

Projekt 2016-02

Optimierung der Verstromung von veränderlichen Schwachgasen im kleinen Leistungsbereich

Abschlussbericht



Ansprechpartner

Dipl.-Ing. (Fh) Günter Zapf

Erstellungsdatum

20.06.2018

1 Inhalt

2	Projektüberblick.....	1
2.1	Ausgangslage.....	1
2.2	Wissenschaftliche und technische Ziele	2
2.3	Herausforderungen // Chancen und Risiken des Vorhabens.....	3
3	Projektbeschreibung	3
3.1	Projektablauf.....	3
3.1.1	Projektidee	3
3.1.2	Projektplanung und Aufteilung	3
3.2	Projektplanung.....	5
3.2.1	Erste Schritte und Recherchen	5
3.2.2	Ausführungsplanung	6
3.2.3	Detailplanung	7
3.3	Technische Umsetzung	8
3.3.1	Technische Daten	8
3.3.2	Anlagenbau	9
3.4	Anlagenbetrieb.....	9
3.4.1	Auswertung der Betriebsergebnisse	9
3.4.2	Aufgetretene Störungen.....	10
3.4.3	Schlussfolgerung und Erkenntnisse der Probleme	15
3.5	Ökologischer Nutzen.....	18
3.5.1	Einsparung an Primärenergie	18
3.5.2	Reduktion der CO ₂ -Emissionen	18
3.6	Betrachtung der Wirtschaftlichkeit.....	18
3.6.1	Investitionskosten	18
3.6.2	Betriebskosten	18
3.6.3	Verbesserung der Wirtschaftlichkeit.....	19
4	Wirkung der Umsetzung.....	19
4.1	Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb	19
4.2	Übertragbarkeit der Projektergebnisse.....	20
5	Öffentlichkeitsarbeit	20
5.1	Führungen und Vorträge	20
6	Zusammenfassung/Fazit	20
7	Ausblick	21
8	Anlage: Projekterkenntnisse.....	22

2 Projektüberblick

2.1 Ausgangslage

Bei der Verbrennung von Mischgas aus einem Holzvergaser im kleinen Leistungsbereich, konnten folgende Probleme festgestellt werden.

- Hoher Materialverschleiß an den Kolben, dadurch kam es zu Maschinenbruch sowie hohem Ölverbrauch
- Schlechte Verbrennung im Motor wegen schwankender Gasqualität, hierdurch schlechte Abgaswerte
- Schlechter Wirkungsgrad durch falschen Drehzahlbereich
- Materialverschleiß an Zylinderlaufwand durch Gasverunreinigungen

Diese Probleme treten hauptsächlich bei Kleinanlagen auf. Der Grund hierfür ist die verwendete Motorentechnik der BHKW Hersteller. Hier werden üblicherweise Motoren aus dem KFZ Bereich eingesetzt. Diese Motoren haben aber durch ihre Entwicklung ihren optimalen Betriebspunkt in ganz anderen Drehzahlbereichen als Industriemotoren, welche bei größeren BHKW's zum Einsatz kommen. Hierdurch werden die Motoren in der Regel überbelastet, was zu erhöhtem Materialverschleiß führt. Auch wird durch den Betrieb in ungeeigneten Drehzahlbereichen nur ein recht schlechter Wirkungsgrad erzielt.

Durch prozessbedingte Verunreinigungen im Gas kann es zu Ablagerungen an der Zylinderlaufwand kommen und damit einhergehend zu einem Ölfilmabriss. Dies hat zur Folge, dass es zu sogenannten "Kolbenfressern" kommt. Eine ausreichende Gasreinigung lässt sich aber, bei Anlagen im kleinen Leistungsbereich, nicht wirtschaftlich herstellen.

Auch begünstigen diese Verunreinigungen eine schlechtere Verbrennung, was zu schlechten Abgaswerten und zur Nachverbrennung in der Abgasstrecke führt. Dies kann durch eine messbare Temperaturerhöhung auf 150°C und höher entlang der Abgasstrecke nachgewiesen werden. In der Summe haben alle diese Punkte zur Folge, dass ein erheblicher Ölverbrauch entsteht und der Ölintervallwechsel um 1/3 von den Herstellervorgaben nach unten korrigiert werden muss. Durch hohen Verschleiß weisen die Motoren nach ca. 10.000 Betriebsstunden ein Kolbenspiel von über einem Millimeter auf. Hierdurch wird die Kompression vermindert und sowohl eine Leistungsminderung als auch eine Wirkungsgradreduzierung sind festzustellen. Des Weiteren hat das hohe Kolbenspiel zur Folge, dass der Blow by am Kolben ansteigt und es zu zusätzlicher Verunreinigung des Öles kommt. Die ganzen bisher beschriebenen Effekte schaukeln sich gegenseitig auf und führen so in der Regel zum Maschinenbruch. Diese Erfahrungen haben bereits viele Anlagenbetreiber gemacht, die Lebensdauer der eingesetzten Motoren liegt im Mittel bei 12.000 bis 14.000 Betriebsstunden. In einigen Fällen ist es aber auch schon nach 2.500 Betriebsstunden zu Maschinenbrüchen gekommen. Im Realbetrieb können nur noch Ölintervallzeiten von 250 – max. 450 Std. gefahren werden.

