

Bernd Kammerich
Beratender Ingenieur
Planung, Beratung und Prototypenbau

**Felderprobung eines neu entwickelten Stirling-Motors in
Kombination mit einer Klein-Feuerungsanlage**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem Az: 21867-24/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Bernd Kammerich
Dortmund

Juni 2008

Abschlussbericht zum DBU-Projekt

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	21867	Referat	24/0	Fördersumme	21.000,00 €
Antragstitel	Felderprobung eines neu entwickelten Stirling-Motors in Kombination mit einer Klein-Holzfeuerungsanlage				
Stichworte	Energie, regenerativ, Wärme, Holz				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
4,5 Jahre	16.12.2003	16.06.2008	2		
Zwischenberichte	06/04 ; 12.04; 06.05;	12.05; 01.06; 07.06;	01.07; 07.07; 01.08		
Bewilligungsempfänger	Herr Dr.-Ing. Bernd Kammerich Berlinerstr. 63 44143 Dortmund			Tel	0231/593288
				Fax	0231/2299921
				Projektleitung	Herr Kammerich
				Bearbeiter	Herr Kammerich
Kooperationspartner	HOVAL AG Austraße 70 FL 9490 Vaduz				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Feststoffbefeuerte Blockheizkraftwerke in kleinen Leistungsgrößen (1 kW_{el}), sind derzeit auf dem Markt nicht verfügbar. Grundsätzlich bietet der Stirlingmotor aufgrund seiner „Viellstofffähigkeit“ die technische Möglichkeit Holz als Brennstoff - neben der Bereitstellung von Raumwärme - auch zur Erzeugung von elektrischer Energie zu nutzen. Der Stirlingmotor ist als „Trockenläufer“ als einzige Wärme-Kraft-Maschine von der Konzeption und Konstruktion in der Lage eine sehr hohe, weitgehend wartungsfreie Betriebszeit zu realisieren. Wechsel von Zündkerzen oder Öl/Schmierstoffen sind hier konzeptionsbedingt nicht erforderlich. Die Kopplung eines vorhandenen und bewährten Heizkessels mit dem Stirlinggenerator ermöglicht mit einem überschaubaren technischen Aufwand die Bereitstellung eines netzgekoppelten Feststoff-BHKW in der gewünschten Leistungsgröße.

Ziel des Vorhabens ist es die neu entwickelte Stirling-Antriebsmaschine in Kombination mit dem Scheitholz-Heizkessel Agrolyth der Firma Hoval AG an einigen Standorten unter realen Betriebsbedingungen zu testen um so Langzeiterfahrungen zu gewinnen.

Die hier erzielten Betriebserfahrungen werden in die Weiterentwicklung des Moduls einfließen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im ersten Projektschritt werden die geplanten 5 Einheiten aufgebaut und getestet. Mit der Integration der Stirlinggeneratoren in die vorgesehenen Heizkesselanlagen und einem ersten Funktions- und Leistungstest beim Kesselhersteller endet die erste Projektphase.

Die zweite Projektphase beginnt mit der Lieferung und der Inbetriebnahme der Anlagen zu/bei den an der Felderprobung Beteiligten.

Projekt begleitend werden jeweils zu Beginn und nach Ablauf der Heizperioden die Anlagen inspiziert und ggf. gewartet, wobei der hier anfallende Umfang der anfallenden Arbeiten noch offen ist.

Nach Abschluss der zweiten Heizperiode und der Abschlussinspektion der Stirling-Generatoren endet der Bearbeitungszeitraum für dieses Projekt.

Ergebnisse und Diskussion

Grundsätzlich sind die erzielten Ergebnisse bei dem durchgeführten Feldversuch als positiv zu bewerten. Insbesondere die Punkte Wartung und Verschleiß zeigen, dass signifikante Wartungsarbeiten innerhalb des Versuchszeitraums nicht von Bedeutung sind.

Auch das thermisch hoch belastete Bauteil „Erhitzer“ über den die thermische Energie in den Motor eingetragen wird zeigt sich den Belastungen gewachsen. Die Befeuerung mit hoch aschebelasteten Brennstoffen zeigt zudem, dass die gewählte „Glattrohrausführung“ gegenüber einer konkurrierenden Rippenrohrvariante zu bevorzugen ist, da eine Reinigung der äußeren Oberflächen von Zeit zu Zeit und abhängig vom Brennstoff notwendig ist – die Asche wäre hier mit einfachen Mitteln kaum von den Rippenrohren zu entfernen.

Hinsichtlich der Regelung und Steuerung der Gesamtanlage zeigt sich, dass die einzustellenden Parameter anlagenspezifisch sind bei der Inbetriebnahme der Anlage zu ermitteln sind. Grundsätzlich ist die Integration der Motorsteuerung in die Kesselsteuerung machbar.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt wurde von dem Kooperationspartner auf mehreren Ausstellungen einem Fachpublikum vorgestellt. Weiterhin erfolgte seitens der Hovalwerk AG die Präsentation des Projektes in Verbindung mit der Vorstellung der Kesseltechnik bei diversen Universitäten und anderen Multiplikatoren.

Eine in Sulzbach laufende Anlage wird vom des vom IZES in Saarbrücken messtechnisch erfasst und online dokumentiert. Im Rahmen einer themenbezogenen Sendung über alternative Energie des ZDF wurde dieses Projekt am 28.04.200 (Mittagsmagazin und Drehscheibe) in einem Kurzbeitrag inklusive Video vorgestellt.

Nach Abschluss des Projektes ist ein Fachvortrag auf dem Europäischen Stirlingforum 2008 in Osnabrück geplant.

Fazit

Mit dem durchgeführten Projekt konnte gezeigt werden, dass die gleichzeitige Erzeugung von elektrischer Energie und Raumwärme in kleinen Holz-befeuerten Hausheizungen nicht nur möglich sondern auch gebrauchstauglich ist.

Allerdings zeigen die erhobenen Daten, dass die Abstimmung von Kessel und Stirlingmotor im Zusammenspiel von Wärmebedarf und Systemeinbindung ein hohes Maß an Aufwand bezüglich der Systemintegration erfordert

Die mit diesem System "Stückholzkessel und Stirlingmotor-Generator" erzielten Erfahrungen führen auch zu dem Ergebnis, dass eine Erweiterung bezüglich des Brennstoffes und des Heizungssystems sinnvoll ist. Der Wärmebedarf von neuen „kleinen“ Objekten ist auf einem niedrigen Level und auch die Objekte, die derzeit und zukünftig einer energietechnischen Sanierung unterzogen werden, erfordern Energieversorgungssysteme mit kleinen Leistungen. Für diese Anwendungen sollte ebenfalls eine Kraft-Wärme-Kopplung entwickelt werden, die hinsichtlich der Laufzeit und damit der Jahreserträge optimiert werden muss.

I. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Zusammenfassung.....	2
3	Hauptteil.....	2
3.1	Vorhabensdurchführung.....	3
3.2	Ergebnisse.....	7
3.2.1	Anlagen- und Motorenkomponenten.....	8
3.2.2	Steuerung und Regelung.....	11
3.3	Ökologische und ökonomische Bewertung.....	12
3.4	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse.....	13
4	Fazit und Entwicklungsbedarf.....	13

II. Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildung 1:	Motorabmessungen	4
Abbildung 2:	Beispiel für eine ausgeführte Stirling-BHKW-Einbindung in die Heizungsanlage	6
Abbildung 3:	Scheitholzessel-Stirlingmotor-BHKW im Versuchsbetrieb (Standort Sulzbach, 25 kW Kesseleistung).....	7
Abbildung 4:	Hairpin-Erhitzer nach 100 Stunden Laufzeit Anlage 2 (Stückholz).....	9
Abbildung 5:	Hairpin-Erhitzer nach 100 Stunden – Anlage 3 (Stückholz).....	9
Abbildung 6:	Hairpin-Erhitzer nach 100 Stunden Betriebszeit - Hobelsteuerung.....	10
Abbildung 7:	Temperaturabhängigkeit des Rauchgases von Luftüberschuss und Zulufttemperatur.....	14
Tabelle 1:	Maschinenkenndaten.....	3
Tabelle 2:	Standorte und Parameter.....	5
Tabelle 3:	Laufzeiten und Rückspeisewerte.....	8

III. Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Stichwortverzeichnis

Blockheizkraftwerk.....	
BHKW.....	1
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.....	
BMU.....	12
Das Verbrennungsluftverhältnis setzt die tatsächlich für eine Verbrennung zur Verfügung stehende Luftmasse $m_{L,tats}$ ins Verhältnis zur mindestens notwendigen stöchiometrischen Luftmasse $m_{L,st}$, die für eine vollständige Verbrennung benötigt wird....	
Luftüberschuss.....	13
Einheit für Arbeit [Giga-Watt-Stunden].....	
GWh.....	12
Einheit für Leistung [KiloWatt].....	
kW.....	1
Fotovoltaikanlage.....	
PV.....	8
Gasqualität 99,8 %.....	
Qualität: 2.8.....	3
Institut für ZukunftsEnergieSystem gGmbH.....	
Saarbrücken.....	
IZES.....	13
KiloPascal.....	
SI-Einheit für den Druck.....	
kPa.....	3
Stirlingmotor, Heißluftmotor mit einem Arbeits und einem Verdrängerkolben in einem Arbeitszylinder.....	
Beta-Konfiguration.....	3
[englisch] Haarnadel	
Hairpin.....	9

1 Einleitung

Holz stellt als nachwachsender Rohstoff einen wichtigen Baustein in einer zukünftigen Energiewirtschaft dar. Durchgeführte Studien zeigen, dass das Holz des in der BRD genutzten Waldes und andere biogene Brennstoffe zu einem hohen Prozentsatz den Hausheizenergiebedarf decken können. In Kombination mit anderen alternativen Energien wie Solarenergie zur Warmwasserbereitung und Hausheizungsunterstützung steigt das Substitutionspotenzial von fossilen Energieträgern durch regenerative sicherlich noch einmal erheblich.

Die Nutzung von Holz als Energiequelle für die Produktion von Wärme und Strom in kleinen Einheiten, d.h. im Leistungsbereich von wenigen Kilowatt ist derzeit noch nicht auf dem Markt verfügbar.

Da der Brennstoff Holz in unterschiedlichen Modifikationen als Brennstoff für Hausheizungen verwendet wird und im Rahmen dieses Projektes nicht alle verfügbaren Brennstoffe untersucht werden können werden wir uns auf den Brennstoff STÜCKHOLZ beschränken.

Ziel des Projektes ist es zu überprüfen inwieweit bekannte und teilweise eingeführte Techniken miteinander kombiniert und zu einem neuen Produkt (Wärme) bzw. zu einer Erweiterung des Produktspektrums (Wärme und Strom) führen kann.

Als bekannte Technologie der Heizung/Feuerung wird bei diesem Projekt ein Stückholzkessel der Firma Hoval AG, Vaduz, Liechtenstein verwendet; als "Wandler" der thermischen Energie zu mechanischer/elektrischer Energie ein neu entwickelter Stirlingmotor mit dreiphasigen Drehstrom-Asynchrongenerator. Der Vorteil der Kesselnutzung besteht darin, dass durch minimale Eingriffe in die Brennkammer der Erhitzer des Stirlingmotors, über den die Energie in den Motor eingebracht wird, in den Feuerraum eingefügt werden kann.

Die Leistung des Generators liegt bei 1 kW elektrisch - der kleinste Kessel der hier verwendeten Kesselbaureihe AGROLYTH beträgt 25 kW.

Die im Vorfeld des Projektes abgeschlossenen Vorversuche hatten gezeigt, dass dieses „Add-On“-System im Grundsatz "funktioniert" die Frage war jedoch, wie sich der neu entwickelte Stirlingmotor zusammen mit dem Kessel in der Praxis als gebrauchstauglich darstellt.

Insbesondere die Tatsache, dass der Scheitholzkessel eine eigenständige Feuerungseinheit darstellt und der Stirlingmotor als "angekoppelte Anlage" nur indirekt auf die Feuerung und dessen Ablauf eingreifen kann lässt erwarten, dass sich in der Praxis unter realen Betriebsbedingungen noch ein gewisser Entwicklungs- und "Anpassungsbedarf" ergeben wird.

Ziel des Vorhabens ist es die neu entwickelte Stirling-Antriebsmaschine in Kombination mit dem Scheitholzkessel der Baureihe Agrolyt der Firma Hovalwerk AG an einige Standorten unter realen Bedingungen zu testen um so Praxis- und Langzeiterfahrungen zu gewinnen – im Einzelnen lassen sich die Ziele wie folgt konkret formulieren:

1. Ermittlung neuer Erkenntnisse für die Entwicklung eines BHKW zur Energieumwandlung von Wärme in Strom aus Holz
2. Insbesondere sind hier Kenntnisse über den dem verstärkten Verschleiss unterworfenen Bauteile der trocken laufenden Antriebsmaschine (Kolben-Zylinder-Gleitpaarung, Kolbenringe) von Interesse
3. Erhebung der Wartungs- und Revisionsintervalle für

- 3.1 Wärmetauscherflächen (Erhitzer, Kühler)
- 3.2 Generatorantrieb (Zahnriemen, Zahnriemenräder)
- 3.3 Verschleiss von Kolbenringe, Zylinderlaufflächen und Stützringen

Der Wartungsaufwand solle sich im Rahmen der üblichen jährlich durchzuführenden Inspektion/Wartung der Kesselanlage bewegen. Hierbei wären in geringem Umfang auch Wartungsarbeiten am Motor bzw. der Anlage möglich – so ist eine Austausch des Zahnriemens der den Generator mit dem Kessel verbindet sowie eine umfangreiche Reinigung des Erhitzers durchaus vorstellbar.

