhr, der bewegliche Ascherost, die automatische Ascheabfuhr sowie Undichtigkeiten am Vergaser.

Start und Stopp gelingen jetzt allgemein relativ rasch, die Regelvorgänge sind automatisiert. Dauerbetrieb wurde mehrmals über 30 Stunden durchgeführt. Eine Leistung von 8 kW_{el} und 22 kW_{th} konnte erreicht werden. Bei Hoval wurden etwa 150, bei Solo weitere 400 Betriebsstunden akkumuliert.

Die Schadstoffemissionen liegen ähnlich wie bei einer guten Pelletsheizung, die Wirkungsgrade lagen bei 18 % elektrisch und 71 % insgesamt und können noch verbessert werden. Hier sind zwar bei Holz gewisse Grenzen gesetzt, dennoch sollten 20- 22 % elektrischer und über 80 % Gesamtwirkungsgrad erreichbar sein.

Das grundsätzliche Problem von Schlacke- Ablagerungen am Erhitzer trat nur minimal auf, Asche- Verstopfung im Luftvorwärmer gab es bei keinem der Versuche. Das vorliegende Konzept umgeht also dieses in früheren Versuchen fatale Phänomen und stellt im Wesentlichen noch Entwicklungsaufgaben an peripheren Bauteilen zur weiteren Optimierung. Die Entwicklung und Erprobung soll mit hoher Priorität weitergehen.

1. Einleitung

1.1 Strom- und Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien

Bei der Erzeugung elektrischer Energie oder Wärme aus kohlenstoffhaltigen Brennstoffen wird über das Abgas CO₂ ausgestoßen. Ein Weg zur Vermeidung dieser klimarelevanten Emissionen in die Atmosphäre ist unter anderem die Verwendung biogener anstelle fossiler Brennstoffe. Damit kann der CO₂- Kreislauf während des Wachstums der Pflanzen wieder geschlossen werden.

Auch der weltweite Anstieg an Verbrauch und der Preisanstieg fossiler Brennstoffe drängen zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen.

Der biogene Brennstoff mit der längsten Tradition ist Holz. Eine in letzter Zeit sehr erfolgreiche Produktform von Holz als Brennstoff sind Pellets, sie werden für automatisch arbeitende Holz- Zentralheizungen und Einzelöfen verwendet, das Versorgungsnetz entwickelt sich zunehmend seit der Preis energiebezogen mit dem des Heizöls vergleichbar ist.

Da die derzeit zur Verfügung stehenden Biobrennstoffe die fossilen mengenmäßig nicht ersetzen können, ist weiter eine möglichst effiziente Ausnutzung nötig. Die beste energetische Nutzbarmachung von Brennstoffen ist die Kraft- Wärme- Kopplung (KWK), das heißt das Erzeugen von Strom und gleichzeitiger Verwendung der dabei abfallenden Wärme. Auf diese Weise ist 75- 85 % der eingesetzten Energie nutzbar.

Kraft- Wärme- Kopplung setzt den Einsatz der Wärme in naher Umgebung voraus, also relativ kleine, dezentrale Anlagen. In Leistungsgrößen ab etwa 1 MW elektrischer Leistung stehen Dampfturbinenanlagen zur Verfügung. Die Verteilung der thermischen Leistung von 3-4 MW auf umliegende Gebäude ist aber bereits schwierig. Für kleinere Leistungen von 100- 1000 kWel gibt es Entwicklungstendenzen, Lösungen mit Holzvergasern/ Gasmotoren und mit Kolben- Dampfmaschinen zu realisieren.

Für Leistungen unter 100 kWel steht heute keine Technik zur Kraft- Wärme- Kopplung aus fester Biomasse Verfügung.

Es ist aber möglich Stirlingmotoren in Blockheizkraftwerken mit festen Brennstoffen zu betreiben. Da Stirlingmotoren mit äußerer Verbrennung, also mit Wärme arbeiten, können diese grundsätzlich mit beliebigen Wärmequellen betrieben werden, auch durch direkte Beheizung mit Holz. Probleme und Lösungsansätze werden im Folgenden beschrieben.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

1.2 Vorhandene Technik- Gasbetriebene Maschine

Das Prinzip des Heißgas- oder Stirlingmotors ist seit langem bekannt. Die Besonderheit dieses Motors ist, dass ein Arbeitsgas zwischen zwei Zylindern hin- und her geschoben wird, ohne den Motor zu verlassen (geschlossener Gaskreislauf). Die Wärmeenergie, die letztendlich in Bewegungsenergie der Kurbelwelle umgewandelt wird, wird dem Arbeitsgas von außen über einen Wärmeaustauscher zugeführt, allgemein Erhitzer genannt. Die Wärmezufuhr kann durch beliebige Wärmequellen erfolgen, etwa durch Brenner, aber auch durch Solarstrahlung.

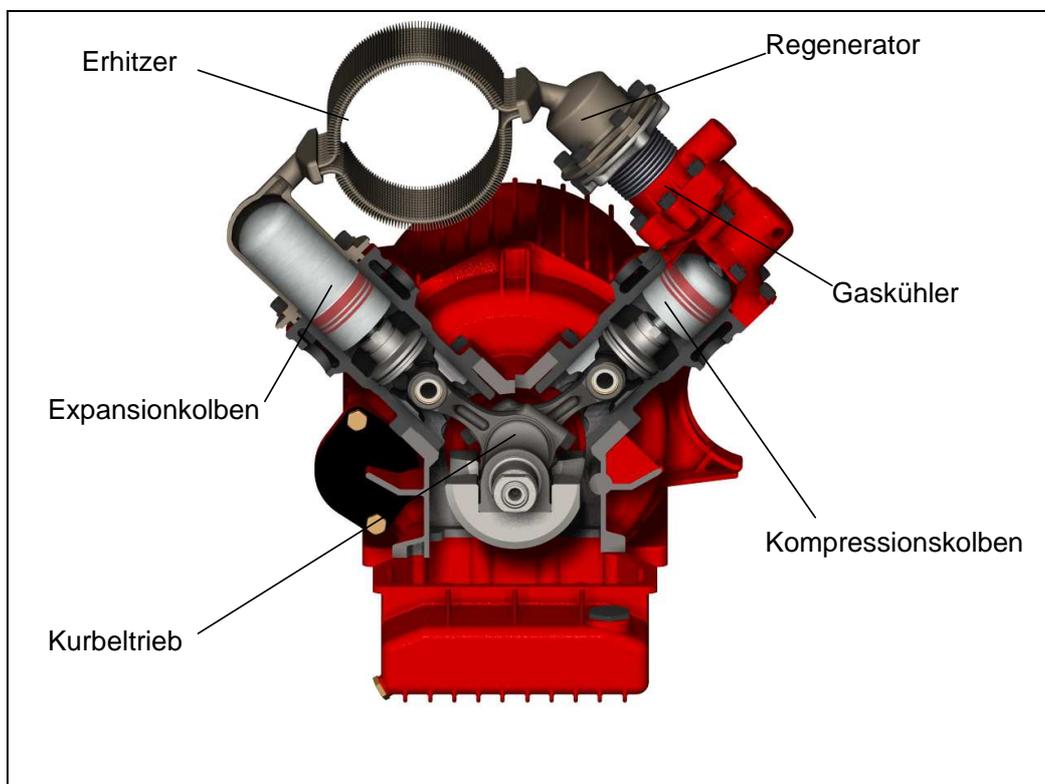


Bild 1: Funktion des Solo Stirling 161

Der von Solo eingesetzte Motor Stirling 161 ist als 90°-V-Zweizylinder mit einem einfach wirkenden Kompressions- und Expansionszylinder konzipiert. Zwischen den Zylindern befinden sich der Erhitzer, der Regenerator und der Gaskühler. Die Wellenleistung liegt bei 10 kW/ 1500 min⁻¹. Wie bei einem herkömmlichen Verbrennungsmotor hat auch der Stirling Kolben. Diese schieben das Arbeitsgas (gewöhnlich Helium) zwischen den beiden Zylindern hin- und her, wobei dies bei niedriger Temperatur komprimiert wird und nach der Erhitzung bei hoher Temperatur expandiert.

Der Erhitzer befindet sich in einer Brennkammer, in der unabhängig vom Motor die Verbrennung des Treibstoffes stattfindet, Verbrennungsrückstände dringen daher nicht in den Motor ein. Damit ergeben sich wichtige Vorteile:



Abschlußbericht Pellets- Stirling

- Es können Brennstoffe genutzt werden, die in konventionellen Otto- oder Dieselmotoren nicht verwendbar sind, zum Beispiel feste Biomasse.
- Verbrennungsrückstände belasten weder Schmierstoffe noch die Umwelt, damit entfällt der Austausch von Motoröl und Filter; Stirlingmotoren können wartungsfrei 5.- 8.000 Stunden laufen, unabhängig vom Brennstoff.
- Der Wirkungsgrad des Stirlingmotors ist wegen des günstigen thermodynamischen Prozesses relativ gut. Auch bei kleinen Motoren sind 30% und mehr erzielbar.

Die Firma SOLO beschäftigt sich seit 1990 mit der Stirling-Technologie. Nach Recherchen und Versuchen mit SPS V 160 in Erdgas- und Solarausführung wurde 1994 eine Neukonstruktion erarbeitet. Diese wurde im von der DBU geförderten Vorhaben „Felderprobung“ mit 16 BHKW bzw. „Micro- KWK- Modulen“ über 100.000 Stunden sehr ausführlich getestet und weiterentwickelt. Die Entwicklung zu dieser hohen Zuverlässigkeit und den Laufzeiten war schwierig und zeitintensiv, konnte aber erfolgreich abgeschlossen werden (siehe Abschlußbericht hierzu, Förderkennzeichen 03873/ 01,02).

SOLO Stirling verfügt also mit dem Stirling 161 über die am längsten und gründlichsten getestete Stirlingmaschine überhaupt. Sie ist relativ einfach und fertigungsgünstig sowie für stationären Einsatz mit langen Laufzeiten konzipiert.

Das Erdgas- Stirling - KWK- Modul wurde auf der Hannover Messe 2001 vorgestellt und ist zertifiziert. Danach wurden die Voraussetzungen für eine Serienproduktion geschaffen, inzwischen sind etwa 100 Geräte produziert und vertrieben. Abmessungen und Kennwerte stellen sich folgendermaßen dar:

Außenabmessungen		
Länge	1280	mm
Breite	700	mm
Höhe	980	mm
Gewicht	450	Kg
Leistung und Wirkungsgrad *		
Elektrische Leistung	2 - 9	kW
Elektrischer Wirkungsgrad	24	%
Thermische Leistung	8– 26	kW
Thermischer Wirkungsgrad (bez. auf Hu)	65 – 75	%
Emissionen		
Stickoxid max.	50	mg/m ³
Kohlenmonoxid max.	80	mg/m ³
Schalldruckpegel in 1 m Abstand	55	dBA
Wartungsintervall		
Austausch Kolbenringe, Stangendichtung	über 5000	h
Motordaten		
Bauart	V 2-Zylinder	
Hubraum	160	ccm

SOLO Stirling GmbH Postfach 600152 71050 Sindelfingen

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Mittlerer Arbeitsdruck	30 – 150	bar
Arbeitsgas	Helium	
Obere Arbeitsgastemperatur	640	°C
Nenn Drehzahl	1500	U/min

* bez. auf Kühlwasservorlauf von 50 °C

Da die Wärmeeinkopplung am Erhitzer von Stirlingmotoren auf hohem Temperaturniveau erfolgen muss, wird für einen guten feuerungstechnischen Wirkungsgrad Luftvorwärmung nötig. Das Abgas nach dem Erhitzer ist über 800 °C heiß und überträgt diese Energie in einem Gegenstrom- Wärmeübertrager auf die Frischluft. Es kühlt sich dabei auf etwa 250 –300 °C ab, die Luft wird auf über 600 °C vorgewärmt. Zur Nutzung der Restwärme im Abgas ist noch ein wasserdurchströmter Wärmeübertrager nachgeschaltet, der es auf etwa 20 °C über die Rücklaufemperatur abkühlt und dabei Kondensat erzeugt.

Eine wesentliche Weiterentwicklung am Stirling 161 betrifft die Brennkammer und den Brenner. Hier findet ein modernes Verfahren mit flammloser Oxidation (Flox®, WS- Wärmeprozessestechnik) Verwendung, um die Schadstoffemissionen zu minimieren.

Die Entwicklung geschah zunächst 1998/ 99 in Zusammenarbeit mit der Firma WS- Wärmeprozessestechnik in einem DBU- Vorhaben (Az.: 10370; „Entwicklung eines Regenerativbrenners...“), später arbeitete Solo unter Nutzung von WS- Lizenzen und eigenen Patenten selbstständig weiter.

Auf der technischen Basis industrieller Ofenheizungen wurde ein entsprechender Gas- Brenner entwickelt, der mit sehr hohen Abgasrezirkulationsraten arbeitet. Dadurch lassen sich die Stickoxidemissionen, die bei hoher Luftvorwärmung zum Problem werden, wirksam begrenzen: Durch die für Stirlingmotoren notwendige Luftvorwärmung lassen sich stabile Oxidationsbedingungen einstellen, wobei die Reaktion Brennstoff- Luft „flammlos“, also räumlich verteilt stattfindet. Durch den hohen Abgasanteil wird die Grenztemperatur der thermischen NOx- Bildung (ca. 1500 °C) nicht erreicht. Der Brenner ist im Verhältnis 1: 3 modulierbar.

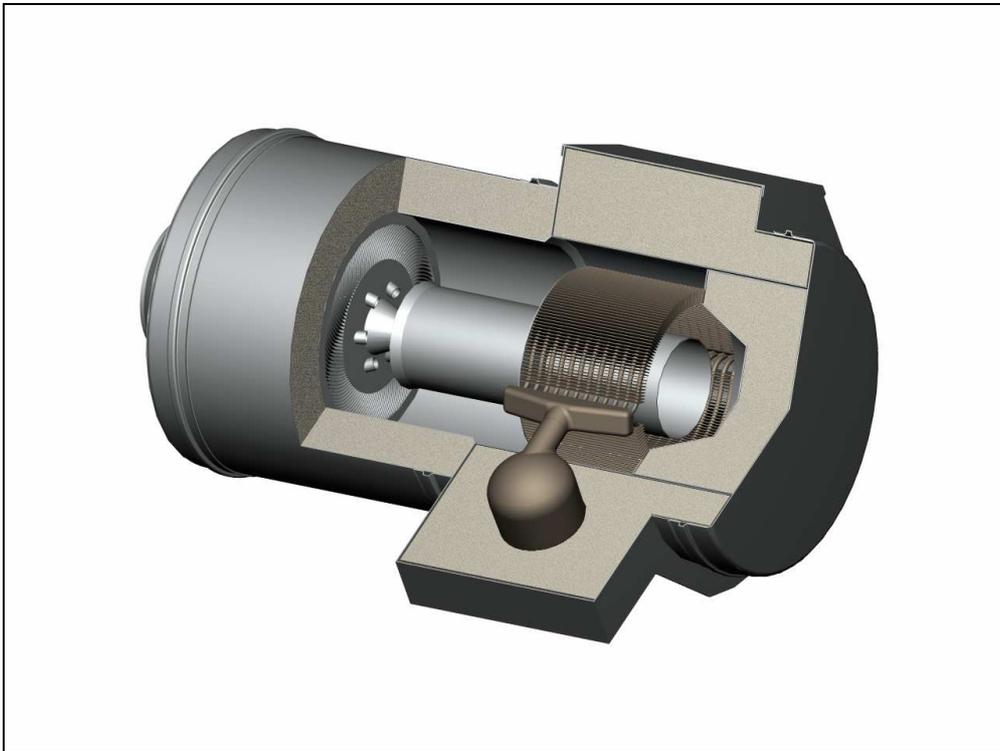


Bild 2: Gasbrenner für Stirling 161 mit flammloser Oxidation

1.3 Ziel des Vorhabens

Es sollte auf Basis des vorhandenen, in Serie produzierten KWK- Moduls eine Version mit einer Pellets- Feuerung entwickelt werden. Das wesentliche zu lösende Problem betraf die extreme Asche- bzw. Partikelarmut der Feuerung, da diese den filigranen Erhitzer und auch den Luftvorwärmer zusetzen würden.

Der Erhitzer muss mit Rippen zur Vergrößerung der Oberfläche bestückt sein, da das Innenvolumen zur Schadraum- Minimierung sehr gering bleiben muss. Asche von Temperaturen über ca. 1100 °C kann erweicht und damit klebrig sein, es besteht dann die Gefahr eines Anbackens am Erhitzer.

Der Luftvorwärmer ist bei dieser Feuerung mit einer Nutzttemperatur von rund 700 °C für einen guten Feuerungs- Wirkungsgrad unerlässlich, auch hier werden für gute Wärmeübergänge enge Kanäle benötigt.

Daher muss die Verbrennung mit gestufter Luftzufuhr durchgeführt werden, durch eine geringe Primärluftzufuhr zur Vergasung des Brennstoffs kann die Asche kaum aufgewirbelt werden, die eigentliche Verbrennung findet unter Sekundärluftzufuhr statt.

Weiter muss eventuell die Verbrennungstemperatur begrenzt werden, um eine Ascheerweichung zu vermeiden. Dies kann durch eine Abgasrezirkulation entsprechend dem Flox- Verfahren geschehen.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Die Verbrennungsverfahren sollte also nahe dem mit Luftvorwärmung und Abgasrezirkulation arbeitenden Flox- Brenner liegen, um die vorhandenen Komponenten zu nutzen. So wurde entschieden, die Pellets in einem Vergaser mithilfe von Primärluft in ein brennfähiges Holzgas umzusetzen, das danach mit Sekundärluft in einem modifizierten Floxbrenner vollständig verbrannt wird.

Die Brennerleistung sollte ähnlich der des Gasbrenners bei knapp 40 kW liegen, die Kennwerte werden wegen des für Biomasse höheren Luftüberschusses und einer wegen Verschmutzung schlechteren Luftvorwärmung etwas unter der Gasversion liegen:

Die elektrische Leistung sollte modulierbar 4-8 kW betragen, die thermische dabei 10- 20 kW. Ein elektrischer Wirkungsgrad von 20 % war das Ziel, der thermische sollte bei 60 % liegen.

Extrem geringe Staubemissionen weit unter 100 mg/m^3 sind auch aus funktionellen Gründen nötig, die CO- Emissionen wird ähnlich wie Gasbrenner um 200 mg/m^3 abgeschätzt. Stickoxidemissionen erwarten wir wegen der Stickstofffracht im Brennstoff um 200 mg/m^3 . Alle Werte liegen damit deutlich unter der TA Luft.

1.4 Projektpartner

Die Hoval AG ist ein Liechtensteiner Hersteller von Heizkesseln und Heizsystemen und auf dem Schweizer, österreichischen und süddeutschen Markt präsent. Etwa 1000 Mitarbeiter fertigen in Vaduz und Werken in den Nachbarländern. Die Kompetenz speziell bei Biomassefeuerungen ist allgemein anerkannt. Hoval hat bereits eigene Versuche mit einem prototypischen 1- kW Stirlingmotor in einer Stückholzfeuerung gemacht.

So kam der Kontakt zustande. Die Hoval AG hat als Unterauftragnehmer den Holzvergaser für dieses Projekt entwickelt und dabei einen Eigenanteil von 70 % der Kosten übernommen.

2 Projektverlauf

2.1 Konzeption Feuerung

Eines der entscheidenden Probleme einer Holzpellet- Feuerung für leistungsfähige Stirlingmotoren ist die Aschebelastung am Erhitzer und im Luftvorwärmer.

Zuerst wurden deshalb grundlegende Literaturrecherchen zum Abbrandverhalten, Reaktionen, und Aschebildung durchgeführt. Bei Hoval wurden verschiedene Feuerungskonzepte getestet und Erfahrungen damit verglichen. Resultat ist, dass die Ausfilterung der Asche aus dem Rauchgas nicht sicher beherrschbar ist, die Rückhaltung im Glutbett ist günstiger. Um dort möglichst wenig Asche aufzuwirbeln, muss die Verbrennungsluft konsequent gestuft zugeführt werden, also zum kleinen Teil zur Vergasung des Brennstoffes (Primärluft) und der Rest später zur vollständigen Verbrennung des Gases (Sekundärluft).