2.2 Wissenschaftliche und technische Ziele

Um diesen Problemen entgegenzuwirken wurden folgende Grundgedanken und Ziele vorab getroffen.

- Erhöhung der Verbrennungstemperatur

Hierdurch wird eine bessere und vollständigere Verbrennung erwartet und eine damit einhergehenden Leistungssteigerung und Schadstoffminimierung.

- Kolbenmaterial sollte Selbstschmierend sein

So soll verhindert werden, dass es durch Abriss des Schmierölfilms zwischen Kolben und Zylinderwand zu "Kolbenfressern" kommt, da die Verunreinigungen mit der verwendeten Filtertechnik nicht zu 100% vermieden werden können.

- Minimierung des Kolbenspiels

Hierfür ist ein Material mit geringer Wärmeausdehnung von Nöten. Damit kann das Kolbenspiel extrem gemindert und somit das Öl vor Verunreinigungen durch verminderten Blow by, geschützt werden. Dies wurde als häufigste Ursache für Maschinenbruch lokalisiert.

- Anpassung der Motordrehzahl auf den besten Betriebspunkt des Motors und somit Anpassung auf veränderte Gaszusammensetzung

Der Motor soll immer auf seinem optimalen Betriebspunkt für die momentan herrschende Gaszusammensetzung betrieben werden. Dies soll eine Leistungssteigerung sowie möglichst saubere Verbrennung erzielen. In einer verbesserten Verbrennung werden hier im Vorfeld die größten Effekte bezüglich der Schadstoffminimierung erwartet.

2.3 Herausforderungen // Chancen und Risiken des Vorhabens

Die Ziele aus 1.2 können mit Werkstoffen, welche als Stand der Technik zu Projektbeginn verfügbar sind, nicht realisiert werden. Um diese Ziele zu erreichen ist die Verwendung von neuen innovativen Werkstoffen Voraussetzung. Durch gründliche Recherche konnte zwar ein Material gefunden werden, welches aber bisher noch nicht im BHKW Bereich zum Einsatz kam. Erfahrungen lagen nur aus dem KFZ Bereich vor, welche als vielversprechend anzusehen sind. Da sich die Betriebsweise von BHKW Motoren grundsätzlich von KFZ Motoren unterscheidet wurden hier im Vorfeld die größten Risiken gesehen.

Zur Zweiten Projektphase wurde die Umsetzung des Drehzahlunabhängigen Betriebes als weniger schwierig betrachtet, da diese Betriebsweise bereits im Marinebereich Anwendung findet. Die dort eingesetzte Motorentechnik ist auch artverwandt mit dem BHKW Bereich. Somit liegen hier die Herausforderungen eher in der Regelsoftware um einen Netzkonformen Betrieb zu gewährleisten.

3 Projektbeschreibung

3.1 Projektablauf

3.1.1 Projektidee

Die Idee hinter dem Projekt ist die Verwendung von Metallinfiltriertem Graphit, da Graphit über die benötigten Werkstoffeigenschaften verfügt. Graphit besitzt einen sehr geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Somit ist es möglich das Kolbenspiel auf ein Minimum zu reduzieren. Durch die Eigenschaft Wärmeenergie sehr gut zu Speichern und zu Leiten ist auch von einer Erhöhung der Verbrennungstemperatur auszugehen. Die Energie aus der Verbrennung soll gespeichert und in der Kompressionsphase wieder an die Gase abgegeben werden. Durch Anpassung der Motordrehzahl soll den veränderlichen Verbrennungsparametern Rechnung getragen werden. Hierbei steht die Methanzahl und Flammengeschwindigkeit im Vordergrund. Vor allem die Flammengeschwindigkeit unterliegt bei Holzgas und anderen Schwachgasen hohen Schwankungen.

3.1.2 Projektplanung und Aufteilung

Das Projekt ist in 2 Entwicklungsstufen aufgeteilt.

In der ersten Projektphase soll der Verunreinigungsproblematik durch den Einsatz von metallinfiltrierten Karbonkolben entgegengewirkt und dies im Realbetrieb getestet werden. In der ersten Stufe soll eine drehzahlfeste Variante aufgebaut werden. Durch diese Variante sollen Einflüsse der Karbonkolben auf Ölverbrauch, Ölalterung und Motorverschleiß, sowie etwaige Auswirkungen auf den Wirkungsgrad ermittelt werden. Mit einer merklichen Wirkungsgradsteigerung wird in dieser ersten Stufe noch nicht gerechnet. Dies ist den Verbrennungsparametern des eingesetzten Schwachgases geschuldet. Es steht die technische Optimierung der Motorentechnik auf ein verunreinigtes Schwachgas im Vordergrund.

In der zweiten Stufe soll für die Verbesserung und damit einhergehende Leistungssteigerung eine drehzahlvariable Betriebsweise eines zweiten Motors realisiert werden, unter der Erhaltung des netzsynchronen Betriebs und somit der Einhaltung der vorgeschriebenen Einspeiseparameter. Hierbei werden bei veränderlicher Gaszusammensetzung und damit einhergehender Veränderung der Verbrennungsparameter, dem Gas immer die bestmöglichen Randbedingungen für eine vollständige Verbrennung geschaffen. Die Projektstufe soll auch zu einer Verbesserung der Abgaswerte führen.