2 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten Felderprobung wurde ein mit Stückholz befeuertes Mikro-Stirlingmotor-BHKW an 5 ausgewählten Standorten auf die Gebrauchs- und Praxistauglichkeit hin untersucht.

Besondere Aufmerksamkeit wurde auch auf die Systemeinbindung und die regelungstechnische Abstimmung der Komponenten Antriebsmaschine und Kesselbetrieb gelegt. Im Gegensatz zu konventionellen BHKW wird bei diesem Projekt ein nahezu unveränderter Kessel als Feuerung des Stirlingmotors verwendet. Diese Tatsache bedingt die Voraussetzung einer recht hohen "Akzeptanz" des Motors in Bezug auf die Regelungsgeschwindigkeit und Trägheit des Feuerungssystems.

Der Versuchszeitraum umfasst zwei Heizperioden in denen die Anlagen regelmäßig bezüglich Verschleiß, Leistungsverhalten und Instandhaltungsaufwand untersucht wurden.

Hinsichtlich Verschleiß konnte festgestellt werden, dass die hiervon besonders betroffenen Komponenten wie Zylinder/Kolben sowie Kolbenringe innerhalb der realisierten Laufzeit von bis zu 3.500 Betriebsstunden keine unerwarteten Ergebnisse zeigen, im „Normalfall“ sind diese Bauteile im Rahmen der jährlichen Wartung nicht zu wechseln. Auch bezüglich des Zahnriemenantriebs konnte kein Verschleiss, weder beim Zahnriemen, noch bei den Zahnriemenrädern festgestellt werden.

Die direkte Befeuerung des Erhitzers mit dem ungereinigten Rauchgas führt bereits nach kurzer Laufzeit zum Aufbau einer Ascheschicht auf den Erhitzerröhrchen. Eine kontinuierliche Reinigung ist hier nicht erforderlich, der Wärmetransport vom Rauchgas auf den Erhitzer (Glattrohrausführung) ist durch die aufsitzende Ascheschicht zwar eingeschränkt, reicht für den Betrieb der Anlage aber aus. Eine monatliche Reinigung dieses Bauteils ist zur Leistungserhaltung jedoch empfehlenswert.

Die Steuerung und Regelung der Anlage, bestehend aus Stirlingmotor-BHKW, Kessel und Wärmeverbraucher (Heizung und Warmwasser) kann in die Heizungssteuerung integriert werden.

Hinsichtlich besonderer Abschalt- und Anfahrvorgänge der Anlage sind hier zusätzliche Maßnahmen erforderlich, die steuerungstechnisch durch die modifizierte Heizungssteuerung alleine nicht abgedeckt werden können (Hochlaufen der Anlage bei Netzausfall auf Leerlaufdrehzahl). Hier konnte ein Verfahren konzeptioniert und erfolgreich getestet werden – hier besteht bezüglich des Betriebsverhaltens jedoch noch Erfahrungsbedarf.

Der von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Feldtest (AZ 21876) wurde in Kooperation mit der HOVALWERK AG, Vaduz, Liechtenstein, durchgeführt, einem Hersteller von Holz- Öl- und Gasfeuerungen in unterschiedlichen Leistungsgrößen.

3 Hauptteil

3.1 Vorhabensdurchführung

Auf Grundlage des Arbeits- und Zeitplanes des Vorhabens wurden im ersten Schritt 5 Anlagen angefertigt und einem Funktionstest unterzogen.

Parallel dazu erfolgt die Planung der Einbindung der BHKW in die Heizungs- und Warmwasserversorgung der einzelnen Objekte. Die Analyse der konkret ausgewählten Objekte zeigte, dass die Bedingungen und Anforderungen sehr unterschiedlich sind - insbesondere die Verknüpfung von Holzheizung, Solaranlage und BHKW – teilweise wurden hier auch noch Gasheizungen „im Bestand“ gefahren – macht deutlich, dass die Suche nach einer Wärmesenke für das BHKW teilweise recht aufwändig war.

Für jede ausgeführte Einheit wurde die Einbindung des Stirling-Kühlkreislaufes modifiziert, in einem Fall, einem Verbraucher mit überdurchschnittlich hohem Warmwasserbedarf war es möglich den Kreislauf direkt und ohne „Koppelwärmetauscher“ direkt auf den Warmwasserbereiter zu legen.

Weiterhin wurde eine Kaltwasser-Notkühlung, die bei Ausfall der Kühlwasserpumpe oder einer anderen Unterbrechung des Kühlkreislaufes den Motor so lange kühlt bis die Temperatur der Anlage wieder auf einem unter kritischen Level liegt, bei allen Anlagen installiert.

Die wesentlichen Kenndaten der Antriebsmaschine und des verwendeten Generators sind:

Parameter	Größe/Einheit
Maschinentyp	Stirlingmotor in Beta-Konfiguration
Arbeitsdruck	12 bar (1.200 kPa)
Arbeitsmedium	Stickstoff (N ₂ , Qualität: 2.8)
Motordrehzahl	760 Umdrehungen pro Minute
Generator	Asynchronmaschine, 4-polig
Generatordrehzahl	1.500 Umdrehungen pro Minute
Generatorspannung	400 Volt
Nennleistung	1.100 Watt
Länge/Breite/Höhe Hüllmaße	970*480*700 [mm] (inkl. Träger)
Gewicht	115 kg

Tabelle 1: Maschinenkenndaten

Die Maße der Maschine können der folgenden Abbildung entnommen werden, wobei hier der „Träger“ auf den die Maschine montiert wird, nicht enthalten ist.