Zur Erlangung eines guten Wirkungsgrades des Motors muss außerdem die Verbrennungsluft aus der Abgasenergie auf 500- 650 °C vorgewärmt werden. Dies sollte sich möglichst auf alle Stufen der Luftzufuhr beziehen.

Wird die Primärluft vorgewärmt, so kann auch die nötige Menge zur Erzeugung des Pyrolysegases gering bleiben und so das Austragen von Asche und Teeren noch mal minimiert werden.

Wenn durch die Luftvorwärmung die Verbrennungstemperatur über die Grenze der Ascheerweichung steigen sollte, kann zur Kühlung eine erhebliche Menge Abgas rezirkuliert werden.

Der Erhitzer des Stirlingmotors wird eventuell so zu verändern sein, dass sich möglichst wenig Asche ansammeln kann. Ebenso verhält es sich mit dem Luftvorwärmer.

Zunächst wurden verschiedene Konzepte untersucht:

1. Anbau einer Vorverbrennung der Pellets mit vorgewärmter Primärluft unter Luftmangel hinter dem Luftvorwärmer des Floxbrenners, weiterführen zur Hauptbrennkammer und Verbrennen mit vorgewärmter Sekundärluft dort
2. Vorschubbrenner in Rinnenform mit schraubenförmig zirkulierender Luftzufuhr in mehreren Stufen
3. Vergaser mit Primärluft vorgeschaltet vor leicht modifizierten Gasbrenner

Kriterien für die Entscheidung waren vor allem minimale Ascheemissionen und Übernahme vorhandener Komponenten wie Brennkammer und Luftvorwärmer. Das Brennerkonzept wurde daher als klar gestufte Feuerung mit Vergasung unter Primärluft und Verbrennung unter Sekundärluft festgelegt Die Entscheidung fiel deshalb auf die dritte Variante. Das Risiko, einen Holzvergaser zum Funktionieren zu bringen, wurde nicht so hoch eingeschätzt, da die Teerprobleme in einer Stirling- Brennkammer nicht relevant sind. Deshalb wurde auch der aufsteigende Gegenstrom- Vergaser vorgesehen, der das Holzgas durch die absinkende Brennstoff- Füllung nach oben abführt und als sehr Asche- arm aber Teer- reich bekannt ist. Der Brenner basiert auf dem Gasbrenner im Flox[®]- (Flammlose Oxidation, WS Wärmeprozessestechnik) Verfahren mit Luftvorwärmung.

2.2 Erste Versuche mit aufsteigendem Vergaser bei Hoval

Die Komponenten Vergaser und Brenner wurden zunächst separat aufgebaut und weiterentwickelt und danach zu einer Einheit zusammengeführt.

Hoval baute einen aufsteigenden Gegenstromvergaser mit doppelter Wandung und verschiedenen Möglichkeiten, Primär- Luft zuzuführen und die Abgaswärme zur Vergaser/ Brennstoffvorwärmung zu verwenden. Die Pelletzufuhr geschah automatisch aus einem Reservoir. (Bild) Die Vorwärmung der Primärluft war bei diesem Konzept leider nur schwer auszuführen.

Solo modifizierte den Erdgas- Floxbrenner so, dass die größere Menge des im Vergleich zu Erdgas sehr niederkalorigen Holzgases zugeführt werden konnte. Die Möglichkeit eines Brennerstarts mit Flüssiggas blieb erhalten.

Der erste Versuch im Februar 2003 in Liechtenstein mit Hoval- Vergaser und Stirlingmotor zeigte die noch zu lösenden Probleme: Die Verbrennung des Holzgases in der Brennkammer verlief deutlich langsamer als bei Erd- oder Flüssiggas, die Reaktion war nach dem Erhitzer und auch im Luftvorwärmer noch nicht abgeschlossen. Kondensat in Form weißen Rauches trat aus dem Abgasrohr, schließlich regierte auch Kondensat innerhalb des Luftvorwärmers und schmolz das Metall.

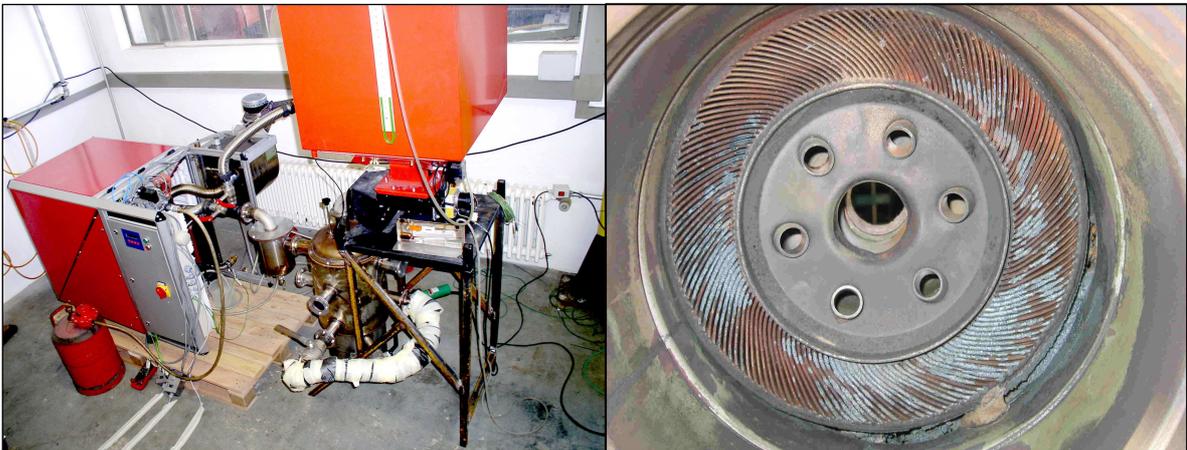


Bild 3: Aufbau Versuch mit Vergaser und BHKW, Brennerfront mit defektem Luftvorwärmer. Gaslanze im Zentrum demontiert

Auch die Gasqualität war zeitabhängig, eine frische Füllung Pellets erzeugte gutes Holzgas, nach etwa 30 Minuten war die Reaktionsfähigkeit des Gases wesentlich geringer, die Leistung sank. Grund ist die zunächst rasche Vergasung des Lignins und die wesentliche langsamere Umsetzung des Kohleskeletts. Bei jeder Nachfüllung gab es deutliche Schwankungen der Gasqualität. Die Temperaturen im Vergaser waren im unteren Bereich mit über 1000 °C bedenklich hoch.

Damit war klar, dass für die Verbrennungseigenschaften des niederkalorigen Holzgases deutliche Änderungen am Erdgasbrenner nötig sind und dass die Gasleistung und -qualität des Vergasers sehr unterschiedlich sein kann.

2.3 Verbesserter Brenner für Schwachgas und Test im Kessel

Vor weiteren Versuchen wurde sowohl der Vergaser bei Hoval als auch der Brenner bei Solo weiterentwickelt. Gleichmäßigere Brenngasqualität und raschere Verbrennung waren das Ziel. Hoval machte Vorversuche mit einem modifizierten Vergaser und einem extra gebauten Rohbrenner. Ein Öl-Heizkessel wurde für die Versuche entsprechend umgebaut und mit einem Sichtfenster versehen.

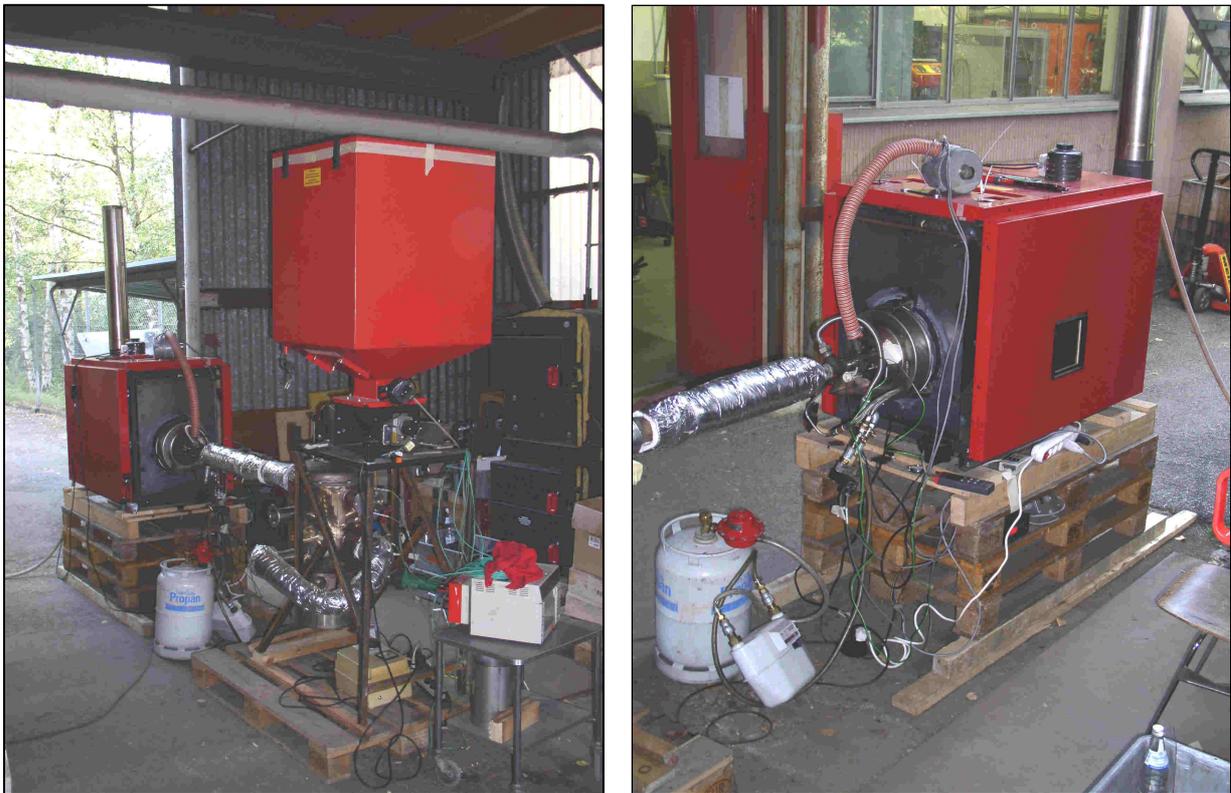


Bild 4: Vergaser- Prüfstand bei Hoval mit Stirling- Brenner in Heizkessel

Bei Solo wurde ein variabler Brenner gebaut, bei dem die Luftzufuhr in die Brennkammer teilweise mit Drall (um die Reaktion zu beschleunigen und teilweise mit Injektor- Düsen (um Abgas zu rezirkulieren wie dem Original Floxbrenner) erfolgt, die Anteile sind veränderbar. Bei Versuchen mit Erdgas wurde außerdem das Mischrohr (in das Luft und Brenngas einströmt) so variiert, dass die Mischstrecke und der Anteil der Abgasrezirkulation ausgetestet werden konnte. Über die CO- und NOx- Bildung sowie Temperaturen konnte der Einfluss von Veränderungen auf die Reaktionsgeschwindigkeit beurteilt werden.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

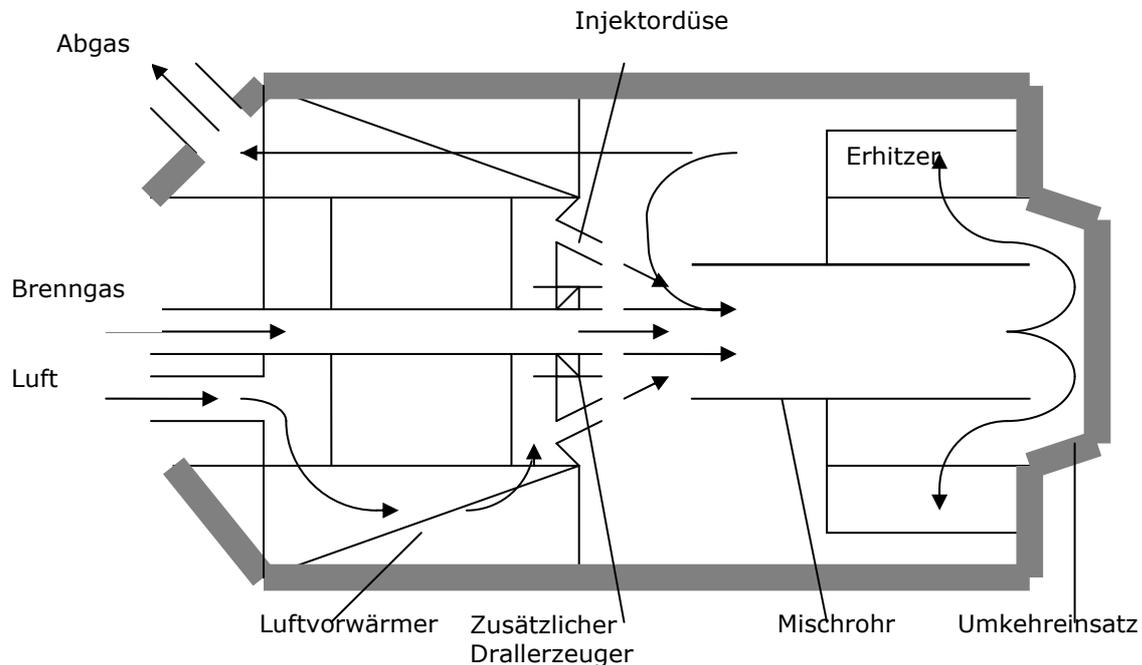


Bild 5: Variabler Brenner für niederkalorige Gase

Dieser Brenner wurde zunächst in verschiedenen Varianten mit Erdgas auf seine Funktion und Emissionen getestet. Die notwendige Änderung am Zünder stellte keinen Nachteil dar, die Stickoxidemissionen lagen bei verminderter Abgasrezirkulation wie erwartet höher, werden aber mit reaktionsträgem Holzgas wieder sinken.

Im Juli 2003 wurden dann der weiterentwickelte Vergaser und der Solo Brenner im Heizkessel bei Hoval getestet. Der Brenner konnte mit Flüssiggas gestartet werden und feuerte zunächst ohne Erhitzer in den Brennraum. Das Abgas wurde noch aus dem Kesselstutzen herausgeführt, damit war keine Luftvorwärmung möglich.

Nach Umschalten von Flüssiggas auf Holzgas konnte die veränderte Flamme durch das Fenster beobachtet werden, sie ist dann wesentlich länger. Es zeigten sich einige Probleme:

- Es ist immer noch schwierig, die reine Holzgas- Flamme stabil zu halten, sie neigt zum Pulsieren und Abreißen.
- Teer und Wasserkondensat sammelt sich in der Leitung vom Vergaser zum Brenner, dies stört die Gaszufuhr oder tritt schwallartig in den Brenner und stört die Verbrennung.
- Teer- Kondensat kann auch als Schaum „aufkochen“ und dann die Holzgaszufuhr blockieren, speziell wenn es wieder verfestigt.

- Nebenluft tritt in den Vergaser (wird im Unterdruck betrieben) und stört die Kontrolle über die Gasbildung und die anschließende Verbrennung.

Weitere Versuche im August 2003 wurden mit einem besser abgedichteten Vergaser und einer isolierten und verkürzten Verbindungsleitung zum Brenner gemacht.

Am Brenner wurden die Injektor- Luftdüsen noch steiler zur Längsachse gestellt um die Durchmischung und Reaktion zu verbessern. Eine Prallplatte wurde auf die Gaslanze gesetzt um ebenfalls die Durchmischung von Brenngas und Luft zu fördern.

Jetzt wurde auch ein wassergekühlter Stirling- Erhitzer montiert, die ganze Einheit aus Brenner, Mischrohr, Erhitzer und Umkehreinsetz in die Kesselbrennkammer eingesetzt. Das Abgas wurde jetzt durch den Luftvorwärmer abgeführt, so konnte die Frischluft vorgewärmt werden. Die Verhältnisse kamen denen auf dem Motor sehr nahe.

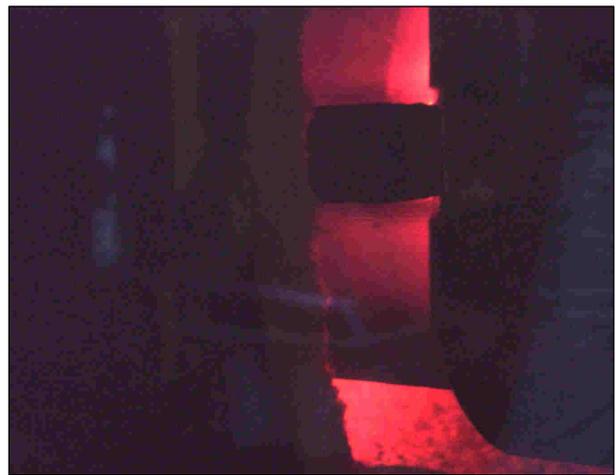
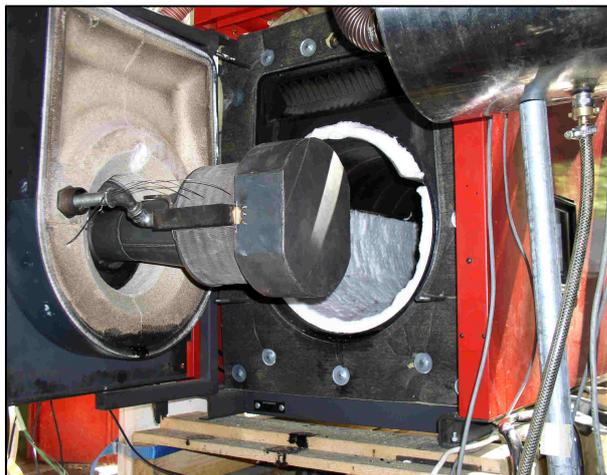


Bild 6: Brennereinheit mit wassergekühltem: Erhitzer und Umkehrplatte, rechts in Betrieb (Ausschnitt)

Durch die Luftvorwärmung konnte nun die Holzgasflamme stabil gehalten werden. Der Brenner lief befriedigend und die Emissionen waren gut, Ablagerungen waren nicht erkennbar. Eine Abgasrezirkulation ist nicht erforderlich.

Probleme machte weiterhin die Empfindlichkeit auf Falschluff am Vergaser, das konnte schließlich behoben werden. Auch durch Einblasen von Wasserdampf in den Vergaser, der als chemischer Hilfsstoff wirkt, konnte die Gasqualität verbessert werden, eine Analyse der Gasqualität war aber nicht möglich.

Kritisch war aber nach wie vor der Vergaserbetrieb, folgende Probleme treten auf:

- Teerschaum kann sich in der Zuleitung bilden
- Ein Abstellen des Vergasers mit einigen Litern Pellets ist nicht in akzeptabel kurzer Zeit möglich

Abschlußbericht Pellets- Stirling

- Die Gasqualität schwankt über die Betriebszeit und bei Zufuhr frischer Pellets
- Hohe Temperaturen und Produktgas im Vergaser können sogar Inconel-Thermoelemente innerhalb von Stunden korrodieren.

Angesichts der unbefriedigenden Ergebnisse wurden alternative Konzepte untersucht:

2.4 Konzept mit integriertem Vergaser

Der Vergaser wird bei diesem Konzept auf ein Rohr reduziert, das in der Brennkammerachse angeordnet ist. Das Volumen ist sehr gering. Die Pellets werden von hinten –wo sonst die Gaszufuhr ist- eingeschoben und erreichen in der Brennkammer Pyrolysetemperatur. Die Asche wird auf der entgegen gesetzten Seite entnommen. Zusätzlich wird Wasser (-dampf) auf dieser Seite eingedüst. Damit formiert sich Holzgas ohne weitere Primärluft, die Reaktion ist endotherm, die Temperaturen liegen unter der Brennkammertemperatur. Das Holzgas tritt aus dem Vergaserrohr etwa in der Mitte aus, wo es mit der vorgewärmten Luft vermischt und verbrannt wird.