Das gesamte Projekt setzt sich aus zwei Projektphasen zusammen.

- Die erste Phase hat die Optimierung der BHKW Technik auf verunreinigte Bio- und Schwachgase sowie den stabilen Realbetrieb als Ziel:
 - Ziel: Verringerung des Wartungsaufwandes und Verbesserung der Wirtschaftlichkeit durch Reduzierung des Ölverbrauchs sowie Standzeiterhöhung des Motors als Voraussetzung für eine Durchdringung des Marktes der dezentralen Erzeugung auf Basis nicht genormter, nachwachsender Rohstoffe.
- Zweite Phase: Drehzahlunabhängiger Betrieb zur besseren Brennstoffausnutzung und Schadstoffreduzierung sowie Test im Realbetrieb.
 - Ziel: Optimierung der motorinternen Verbrennung, hierdurch soll eine Erhöhung des Brennstoffausnutzungsgrades erzielt werden, mit einer Leistungssteigerung um 6%- Punkte einhergehend. Die Verminderung des Schadstoffausstoßes erfolgt durch eine verbesserte und kontrollierte Verbrennung.

Beginn 1.09.2015 erster Entwicklungsschritt

Technische Planung; Einholen von Angeboten.

Auftragsvergabe für ersten Entwicklungsschritt 1.11.2015.

Installation der 1500 U/min Variante bis Ende Dezember 2015 geplant.

Probetrieb von geplanten ca.3.500- 4.000 Betriebsstunden bis ca. 1.07.2016.

Erfassung der erreichten Parameter und Auswertung, 1.07.2016 bis 1.08.2016.

Beginn 1.08.2016 zweiter Entwicklungsschritt

Technische Planung für Drehzahlunabhängigen Betrieb; Einholen von Angeboten.

Auftragsvergabe für zweiten Entwicklungsschritt 1.09.2016

Installation des Drehzahlunabhängigen Entwicklungsschrittes ca. 1.12.2016

Probetrieb von geplanten ca.3.500- 4.000 Betriebsstunden bis ca. 1.07.2017

Erfassung der erreichten Parameter und Auswertung, 1.07.2016 bis 1.09.2017

Durch die aufgetretenen Probleme in Projektphase 1 wurde der Terminplan nicht eingehalten, und in Abstimmung mit dem Innovationsfond abgeändert. Die Meilensteine wurden beibehalten.

Definition und Terminierung von Meilensteinen

Meilenstein 1

Installation des ersten Entwicklungsschrittes bis Ende Dez. 2015.

Aufnahme des Probetriebes zum 1. Jan. 2016

Meilenstein 2

Erreichen von 3.500- 4.000 Betriebsstunden bis zum 1.07.2016

Erfassung der erreichten Parameter und Auswertung, 1.07.2016 bis 1.08.2016.

Meilenstein 3

Installation der zweiten Entwicklungsstufe zum 1.12.2016

Aufnahme des Probetriebes zum 1. Jan. 2017

Meilenstein 4

Erreichen von 3.500- 4.000 Betriebsstunden bis zum 1.07.2017

Erfassung der erreichten Parameter und Auswertung 1.07.2017 bis 1.09.2017

3.2 Projektplanung

3.2.1 Erste Schritte und Recherchen

Im Vorfeld wurden alle verfügbaren Daten gesammelt und ausgewertet um eine realistische Machbarkeit der Projektidee abzuschätzen. Hierzu wurden bereits vorliegende Ergebnisse vom Einsatz von Graphitkolben eingeholt und beurteilt. Es zeichnete sich schnell ab, dass sich durch Verwendung von reinem Graphit, der erwünschte Erfolg nicht einstellen würde. Lediglich die Verwendung von infiltriertem Material konnte als erfolgsversprechend angesehen werden. Dies liegt in den strukturellen Eigenschaften von technischen Graphiten. Diese weisen eine offenporige Struktur auf. Hierdurch können Verunreinigungen in das Material eindringen und dieses zerstören, oder die Werkstoffeigenschaften soweit verändern, dass sie nicht mehr den Anforderungen entsprechen. Durch Untersuchungen von Hochschulen und aus der Automobil- sowie BHKW Industrie konnte eine positive Beurteilung von infiltriertem Graphit erzielt werden. Als nächster Schritt erfolgte die Auswahl eines geeigneten Motors. Hier wurde in Bezug auf den Hubraum die Entscheidung auf ein höheres Hubvolumen gesetzt, damit die Ladedrücke noch in einem moderaten Bereich gehalten werden können. Damit soll die Klopfgefahr gesenkt werden, welche durch den

Wasserstoffanteil des Gases stark beeinflusst wird. In Bezug auf den Drehzahlbereich wurde bereits die Projektphase 2 berücksichtigt, da in Phase 2 Drehzahlen von max. 2.300 U/min in der Planung festgelegt wurden. Als sehr wichtiger Entscheidungspunkt wurde auch die Robustheit des Motors angesehen. Da sich gerade die zuerst genannten Punkte stark gegenseitig beeinflussen war hier eine genaue Abwägung und Vergleich unabdingbar. Eine Gasprobe wurde zur Analyse gegeben, um reale Werte für eine erste Planung und Auslegung zu Grunde zu legen.