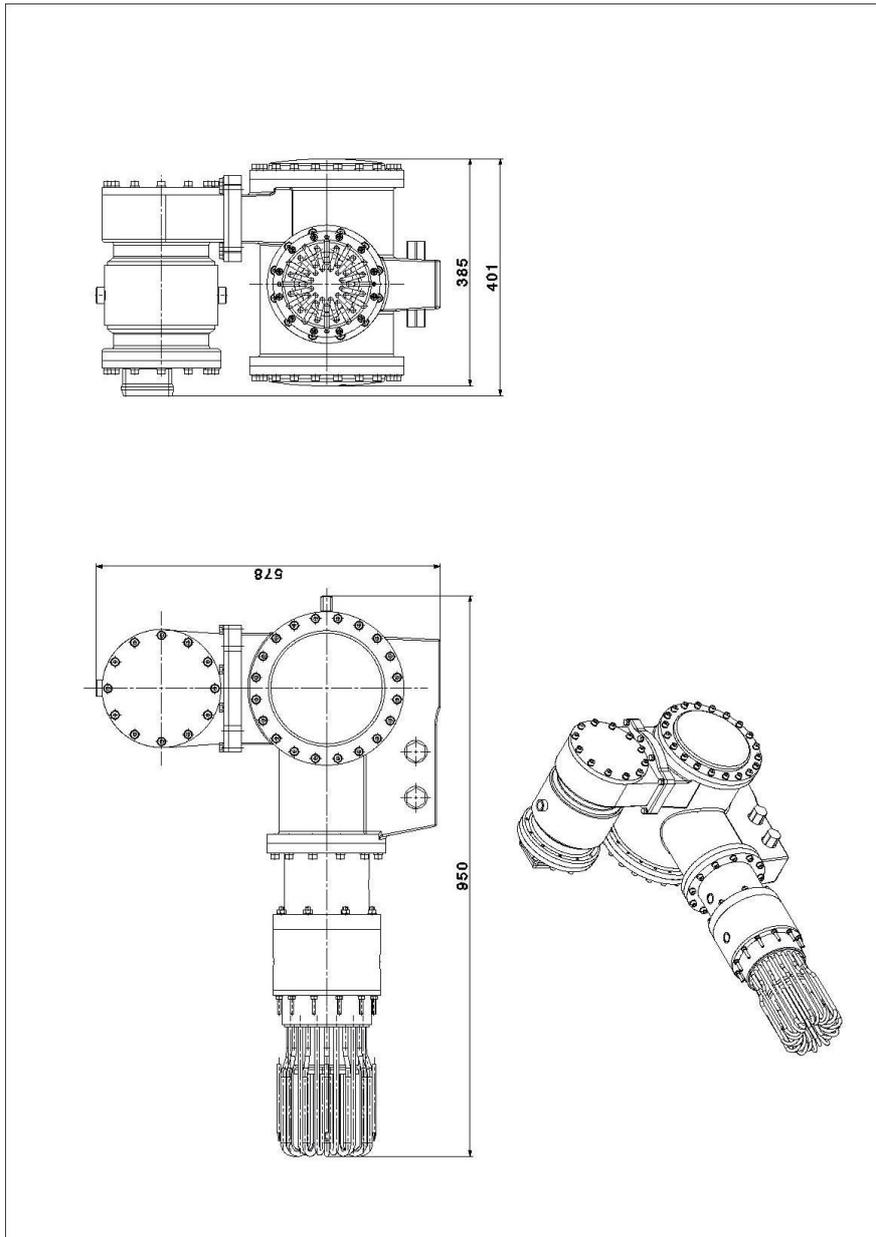


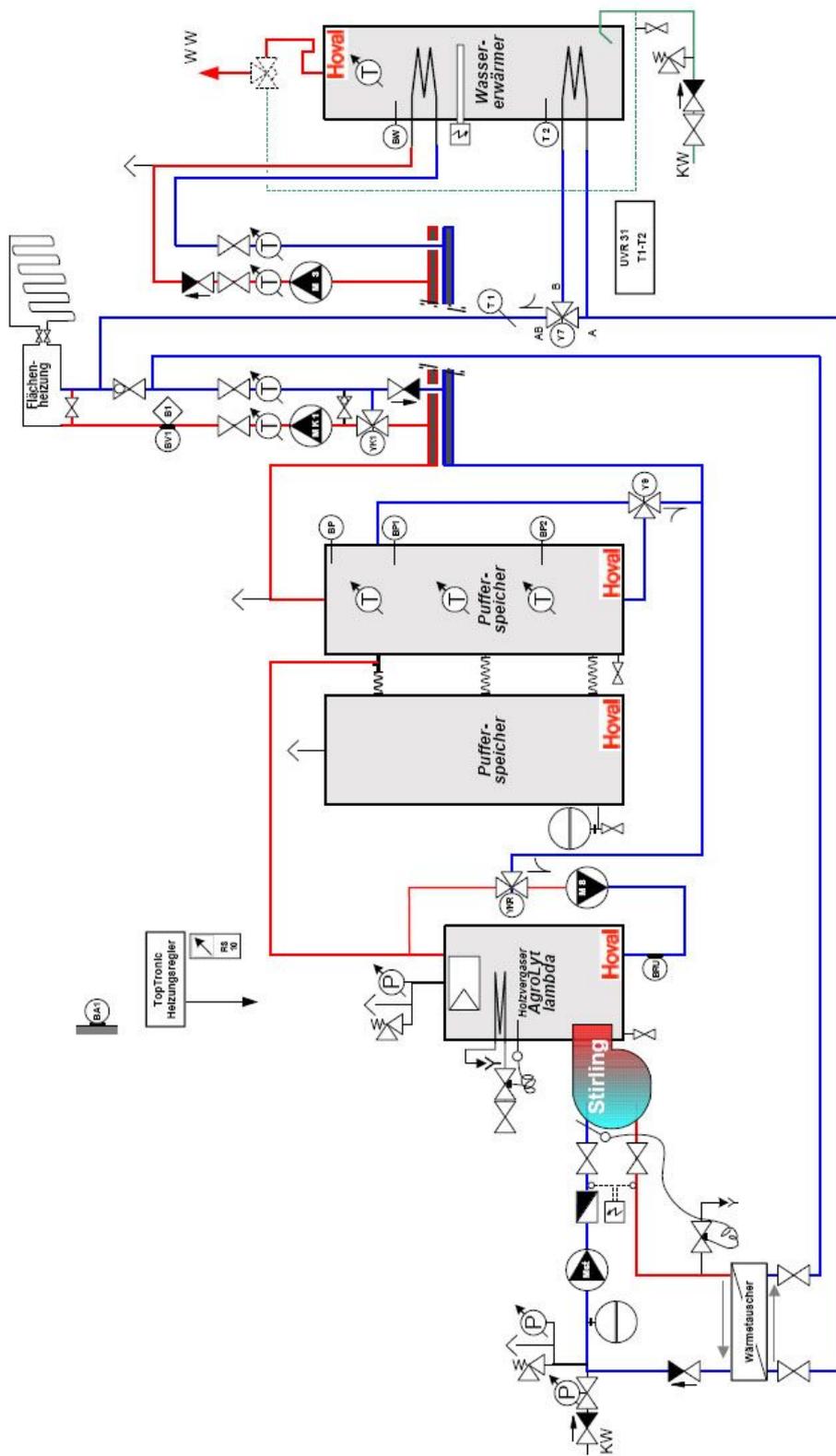
Abbildung 1: Motorabmessungen

Die Standorte der Anlagen sowie einige Parameter der Anlagen sind in der folgenden Tabelle benannt – zusätzlich ist eine weitere Anlage aufgeführt, die nicht Bestandteil des geförderten Feldversuches war:

	Ort	Versorgung - Parameter	Kühlwasser – El. Einbindung
1	Harpstedt bei Bremen	Versorgungsmix aus Gasfeuerung, Solaranlage und Holzfeuerung	Pufferspeicher - Einspeisung
2	Stockach, Bodensee	Holzheizung für Raumwärme- und Warmwasserversorgung, spätere Installation einer thermischen Solaranlage	Pufferspeicher – Eigenbedarf
3	Sulzbach, Saar	Holzheizung für Raumwärme und Brauchwasser	Warmwasser-Bereitung und Warmluft für Holz Trocknung - Einspeisung
4	Vaduz, Liechtenstein	Holzheizung Raumwärme	Rücklauf-Anhebung - Einspeisung
5	Stuttgart	Holzheizung und Solaranlage für Brauchwasser und Heizungsunterstützung	Pufferspeicher - Einspeisung
6	Poschiavo, Schweiz	Holzheizung und Warmwasserbereitung (Inselanlage)	Pufferspeicher - Eigenbedarf

Tabelle 2: Standorte und Parameter

Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für die die Einbindung des Kühlkreislaufes des BHKW in die Wärmeversorgung



Hydraulikschemata	Verbindungshinweise: »	Hoval	
		Datum	Name
»	»	Gez.	28.07.04
		Version	FEDI
Seite 1 von 4		Datei: AGLL_Stirling_vsd	

Abbildung 2: Beispiel für eine ausgeführte Stirling-BHKW-Einbindung in die Heizungsanlage

Die Steuerung der Anlage erfolgt über die Kesselsteuerung, die entsprechend den Anforderungen angepasst und modifiziert wurde.

Die Integration des Stirlingmotors in den Kessel zeigt die folgende Abbildung.



Abbildung 3: Scheitholzessel-Stirlingmotor-BHKW im Versuchsbetrieb
(Standort Sulzbach, 25 kW Kesseleistung)

Der Motor inklusive aufgesetztem Generator ist auf Schienen gelagert, so dass dieser ohne Kraftaufwand aus dem Kessel herausgefahren werden kann um die notwendigen Reinigungsarbeiten auch der Brennkammer zuzuführen. Die Kühlwasseranschlüsse zum Motor sind daher flexibel ausgeführt.

Als Prüfungs- und Wartungstermine wurden festgelegt:

1. Inbetriebnahme der Anlage
2. Nach Abschluss der ersten Heizperiode
3. Vor Beginn der zweiten Heizperiode
4. Nach der zweiten Heizperiode

3.2 **Ergebnisse**

Die Ergebnisse der durchgeführten Felderprobung sind bezüglich der im Antrag benannten Inhalte – hier im wesentlichen die Punkte Wartung und Verschleiß erfreulich und werden im folgenden kurz skizziert.

In der Praxis haben sich neben den im Antrag formulierten Zielen Sachverhalte gezeigt, die im Vorab so nicht erwartet wurden. Auch diese werden im folgenden kurz skizziert, beschrieben und bewertet.

Die im Versuchszeitraum realisierten Laufzeiten und Netto-Energieerträge sind wie folgt:

Nr	Zeit [h]	Einspeisung [kWh]	Erläuterung/Ergänzung
1	350	240	Die Holzkesselanlage wurde nicht im Grundlastbetrieb gefahren (Verbund und Solaranlage)
2	1.100	720	Seit der Inbetriebnahme der Solaranlage steht für den Stirling kein ausreichendes Potenzial für die Kühlung zur Verfügung. Ursache ist ein Fehler in der Verschaltung der Einzelkomponenten zu finden
3	1.400	200	Strombezug durch Takten der Anlage bei „niedrigen“ Temperaturen. Die erzeugte Energie in den ersten tausend Betriebsstunden wurde gleich wieder verbraucht ¹
4	3.500	1.930	Anlage nach Beendigung des Feldtests an einem anderen Standort (Neckarsulm) installiert. Läuft dort nun in einem Pelletkessel.
5	700	370	Laufzeiten aufgrund niedrigen Energiebedarfs und Solaranlage gering.
6	3.000	2.000	Inselanlage – ohne Netzanschluss, Gleichstromgenerator, 100% Eigenversorgung mit PV-Anlage

Tabelle 3: Laufzeiten und Rückspeisewerte

Die Werte der ins Stromnetz eingespeisten Energie sind auch von der Größe des Eigenstromverbrauchs (Kühlwasserpumpe und Anlaufstrom) abhängig. Insbesondere bei Anlage 3 hat sich gezeigt, dass der Asynchrongenerator im Betrieb beim Herunterfahren der Kesselanlage und dem Betriebszustand „Glutbetherhaltung“ erhebliche Mengen an Energie aus dem Netz bezieht.

3.2.1 Anlagen- und Motorenkomponenten

Die im Betrieb stark beanspruchten Anlagenkomponenten sind einerseits der Erhitzer, der direkt im Abgasstrom der Brennkammer positioniert ist und neben den heißen Rauchgasen auch die im Brennstoff enthaltene Asche enthält. Die chemisch-physikalischen Eigenschaften dieser Asche ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung (und damit auch der Holzart) und der Temperatur in der Brennkammer. Der Erhitzer ist als „Glattrohrwärmetauscher“ ausgeführt und enthält keine zusätzlichen Rippen zur Verbesserung des Wärmeübergangs resp. zur Erhöhung des Wärmestromes in die Maschine.

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch drei Erhitzer nach etwa gleicher Laufzeit.

¹ Der Kessel wird in den kalten Jahreszeiten mehrfach am Tag aufgelegt, in den Zeiten, in denen der Kessel auf „Gluterhaltung“ läuft ist die Temperatur häufig noch so hoch, dass der Stirlingmotor auf das Netz geschaltet wird, aufgrund des Eigenbedarfs (Magnetisierungsenergie) dabei aber stetig Energie aus dem Netz zieht! Dieser Zustand ist inzwischen dahingehend geändert, dass in diesen Zeiten die Anlage in einem „ungeregeltem-Inselbetrieb“ läuft und dann keine Magnetisierungsenergie mehr aus dem Netz bezieht.