Damit wird erwartet, dass folgende Probleme gelöst werden können:

- Teerkondensat kann während des Betriebs im Vergaser nicht entstehen, die Temperaturen sind zu hoch
- Übertemperatur und Korrosion kann nicht entstehen, da die Vergasung endotherm abläuft
- Nebenluft kann nur von der Pellet- Zufuhr her eintreten, hier gibt es Maßnahmen zur Abdichtung
- Die Gasmenge kann über die Wasserdampfmenge gesteuert und konstant gehalten werden
- Start und Stopp sind wegen der geringen Pelletmengen relativ rasch möglich

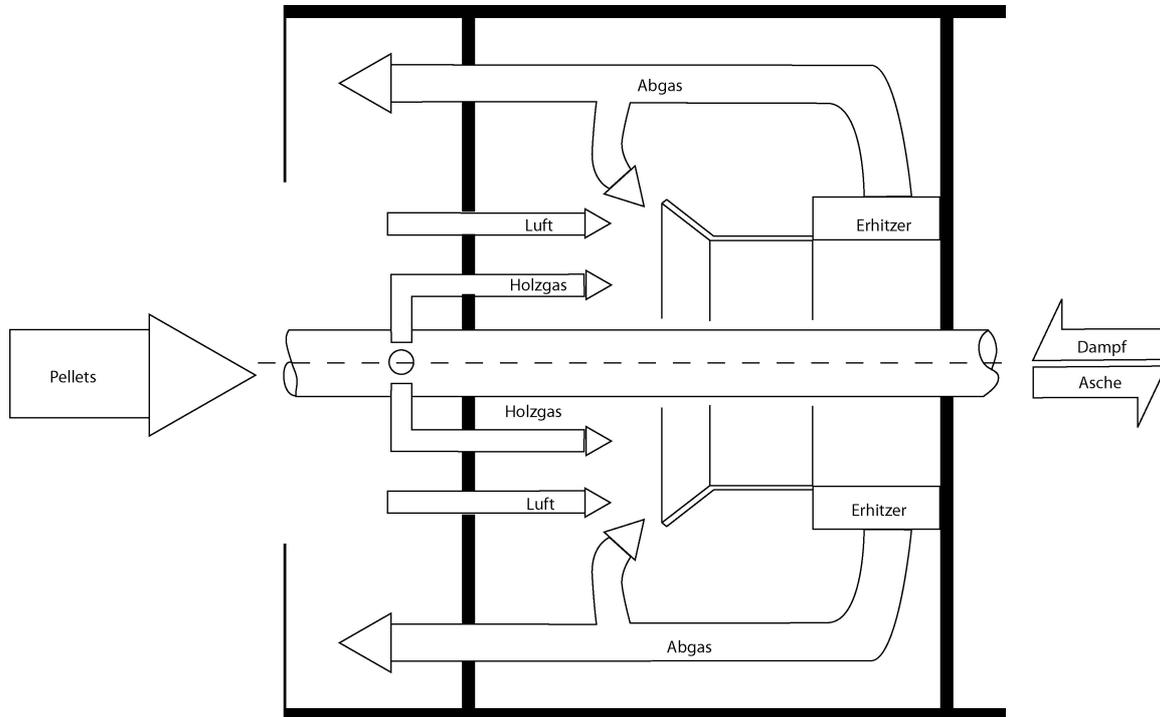


Bild 7: Konzept integrierter Vergaser

Ein solcher Vergaser innerhalb der Brennkammer wurde aufgebaut, auch eine zweite Versuchsmaschine in vertikaler Anordnung wurde gebaut. Im Sommer 2004 wurden erste Tests gefahren, die allerdings noch keine klaren Ergebnisse zeigten. Es gab Schwierigkeiten mit der Pellets- Zufuhr und Dampfeinblasung, die eingebrachten Pellets vergasten aber vollständig.

2.5 Versuche mit absteigendem Vergaser

Bei Hoval in Liechtenstein baute man den Vergaser im Herbst 2004 in eine absteigende Version um, die bekanntlich eine bessere Gasqualität liefert, jedoch Asche im Gas mitführt. Die Nachteile des separaten Vergasers sind damit nicht vollkommen gelöst aber der neue Ansatz war interessant genug, weiter mit Hoval zusammenzuarbeiten, zumal die ersten Versuche dort sehr gut verliefen. Vergaser dieses Typs sind auch allgemein bekannt als Imbert- Vergaser.

Bis zur Beendigung des Projekts wurden alle Versuche mit dieser Vergaserbauart gefahren.

Bis Ende 2004 wurde mit einem Umbau des ursprünglich aufsteigenden Vergasers gearbeitet. Das folgende Bild zeigt diesen Umbau beim letzten Versuch am 4.11.2004:

Abschlußbericht Pellets- Stirling



Bild 8: In der Mitte der Vergaser, links das Stirling- Modul

Es stellte sich jedoch schnell heraus, daß die Zuverlässigkeit des Vergasers nicht ausreichend war:

- Die Dichtungen hielten nicht
- Ein kontinuierliches Austragssystem der Asche war nicht vorgesehen
- Die Pelletzufuhr versagte
- In der Gasführung gab es Verteerungen

Dennoch waren große Fortschritte erreicht worden, denn erstmals konnte im Stirlingbetrieb ein Maschinendruck von 120 bar gefahren werden, was 6,5 kWe entspricht. Der in 2003 entwickelte Brenner arbeitete im Stirlingbetrieb hervorragend und es konnten auch sehr gute Emissionen nachgewiesen werden. Die Versuchsdauer verlängerte sich mit dem neuen Vergasertyp ebenfalls.

Hoval hatte zu diesem Zeitpunkt bereits einen Diplomanden für das Projekt eingestellt. Er konstruierte über die Winterpause einen neuen Vergasertypen, mit dem Ziel die wesentlichen Schwachstellen des ersten Prototyps auszumerzen. Am 21.2.2005 konnte der erste Versuch mit diesem Vergaser gefahren werden:



Bild 9: Neuer absteigender Vergaser, noch mit manueller Pelletzufuhr

Es wurden bis Juni 2005 mehrere Einzelversuche gefahren. Arbeitsschwerpunkt war in erster Linie die Pelletschleuse. Hier gab es enorme Schwierigkeiten ein zuverlässiges und sicheres System zu finden. Aufgrund des Überdrucks im Vergaser waren selbst minimale Undichtigkeiten im Schleusenbereich Grund für ein Verstopfen der Zufuhr. Die hohe Feuchtigkeit des austretenden Gases verklebte den Staub, die Pellets selbst quollen auf und zerfielen innerhalb der Schleuse. Der Versuchsbetrieb konnte nur durch ständiges manuelles Gängigmachen aufrechterhalten werden. Mehrere Schleusenvarianten wurden gebaut.

Die Temperaturen im Vergaser zeigt das folgende Diagramm1. Im Zuge dieser Phase wurde auch eine automatische Erfassung der Holzgasqualität mit den Messpunkten HC, CO und CO₂ von Hoval eingerichtet, siehe Diagramm 2 unter 3.1.

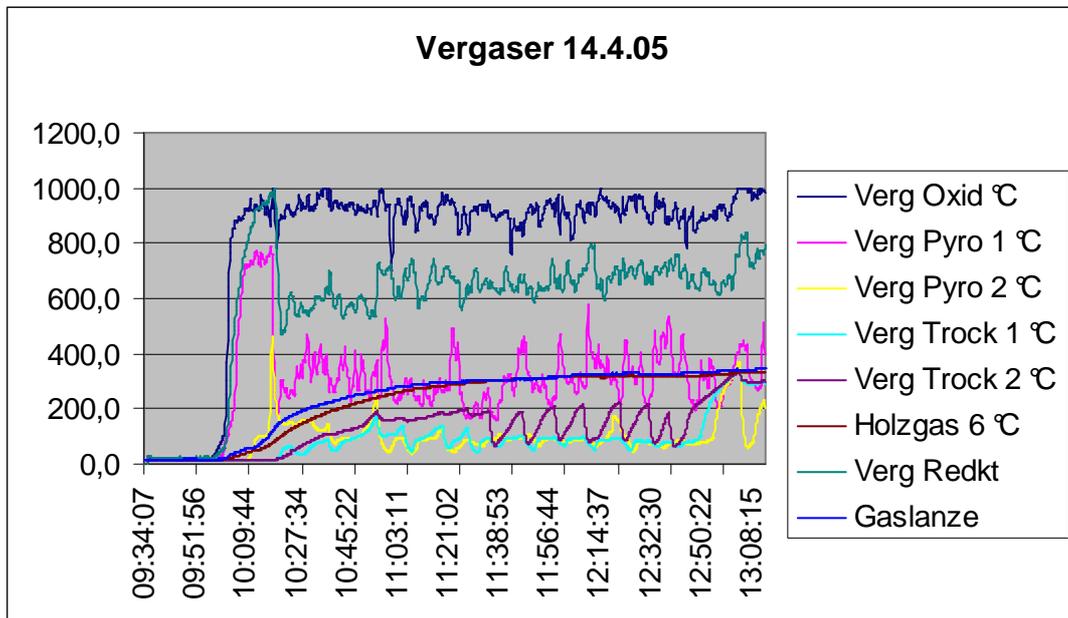


Diagramm 1: Temperaturschichtung im Vergaser

2.6 Automatisierung

Im Juni 2005 wurde erstmalig ein Schritt hin zur Automatisierung unternommen. Stellmotoren wurden angebracht für:



- Ascheaustrag
- Rüttelmechanismus
- Pelletschleuse

Als Steuerung wurde eine SPS der Firma WAGO eingesetzt. Durch deren modulare Bauweise konnten alle Aufgaben flexibel gelöst werden.

Während der Rüttler und der Ascheaustrag nur nach einem Zeitintervall arbeiteten, so wurde die Vergaserbeschickung nach dem Temperaturprofil geregelt. Diese Vorgehensweise hat sich auch in den weiteren Versuchen bewährt. Der Vorteil auf mechanische Komponenten bei der Füllstandsregelung verzichten zu können ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den bisher bekannten Paddelfühlern. Eine Patentierung des Verfahrens wird geprüft.

Bild 10: Vergaser mit Beschickung vor Stirling Modul

Die Excel-Software zur Messdatenerfassung konnte auf Mod- Bus umgestellt werden. Außerdem konnten deutliche Schritte hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit der Makros gemacht werden.

Die Leistung der Stirlingmaschine wird nicht über den eingestellten Helium-Druck sondern über die dem Brenner zugeführte Sekundärluft geregelt. Eine Lamdamessung im Abgas dient der SPS dazu, die nötige Holzgasmenge über eine Motorklappe in der Primärluft bereitzustellen. Die Stirling- Regelung passt schließlich den Helium- Druck so an, dass die Erhitzertemperatur konstant bei 740 °C bleibt.

Diese Betriebsweise war Anfangs sehr schwankend, durch Verfeinerungen der Regelalgorithmen konnte sie aber erheblich beruhigt werden.

2.7 Dauerversuche

Im Juni 2005 wurde aufgrund der positiven Ergebnisse beschlossen, nun parallel sowohl in Vaduz als auch in Sindelfingen Versuche zu fahren um möglichst viele Betriebsstunden zu erreichen.

Hoval baute darum auf der Basis des vorhandenen Vergasers einen weiteren Prototyp, während in Sindelfingen ein eigener Prüfstand eingerichtet wurde. Der Stirling wurde wieder nach Sindelfingen geschickt, während der wassergekühlte Stirling-Erhitzer im Ölkessel bei Hoval für deren Versuche als Holzgasabnehmer blieb.



Bild 11: Versuchsaufbau in Sindelfingen

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Am 14.10.2005 konnte erstmalig in Sindelfingen die Anlage in Betrieb genommen werden.

Bei den Dauerversuchen traten deutlich folgende Arbeitsfelder ans Licht:

- Die Abdichtung des Vergasers über Flanschdichtungen mit Dichtschnüren aus Keramik versagte regelmäßig. Am oberen Deckel konnte durch den Einsatz von Stirling Brennkammerteilen schnell und sicher Abhilfe geschaffen werden.
- Die Abdichtung des Rüttlerantriebs war thermisch zu hoch belastet. Hier trat ständig Holzgas aus. Durch eine konstruktive Verlegung in einen kälteren Bereich und Auslegung als O-Ring-Dichtung wurde der Fehler behoben.
- Die Ascheschnecke versagte regelmäßig. Da sie als seelenlose Schnecke ausgebildet war, reichte die Festigkeit bei den hohen Temperaturen nicht aus und sie verformte sich. Der Vergaser lief dann mit Asche voll.
- Der Antrieb der Ascheschnecke war thermisch einer zu hohen Belastung ausgesetzt. Eine Verlegung in einen kälteren Bereich war erforderlich.
- Die Pelletschleuse arbeitete äußerst unzuverlässig. Nachdem mehrere Klappenschleusen schon nach kürzester Zeit ausgefallen waren wurde ein metallisch dichtendes Sitzventil mit pneumatischer Ansteuerung konstruiert. Das Ventil arbeitete sehr zuverlässig auch unter den widrigen Bedingungen.



Bild 12: Sitzventil der Pelletschleuse Zu/ Offen, arbeitet trotz der Teerablagerungen

Die Dauerversuche wurden auch nach Ablauf des Projekts weiter fortgesetzt. Der erste Schwerpunkt war durch Verbesserung der Einzelkomponenten einen dauerhaften Versuchsablauf zu erreichen. Außerdem sollte der ständig beaufsichtigte Betrieb durch weitere Sicherheitsketten und Automatisierungsmaßnahmen in einen selbständigen Betrieb geführt werden.

Diese Ziele sind inzwischen auch erreicht worden.

3 Ergebnisse

3.1 Erreichter technischer Stand

Das System ist mit Erd- oder Flüssiggas im Brenner und durch ein Heißluftgebläse am Vergaser allgemein gut zu starten. Während der Brenner aufgewärmt wird, mischt sich immer mehr im Vergaser produziertes Holzgas zu, nach ca. 15 Minuten erreicht die Maschine Normalbetrieb mit reinem Holzgas. Über die Temperaturen im Vergaser kann die Lage der Glutzone im Vergaser beurteilt und entsprechend Brennstoff nachgefördert werden.

Die Sekundärluft für den Brenner wird nach gewünschter Leistung eingestellt. Die nötige Primärluft für den Vergaser wird über eine Lamda- Sonde im Abgas ermittelt. Letztlich wird dadurch die Menge der Gasproduktion beeinflusst. Zur Kontrolle der vollständigen Verbrennung wird die Abgastemperatur nach dem Erhitzer ständig beobachtet.

Das Abstellen geschieht durch Beenden der Primärluftzufuhr und kann durch Wassereinspritzen beschleunigt werden, so dass nach 15- 20 Minuten am Motor Stillstand erreicht ist. Das Saugzuggebläse läuft noch nach.

Der Vergaser wird derzeit mit ca. 20 mbar über der Umgebung betrieben, in Zukunft wird ein druckneutraler Betrieb angestrebt, was aber ein regelbares, wärme und kondensatfestes Abgas- Absauggebläse nach dem Abgaswärmetauscher mit EMV- Zulassung erfordert, was serienmäßig nicht erhältlich ist.

Im Vergaser werden unterstöchiometrische Luftzahlen von etwa $\lambda = 0,4$ gefahren, im Abgas nach dem Brenner waren die Luftzahlen bei etwa 1,4. Diagramm 2 zeigt die Zusammensetzung des Holzgases. Man erkennt zunächst die noch sehr stark schwankende Gasproduktion, dies wurde durch bessere Regelung inzwischen deutlich gleichmäßiger. Der prozentuale Anteil von CO und CO₂ ist auf der linken Abszisse zu sehen und rechts der Anteil der HC-Verbindungen, oder auch der Teere. Allerdings wurde nach einer Gaswäsche gemessen um das Messgerät nicht durch übermäßige Teerbelastung zu zerstören. Diese Kurve ist also nur tendenziell auszuwerten. Für den Heizwert des Produktgases steht CO und H₂ im Vordergrund. Der Rest ist überwiegend unvermeidlicher Stickstoff aus der Primärluft und sehr geringe Mengen an Methan und anderen Kohlenwasserstoffen. H₂ konnte jedoch nicht erfasst werden. Der Heizwert des Gases liegt mit rund 8,5 MJ/m³ nur bei rund einem Viertel von dem des Erdgases.

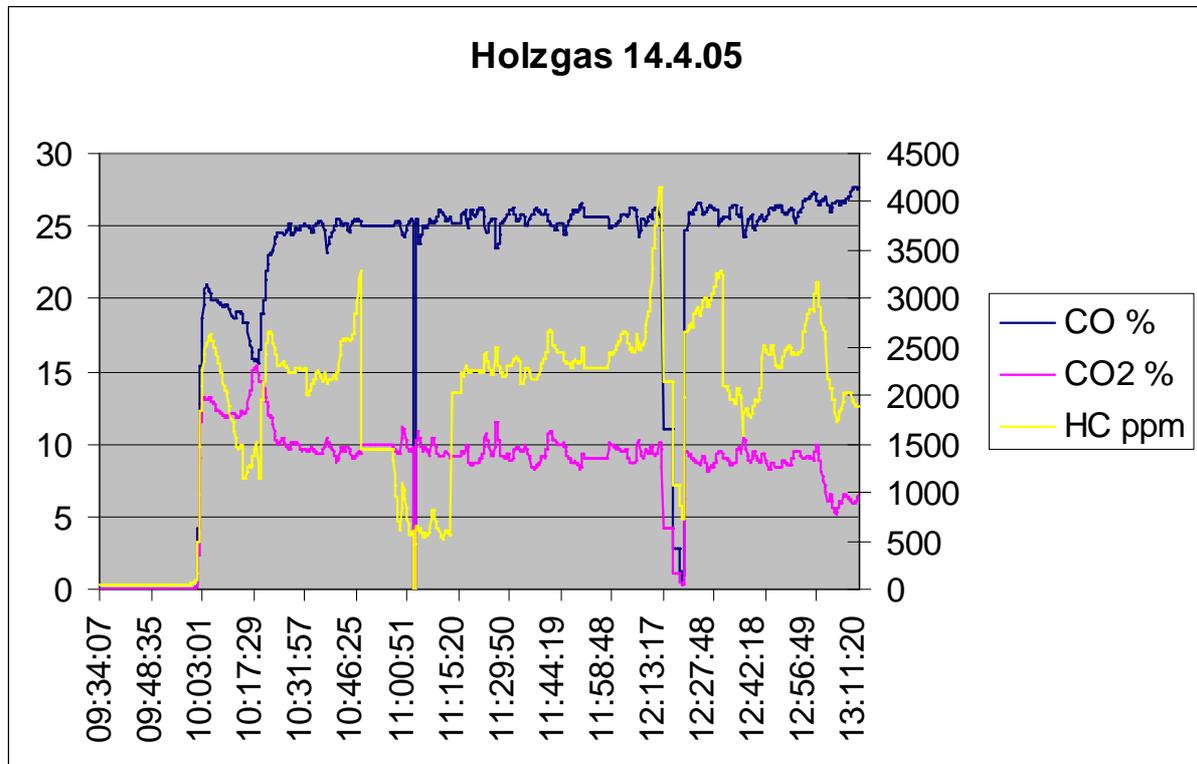


Diagramm 2: Aufschrieb der Holzgas- Zusammensetzung

Es konnten mehrere Dauerbetriebsphasen über 15- 30 Stunden gefahren werden. Insgesamt sind etwa 400 Betriebsstunden des Gesamt- Systems akkumuliert, weitere 150 Stunden mit Vergaser und Brenner im Kessel. Hier konnte das Ziel von Tausend Betriebsstunden nicht erreicht werden, Probleme mit der Vergaser- Peripherie hatten dies nicht erlaubt:

Im Betrieb werden entsprechend dem Temperaturprofil im Vergaser die Pellets über eine Schleuse zugeführt. Der Rost wird zyklisch bewegt und die Ascheschnecke eingeschaltet. Diese drei Komponenten erforderten noch weitere Erprobung, es gab hier immer wieder Ausfälle aber auch kontinuierlich Verbesserungen. Diese von Pellets- Feuerungen entnommenen Geräte waren offensichtlich mit den Dichtigkeit- Anforderungen und Teerbelastungen des Vergasers überfordert, sie konnten inzwischen auf zuverlässigen Laborbetrieb verbessert werden.