3.2.2 Ausführungsplanung

Hier wurden die recherchierten Grundlagen zu einem Grundgerüst zusammengefügt. So entstanden Schritt für Schritt die technischen Rahmenbedingungen der geplanten Anlage.

Gas	Literaturwert	Messwert	Einheit
CO	23	25,6	[Vol %]
H ₂	18	16,4	[Vol %]
CH ₄	2	2,6	[Vol %]
CO ₂	10	9,8	[Vol %]
N ₂ (berechnet)	47	45,6	[Vol %]

Tabelle 1 Werte der Holzgasanalyse und Literaturwerte

Die gemessenen Gasbestandteile lagen in guter Näherung an den Literaturwerten und konnten daher zur Auslegung herangezogen werden. Auch beweisen diese Messergebnisse, dass mit dem verwendeten Vergaser ein Durchschnittliches Schwachgas erzeugt wird und dies nicht von der Norm abweicht. Hieraus konnten folgende Werte für das zu Grunde gelegte Gas berechnet werden.

Normdichte Holzgas	1,117	[kg/Nm ³]
Hu (unterer Heizwert)	1,648	[kWh/Nm ³]
Mindestluftbedarf	1,25	[m ³ /m ³]
Methanzahl	51	[-]

Tabelle 2 Ermittelte Kenndaten des Holzgases auf Basis der Analyse

Zu den berechneten Werten aus der Analyse muss angemerkt werden, dass die Gaszusammensetzung je nach Holzart, Verschlackungsgrad des Holzvergasers etc. starken Schwankungen unterliegt. Daher können diese Werte als gute Mittelwerte angenommen und durch den Vergleich mit Literaturwerten als real angesehen werden. Auftretende Schwankungen dürfen aber in der Auslegung nicht unberücksichtigt gelassen werden. Die ermittelte Methanzahl liegt bei 51 MZ. Gegenüber Erdgas mit etwa 90 MZ-Einheiten ist dies zwar eine deutliche Verringerung, jedoch liegt die Methanzahl des Holzgases auch deutlich über dem von Propan (33 MZ). Hieraus ergibt sich

die Folgerung, dass es durch die üblichen Verdichtungsverhältnisse von 11-12,5 bei Biogasmotoren keine Probleme geben sollten.

Motor	KW-DHM226-06-50	SiSu	YC4G180-50
Hersteller	MWM (Lizensfertigung)	SiSu	Yuchai
Hubraum	6,2	4,8	5,2
Leistung Holzgas [kW]	50-58	50	54-58 (theoretisch)
Zylinderkopf	Einzelköpfe	Ein Kopf	Ein Kopf
Laufbüchse	Nasslaufbüchse	Nasslaufbüchse (kwe) Standard trocken	Trockenlaufbüchse
Biogas/BHKW erprobt	Ja	ja	ja
Wirkungsgrad Herstellerangabe	28 (gesamtwirkungsgrad)	34%	34%

Tabelle 1 Gegenüberstellung Holzgasmotoren

Durch die Gegenüberstellung der Motoren, wurde der YC4G180-50 als geeignetste Variante ausgewählt. Diese Entscheidung wurde auch getroffen, da dieser Motor die mechanisch stabilste Kurbelwelle aufweist. Die aufgeführten Werte beruhen auf Ergebnissen, die mit Holzgas bereits erzielt oder durch Herstellerangaben ermittelt wurden.

3.2.3 Detailplanung

Hier wurde der ausgewählte Motor nochmals exakter berechnet um die mögliche erreichbare Leistung zu eruieren.

Lambda	1500 U/min		2300 U/min	
	Erdgas	Holzgas	Erdgas	Holzgas
1,5	70	58,7	102	85,3
1,6	66	56,7	96	82
1,7	62	54	90,7	78,7
Luftaufwand	0,84	0,84	0,70	0,70
eff. Wirkungsgrad	38%	34%	34%	30%

Tabelle 2 Ermittelte Kenndaten nach Herstellerangaben

Die ermittelten Werte sind nur als Richtwerte anzusehen. Gerade die Wirkungsgrade sind Herstellerangaben und werden nicht als im Realbetrieb erreichbare Werte angesehen. Hier wird von einem max. erreichbaren effektivem Wirkungsgrad von 30%, bei Holzgas, als realistisch angesehen. Die momentan verwendeten Motoren haben laut Umweltgutachter einen effektiven Gesamtwirkungsgrad von 23-24%. Hier ist bereits durch den Einsatz von Langhubmotoren eine Leistungssteigerung technisch realisierbar. Durch diese Maßnahme kann die geplante Leistungserhöhung zu 50% bereits durch die Änderung der verwendeten Motorentechnik erreicht werden.