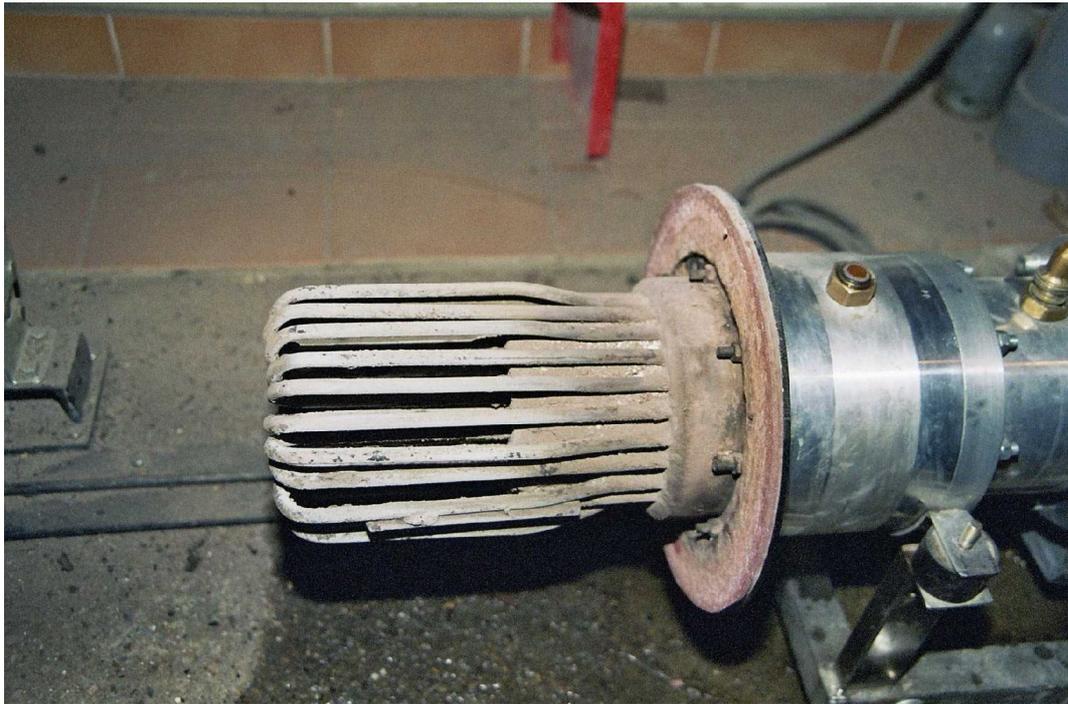


Abbildung 4: Hairpin-Erhitzer nach 100 Stunden Laufzeit Anlage 2 (Stückholz)

Die Ablagerungen auf den Erhitzenrohren sind etwa 1 bis 2 mm stark und recht „weich“, lassen sich mit einer Drahtbürste aber noch entfernen.



Abbildung 5: Hairpin-Erhitzer nach 100 Stunden – Anlage 3 (Stückholz)

Die Farbe der Asche ist grau-schwarz, sehr spröde, fast glasartig und ist gut zu entfer-

nen. Offensichtlich ist diese Anlage bei einer deutliche höheren Temperatur gefahren worden, Die Ursache dafür kann darin begründet sein, dass hier eine Holzart mit hohem Brennwert und/oder ein Brennstoff mit sehr geringer Restfeuchte verwendet wurde.

Deutlich zu sehen ist auch, dass die Ablagerungen/Verfärbungen ungleichmäßig über den Erhitzer verteilt sind, ein Indiz für eine – zumindest temporäre – ungleichförmige Befeuerung.

Korrosion des thermisch hoch belasteten Bauteils konnte bisher nicht festgestellt werden, was auf das Fehlen von korrosiven Inhaltsstoffen wie Schwefel, Chlor und deren chemischen Verbindungen im Rauchgas zurückzuführen ist.

Im Vergleich dazu der Erhitzer einer mit Holzgas gefahrenen Anlage wobei das Rohgas einer einfachen Reinigung mittels Fliehkraftabscheider unterzogen wurde. Es zeigt sich, dass diese Entaschung des Produktgases bei der Verbrennung des Gases und der Nutzung in einem Stirlingmotor ausreichend ist.

Der weissliche Belag auf dem Erhitzer ist fast staubförmig und kann mit Pressluft abgeblasen werden. Bei einem Motor mit interner Verbrennung wie Gas- oder Dieselmotor würden diese Rückstände allerdings zu Schäden im Motor führen.



Abbildung 6: Hairpin-Erhitzer nach 100 Stunden Betriebszeit - Hobelsteuerung

Gleitpaarung

Die Untersuchung der Kolbenringe – Stützringe und Zylinderoberflächen sind auch nach einer Laufzeit von über 3.500 Stunden „ohne Befund“. Die hier angewendeten Maßnahmen zur Minimierung der Reibung des Gleitsystems von Kolben/Zylinder hat sich bewährt – ein Abrieb des Gleitbelags von Kolben und Verdränger ist auch dieser Laufzeit mit der verwendeten Methode (Bügelmeßschraube) nicht nachweisbar.

Riementrieb

Auch die regelmäßige Kontrolle des Riementriebs – der kraft- und formschlüssigen Verbindung von Antriebsmotor und Generator zeigt, dass Zahnriemen sowie Zahnriemenräder weder abgelaufen noch anderweitig geschädigt sind, brauchen also auch nach der Laufzeit von 2 Heizperioden nicht gewechselt zu werden.

3.2.2 Steuerung und Regelung

Im Betrieb der Anlage unter Praxisbedingungen sind Betriebszustände eingetreten, die eine deutliche Modifizierung der Regelung/Steuerung erfordern. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass die Befeuerung der Anlage weitgehend unabhängig von dem Betriebszustand der Stirlingmaschine ist. Der Grund dafür ist die Trägheit des Feuerungssystems – selbst bei einer Notabschaltung, d.h. dem Abschalten der Primärluft und dem Drosseln des Saugzuggebläses erfolgt eine merkliche Absenkung der Brennkamertemperatur aufgrund der großen Masse der Brennkammer und der Größe der Glutbettes erst um etwa eine halbe Stunde zeitverzögert.

Es hat sich gezeigt, dass die Netzstabilität durchaus nicht so hoch ist wie erhofft. Es kommt also häufiger zu Störungen der Frequenz der der Spannung, die in einem normalen Haushalt nicht auffallen, die Schutzeinrichtung (Spannungs- und Frequenzüberwachung) aber anspricht und die Anlage vom Netz trennt.

Wenn eine Netztrennung erfolgt unmittelbar ein Hochdrehen der Anlage auf Leerlaufdrehzahl, ein an sich schon sehr kritischer Zustand. Wenn nach kurzer Zeit die Netzstörung wieder beseitigt ist und die Anlage wieder auf das Netz schaltet kann der dann generierte Stromstoß beim Zuschalten aus dem hohen Drehzahlniveau so hoch sein, dass der Generator innerhalb eines Sekundenbruchteils durchbrennt, was im Beobachtungszeitraum einige Male erfolgt ist.