Teerablagerungen in der Gasleitung zum Brenner sind bei guter Isolierung und Leitungsführung kein Problem mehr. Es muss aber noch beobachtet werden, ob sich auf Dauer hier nicht trockene Ablagerungen absetzen.

Der Vergaser selbst soll nun konstruktiv überarbeitet und ähnlich der Stirling- Brennkammer aus Blech- Drückteilen und mit außen liegenden Dichtungen konzipiert werden.

Der Erhitzer und der Luftvorwärmer zeigen kaum Ablagerungen, dies war ein wichtiges Ziel des Vorhabens. Zwar stehen längere Betriebszeiten noch aus, aber der erreichte Stand ist um Größenordnungen besser als bei Direktfeuerungen.

Der Brenner arbeitet mit ganz unterschiedlicher Gasqualität und Mischungsverhältnissen sehr sicher und stabil.

3.2 Energetische Bilanzierung

Es ist noch nicht genau geklärt, welche Wirkungsgrade mit diesem System letztendlich erreicht werden können. Im Dauerversuch inklusive Start und Propangas waren über 30 Stunden elektrische Netto- Wirkungsgrade von rund 18 % und Gesamtwirkungsgrade von etwa 71 % gemessen worden. Die Wirkungsgrade im stationären Dauerbetrieb wären etwas höher.

Gegenüber der Erdgasversion müssen bei Biomassenutzung grundsätzlich sicher einige Kompromisse gemacht werden:

- Der Ausbrand in einem Vergaser wird oft mit maximal 95 % eingeschätzt, es bleibt ein Holzkohlerest im Aschekasten.
- Es gibt Wärmeverluste aus dem Holzvergaser und aus der Zuleitung zum Brenner, hier als Vergaser- Wärme- Wirkungsgrad bezeichnet.
- Der Luftvorwärmer des Brenners arbeitet weniger effektiv: Die Primärluft kann nicht einfach vorgewärmt werden da der Sekundärluftanteil nur höchstens 75 % der Gesamt- Luftmenge ist , kann das Abgas nach dem Erhitzer nur einen begrenzten Anteil seiner Energie auf die Sekundärluft übertragen. Die Abgasverluste liegen somit bei 25- 30 % der Brennerleistung, etwa doppelt so hoch wie beim Gasbrenner.
- Die Abgasverluste können zwar im Abgaswärmetauscher als Wärme genutzt werden, eine Brennwertnutzung wie bei Erdgas kann aber nicht im selben Maße erreicht werden, das mindert den Gesamtwirkungsgrad.

Die Einzel- Wirkungsgrade können etwa folgendermaßen abgeschätzt werden. Als verbesserter Pelletsvergaser wird hier eine an Isolierung und Rüttelrost optimierte Version verstanden, Primärluftvorwärmung ist ein größerer Schritt.

Wirkungsgrad	Erdgas	Vergaser heute	Vergaser verbessert	Mit Primärluftvorwärmung
Ausbrand	1	0,94	0,95	0,95
Vergaser- Wärme	1	0,85	0,9	0,9
Feuerungstechnisch	0,83	0,75	0,75	0,85
Stirling Wärme in Strom	0,3	0,3	0,3	0,3
Gesamt elektrisch	0,25	0,18	0,19	0,22
Gesamt Strom + Wärme	0,92	0,71	0,77	0,77

Der Vergaser- Wirkungsgrad setzt sich aus Ausbrand und nutzbarer Wärme aus der Vergasung zusammen. Hier sind bei Vergasern im Gegensatz zur Direktfeuerung allgemein Verluste unvermeidlich.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Der größere Verlust kommt vom feuerungstechnischen Wirkungsgrad des Brenners. Durch die hohe Nutztemperatur von über 700 °C am Erhitzer steckt im Abgas nach diesem noch sehr viel Wärme, es hat ca. 850- 900 °C. Beim Erdgasbrenner lässt sich diese Wärme zu fast 90 % an die Frischluft übertragen. Eine Vorwärmung des Erdgases lohnt nicht und würde dieses zersetzen, der Abgas-Kapazitätsmassenstrom ist hier nur ca. 10 % höher als der Luft- Kapazitätsmassenstrom.

Beim Holzgasbrenner kann nur die Sekundärluft Energie vom Abgas aufnehmen, hier ist der Kapazitätsmassenstrom nicht ausreichend. Der Abgas- Kapazitätsmassenstrom ist außerdem hoch, da das Abgas noch Ballast- Stickstoff aus dem Holzgas mitführt. Daraus resultiert eine hohe Abgastemperatur von über 450 °C nach dem Luftvorwärmer, die Energie aus der Feuerung mitführt und dann im Abgaswärmetauscher abgibt.

Die einzige Möglichkeit zu einer Verbesserung besteht in der Vorwärmung der Primärluft. Dies war geplant und durch einen Stutzen im Luftvorwärmer vorbereitet, aus dem ca. 650 °C heiße Frischluft entnehmbar ist. In der Praxis gab es allerdings erhebliche Probleme bei der Vergasung mit vorgewärmter Luft, so dass dieser Weg zunächst aufgegeben werden musste. Dies wird in Zukunft noch einmal diskutiert. So sollte ein elektrischer Wirkungsgrad von 20- 22 % machbar sein, der Gesamt- Wirkungsgrad ließe sich nur durch Minderung der ersten beiden Verluste weiter steigern.

3.3 Ökologische Bilanzierung

Zunächst ist natürlich klar, dass die Nutzung regenerativer Brennstoffe einen geschlossenen CO₂- Kreislauf ermöglicht, die Erzeugung von höherwertiger Energie wie Strom aus Biomasse ist bei dezentralen Anlagen bisher nicht möglich gewesen.

Da Erhitzer und Luftvorwärmer gegen Aschen empfindlich sind, musste ein extrem partikelarmes Verbrennungskonzept gewählt werden, mit Staubemissionen aus der Verbrennung wie in klassischen Holzfeuerungen ist daher nicht zu rechnen.

Die Schadstoffemissionen des verwendeten Brenners sind gering. Die Werte im Diagramm zeigen für CO etwa 200- 250 ppm und für NO zwischen 100 und 200 ppm.

Das entspricht 250- 312 mg/m_N³ für CO- und 135- 270 mg/m_N³ für NO- Emissionen bezogen auf 5% Restsauerstoff, für eine Holzfeuerung durchaus gute Werte. Die starken Schwankungen sind auf die damals noch unvollkommene Regelung des Vergasers zurückzuführen.

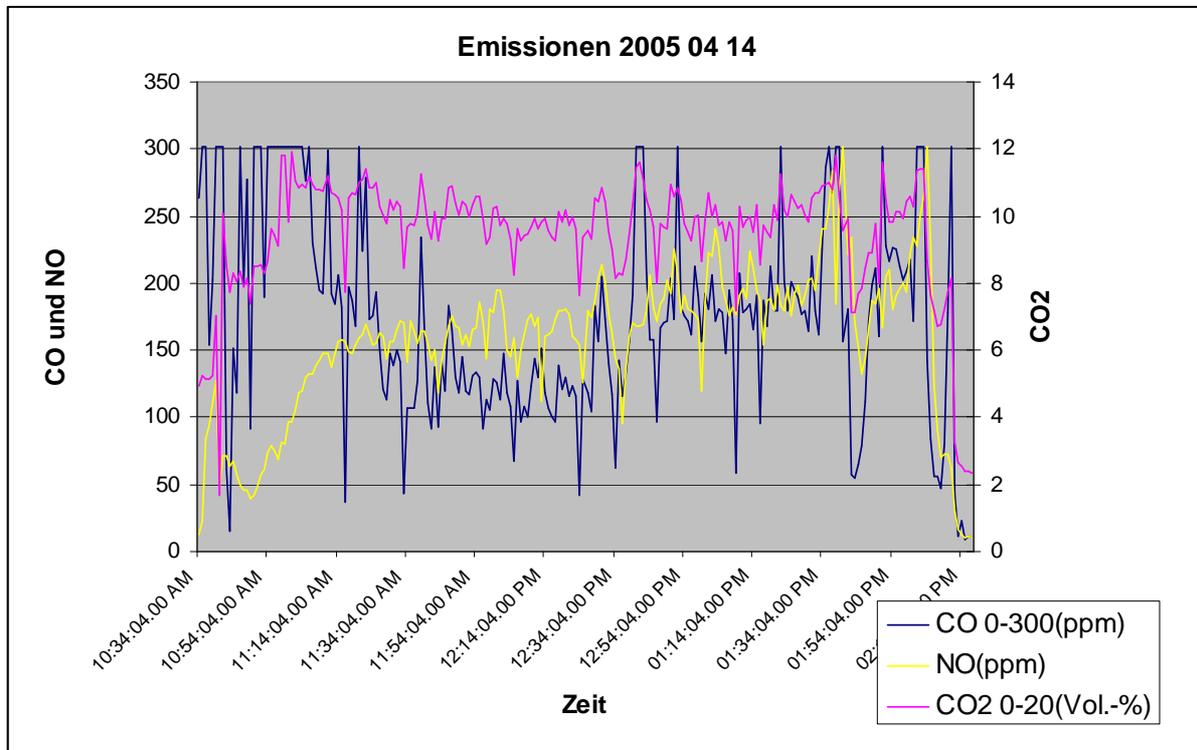


Diagramm 3: Schadstoffemissionen während eines Versuchslaufs

Ein Ausstoß von unverbrannten Kohlenwasserstoffen kann auch im Kaltstart nicht passieren, da mit Erd- oder Flüssiggas vorgeheizt wird. Im Betrieb sind alle Brennraumwände auf so hohem Temperaturniveau dass die Brennstoffumsetzung vollständig ist.

Die Staubemissionen konnten leider nicht gemessen werden. Sie müssen aber schon aus den unter 3.1 genannten funktionellen Gründen der Staubanlagerung am Erhitzer sehr gering sein und weit unter den Vorschriften liegen.

Die Herstellung von KWK- Modulen ist wegen deren energetisch nicht aufwändigen Aufbaus aus Eisenwerkstoffen und ihrer Langlebigkeit ökologisch anerkannt günstig. Dies trifft auch für Stirlingmotoren und den Vergaser zu. Die Rücknahme gebrauchter KWK- Module durch den Hersteller ist zugesichert, die Wiederverwertung der hochwertigen Hochtemperatur- Werkstoffe ist möglich.

3.4 Ökonomische Betrachtung

Strom aus Biomasse wird nach dem EEG mit folgenden Vergütungen bezahlt:

- Gesamteinspeisevergütung für elektrische Energie 2006: 0,136
 - Bonus für Kraft- Wärme- Kopplung von 0,08
 - Bonus für Innovative Verfahren 0,04
- Gesamtvergütung Summe 0,2516 €/kWh

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Der erzeugte Strom wird deshalb vollständig eingespeist. Die Wärme kann allgemein genutzt werden und hat einen Wert von 0,035 €/kWh (bezogen auf eine Holzpellettheizung, 0,16 €/kg Pellets, $H_u = 5,2 \text{ kWh/kg}$, $\eta = 0,9$). Die Wartungskosten sind mit 0,04 €/kWh gut zweimal höher angesetzt als beim Erdgas-Modul.

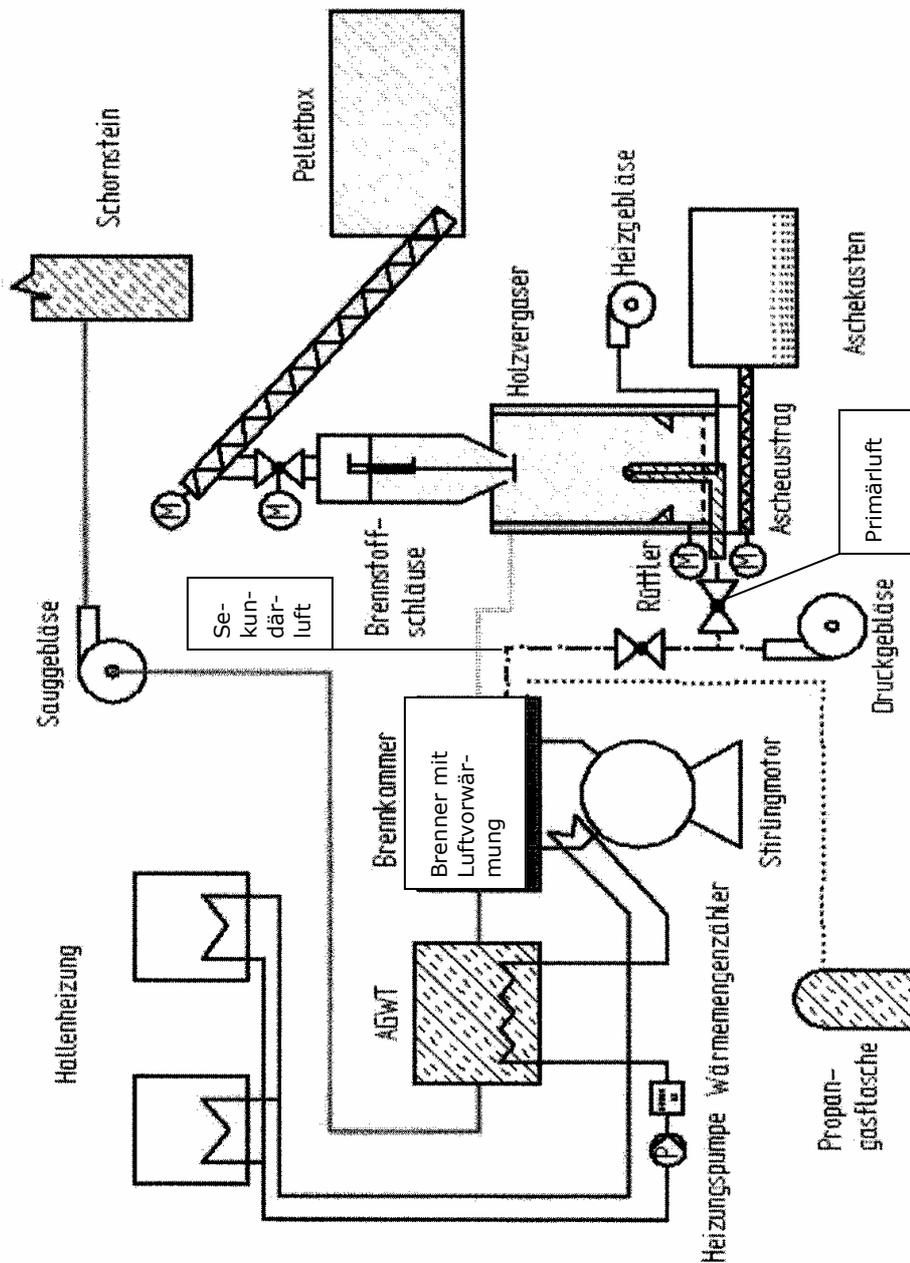
Bei einer vorsichtig angesetzten Leistung und Jahreslaufzeit ergibt sich:

					Kosten, Nutzen, /Jahr
Stromproduktion	7,5	kW	7000	h	13.209 €
Wärmeproduktion	22	kW	7000	h	5.929 €
Wartungskosten	-0,03	€/kWh	52500	kWh	-1.575 €
Brennstoffkosten	-0,035	€/kWh	275333	kWh	-9.637 €
Erlös ohne Investment und Zinsabzug					7.926 €

Bei einer angenommenen Investitionssumme von 38.000 € liegt die Abschreibungszeit bei 5 Jahren, ein realistischer Wert für Kraft- Wärme- Kopplung.

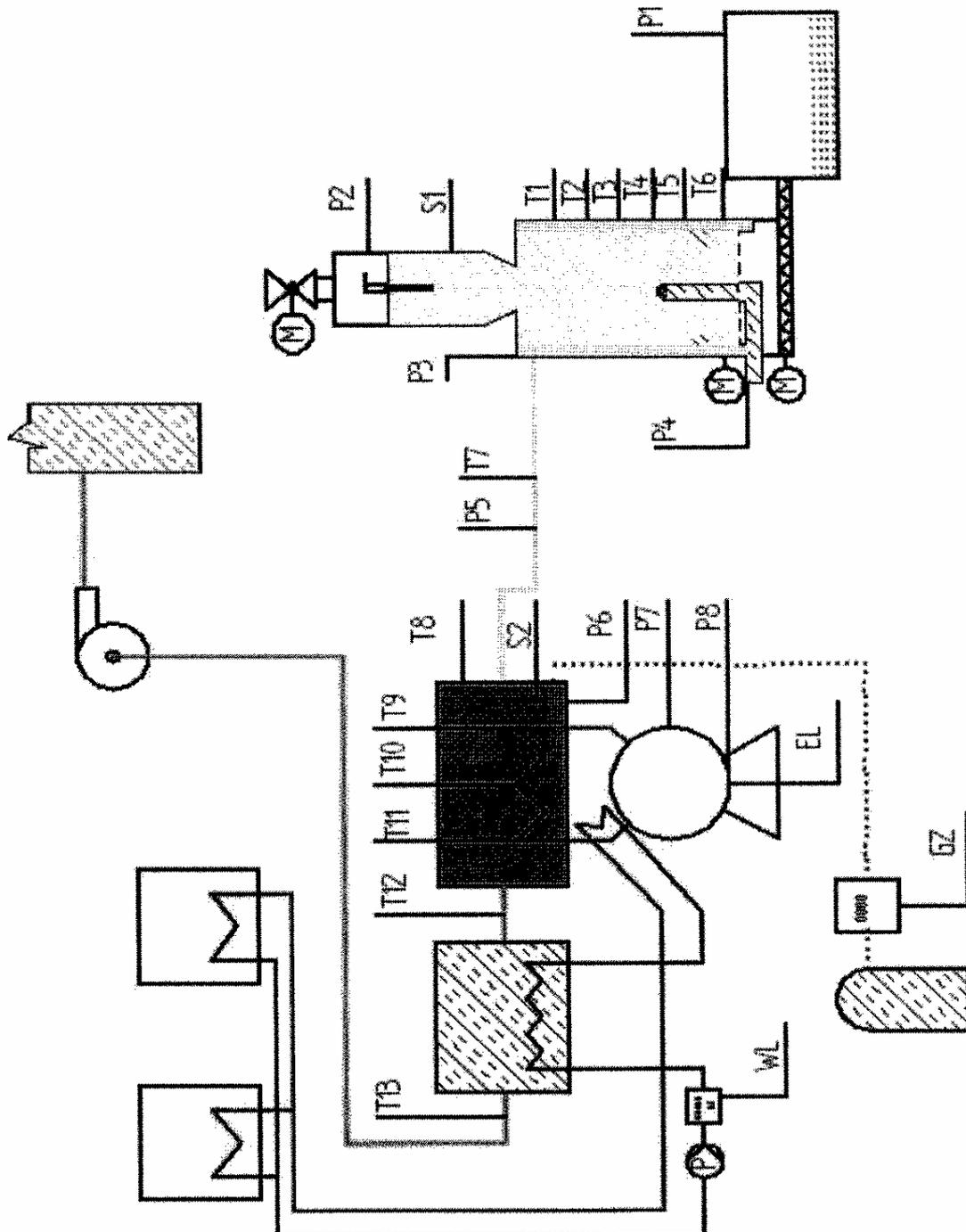
4 Anhang

4.1 Anlagenschema



Abschlußbericht Pellets- Stirling

4.2 Messstellen an der Anlage



4.3 Literatur

Bernstein, Wolfgang et al.:

Energetische Aspekte bei der Verbrennung und Vergasung von Holz; Vortrag Internationaler und Interdisziplinärer Kongress Paderborn, 20.-22. 11. 2000

Carlsen Hendrik et al.:

Results from tests of a Stirling engine and wood chips gasifier plant, Vortrag Europäisches Stirling Forum 2004, Osnabrück

Schotte, Eyck:

Untersuchungen zur Verbrennung von Gasen und Biomassen...
Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; 2002

Carlsen Hendrik et al.:

Stirling Engines for Biomass – what is the problem?; Proceedings of the 12th Int Stirling Engine Conference 2005, Durham, UK



Solo Stirling GmbH

Entwicklung einer Holz- Pellets- Feuerung für Stirling Blockheizkraftwerke

Abschlußbericht zum Vorhaben

Zeitraum: 1.1.2003 bis 31.12.2005

Aktenzeichen der Umweltstiftung: 20631-24/0

**Verfasser:
Dipl.-Ing. Andreas Baumüller
Dipl.-Ing. Andreas Laug**



Inhalt

Inhalt	2
Zusammenfassung	3
1. Einleitung	4
1.1 Strom- und Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien	4
1.2 Vorhandene Technik- Gasbetriebene Maschine	5
1.3 Ziel des Vorhabens.....	8
1.4 Projektpartner	9
2 Projektverlauf	10
2.1 Konzeption Feuerung.....	10
2.2 Erste Versuche mit aufsteigendem Vergaser bei Hoval.....	11
2.3 Verbessertes Brenner für Schwachgas und Test im Kessel.....	12
2.4 Konzept mit integriertem Vergaser	15
2.5 Versuche mit absteigendem Vergaser	16
2.6 Automatisierung	19
2.7 Dauerversuche	20
3 Ergebnisse	22
3.1 Erreichter technischer Stand.....	22
3.2 Energetische Bilanzierung	24
3.3 Ökologische Bilanzierung.....	25
3.4 Ökonomische Betrachtung.....	26
4 Anhang.....	28
4.1 Anlagenschema	28
4.2 Messstellen an der Anlage	29
4.3 Literatur	30

Zusammenfassung

Die Nutzung von Holzpellets in einem Modul zur Kraft- Wärme- Kopplung ist ökologisch sehr sinnvoll und auch ökonomisch interessant. Bis jetzt gab es dazu aber keine dezentrale Technik. Ein durch beliebige Wärme angetriebener Stirlingmotor mit entsprechender Feuerung aber kann diese Aufgabe erfüllen.