Die extreme Leistungssteigerung bei 2.300 U/min ist durch den erhöhten Ladungswechsel begründet, welcher um den Faktor 1,5 höher liegt. Diese Werte müssen aber auch relativiert werden, da die erforderlichen Holzgas Volumenströme den Holzvergaser überfordern. Es liegen Aussagen des Herstellers vor, in denen von Holzgas Mengen für 75 kW_{el} gesprochen wird, allerdings liegen hier auch Motoren mit einem effektiven Wirkungsgrad von 30% zugrunde. Auch diese Angabe ist als Grenzwert zu betrachten, und würde im Dauerbetrieb zu Schäden und damit zum Totalausfall des Holzvergasers führen. Auch ist eine Drehzahl von 2.300 U/min als obere Grenzdrehzahl des Motors angesetzt worden, welche nicht erreicht wird, da diese Drehzahl als Grenzwert in der Steuerung hinterlegt werden muss. Dies bedeutet technisch, dass bei Erreichen dieser Drehzahl die Steuerung auf Störung geht und das Aggregat abschaltet.

Durch die doch sehr unterschiedlichen Zahlen und den noch nicht einkalkulierten Leistungsänderungen bezüglich der Graphitkolben, wurde die Generatorgröße mit 75 kW_{el} überdimensioniert. Auch trug die Entscheidung, die bestehende BHKW Steuerung in Phase 1 zu verwenden, zu dieser Entscheidung bei. Die bestehende Steuerung ist auf eine max. installierte Leistung von 80kW limitiert. Der Umbau des Leistungsteils des BHKW Schaltschranks wurde in enger Zusammenarbeit mit der Firma J.Schneider aus Offenburg realisiert und wurde nach Vorgaben von Günter Zapf durchgeführt.

Für die Kompression wurde das Originale Verhältnis von 11,5:1 beibehalten. Auch wenn hier Literaturangaben der Methanzahl von 20- 110 zu finden sind.

Abgaswärmetauscher und Abgasstrecke wurden auf die Abgasmenge von 135 [Nm³/h] Holzgas mit einem Lambdawert von 1,7 berechnet. Wobei die Tauscherfläche einen Sicherheitsfaktor von 1,8 aufweist um Leistungsreduzierung durch Verschmutzung entgegen zu wirken. Auf eine genauere Erläuterung wird an dieser Stelle verzichtet, da die Auslegung nach Stand der Technik erfolgte.

3.3 Technische Umsetzung

3.3.1 Technische Daten

Motordaten

Viertakt- Otto- Gas- Magermotor

4 Zylinder in Reihe

5,2 Liter Hubraum

1500 U/min Drehzahl, als drehzahlvariable Ausführung bis 2.300 U/min

ABB Generator	75 kW _{el} installiert Leistung (elektrisch)
Druckumlaufschmierung durch Zahnradpumpe	
Betriebsdaten Toleranz	+/- 5%
Magermotor mit Verbrennungsluftverhältnis Lambda	1,6
effektiver Mitteldruck:	12,3 bar
mittlere Kolbengeschwindigkeit:	6,6 m/s
Gesamtwirkungsgrad	ca. 90 % (bisher nur theoretisch ermittelte Werte)
mechanischer Wirkungsgrad	ca. 34 % (bisher nur theoretisch ermittelte Werte)
Schmierölverbrauch:	0,2 g/kWh (original Motor)
Verdichtungsverhältnis:	11,5 : 1
Bohrung x Hub:	112 x 132 mm
max. Abgasgegendruck:	40 mbar
Abmessungen: L x B x H	979 mm x 708 mm x 870mm
Gewicht:	630 kg

3.3.2 Anlagenbau

Der Aufbau der mechanischen Teile wie Motor und Generator wurde von Berlin-Motorsport übernommen. Hier wurde Motor und Generator bereits aufgebaut auf einem eigenen Gestell geliefert. Die Umrüstung des Motors auf Graphitkolben erfolgte bereits im Vorfeld beim Hersteller. Die Anbindung an die bestehende Steuerung sowie Anpassung der Sensorik, Steuerungsparameter etc. wurde von Günter Zapf vorgenommen.

Die elektrischen Leistungsteile wurden von der Firma J.Schneider nach Vorgabe aufgebaut und auch angeschlossen sowie geprüft.

Abgasstrecke und Wärmetauscher wurden nach Vorgabe von Günter Zapf gefertigt und aufgebaut.

3.4 Anlagenbetrieb

3.4.1 Auswertung der Betriebsergebnisse

Das verwendete Material zeigte sich im Betrieb besser als anfangs erwartet. Die zu erwartende Leistungssteigerung konnte bereits in Projektphase 1 erzielt werden. Eine große Vermessung der Anlage liegt vor. Da sich bei dieser Vermessung jedoch herausstellte, dass ein Schaden am Holzvergaser sowie Motor vorliegen muss, sind diese Ergebnisse nicht repräsentativ. Diese Ergebnisse würden den Betrachter nur in die Irre führen und werden aus diesem Grund hier nicht aufgeführt. Die Gasanalyse zeigte in diesem Versuch nur, dass das erzeugte Holzgas einen Brennwert

unter $1[\text{kWh}/\text{Nm}^3]$ aufwies, was ca. 60% vom Normalwert entspricht. Dass der verwendete Motor überhaupt mit diesem Gas betrieben werden konnte ist bemerkenswert. In dieser Testreihe wurde ein Lambda von 1,0- 1,7 durchgefahren. Hierbei zeigte sich, dass die Grenzwerte der TA Luft gerade eingehalten oder nur gering darüber waren. Hervorzuheben ist hier, dass die Abgasmessung 20 cm nach dem Turbolader ohne Verwendung von üblicher Katalysatortechnik erfolgte. Mit der Verwendung üblicher Techniken können die Werte der TA Luft ohne Probleme eingehalten werden.