Eine weitere anlagenspezifische Besonderheit erforderte zusätzliche Änderungen der Regelung

Drehstromgeneratoren ziehen die Magnetisierungsenergie aus dem Netz was dazu führt, dass bei einer rückgespeisten Leistung von 0 Watt Magnetisierungsenergie bereits vom Generator produziert wird, diese aber zwischen Generator und Netz hin- und her pendelt. Wird die Anlage vom Netz geschaltet erfolgt, da eine Leistung an der Welle anliegt, sofort ein Hochdrehen der Anlage. Diese Leistung liegt bei den verwendeten Generatoren bei ca. 150 bis 200 Watt.

Wenn das Hochdrehen der Anlage verhindert werden soll muss die Abschaltung vom Netz genau dann erfolgen, wenn die Arbeitstemperatur so hoch ist, dass die Maschine noch die Magnetisierungsenergie aus dem Netz zieht! Zwar ist eine Drehzahlerhöhung über die Nenndrehzahl hinaus in gewissen Grenzen akzeptabel, diese werden aber bei der oben stehenden Wellenleistung bereits überschritten.

Ist die Abschalttemperatur nicht korrekt eingestellt können sich entweder Schäden bei der Maschine einstellen oder aber die vom Netz bezogene Leistung wird unverträglich hoch. Diese Verhältnisse können sich auch bei Brennerstörungen, wie beispielsweise einem Hohlbrenner einstellen. Hier könnte die Anlage über einen längeren Zeitraum aufgrund ungünstiger Temperaturverhältnisse Leistung aus dem Netz ziehen.

Es wurde eine Lösung gefunden, dies Aufgabe mit einem zusätzlichen Regelungsbaustein weitgehend zu kompensieren. Es ist nun möglich die Anlage bereits bei höheren

Brennertemperaturen vom Netz zu nehmen, so dass der Leistungsbezug vermieden werden kann.

3.3 Ökologische und ökonomische Bewertung

Es konnte gezeigt werden, dass die Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis Stückholz mit der gewählten Technik technisch möglich ist.

Mit dieser Technik kann eine weitgehend ökologisch verträgliche kleinräumige Energieversorgung auf Basis nachwachsender Rohstoffe in Verbindung mit der Nutzung von Solarenergie realisiert werden.

Auf Grundlage der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) erhobenen und veröffentlichten aktuellen Zahlen² kann abgeschätzt werden in welcher Größenordnung sich das Potenzial der Erzeugung von elektrischer Energie aus Holz in Kleinf Feuerungsanlagen bewegt. Zur Zeit werden ca. 61.600 GWh Endenergie (fühlbare Wärme) aus Holz für die Beheizung von Haushalten eingesetzt. Unter der Annahme, dass dieses gesamte Potenzial ausgeschöpft und ein gemittelter Wirkungsgrad von 5 % bei der Konversion erreicht werden könnte, wären ca. 3.080 GWh an elektrischer Arbeit zu gewinnen. Der Vergleich zu der aktuell generierten elektrischen Energie von 2.220 GWh aus Fotovoltaikanlagen zeigt, dass das Potenzial mit der aktuell verfügbaren Technik den aktuellen Fotovoltaikbeitrag zur Stromerzeugung noch um 38 % übersteigen kann.

In welchem Umfang sich eine Verbesserung der Bilanz durch eine Wirkungsgradsteigerung auswirkt ist einsichtig – obwohl an dieser Stelle angemerkt werden muss, dass Steigerungen des Wirkungsgrades mit einem nicht unerheblichen technischen Mehraufwand verbunden sind.

Eine abschließende ökonomische Bewertung ist aufgrund der noch unzureichenden Kenntnis über die Kosten Serienfertigung der Anlage und einiger anderer Aspekte zum jetzigen Zeitpunkt (noch) nicht möglich.

Parallel zu den im Feldversuch laufenden Anlagen wurde eine weitere Anlage im „Inselbetrieb“ in der Schweiz in Betrieb genommen. Zusammen mit einer Fotovoltaikanlage wird ein Nutzer ohne Netzanbindung mit elektrischer Energie versorgt – ein Zusatzmodul ist nicht mehr erforderlich.

Diese Prototyp-Anlage läuft unter den jetzigen Gegebenheiten wirtschaftlich wenn man die Kosten für die elektrische Energie zu ca. 50 €/Cent/kWh annimmt – ein Wert, der für die Verhältnisse „vor Ort“ als relevant angegeben wurde.

Wichtig für die Wirtschaftlichkeit der Anlage ist neben den noch offenen Produktions- und variablen Brennstoffkosten in hohem Maße die jährlich erzielbaren Laufzeit, die sich bei etwa konstanter Leistung von 75 % der Nennleistung direkt auf die jährlich erzielbaren Gutschriften auswirken. Die Verbindung unterschiedlicher Systeme zu einem „Verbundsystem“, bestehend beispielsweise aus Solaranlage zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung, möglicherweise auch noch ein drittes System wie ein mit Erdgas befeuerter Spitzenlastkessel sind durchaus zu finden, wirken sich hinsichtlich der Maximierung der Laufstunden des Stückholzkessels in Bezug auf die Laufstunden eher kontraproduktiv aus.

Eine Wirtschaftlichkeit wird demnach nur dann erzielbar sein, wenn die Kesselleistung sich eher am unteren Wert der notwendigen Heizleistung bewegt und ein optimiertes Speichermanagement verfügbar sind.

² BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) Referat Öffentlichkeitsarbeit: *Erneuerbare Energien in Zahlen – nationale und internationale Entwicklung*; 11055 Berlin; 2007

3.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Das Projekt wurde von dem Kooperationspartner auf mehreren Ausstellungen einem Fachpublikum vorgestellt. Weiterhin erfolgte seitens der Hovalwerk AG die Präsentation des Projektes in Verbindung mit der Vorstellung der Kesseltechnik bei diversen Universitäten und anderen Multiplikatoren.

Nach Abschluss des Projektes ist weiterhin ein Fachvortrag auf dem Europäischen Stirlingforum in Osnabrück geplant.

Im Rahmen des „Monitorings“ des vom IZES in Saarbrücken durchgeführten Projektes, erfolgte die Sendung eines Kurzberichtes dieses Projektes im ZDF (Mittagsmagazin, 25.06.08). Bei dem von diesem Institut durchgeführten Projekt werden alle für die gesamte Heizanlage, bestehend aus Kessel, Pufferspeicheranlage, Warmwasserspeicher und Stirlingmotor-BHKW, relevanten Kennwerte messtechnisch erfasst und online dokumentiert. Die Datenerhebung erfolgt in Minutenschritten, alle Parameter werden in diesem Zeitintervall genau einmal erfasst.

Das Monitoring-Projekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz – Projektträger ist die Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. in Gültig – Laufzeit des Projektes 2006-2008.

4 Fazit und Entwicklungsbedarf

Mit dem durchgeführten Projekt konnte gezeigt werden, dass die gleichzeitige Erzeugung von elektrischer Energie und Raumwärme in kleinen holz-befeuerten Hausheizungen nicht nur möglich sondern auch gebrauchstauglich ist.