Solo Stirling beschäftigt sich seit über 15 Jahren mit Stirlingmotoren und hat ein gasbetriebenes Stirling KWK- Modul von 9 kW_{el}/ 26 kW_{th} in Serienproduktion.

Auf dieser Basis wurde eine Variante für Holzpellets als Brennstoff entwickelt. Als Konzept dazu wurden eine Holzvergasung und ein spezieller Brenner mit Luftvorwärmung ausgewählt. Der Projektpartner Hoval entwickelte zunächst einen aufsteigenden Gegenstrom- Vergaser, Solo modifizierte den Brenner der Gasmachine für den Betrieb mit schwachkalorigem Holzgas. Brennersuche fanden zuerst mit einem wassergekühlten Erhitzer und danach auf der kompletten Stirlingmaschine statt. Später wurde der Vergaser in eine absteigende Konzeption umgebaut, hierdurch erhielt man eine deutlich bessere Gasqualität. Schwierigkeiten machten weiter die automatische Pelletzufuhr, der bewegliche Ascherost, die automatische Ascheabfuhr sowie Undichtigkeiten am Vergaser.

Start und Stopp gelingen jetzt allgemein relativ rasch, die Regelvorgänge sind automatisiert. Dauerbetrieb wurde mehrmals über 30 Stunden durchgeführt. Eine Leistung von 8 kW_{el} und 22 kW_{th} konnte erreicht werden. Bei Hoval wurden etwa 150, bei Solo weitere 400 Betriebsstunden akkumuliert.

Die Schadstoffemissionen liegen ähnlich wie bei einer guten Pelletsheizung, die Wirkungsgrade lagen bei 18 % elektrisch und 71 % insgesamt und können noch verbessert werden. Hier sind zwar bei Holz gewisse Grenzen gesetzt, dennoch sollten 20- 22 % elektrischer und über 80 % Gesamtwirkungsgrad erreichbar sein.

Das grundsätzliche Problem von Schlacke- Ablagerungen am Erhitzer trat nur minimal auf, Asche- Verstopfung im Luftvorwärmer gab es bei keinem der Versuche. Das vorliegende Konzept umgeht also dieses in früheren Versuchen fatale Phänomen und stellt im Wesentlichen noch Entwicklungsaufgaben an peripheren Bauteilen zur weiteren Optimierung. Die Entwicklung und Erprobung soll mit hoher Priorität weitergehen.

1. Einleitung

1.1 Strom- und Wärmeerzeugung aus regenerativen Energien

Bei der Erzeugung elektrischer Energie oder Wärme aus kohlenstoffhaltigen Brennstoffen wird über das Abgas CO₂ ausgestoßen. Ein Weg zur Vermeidung dieser klimarelevanten Emissionen in die Atmosphäre ist unter anderem die Verwendung biogener anstelle fossiler Brennstoffe. Damit kann der CO₂- Kreislauf während des Wachstums der Pflanzen wieder geschlossen werden.

Auch der weltweite Anstieg an Verbrauch und der Preisanstieg fossiler Brennstoffe drängen zur verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen.

Der biogene Brennstoff mit der längsten Tradition ist Holz. Eine in letzter Zeit sehr erfolgreiche Produktform von Holz als Brennstoff sind Pellets, sie werden für automatisch arbeitende Holz- Zentralheizungen und Einzelöfen verwendet, das Versorgungsnetz entwickelt sich zunehmend seit der Preis energiebezogen mit dem des Heizöls vergleichbar ist.

Da die derzeit zur Verfügung stehenden Biobrennstoffe die fossilen mengenmäßig nicht ersetzen können, ist weiter eine möglichst effiziente Ausnutzung nötig. Die beste energetische Nutzbarmachung von Brennstoffen ist die Kraft- Wärme- Kopplung (KWK), das heißt das Erzeugen von Strom und gleichzeitiger Verwendung der dabei abfallenden Wärme. Auf diese Weise ist 75- 85 % der eingesetzten Energie nutzbar.

Kraft- Wärme- Kopplung setzt den Einsatz der Wärme in naher Umgebung voraus, also relativ kleine, dezentrale Anlagen. In Leistungsgrößen ab etwa 1 MW elektrischer Leistung stehen Dampfturbinenanlagen zur Verfügung. Die Verteilung der thermischen Leistung von 3-4 MW auf umliegende Gebäude ist aber bereits schwierig. Für kleinere Leistungen von 100- 1000 kWel gibt es Entwicklungstendenzen, Lösungen mit Holzvergasern/ Gasmotoren und mit Kolben- Dampfmaschinen zu realisieren.

Für Leistungen unter 100 kWel steht heute keine Technik zur Kraft- Wärme- Kopplung aus fester Biomasse Verfügung.

Es ist aber möglich Stirlingmotoren in Blockheizkraftwerken mit festen Brennstoffen zu betreiben. Da Stirlingmotoren mit äußerer Verbrennung, also mit Wärme arbeiten, können diese grundsätzlich mit beliebigen Wärmequellen betrieben werden, auch durch direkte Beheizung mit Holz. Probleme und Lösungsansätze werden im Folgenden beschrieben.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

1.2 Vorhandene Technik- Gasbetriebene Maschine

Das Prinzip des Heißgas- oder Stirlingmotors ist seit langem bekannt. Die Besonderheit dieses Motors ist, dass ein Arbeitsgas zwischen zwei Zylindern hin- und her geschoben wird, ohne den Motor zu verlassen (geschlossener Gaskreislauf). Die Wärmeenergie, die letztendlich in Bewegungsenergie der Kurbelwelle umgewandelt wird, wird dem Arbeitsgas von außen über einen Wärmeaustauscher zugeführt, allgemein Erhitzer genannt. Die Wärmezufuhr kann durch beliebige Wärmequellen erfolgen, etwa durch Brenner, aber auch durch Solarstrahlung.

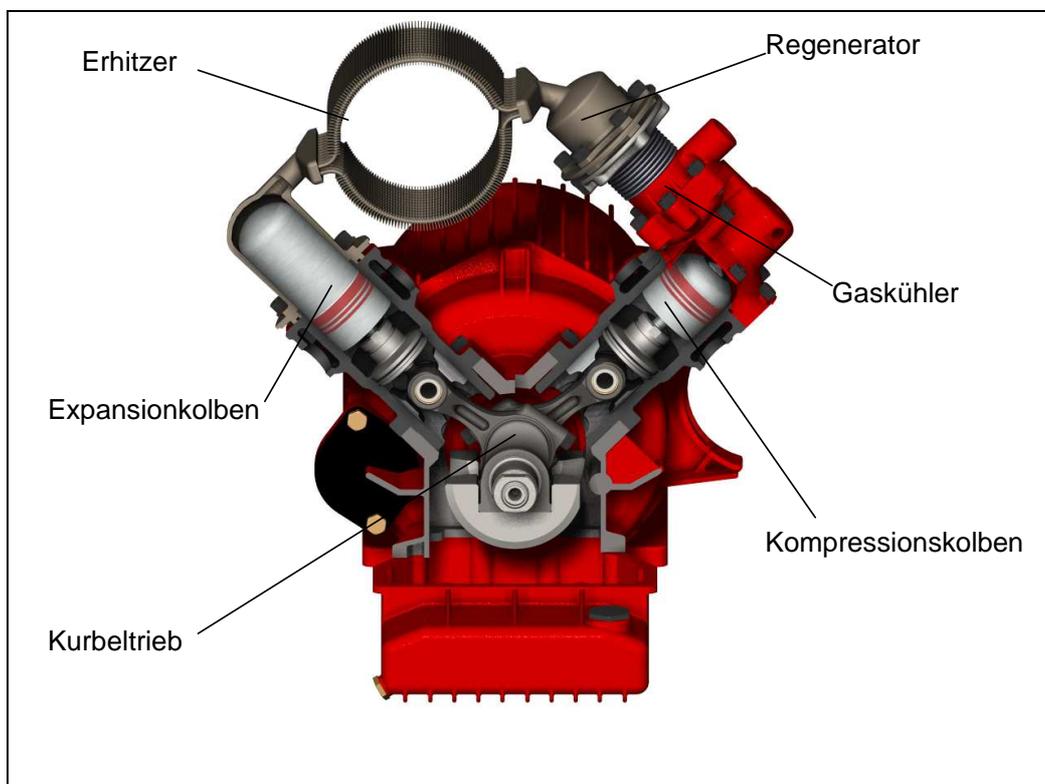


Bild 1: Funktion des Solo Stirling 161

Der von Solo eingesetzte Motor Stirling 161 ist als 90°-V-Zweizylinder mit einem einfach wirkenden Kompressions- und Expansionszylinder konzipiert. Zwischen den Zylindern befinden sich der Erhitzer, der Regenerator und der Gaskühler. Die Wellenleistung liegt bei 10 kW/ 1500 min⁻¹. Wie bei einem herkömmlichen Verbrennungsmotor hat auch der Stirling Kolben. Diese schieben das Arbeitsgas (gewöhnlich Helium) zwischen den beiden Zylindern hin- und her, wobei dies bei niedriger Temperatur komprimiert wird und nach der Erhitzung bei hoher Temperatur expandiert.

Der Erhitzer befindet sich in einer Brennkammer, in der unabhängig vom Motor die Verbrennung des Treibstoffes stattfindet, Verbrennungsrückstände dringen daher nicht in den Motor ein. Damit ergeben sich wichtige Vorteile:



Abschlußbericht Pellets- Stirling

- Es können Brennstoffe genutzt werden, die in konventionellen Otto- oder Dieselmotoren nicht verwendbar sind, zum Beispiel feste Biomasse.
- Verbrennungsrückstände belasten weder Schmierstoffe noch die Umwelt, damit entfällt der Austausch von Motoröl und Filter; Stirlingmotoren können wartungsfrei 5.- 8.000 Stunden laufen, unabhängig vom Brennstoff.
- Der Wirkungsgrad des Stirlingmotors ist wegen des günstigen thermodynamischen Prozesses relativ gut. Auch bei kleinen Motoren sind 30% und mehr erzielbar.

Die Firma SOLO beschäftigt sich seit 1990 mit der Stirling-Technologie. Nach Recherchen und Versuchen mit SPS V 160 in Erdgas- und Solarausführung wurde 1994 eine Neukonstruktion erarbeitet. Diese wurde im von der DBU geförderten Vorhaben „Felderprobung“ mit 16 BHKW bzw. „Micro- KWK- Modulen“ über 100.000 Stunden sehr ausführlich getestet und weiterentwickelt. Die Entwicklung zu dieser hohen Zuverlässigkeit und den Laufzeiten war schwierig und zeitintensiv, konnte aber erfolgreich abgeschlossen werden (siehe Abschlußbericht hierzu, Förderkennzeichen 03873/ 01,02).

SOLO Stirling verfügt also mit dem Stirling 161 über die am längsten und gründlichsten getestete Stirlingmaschine überhaupt. Sie ist relativ einfach und fertigungsgünstig sowie für stationären Einsatz mit langen Laufzeiten konzipiert.

Das Erdgas- Stirling - KWK- Modul wurde auf der Hannover Messe 2001 vorgestellt und ist zertifiziert. Danach wurden die Voraussetzungen für eine Serienproduktion geschaffen, inzwischen sind etwa 100 Geräte produziert und vertrieben. Abmessungen und Kennwerte stellen sich folgendermaßen dar:

Außenabmessungen		
Länge	1280	mm
Breite	700	mm
Höhe	980	mm
Gewicht	450	Kg
Leistung und Wirkungsgrad *		
Elektrische Leistung	2 - 9	kW
Elektrischer Wirkungsgrad	24	%
Thermische Leistung	8– 26	kW
Thermischer Wirkungsgrad (bez. auf Hu)	65 – 75	%
Emissionen		
Stickoxid max.	50	mg/m ³
Kohlenmonoxid max.	80	mg/m ³
Schalldruckpegel in 1 m Abstand	55	dBA
Wartungsintervall		
Austausch Kolbenringe, Stangendichtung	über 5000	h
Motordaten		
Bauart	V 2-Zylinder	
Hubraum	160	ccm

SOLO Stirling GmbH Postfach 600152 71050 Sindelfingen

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Mittlerer Arbeitsdruck	30 – 150	bar
Arbeitsgas	Helium	
Obere Arbeitsgastemperatur	640	°C
Nenndrehzahl	1500	U/min

* bez. auf Kühlwasservorlauf von 50 °C

Da die Wärmeeinkopplung am Erhitzer von Stirlingmotoren auf hohem Temperaturniveau erfolgen muss, wird für einen guten feuerungstechnischen Wirkungsgrad Luftvorwärmung nötig. Das Abgas nach dem Erhitzer ist über 800 °C heiß und überträgt diese Energie in einem Gegenstrom- Wärmeübertrager auf die Frischluft. Es kühlt sich dabei auf etwa 250 –300 °C ab, die Luft wird auf über 600 °C vorgewärmt. Zur Nutzung der Restwärme im Abgas ist noch ein wasserdurchströmter Wärmeübertrager nachgeschaltet, der es auf etwa 20 °C über die Rücklauftemperatur abkühlt und dabei Kondensat erzeugt.

Eine wesentliche Weiterentwicklung am Stirling 161 betrifft die Brennkammer und den Brenner. Hier findet ein modernes Verfahren mit flammloser Oxidation (Flox®, WS- Wärmeprozessestechnik) Verwendung, um die Schadstoffemissionen zu minimieren.

Die Entwicklung geschah zunächst 1998/ 99 in Zusammenarbeit mit der Firma WS- Wärmeprozessestechnik in einem DBU- Vorhaben (Az.: 10370; „Entwicklung eines Regenerativbrenners...“), später arbeitete Solo unter Nutzung von WS- Lizenzen und eigenen Patenten selbstständig weiter.

Auf der technischen Basis industrieller Ofenheizungen wurde ein entsprechender Gas- Brenner entwickelt, der mit sehr hohen Abgasrezirkulationsraten arbeitet. Dadurch lassen sich die Stickoxidemissionen, die bei hoher Luftvorwärmung zum Problem werden, wirksam begrenzen: Durch die für Stirlingmotoren notwendige Luftvorwärmung lassen sich stabile Oxidationsbedingungen einstellen, wobei die Reaktion Brennstoff- Luft „flammlos“, also räumlich verteilt stattfindet. Durch den hohen Abgasanteil wird die Grenztemperatur der thermischen NOx- Bildung (ca. 1500 °C) nicht erreicht. Der Brenner ist im Verhältnis 1: 3 modulierbar.

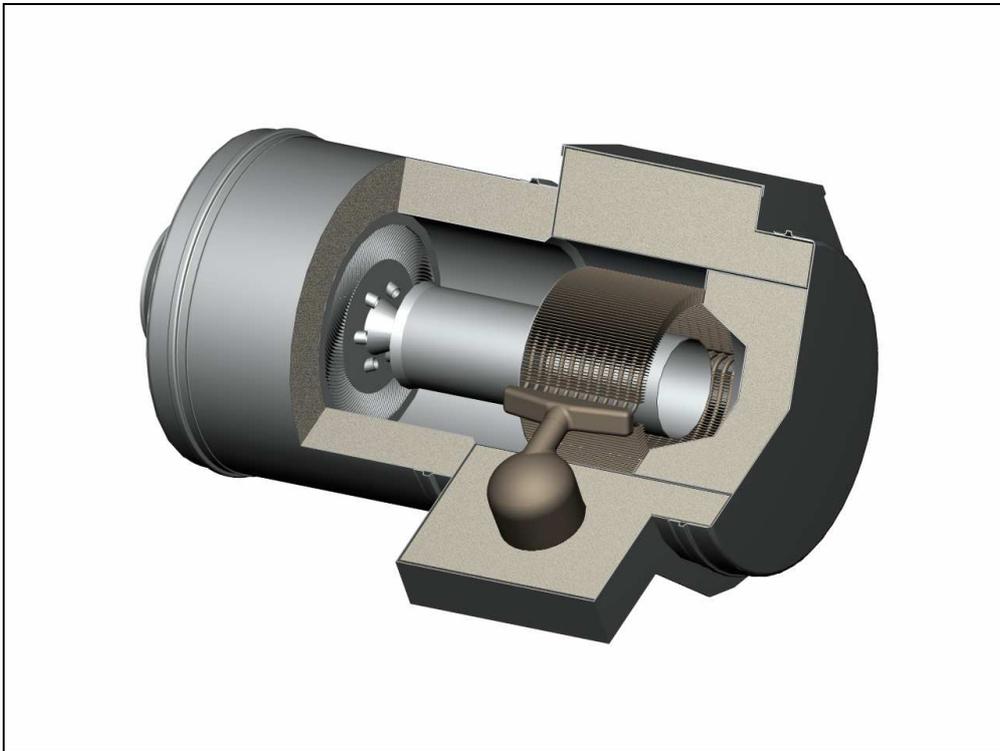


Bild 2: Gasbrenner für Stirling 161 mit flammloser Oxidation

1.3 Ziel des Vorhabens

Es sollte auf Basis des vorhandenen, in Serie produzierten KWK- Moduls eine Version mit einer Pellets- Feuerung entwickelt werden. Das wesentliche zu lösende Problem betraf die extreme Asche- bzw. Partikelarmut der Feuerung, da diese den filigranen Erhitzer und auch den Luftvorwärmer zusetzen würden.

Der Erhitzer muss mit Rippen zur Vergrößerung der Oberfläche bestückt sein, da das Innenvolumen zur Schadraum- Minimierung sehr gering bleiben muss. Asche von Temperaturen über ca. 1100 °C kann erweicht und damit klebrig sein, es besteht dann die Gefahr eines Anbackens am Erhitzer.