Da die verwendete Messtechnik nicht permanent während der Projektphase zur Verfügung stand konnte der Wirkungsgrad nur mit einer Genauigkeit von $\pm 1\%$ ermittelt werden. Hier ergab sich bei späteren Messungen ein Wirkungsgrad von ca. 40%_{el}.

In den ganzen Versuchsreihen wurde das Grundmaterial der Kolben immer beibehalten. Änderungen erfolgten nur in Geometrie oder Anlagenparametern.

Die Testreihen zeigten im Normalbetrieb auch die erwarteten positiven Auswirkungen auf das Motorenöl. So war bei den Testreihen ohne Kolbens Schäden fast kein Ölverbrauch festzustellen. Auf eine Nachspeiseeinrichtung konnte ganz verzichtet werden. Auch wurde die Ölalterung stark reduziert. In den Ölanalysen konnten deutliche Verbesserungen in den Ölwerten ermittelt werden. Gerade in Bezug auf den TBN Wert, welcher auch als Maß für den Blow by herangezogen werden kann. Hier konnte die Ölalterung im Normalbetrieb um ca. 60% minimiert werden.

3.4.2 Aufgetretene Störungen

Die aufgetretenen Störungen sind oft gemeinsam bzw. im Zusammenhang miteinander aufgetreten. Zum besseren Verständnis werden die einzelnen Störungen und Probleme einzeln und getrennt voneinander behandelt.

3.4.2.1 Erste IBN Versuche, Abgasstrang

Nach Installation und elektrischer Verdrahtung sowie Prüfung dessen konnten die ersten Laufversuche erfolgen. Hier zeigte sich schnell dass die Abgasstrecke einer enormen Hitzeentwicklung unterlag. Hierdurch konnten keine Laufversuche gefahren werden, da jeder Start spätestens nach 60 Sekunden abgebrochen werden musste. Hier wurden die Probleme zuerst vom BHKW Hersteller in zu hohem Abgasgegendruck erkannt. Um dies zu beheben wurde die Abgasstrecke mehrfach abgeändert bis nur noch ein Gegendruck von 5mbar zu verzeichnen war. Die Temperaturprobleme konnten aber durch die Maßnahmen nicht behoben werden. Es konnte sogar festgestellt werden dass hier keine Veränderung diesbezüglich stattfand.

Die Abgasstrecke musste in einem späteren Schritt nochmals abgeändert werden. In den Versuchsfahrten zeigte sich, dass der Motor sehr starke Schallemissionen erzeugte, welche mit normaler Technik nicht zu beheben waren. Erst eine Messung ergab dass die Frequenzen bei 50 Hz Grundschiwingung und einer Oberschiwingung von 100 Hz lagen. Bei normalen Schalldämpfern beginnt der Arbeitsbereich erst bei 65 Hz. Mit Hilfe der Messergebnisse aus der Schallmessung sowie den Abgaswerten konnte ein zweistufiger einstellbarer Helmholtz Resonator von Günter Zapf ausgelegt werden.

3.4.2.2 Kompressionsverhältnis

Die Graphitkolben zeigten die gewünschte Eigenschaft der Minimierung des Blow by. Nebeneffekt war, dass die Kompressionsdrücke gesteigert waren. Hier konnten anfänglich mit der originalen Kolbengeometrie Drücke von 28bar gemessen werden. Geometrisch identische Aluminiumkolben weisen einen messbaren Druck von 18,5 bar auf (gemessen mit Kompressionsmessgerät Motometer, sowie Digitales Messgerät der Firma VW bei Anlasserdrehzahl 150 U/min). Dies hatte zur Folge, dass das Gasgemisch bei diesen Drücken zur Selbstzündung neigte, und der Motor „Dieselte“. Aus Sicherheitstechnischen Gründen musste hier ein Betriebspunkt gefunden werden, in dem die Notausfunktionen ohne Einschränkung wirksam sind. Hierzu wurde das Verdichtungsverhältnis schrittweise herabgesetzt bis der gemessene Druck auf ebenfalls bei 18,5 bar lag. Die Umsetzung erfolgte durch die Demontage der Kolben, das Abdrehen der Kolben und somit der Vergrößerung des Brennraumes. Anschließend wurden die Kolben wieder montiert, das Brennraumvolumen ermittelt, die Kompression gemessen und im Versuch getestet. Dieser Vorgang wurde etwa 10-mal durchgeführt. Es wurde das Kompressionsverhältnis von 11,5 bis 6 durchgetestet. Die Reduzierung erfolgte in 0,5er Schritten des Verhältnisses. Bei dieser Versuchsreihe zeigte sich, dass die Annahme das Graphit die Energie speichert und wieder an das Gas abgibt berechtigt war. Die Versuchsreihe zeigte auch auf, dass sich die erzielten Drücke und deren Verlauf nicht linear mit dem Kompressionsverhältnis ändern. Die gemessenen Druckveränderungen lassen sich nur unter Berücksichtigung von Wärmeenergie erklären, da diese nicht exakt linear mit der Kompressionsminderung verlaufen. In den Bildern XX ist die Bearbeitung der Kolben zu erkennen, welche nötig war um die Kompressionsspanne durchzutesten. Bild XX zeigt links den Original Kolben und rechts den Kolben mit Brennraum für einen Kompressionsdruck von 18,5bar.