Allerdings zeigen die Ergebnisse auch, dass die Abstimmung von Kessel und Stirlingmotor im Zusammenspiel von Wärmebedarf und Systemeinbindung ein hohes Maß an Aufwand bezüglich der Systemintegration erfordert.

Bezüglich der Möglichkeiten bei der „Add-On-Variante“ mit Stückholzfeuerungen zu signifikant höheren Wirkungsgraden und Leistungen zu kommen erscheint der technische Aufwand zu hoch. Der Luftüberschuss der Feuerung von 2 bei schlecht gewarteten und eingestellten Anlagen auch bis 3 ist, neben der Brennstoffzusammensetzung, für die „niedrige“ Verbrennungstemperatur verantwortlich.

Die zu erwartende Rauchgastemperatur einer Feuerung kann iterativ aus der Elementarzusammensetzung, dem Luftüberschuss und der Verbrennungslufttemperatur berechnet werden³.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die theoretische Verbrennungstemperatur von Holz in Abhängigkeit vom λ -Wert (Luftüberschuss) und der Temperatur der Verbrennungsluft.

³ BEITZ, W.; GROTE, K.-H.; (Herausgeber): *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*; Springer-Verlag; 19. Auflage; 1997

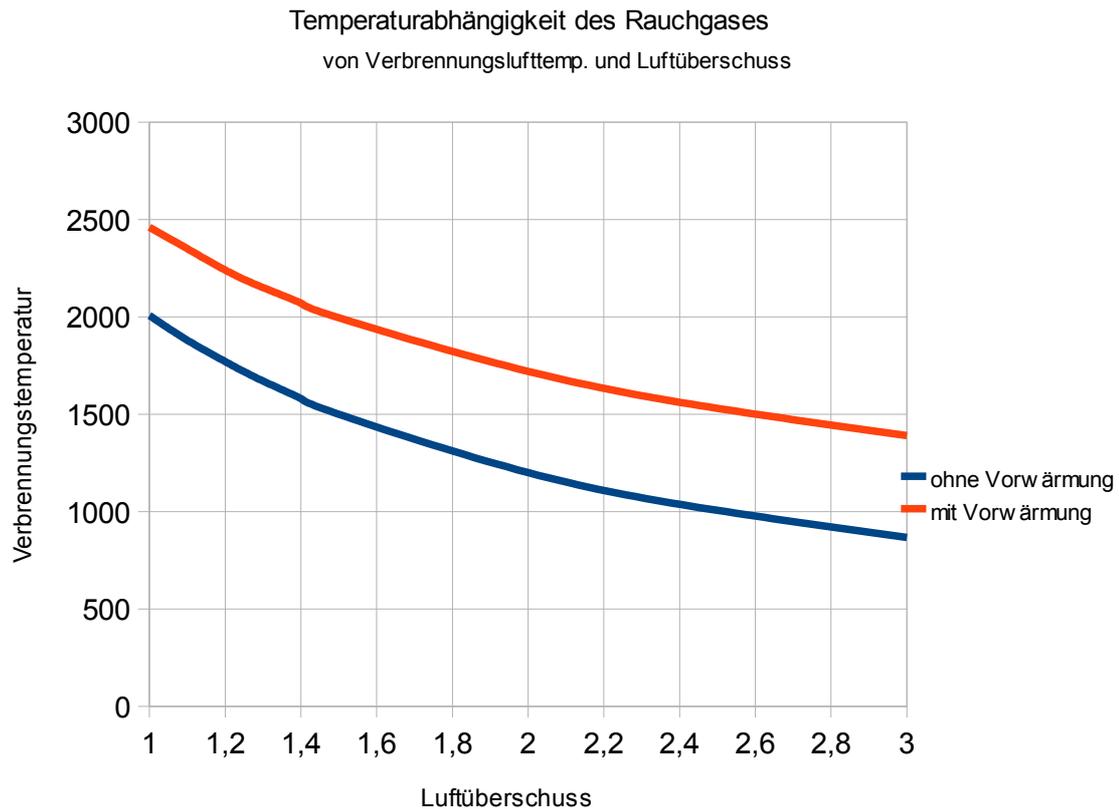


Abbildung 7: Temperaturabhängigkeit des Rauchgases von Luftüberschuss und Zulufttemperatur

Aus der bei dem Stückholzkessel erreichten 1.200 °C kann bei der Zulufttemperatur von 20 °C der Luftüberschuss von ca. 2 aus dem Diagramm entnommen werden. Dies entspricht recht genau den realen Verhältnissen wenn berücksichtigt wird, dass die berechneten Werte geringfügig über den realen Werten liegen – die Rechenergebnisse bei anderen Betriebsbedingungen können daher korrekt angenommen werden.

Der Wärmebedarf von neuen „kleinen“ Bau-Objekten ist auf einem niedrigen Level und auch die Objekte, die derzeit und zukünftig einer energetischen Sanierung unterzogen werden, erfordern Energieversorgungssysteme mit kleinen Leistungen. Es erscheint gerade bei kleinen Anlagen eine Doppelstrategie notwendig: Neben der Verwendung von biogenen Brennstoffen wie Stückholz die auch in kleineren, Anlagen (< 15 kW) verwendet werden können, sind Anlagen wünschenswert, die hinsichtlich Wirkungsgrad und Leistung optimiert sind.

Eine Verbrennungsluftvorwärmung ist bei Stückholzkesseln nicht einfach umzusetzen und würde eine komplette Neukonzeption des Kessels erfordern. Eine Anhebung des Wirkungsgrades des Systems wäre möglich, indem der Luftüberschuss deutlich zurückgenommen wird, Voraussetzung dafür ist die Realisierung einer Abgasrückführung um die Spitzentemperatur in Grenzen zu halten und den Wärmeübergang vom Rauchgas auf den Erhitzer zu verbessern.

Weniger als Alternative als vielmehr eine sinnvolle Ergänzung sind in diesem Zusammenhang Feuerungsanlagen die Holzpellets als Brennstoff verwenden. Dieser Brennstoff eignet sich für die Optimierung einer Feuerung im kleinen Leistungsbedarf besser als ein Stückholzfeuerung. Es ist allerdings zu prüfen ob die verfolgte „Add-On“- Variante auch direkt auf die Pelletsfeuerungen übertragen werden sollte. Die Alternative dazu

besteht in der Entwicklung einer für den Stirlingmotor optimierten Feuerung mit „Restwärmennutzung“ für die Heizung mit der hohe Laufzeiten bei erhöhtem Wirkungsgrad realisiert werden könnten.

Neben der technischen Optimierung der Einzelkomponenten wird hier auch die Verwendung von Wärmepufferspeichern sinnvoll werden um hier eine hohe Laufzeit der Anlage zu erreichen.