Der Luftvorwärmer ist bei dieser Feuerung mit einer Nutzttemperatur von rund 700 °C für einen guten Feuerungs- Wirkungsgrad unerlässlich, auch hier werden für gute Wärmeübergänge enge Kanäle benötigt.

Daher muss die Verbrennung mit gestufter Luftzufuhr durchgeführt werden, durch eine geringe Primärluftzufuhr zur Vergasung des Brennstoffs kann die Asche kaum aufgewirbelt werden, die eigentliche Verbrennung findet unter Sekundärluftzufuhr statt.

Weiter muss eventuell die Verbrennungstemperatur begrenzt werden, um eine Ascheerweichung zu vermeiden. Dies kann durch eine Abgasrezirkulation entsprechend dem Flox- Verfahren geschehen.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Die Verbrennungsverfahren sollte also nahe dem mit Luftvorwärmung und Abgasrezirkulation arbeitenden Flox- Brenner liegen, um die vorhandenen Komponenten zu nutzen. So wurde entschieden, die Pellets in einem Vergaser mithilfe von Primärluft in ein brennfähiges Holzgas umzusetzen, das danach mit Sekundärluft in einem modifizierten Floxbrenner vollständig verbrannt wird.

Die Brennerleistung sollte ähnlich der des Gasbrenners bei knapp 40 kW liegen, die Kennwerte werden wegen des für Biomasse höheren Luftüberschusses und einer wegen Verschmutzung schlechteren Luftvorwärmung etwas unter der Gasversion liegen:

Die elektrische Leistung sollte modulierbar 4-8 kW betragen, die thermische dabei 10- 20 kW. Ein elektrischer Wirkungsgrad von 20 % war das Ziel, der thermische sollte bei 60 % liegen.

Extrem geringe Staubemissionen weit unter 100 mg/m^3 sind auch aus funktionellen Gründen nötig, die CO- Emissionen wird ähnlich wie Gasbrenner um 200 mg/m^3 abgeschätzt. Stickoxidemissionen erwarten wir wegen der Stickstofffracht im Brennstoff um 200 mg/m^3 . Alle Werte liegen damit deutlich unter der TA Luft.

1.4 Projektpartner

Die Hoval AG ist ein Liechtensteiner Hersteller von Heizkesseln und Heizsystemen und auf dem Schweizer, österreichischen und süddeutschen Markt präsent. Etwa 1000 Mitarbeiter fertigen in Vaduz und Werken in den Nachbarländern. Die Kompetenz speziell bei Biomassefeuerungen ist allgemein anerkannt. Hoval hat bereits eigene Versuche mit einem prototypischen 1- kW Stirlingmotor in einer Stückholzfeuerung gemacht.

So kam der Kontakt zustande. Die Hoval AG hat als Unterauftragnehmer den Holzvergaser für dieses Projekt entwickelt und dabei einen Eigenanteil von 70 % der Kosten übernommen.

2 Projektverlauf

2.1 Konzeption Feuerung

Eines der entscheidenden Probleme einer Holzpellet- Feuerung für leistungsfähige Stirlingmotoren ist die Aschebelastung am Erhitzer und im Luftvorwärmer.

Zuerst wurden deshalb grundlegende Literaturrecherchen zum Abbrandverhalten, Reaktionen, und Aschebildung durchgeführt. Bei Hoval wurden verschiedene Feuerungskonzepte getestet und Erfahrungen damit verglichen. Resultat ist, dass die Ausfilterung der Asche aus dem Rauchgas nicht sicher beherrschbar ist, die Rückhaltung im Glutbett ist günstiger. Um dort möglichst wenig Asche aufzuwirbeln, muss die Verbrennungsluft konsequent gestuft zugeführt werden, also zum kleinen Teil zur Vergasung des Brennstoffes (Primärluft) und der Rest später zur vollständigen Verbrennung des Gases (Sekundärluft).

Zur Erlangung eines guten Wirkungsgrades des Motors muss außerdem die Verbrennungsluft aus der Abgasenergie auf 500- 650 °C vorgewärmt werden. Dies sollte sich möglichst auf alle Stufen der Luftzufuhr beziehen.

Wird die Primärluft vorgewärmt, so kann auch die nötige Menge zur Erzeugung des Pyrolysegases gering bleiben und so das Austragen von Asche und Teeren noch mal minimiert werden.

Wenn durch die Luftvorwärmung die Verbrennungstemperatur über die Grenze der Ascheerweichung steigen sollte, kann zur Kühlung eine erhebliche Menge Abgas rezirkuliert werden.

Der Erhitzer des Stirlingmotors wird eventuell so zu verändern sein, dass sich möglichst wenig Asche ansammeln kann. Ebenso verhält es sich mit dem Luftvorwärmer.

Zunächst wurden verschiedene Konzepte untersucht:

1. Anbau einer Vorverbrennung der Pellets mit vorgewärmter Primärluft unter Luftmangel hinter dem Luftvorwärmer des Floxbrenners, weiterführen zur Hauptbrennkammer und Verbrennen mit vorgewärmter Sekundärluft dort
2. Vorschubbrenner in Rinnenform mit schraubenförmig zirkulierender Luftzufuhr in mehreren Stufen
3. Vergaser mit Primärluft vorgeschaltet vor leicht modifizierten Gasbrenner

Kriterien für die Entscheidung waren vor allem minimale Ascheemissionen und Übernahme vorhandener Komponenten wie Brennkammer und Luftvorwärmer. Das Brennerkonzept wurde daher als klar gestufte Feuerung mit Vergasung unter Primärluft und Verbrennung unter Sekundärluft festgelegt Die Entscheidung fiel deshalb auf die dritte Variante. Das Risiko, einen Holzvergaser zum Funktionieren zu bringen, wurde nicht so hoch eingeschätzt, da die Teerprobleme in einer Stirling- Brennkammer nicht relevant sind. Deshalb wurde auch der aufsteigende Gegenstrom- Vergaser vorgesehen, der das Holzgas durch die absinkende Brennstoff- Füllung nach oben abführt und als sehr Asche- arm aber Teer- reich bekannt ist. Der Brenner basiert auf dem Gasbrenner im Flox[®]- (Flammlose Oxidation, WS Wärmeprozessestechnik) Verfahren mit Luftvorwärmung.

2.2 Erste Versuche mit aufsteigendem Vergaser bei Hoval

Die Komponenten Vergaser und Brenner wurden zunächst separat aufgebaut und weiterentwickelt und danach zu einer Einheit zusammengeführt.

Hoval baute einen aufsteigenden Gegenstromvergaser mit doppelter Wandung und verschiedenen Möglichkeiten, Primär- Luft zuzuführen und die Abgaswärme zur Vergaser/ Brennstoffvorwärmung zu verwenden. Die Pelletzufuhr geschah automatisch aus einem Reservoir. (Bild) Die Vorwärmung der Primärluft war bei diesem Konzept leider nur schwer auszuführen.

Solo modifizierte den Erdgas- Floxbrenner so, dass die größere Menge des im Vergleich zu Erdgas sehr niederkalorigen Holzgases zugeführt werden konnte. Die Möglichkeit eines Brennerstarts mit Flüssiggas blieb erhalten.

Der erste Versuch im Februar 2003 in Liechtenstein mit Hoval- Vergaser und Stirlingmotor zeigte die noch zu lösenden Probleme: Die Verbrennung des Holzgases in der Brennkammer verlief deutlich langsamer als bei Erd- oder Flüssiggas, die Reaktion war nach dem Erhitzer und auch im Luftvorwärmer noch nicht abgeschlossen. Kondensat in Form weißen Rauches trat aus dem Abgasrohr, schließlich regierte auch Kondensat innerhalb des Luftvorwärmers und schmolz das Metall.

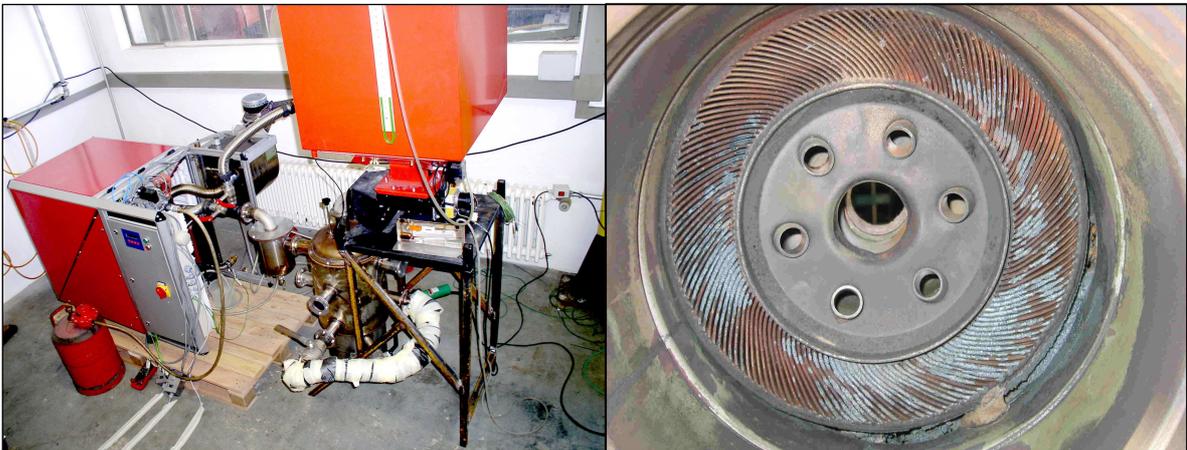


Bild 3: Aufbau Versuch mit Vergaser und BHKW, Brennerfront mit defektem Luftvorwärmer. Gaslanze im Zentrum demontiert

Auch die Gasqualität war zeitabhängig, eine frische Füllung Pellets erzeugte gutes Holzgas, nach etwa 30 Minuten war die Reaktionsfähigkeit des Gases wesentlich geringer, die Leistung sank. Grund ist die zunächst rasche Vergasung des Lignins und die wesentliche langsamere Umsetzung des Kohleskeletts. Bei jeder Nachfüllung gab es deutliche Schwankungen der Gasqualität. Die Temperaturen im Vergaser waren im unteren Bereich mit über 1000 °C bedenklich hoch.

Damit war klar, dass für die Verbrennungseigenschaften des niederkalorigen Holzgases deutliche Änderungen am Erdgasbrenner nötig sind und dass die Gasleistung und -qualität des Vergasers sehr unterschiedlich sein kann.

2.3 Verbesserter Brenner für Schwachgas und Test im Kessel

Vor weiteren Versuchen wurde sowohl der Vergaser bei Hoval als auch der Brenner bei Solo weiterentwickelt. Gleichmäßigere Brenngasqualität und raschere Verbrennung waren das Ziel. Hoval machte Vorversuche mit einem modifizierten Vergaser und einem extra gebauten Rohbrenner. Ein Öl-Heizkessel wurde für die Versuche entsprechend umgebaut und mit einem Sichtfenster versehen.



Bild 4: Vergaser- Prüfstand bei Hoval mit Stirling- Brenner in Heizkessel

Bei Solo wurde ein variabler Brenner gebaut, bei dem die Luftzufuhr in die Brennkammer teilweise mit Drall (um die Reaktion zu beschleunigen und teilweise mit Injektor- Düsen (um Abgas zu rezirkulieren wie dem Original Floxbrenner) erfolgt, die Anteile sind veränderbar. Bei Versuchen mit Erdgas wurde außerdem das Mischrohr (in das Luft und Brenngas einströmt) so variiert, dass die Mischstrecke und der Anteil der Abgasrezirkulation ausgetestet werden konnte. Über die CO- und NOx- Bildung sowie Temperaturen konnte der Einfluss von Veränderungen auf die Reaktionsgeschwindigkeit beurteilt werden.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

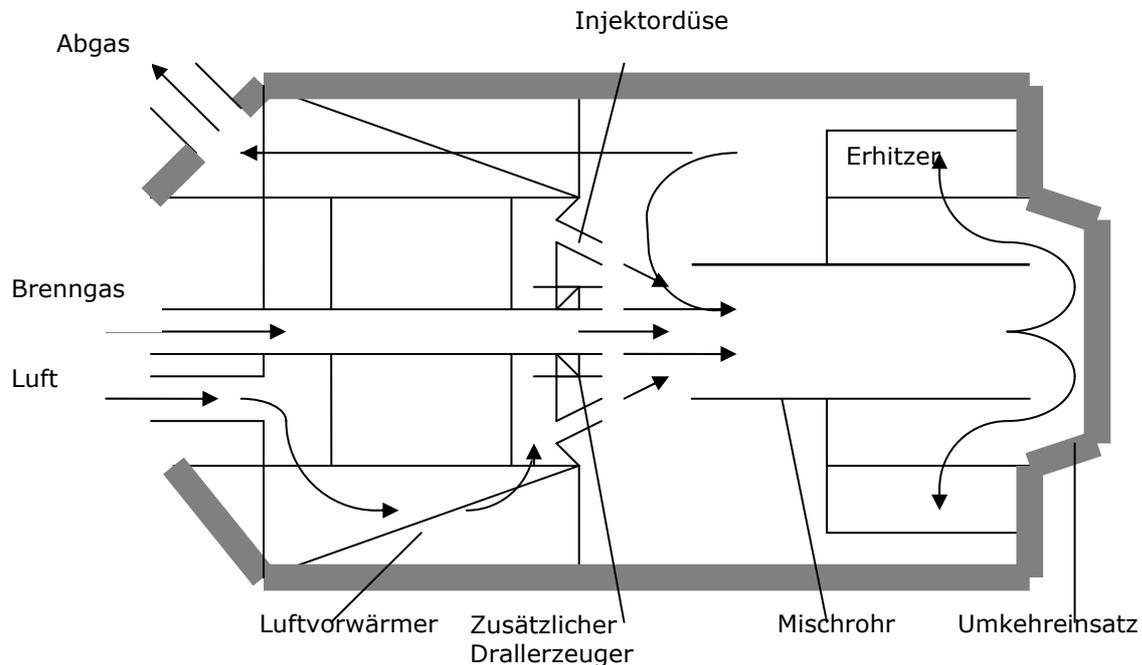


Bild 5: Variabler Brenner für niederkalorige Gase

Dieser Brenner wurde zunächst in verschiedenen Varianten mit Erdgas auf seine Funktion und Emissionen getestet. Die notwendige Änderung am Zünder stellte keinen Nachteil dar, die Stickoxidemissionen lagen bei verminderter Abgasrezirkulation wie erwartet höher, werden aber mit reaktionsträgem Holzgas wieder sinken.

Im Juli 2003 wurden dann der weiterentwickelte Vergaser und der Solo Brenner im Heizkessel bei Hoval getestet. Der Brenner konnte mit Flüssiggas gestartet werden und feuerte zunächst ohne Erhitzer in den Brennraum. Das Abgas wurde noch aus dem Kesselstutzen herausgeführt, damit war keine Luftvorwärmung möglich.

Nach Umschalten von Flüssiggas auf Holzgas konnte die veränderte Flamme durch das Fenster beobachtet werden, sie ist dann wesentlich länger. Es zeigten sich einige Probleme:

- Es ist immer noch schwierig, die reine Holzgas- Flamme stabil zu halten, sie neigt zum Pulsieren und Abreißen.
- Teer und Wasserkondensat sammelt sich in der Leitung vom Vergaser zum Brenner, dies stört die Gaszufuhr oder tritt schwallartig in den Brenner und stört die Verbrennung.
- Teer- Kondensat kann auch als Schaum „aufkochen“ und dann die Holzgaszufuhr blockieren, speziell wenn es wieder verfestigt.

- Nebenluft tritt in den Vergaser (wird im Unterdruck betrieben) und stört die Kontrolle über die Gasbildung und die anschließende Verbrennung.

Weitere Versuche im August 2003 wurden mit einem besser abgedichteten Vergaser und einer isolierten und verkürzten Verbindungsleitung zum Brenner gemacht.

Am Brenner wurden die Injektor- Luftdüsen noch steiler zur Längsachse gestellt um die Durchmischung und Reaktion zu verbessern. Eine Prallplatte wurde auf die Gaslanze gesetzt um ebenfalls die Durchmischung von Brenngas und Luft zu fördern.

Jetzt wurde auch ein wassergekühlter Stirling- Erhitzer montiert, die ganze Einheit aus Brenner, Mischrohr, Erhitzer und Umkehreinsetz in die Kesselbrennkammer eingesetzt. Das Abgas wurde jetzt durch den Luftvorwärmer abgeführt, so konnte die Frischluft vorgewärmt werden. Die Verhältnisse kamen denen auf dem Motor sehr nahe.

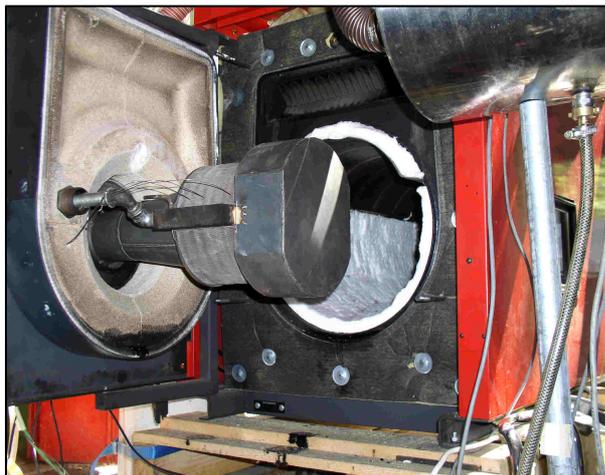


Bild 6: Brennereinheit mit wassergekühltem: Erhitzer und Umkehrplatte, rechts in Betrieb (Ausschnitt)

Durch die Luftvorwärmung konnte nun die Holzgasflamme stabil gehalten werden. Der Brenner lief befriedigend und die Emissionen waren gut, Ablagerungen waren nicht erkennbar. Eine Abgasrezirkulation ist nicht erforderlich.

Probleme machte weiterhin die Empfindlichkeit auf Falschlufte am Vergaser, das konnte schließlich behoben werden. Auch durch Einblasen von Wasserdampf in den Vergaser, der als chemischer Hilfsstoff wirkt, konnte die Gasqualität verbessert werden, eine Analyse der Gasqualität war aber nicht möglich.

Kritisch war aber nach wie vor der Vergaserbetrieb, folgende Probleme treten auf:

- Teerschaum kann sich in der Zuleitung bilden
- Ein Abstellen des Vergasers mit einigen Litern Pellets ist nicht in akzeptabel kurzer Zeit möglich

Abschlußbericht Pellets- Stirling

- Die Gasqualität schwankt über die Betriebszeit und bei Zufuhr frischer Pellets
- Hohe Temperaturen und Produktgas im Vergaser können sogar Inconel-Thermoelemente innerhalb von Stunden korrodieren.

Angesichts der unbefriedigenden Ergebnisse wurden alternative Konzepte untersucht:

2.4 Konzept mit integriertem Vergaser

Der Vergaser wird bei diesem Konzept auf ein Rohr reduziert, das in der Brennkammerachse angeordnet ist. Das Volumen ist sehr gering. Die Pellets werden von hinten –wo sonst die Gaszufuhr ist- eingeschoben und erreichen in der Brennkammer Pyrolysetemperatur. Die Asche wird auf der entgegen gesetzten Seite entnommen. Zusätzlich wird Wasser (-dampf) auf dieser Seite eingedüst. Damit formiert sich Holzgas ohne weitere Primärluft, die Reaktion ist endotherm, die Temperaturen liegen unter der Brennkammertemperatur. Das Holzgas tritt aus dem Vergaserrohr etwa in der Mitte aus, wo es mit der vorgewärmten Luft vermischt und verbrannt wird.