Abbildung 1 Kolben der kompressionsmessung, sowie original und Graphitkolben

3.4.2.3 Gasmischstrecke

Durch Optimierung des Abgasstranges auf möglichst geringen Gegendruck, konnten die Probleme der zu heißen Abgasstrecke nicht behoben werden. Hier wurde der Fehler vom Hersteller in einem zu magerem Gemisch gesehen. Hier entstand nun die Problematik, dass keine Gasmischer für Holzgas auf dem freien Markt verfügbar sind. Also ergab sich die Notwendigkeit einen Gasmischer selbst auszulegen und zu bauen. Der entwickelte Gasmischer zeigte im Betrieb ein zufriedenstellendes Verhalten und wurde in allen Versuchen eingesetzt.

3.4.2.4 Zündpunkt, Zündung und Zündkerzen

Nach erfolgreicher Entwicklung eines funktionsfähigen Gasmischers für Holzgas, konnten die Abgasprobleme immer noch nicht behoben werden. Nach Zerlegung des Motors durch Günter Zapf, zeigte sich auf, dass die verwendete Zündung nicht mit dem installierten Zündgerät kompatibel war. Die Abstimmung vom Triggerrad auf die verwendete Zündung konnte durch Versetzen auf die richtige Gradposition behoben werden. Auch zeigten die Zündkerzen einen enormen Verschleiß am Funkenbügel auf. Durch mehrere Testreihen mit unterschiedlichen Zündkerzen verschiedener Hersteller und Wärmewerten konnten immer die gleichen Verschleißerscheinungen festgestellt werden. Hier konnte nur durch Anpassung der Zündenergie des Funkens dieser Erscheinung entgegengesteuert werden.



Abbildung 2 Abgenutzte Iridium Zündkerze

Ein zufriedenstellendes Ergebnis konnte aber auch in diesem Punkt nicht erzielt werden. Bild Nr 2 zeigt den typischen Zündkerzenverschleiß nach ca. 1.000 Betriebsstunden. Deutlich ist die einseitige Abnutzung am Funkenbügel zu erkennen, welche bei allen Zündkerzen festzustellen war. Hier wird davon ausgegangen das Gasverwirbelungen mit zu den Verschleißerscheinungen beitragen, und diese nicht ganz mit der Zündung alleine eliminiert werden können. Darauf weist auch die Art des Abtrages hin, der bei jedem Zylinder auf der gleichen Seite des Zündkerzenbügels auftrat. Die Abtragung weist eindeutig auf ein Wegblasen des Zündfunkens aus der üblichen Funkenstrecke hin. Durch diesen Abtrag wird auch die Funkenstrecke vergrößert, hierdurch wird die Neigung zum „Back Fire“ (Unkontrollierte Rückzündungen in den Ansaugtrakt) extrem gesteigert.

Durch die Versuche mit unterschiedlichen Zündenergien, sowie Zündkerzen, kam es zu einem unüblichen Kolbenschaden. In Bild 3 und 4 ist dieser Kolben zu sehen. Hier ist das Material stark angegriffen. Dies ist besonders bemerkenswert, da Graphit erst bei einer Temperatur von über 3000°C sublimiert. Hervorzuheben ist auch die Tatsache, dass der Motor trotz diesem extremen Schaden lauffähig war und nur durch höheren Ölverbrauch und geringere Leistungsabgabe auf sich aufmerksam machte. Dieser Schaden wird der Zündung zugesprochen, da solche Schäden auch bei Aluminiumkolben im Biogasbereich keine Seltenheit darstellen. Dort führen solche Schäden aber in der Regel zum Totalausfall des Motors.



Abbildung 3 Abgebrannter Kolben durch zu hohe Zündenergie



Abbildung 4 Detailansicht abgebrannter Kolben

3.4.2.5 Motorkühlung

Nach Auftreten der ersten gerissenen Kolbens, wurde das Problem vom Kolbenhersteller in zu geringer Kühlleistung am Zylinderkopf gesehen. Hierzu wurde die Motorkühlung mehrfach umgebaut. Anfangs wurde die motoreigene Wasserpumpe zur Durchströmung, wie im Biogasbereich an diesem Motor verbaut, hergenommen. Nächster Umbau war die Umrüstung der Kühlung mittels unregelter Wasserpumpe. Hierdurch war dann im nächsten Schritt die Umkehrung der Strömungsrichtung des Wasserkreislaufes möglich. Dadurch konnte der Kopf zuerst angeströmt werden, um eine möglichst gute Kopfkühlung zu gewährleisten. Diese Umbaumaßnahmen beinhalteten auch die Anpassung der Sicherheitstechnik der BHKW Steuerung.