Damit wird erwartet, dass folgende Probleme gelöst werden können:

- Teerkondensat kann während des Betriebs im Vergaser nicht entstehen, die Temperaturen sind zu hoch
- Übertemperatur und Korrosion kann nicht entstehen, da die Vergasung endotherm abläuft
- Nebenluft kann nur von der Pellet- Zufuhr her eintreten, hier gibt es Maßnahmen zur Abdichtung
- Die Gasmenge kann über die Wasserdampfmenge gesteuert und konstant gehalten werden
- Start und Stopp sind wegen der geringen Pelletmengen relativ rasch möglich

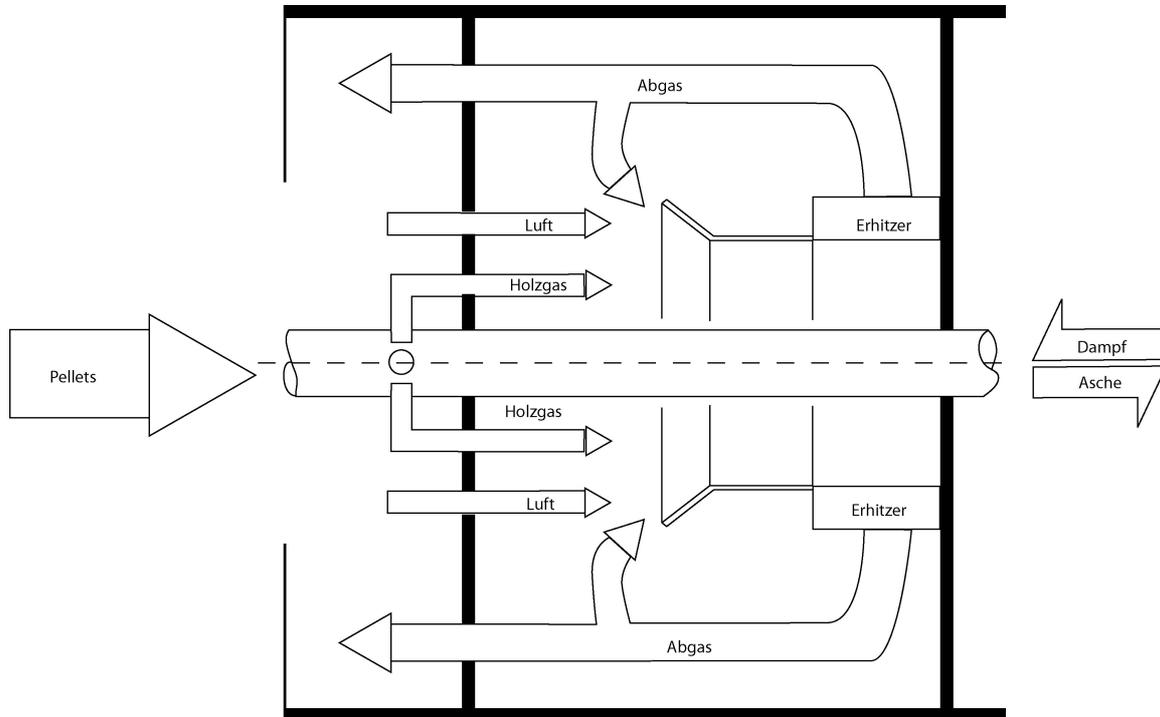


Bild 7: Konzept integrierter Vergaser

Ein solcher Vergaser innerhalb der Brennkammer wurde aufgebaut, auch eine zweite Versuchsmaschine in vertikaler Anordnung wurde gebaut. Im Sommer 2004 wurden erste Tests gefahren, die allerdings noch keine klaren Ergebnisse zeigten. Es gab Schwierigkeiten mit der Pellets- Zufuhr und Dampfblasung, die eingebrachten Pellets vergasten aber vollständig.

2.5 Versuche mit absteigendem Vergaser

Bei Hoval in Liechtenstein baute man den Vergaser im Herbst 2004 in eine absteigende Version um, die bekanntlich eine bessere Gasqualität liefert, jedoch Asche im Gas mitführt. Die Nachteile des separaten Vergasers sind damit nicht vollkommen gelöst aber der neue Ansatz war interessant genug, weiter mit Hoval zusammenzuarbeiten, zumal die ersten Versuche dort sehr gut verliefen. Vergaser dieses Typs sind auch allgemein bekannt als Imbert- Vergaser.

Bis zur Beendigung des Projekts wurden alle Versuche mit dieser Vergaserbauart gefahren.

Bis Ende 2004 wurde mit einem Umbau des ursprünglich aufsteigenden Vergasers gearbeitet. Das folgende Bild zeigt diesen Umbau beim letzten Versuch am 4.11.2004:

Abschlußbericht Pellets- Stirling



Bild 8: In der Mitte der Vergaser, links das Stirling- Modul

Es stellte sich jedoch schnell heraus, daß die Zuverlässigkeit des Vergasers nicht ausreichend war:

- Die Dichtungen hielten nicht
- Ein kontinuierliches Austragssystem der Asche war nicht vorgesehen
- Die Pelletzufuhr versagte
- In der Gasführung gab es Verteerungen

Dennoch waren große Fortschritte erreicht worden, denn erstmals konnte im Stirlingbetrieb ein Maschinendruck von 120 bar gefahren werden, was 6,5 kWe entspricht. Der in 2003 entwickelte Brenner arbeitete im Stirlingbetrieb hervorragend und es konnten auch sehr gute Emissionen nachgewiesen werden. Die Versuchsdauer verlängerte sich mit dem neuen Vergasertyp ebenfalls.

Hoval hatte zu diesem Zeitpunkt bereits einen Diplomanden für das Projekt eingestellt. Er konstruierte über die Winterpause einen neuen Vergasertypen, mit dem Ziel die wesentlichen Schwachstellen des ersten Prototyps auszumerzen. Am 21.2.2005 konnte der erste Versuch mit diesem Vergaser gefahren werden:



Bild 9: Neuer absteigender Vergaser, noch mit manueller Pelletzufuhr

Es wurden bis Juni 2005 mehrere Einzelversuche gefahren. Arbeitsschwerpunkt war in erster Linie die Pelletschleuse. Hier gab es enorme Schwierigkeiten ein zuverlässiges und sicheres System zu finden. Aufgrund des Überdrucks im Vergaser waren selbst minimale Undichtigkeiten im Schleusenbereich Grund für ein Verstopfen der Zufuhr. Die hohe Feuchtigkeit des austretenden Gases verklebte den Staub, die Pellets selbst quollen auf und zerfielen innerhalb der Schleuse. Der Versuchsbetrieb konnte nur durch ständiges manuelles Gängigmachen aufrechterhalten werden. Mehrere Schleusenvarianten wurden gebaut.

Die Temperaturen im Vergaser zeigt das folgende Diagramm1. Im Zuge dieser Phase wurde auch eine automatische Erfassung der Holzgasqualität mit den Messpunkten HC, CO und CO₂ von Hoval eingerichtet, siehe Diagramm 2 unter 3.1.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

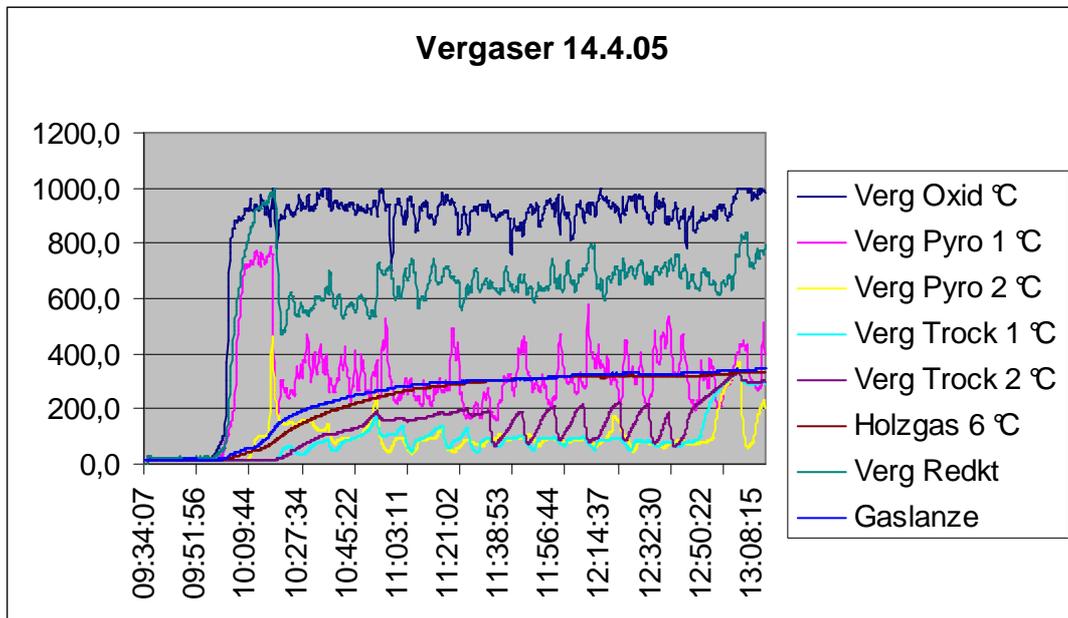


Diagramm 1: Temperaturschichtung im Vergaser

2.6 Automatisierung

Im Juni 2005 wurde erstmalig ein Schritt hin zur Automatisierung unternommen. Stellmotoren wurden angebracht für:



- Ascheaustrag
- Rüttelmechanismus
- Pelletschleuse

Als Steuerung wurde eine SPS der Firma WAGO eingesetzt. Durch deren modulare Bauweise konnten alle Aufgaben flexibel gelöst werden.

Während der Rüttler und der Ascheaustrag nur nach einem Zeitintervall arbeiteten, so wurde die Vergaserbeschickung nach dem Temperaturprofil geregelt. Diese Vorgehensweise hat sich auch in den weiteren Versuchen bewährt. Der Vorteil auf mechanische Komponenten bei der Füllstandsregelung verzichten zu können ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den bisher bekannten Paddelfühlern. Eine Patentierung des Verfahrens wird geprüft.

Bild 10: Vergaser mit Beschickung vor Stirling Modul

Die Excel-Software zur Messdatenerfassung konnte auf Mod- Bus umgestellt werden. Außerdem konnten deutliche Schritte hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit der Makros gemacht werden.

Die Leistung der Stirlingmaschine wird nicht über den eingestellten Helium-Druck sondern über die dem Brenner zugeführte Sekundärluft geregelt. Eine Lamdamessung im Abgas dient der SPS dazu, die nötige Holzgasmenge über eine Motorklappe in der Primärluft bereitzustellen. Die Stirling- Regelung passt schließlich den Helium- Druck so an, dass die Erhitzertemperatur konstant bei 740 °C bleibt.

Diese Betriebsweise war Anfangs sehr schwankend, durch Verfeinerungen der Regelalgorithmen konnte sie aber erheblich beruhigt werden.

2.7 Dauerversuche

Im Juni 2005 wurde aufgrund der positiven Ergebnisse beschlossen, nun parallel sowohl in Vaduz als auch in Sindelfingen Versuche zu fahren um möglichst viele Betriebsstunden zu erreichen.

Hoval baute darum auf der Basis des vorhandenen Vergasers einen weiteren Prototyp, während in Sindelfingen ein eigener Prüfstand eingerichtet wurde. Der Stirling wurde wieder nach Sindelfingen geschickt, während der wassergekühlte Stirling-Erhitzer im Ölkessel bei Hoval für deren Versuche als Holzgasabnehmer blieb.



Bild 11: Versuchsaufbau in Sindelfingen

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Am 14.10.2005 konnte erstmalig in Sindelfingen die Anlage in Betrieb genommen werden.

Bei den Dauerversuchen traten deutlich folgende Arbeitsfelder ans Licht:

- Die Abdichtung des Vergasers über Flanschdichtungen mit Dichtschnüren aus Keramik versagte regelmäßig. Am oberen Deckel konnte durch den Einsatz von Stirling Brennkammerteilen schnell und sicher Abhilfe geschaffen werden.
- Die Abdichtung des Rüttlerantriebs war thermisch zu hoch belastet. Hier trat ständig Holzgas aus. Durch eine konstruktive Verlegung in einen kälteren Bereich und Auslegung als O-Ring-Dichtung wurde der Fehler behoben.
- Die Ascheschnecke versagte regelmäßig. Da sie als seelenlose Schnecke ausgebildet war, reichte die Festigkeit bei den hohen Temperaturen nicht aus und sie verformte sich. Der Vergaser lief dann mit Asche voll.
- Der Antrieb der Ascheschnecke war thermisch einer zu hohen Belastung ausgesetzt. Eine Verlegung in einen kälteren Bereich war erforderlich.
- Die Pelletschleuse arbeitete äußerst unzuverlässig. Nachdem mehrere Klappenschleusen schon nach kürzester Zeit ausgefallen waren wurde ein metallisch dichtendes Sitzventil mit pneumatischer Ansteuerung konstruiert. Das Ventil arbeitete sehr zuverlässig auch unter den widrigen Bedingungen.



Bild 12: Sitzventil der Pelletschleuse Zu/ Offen, arbeitet trotz der Teerablagerungen

Die Dauerversuche wurden auch nach Ablauf des Projekts weiter fortgesetzt. Der erste Schwerpunkt war durch Verbesserung der Einzelkomponenten einen dauerhaften Versuchsablauf zu erreichen. Außerdem sollte der ständig beaufsichtigte Betrieb durch weitere Sicherheitsketten und Automatisierungsmaßnahmen in einen selbständigen Betrieb geführt werden.

Diese Ziele sind inzwischen auch erreicht worden.

3 Ergebnisse

3.1 Erreichter technischer Stand

Das System ist mit Erd- oder Flüssiggas im Brenner und durch ein Heißluftgebläse am Vergaser allgemein gut zu starten. Während der Brenner aufgewärmt wird, mischt sich immer mehr im Vergaser produziertes Holzgas zu, nach ca. 15 Minuten erreicht die Maschine Normalbetrieb mit reinem Holzgas. Über die Temperaturen im Vergaser kann die Lage der Glutzone im Vergaser beurteilt und entsprechend Brennstoff nachgefördert werden.

Die Sekundärluft für den Brenner wird nach gewünschter Leistung eingestellt. Die nötige Primärluft für den Vergaser wird über eine Lamda- Sonde im Abgas ermittelt. Letztlich wird dadurch die Menge der Gasproduktion beeinflusst. Zur Kontrolle der vollständigen Verbrennung wird die Abgastemperatur nach dem Erhitzer ständig beobachtet.

Das Abstellen geschieht durch Beenden der Primärluftzufuhr und kann durch Wassereinspritzen beschleunigt werden, so dass nach 15- 20 Minuten am Motor Stillstand erreicht ist. Das Saugzuggebläse läuft noch nach.

Der Vergaser wird derzeit mit ca. 20 mbar über der Umgebung betrieben, in Zukunft wird ein druckneutraler Betrieb angestrebt, was aber ein regelbares, wärme und kondensatfestes Abgas- Absauggebläse nach dem Abgaswärmetauscher mit EMV- Zulassung erfordert, was serienmäßig nicht erhältlich ist.

Im Vergaser werden unterstöchiometrische Luftzahlen von etwa $\lambda = 0,4$ gefahren, im Abgas nach dem Brenner waren die Luftzahlen bei etwa 1,4. Diagramm 2 zeigt die Zusammensetzung des Holzgases. Man erkennt zunächst die noch sehr stark schwankende Gasproduktion, dies wurde durch bessere Regelung inzwischen deutlich gleichmäßiger. Der prozentuale Anteil von CO und CO₂ ist auf der linken Abszisse zu sehen und rechts der Anteil der HC-Verbindungen, oder auch der Teere. Allerdings wurde nach einer Gaswäsche gemessen um das Messgerät nicht durch übermäßige Teerbelastung zu zerstören. Diese Kurve ist also nur tendenziell auszuwerten. Für den Heizwert des Produktgases steht CO und H₂ im Vordergrund. Der Rest ist überwiegend unvermeidlicher Stickstoff aus der Primärluft und sehr geringe Mengen an Methan und anderen Kohlenwasserstoffen. H₂ konnte jedoch nicht erfasst werden. Der Heizwert des Gases liegt mit rund 8,5 MJ/m³ nur bei rund einem Viertel von dem des Erdgases.

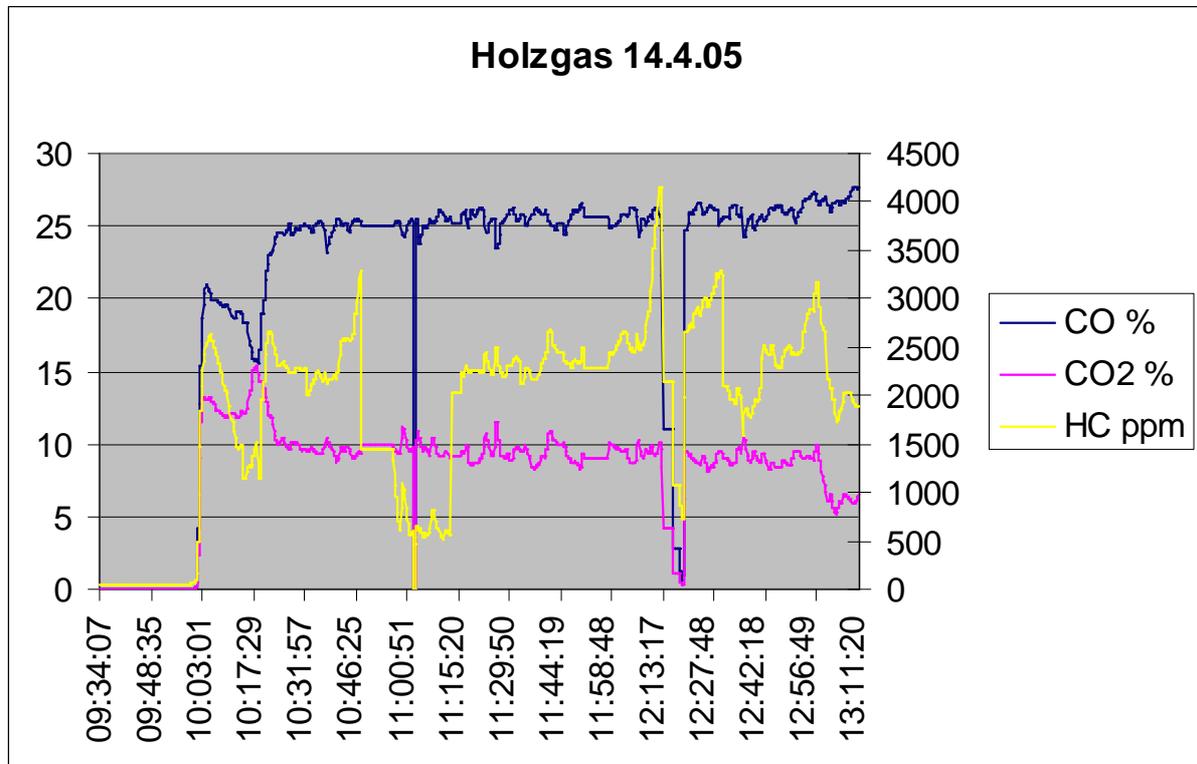


Diagramm 2: Aufschrieb der Holzgas- Zusammensetzung

Es konnten mehrere Dauerbetriebsphasen über 15- 30 Stunden gefahren werden. Insgesamt sind etwa 400 Betriebsstunden des Gesamt- Systems akkumuliert, weitere 150 Stunden mit Vergaser und Brenner im Kessel. Hier konnte das Ziel von Tausend Betriebsstunden nicht erreicht werden, Probleme mit der Vergaser- Peripherie hatten dies nicht erlaubt:

Im Betrieb werden entsprechend dem Temperaturprofil im Vergaser die Pellets über eine Schleuse zugeführt. Der Rost wird zyklisch bewegt und die Ascheschnecke eingeschaltet. Diese drei Komponenten erforderten noch weitere Erprobung, es gab hier immer wieder Ausfälle aber auch kontinuierlich Verbesserungen. Diese von Pellets- Feuerungen entnommenen Geräte waren offensichtlich mit den Dichtigkeit- Anforderungen und Teerbelastungen des Vergasers überfordert, sie konnten inzwischen auf zuverlässigen Laborbetrieb verbessert werden.

Teerablagerungen in der Gasleitung zum Brenner sind bei guter Isolierung und Leitungsführung kein Problem mehr. Es muss aber noch beobachtet werden, ob sich auf Dauer hier nicht trockene Ablagerungen absetzen.

Der Vergaser selbst soll nun konstruktiv überarbeitet und ähnlich der Stirling- Brennkammer aus Blech- Drückteilen und mit außen liegenden Dichtungen konzipiert werden.

Der Erhitzer und der Luftvorwärmer zeigen kaum Ablagerungen, dies war ein wichtiges Ziel des Vorhabens. Zwar stehen längere Betriebszeiten noch aus, aber der erreichte Stand ist um Größenordnungen besser als bei Direktfeuerungen.

Der Brenner arbeitet mit ganz unterschiedlicher Gasqualität und Mischungsverhältnissen sehr sicher und stabil.

3.2 Energetische Bilanzierung

Es ist noch nicht genau geklärt, welche Wirkungsgrade mit diesem System letztendlich erreicht werden können. Im Dauerversuch inklusive Start und Propangas waren über 30 Stunden elektrische Netto- Wirkungsgrade von rund 18 % und Gesamtwirkungsgrade von etwa 71 % gemessen worden. Die Wirkungsgrade im stationären Dauerbetrieb wären etwas höher.

Gegenüber der Erdgasversion müssen bei Biomassenutzung grundsätzlich sicher einige Kompromisse gemacht werden:

- Der Ausbrand in einem Vergaser wird oft mit maximal 95 % eingeschätzt, es bleibt ein Holzkohlerest im Aschekasten.
- Es gibt Wärmeverluste aus dem Holzvergaser und aus der Zuleitung zum Brenner, hier als Vergaser- Wärme- Wirkungsgrad bezeichnet.
- Der Luftvorwärmer des Brenners arbeitet weniger effektiv: Die Primärluft kann nicht einfach vorgewärmt werden da der Sekundärluftanteil nur höchstens 75 % der Gesamt- Luftmenge ist , kann das Abgas nach dem Erhitzer nur einen begrenzten Anteil seiner Energie auf die Sekundärluft übertragen. Die Abgasverluste liegen somit bei 25- 30 % der Brennerleistung, etwa doppelt so hoch wie beim Gasbrenner.
- Die Abgasverluste können zwar im Abgaswärmetauscher als Wärme genutzt werden, eine Brennwertnutzung wie bei Erdgas kann aber nicht im selben Maße erreicht werden, das mindert den Gesamtwirkungsgrad.

Die Einzel- Wirkungsgrade können etwa folgendermaßen abgeschätzt werden. Als verbesserter Pelletsvergaser wird hier eine an Isolierung und Rüttelrost optimierte Version verstanden, Primärluftvorwärmung ist ein größerer Schritt.

Wirkungsgrad	Erdgas	Vergaser heute	Vergaser verbessert	Mit Primärluftvorwärmung
Ausbrand	1	0,94	0,95	0,95
Vergaser- Wärme	1	0,85	0,9	0,9
Feuerungstechnisch	0,83	0,75	0,75	0,85
Stirling Wärme in Strom	0,3	0,3	0,3	0,3
Gesamt elektrisch	0,25	0,18	0,19	0,22
Gesamt Strom + Wärme	0,92	0,71	0,77	0,77

Der Vergaser- Wirkungsgrad setzt sich aus Ausbrand und nutzbarer Wärme aus der Vergasung zusammen. Hier sind bei Vergasern im Gegensatz zur Direktfeuerung allgemein Verluste unvermeidlich.

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Der größere Verlust kommt vom feuerungstechnischen Wirkungsgrad des Brenners. Durch die hohe Nutztemperatur von über 700 °C am Erhitzer steckt im Abgas nach diesem noch sehr viel Wärme, es hat ca. 850- 900 °C. Beim Erdgasbrenner lässt sich diese Wärme zu fast 90 % an die Frischluft übertragen. Eine Vorwärmung des Erdgases lohnt nicht und würde dieses zersetzen, der Abgas-Kapazitätsmassenstrom ist hier nur ca. 10 % höher als der Luft- Kapazitätsmassenstrom.

Beim Holzgasbrenner kann nur die Sekundärluft Energie vom Abgas aufnehmen, hier ist der Kapazitätsmassenstrom nicht ausreichend. Der Abgas- Kapazitätsmassenstrom ist außerdem hoch, da das Abgas noch Ballast- Stickstoff aus dem Holzgas mitführt. Daraus resultiert eine hohe Abgastemperatur von über 450 °C nach dem Luftvorwärmer, die Energie aus der Feuerung mitführt und dann im Abgaswärmetauscher abgibt.

Die einzige Möglichkeit zu einer Verbesserung besteht in der Vorwärmung der Primärluft. Dies war geplant und durch einen Stutzen im Luftvorwärmer vorbereitet, aus dem ca. 650 °C heiße Frischluft entnehmbar ist. In der Praxis gab es allerdings erhebliche Probleme bei der Vergasung mit vorgewärmter Luft, so dass dieser Weg zunächst aufgegeben werden musste. Dies wird in Zukunft noch einmal diskutiert. So sollte ein elektrischer Wirkungsgrad von 20- 22 % machbar sein, der Gesamt- Wirkungsgrad ließe sich nur durch Minderung der ersten beiden Verluste weiter steigern.

3.3 Ökologische Bilanzierung

Zunächst ist natürlich klar, dass die Nutzung regenerativer Brennstoffe einen geschlossenen CO₂- Kreislauf ermöglicht, die Erzeugung von höherwertiger Energie wie Strom aus Biomasse ist bei dezentralen Anlagen bisher nicht möglich gewesen.

Da Erhitzer und Luftvorwärmer gegen Aschen empfindlich sind, musste ein extrem partikelarmes Verbrennungskonzept gewählt werden, mit Staubemissionen aus der Verbrennung wie in klassischen Holzfeuerungen ist daher nicht zu rechnen.

Die Schadstoffemissionen des verwendeten Brenners sind gering. Die Werte im Diagramm zeigen für CO etwa 200- 250 ppm und für NO zwischen 100 und 200 ppm.

Das entspricht 250- 312 mg/m_N³ für CO- und 135- 270 mg/m_N³ für NO- Emissionen bezogen auf 5% Restsauerstoff, für eine Holzfeuerung durchaus gute Werte. Die starken Schwankungen sind auf die damals noch unvollkommene Regelung des Vergasers zurückzuführen.

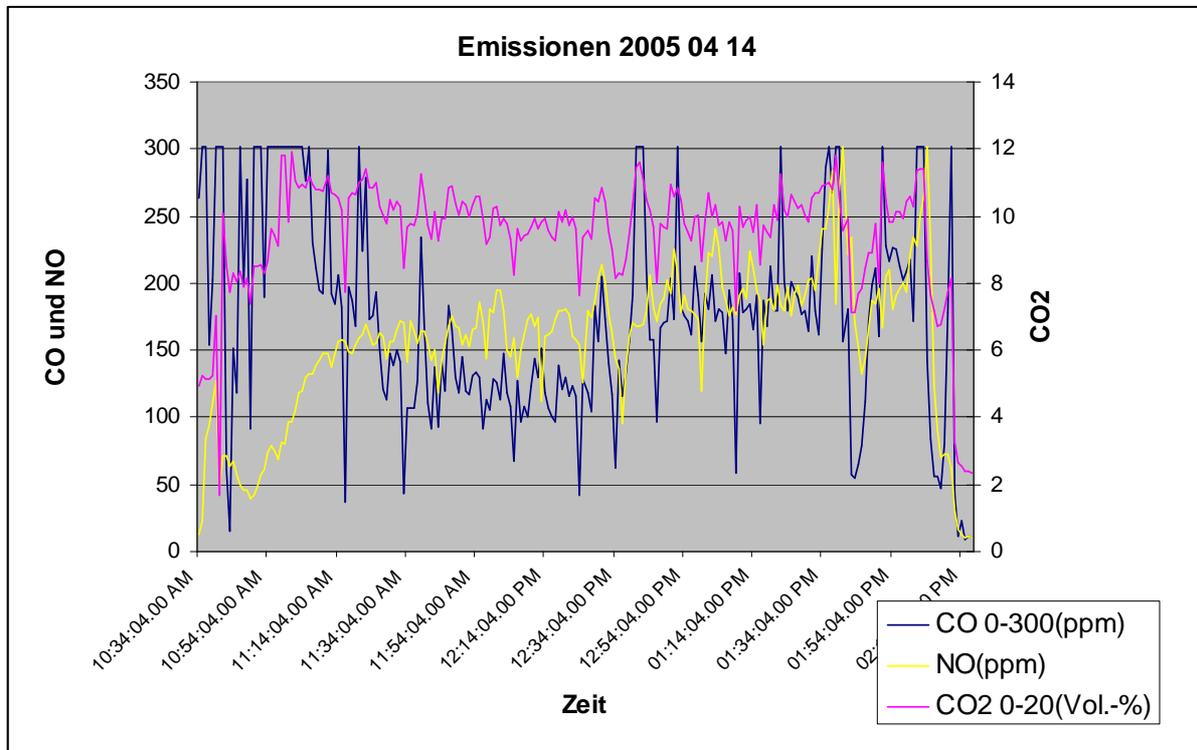


Diagramm 3: Schadstoffemissionen während eines Versuchslaufs

Ein Ausstoß von unverbrannten Kohlenwasserstoffen kann auch im Kaltstart nicht passieren, da mit Erd- oder Flüssiggas vorgeheizt wird. Im Betrieb sind alle Brennraumwände auf so hohem Temperaturniveau dass die Brennstoffumsetzung vollständig ist.

Die Staubemissionen konnten leider nicht gemessen werden. Sie müssen aber schon aus den unter 3.1 genannten funktionellen Gründen der Staubanlagerung am Erhitzer sehr gering sein und weit unter den Vorschriften liegen.

Die Herstellung von KWK- Modulen ist wegen deren energetisch nicht aufwändigen Aufbaus aus Eisenwerkstoffen und ihrer Langlebigkeit ökologisch anerkannt günstig. Dies trifft auch für Stirlingmotoren und den Vergaser zu. Die Rücknahme gebrauchter KWK- Module durch den Hersteller ist zugesichert, die Wiederverwertung der hochwertigen Hochtemperatur- Werkstoffe ist möglich.

3.4 Ökonomische Betrachtung

Strom aus Biomasse wird nach dem EEG mit folgenden Vergütungen bezahlt:

- Gesamteinspeisevergütung für elektrische Energie 2006: 0,136
 - Bonus für Kraft- Wärme- Kopplung von 0,08
 - Bonus für Innovative Verfahren 0,04
- Gesamtvergütung Summe 0,2516 €/kWh

Abschlußbericht Pellets- Stirling

Der erzeugte Strom wird deshalb vollständig eingespeist. Die Wärme kann allgemein genutzt werden und hat einen Wert von 0,035 €/kWh (bezogen auf eine Holzpellettheizung, 0,16 €/kg Pellets, $H_u = 5,2 \text{ kWh/kg}$, $\eta = 0,9$). Die Wartungskosten sind mit 0,04 €/kWh gut zweimal höher angesetzt als beim Erdgas-Modul.

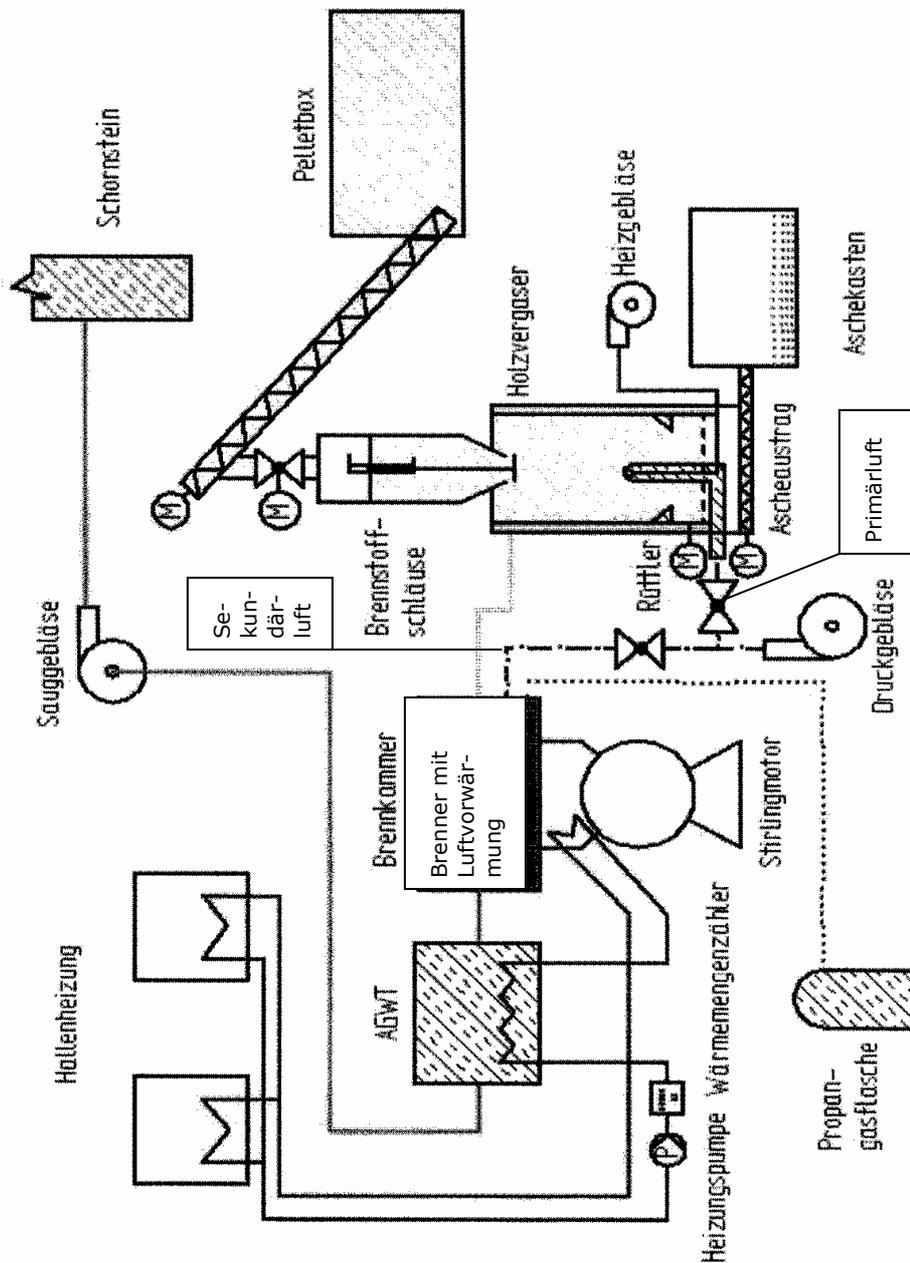
Bei einer vorsichtig angesetzten Leistung und Jahreslaufzeit ergibt sich:

					Kosten, Nutzen, /Jahr
Stromproduktion	7,5	kW	7000	h	13.209 €
Wärmeproduktion	22	kW	7000	h	5.929 €
Wartungskosten	-0,03	€/kWh	52500	kWh	-1.575 €
Brennstoffkosten	-0,035	€/kWh	275333	kWh	-9.637 €
Erlös ohne Investment und Zinsabzug					7.926 €

Bei einer angenommenen Investitionssumme von 38.000 € liegt die Abschreibungszeit bei 5 Jahren, ein realistischer Wert für Kraft- Wärme- Kopplung.

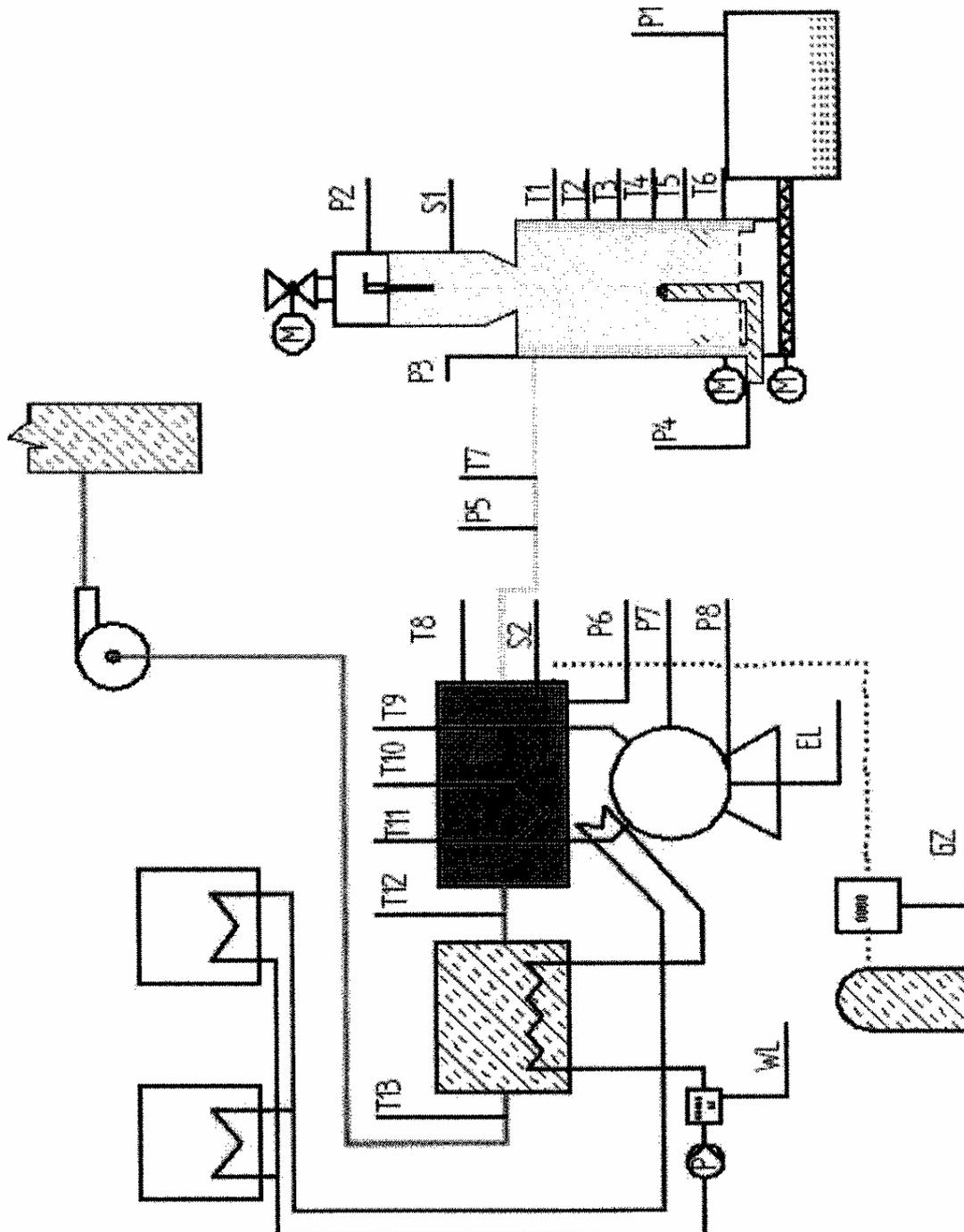
4 Anhang

4.1 Anlagenschema



Abschlußbericht Pellets- Stirling

4.2 Messstellen an der Anlage



4.3 Literatur

Bernstein, Wolfgang et al.:

Energetische Aspekte bei der Verbrennung und Vergasung von Holz; Vortrag Internationaler und Interdisziplinärer Kongress Paderborn, 20.-22. 11. 2000

Carlsen Hendrik et al.:

Results from tests of a Stirling engine and wood chips gasifier plant, Vortrag Europäisches Stirling Forum 2004, Osnabrück

Schotte, Eyck:

Untersuchungen zur Verbrennung von Gasen und Biomassen...
Dissertation Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; 2002

Carlsen Hendrik et al.:

Stirling Engines for Biomass – what is the problem?; Proceedings of the 12th Int Stirling Engine Conference 2005, Durham, UK