3.4.2.6 Ölkühlung

Durch den Umbau des Wasserkreislaufes musste auch die interne Ölkühlung geändert werden. Diese wurde auf einen externen Ölkühler umgebaut. Auslegung und Umbau stellten in diesem Punkt kein

Problem dar, da hier auf verfügbare Bauteile und Technik zurückgegriffen werden konnte. Somit konnte auch ausgeschlossen werden dass die Öltemperatur, wie anfangs vom Hersteller vermutet, zu hoch ist. Dies könnte auch zu den aufgetretenen Schäden, durch zu geringe Viskosität bzw. Verkohlungen, geführt haben.

3.4.2.7 Kolbensschäden

In der sich lange hinziehenden IBN Phase war es nötig, die vorab genannten Probleme und Umbaumaßnahmen zu erkennen und umzusetzen. Erst mit Behebung dieser Schwierigkeiten konnte der richtige Probetrieb beginnen. Nach etwa 1.000 Betriebsstunden wurde eine Abgas- und Holzgasmessung durchgeführt. Diese Messung zeigte dass ein Schaden am Motor vorliegen muss. In diesem Zuge wurde der erste gerissene Kolben ermittelt. Später kam es immer wieder zu gerissenen Kolben.



Riss durch den ganzen Kolben vom Bolzenauge ausgehend bis in den Brennraum.

Abbildung 5 Gerissener Kolben

Hierbei war das auftretende Schadensbild immer das gleiche. Der Kolben wurde durch Wärmeausdehnung des Kolbenbolzens gesprengt. Auffallend hierbei war, dass die Rissausbildung sowie die Laufzeit bis zum nächsten Schaden identisch waren. Die Rissausbildung war immer vom Kolbenbolzenauge nach oben wo der Kolben die größte Materialstärke aufweist. Auch waren die Laufzeiten zwischen zwei gerissenen Kolben immer in etwa 750-800 Betriebsstunden. Dies konnte nur durch empirisches Ausprobieren der Fertigungstoleranzen eliminiert werden. Bemerkenswert an diesen Schäden ist die Tatsache, dass der Motor immer funktionsfähig war. Das Erkennen erfolgte immer über die Feststellung, dass ein Ölverbrauch vorhanden war. Bei einer Rissbildung kommt es zu „Blow by“ durch den Riss und somit zu einer Steigerung des Gasstromes der Kurbelgehäuseentlüftung, welcher eine merkliche Erhöhung des Ölverbrauches zur Folge hat. Lokalisierung konnte dann anschließend nur durch Kompressionsmessung und Demontage erfolgen.

3.4.2.8 Ringfresser

Die aufgetretenen Ringfresser an den Laufbüchsen traten wie die gerissenen Kolben auch immer in einem gleichen Zeitintervall auf. Die ersten Laufschäden konnten nach 1.000 Stunden festgestellt werden. Auch war systematisch, dass die Schäden eindeutig im Bereich des Ölabbstreifringes auftraten. Nach etwa weiteren 500 Std war der Schaden so groß, dass ein Ersetzen der Laufbüchse

nötig wurde. Dieser Schaden trat aber nicht an allen Laufbüchsen gleichzeitig auf. Die Schäden waren immer an einzelnen Zylindern, und traten auch immer an einem anderen Zylinder auf. Dieses Schadensbild konnte somit nicht mit Einströmerscheinungen oder durch interne Vorgänge im Motor erklärt werden. Die Ursache ist im Ölkreislauf sowie Kühlkreislauf zu vermuten.

Hier besteht der eigentliche noch nötige Entwicklungsbedarf zur vollständigen Entwicklung der Kolben für den Dauereinsatz.

3.4.3 Schlussfolgerung und Erkenntnisse der Probleme

Hier wird zum leichteren Verständnis auf die in 3.4.2 aufgeführten Punkte einzeln eingegangen.

3.4.3.1 Anpassung Abgasstrecke

Die Anpassung der Abgasstrecke stellte sich im Nachhinein als nicht notwendig heraus. Die getätigten Umbauten wirken sich aber für einen weiteren Betrieb nicht negativ aus. Das eingesetzte BHKW besitzt nun einen eigenen Abgaswärmetauscher mit, um den Faktor 2, überdimensionierter Abgasstrecke. Dies beeinflusst spätere Wartungsarbeiten positiv, und es wurde schon der Grundgedanke gefasst, auch die anderen BHKW genauso umzubauen.

Lediglich die Installation des Helmholtz Resonators zur Schallemissionsminderung war nicht durch andere Technik zu realisieren.

3.4.3.2 Gasmischer Eigen Konstruktion

Hier wurde ein Ringgasmischer konstruiert, welcher mehrere Reihen von Einmischbohrungen besitzt. Größte positive Eigenschaft des Mischers ist die leichte Demontage, so dass dieser einfach und schnell zu reinigen ist. Momentan wird von Herstellern die Gas Mischung so vorgenommen, dass die Gasströme lediglich mit 2 Leitungen zusammengeführt werden. Die Durchmischung erfolgt durch den Turbolader. Bei Saugmotoren sind aber Effekte an den Zylindern durch schlechte Gasmischung feststellbar. Dies kann als Weiterentwicklung der bestehenden Technik aufgefasst werden, welche auf andere Anlagen übertragbar ist. Diese Effekte müssten an einem Saugmotor nochmals überprüft werden. Da die eingesetzten Motoren alle Turboaufladung besitzen, konnten diese Effekte bisher nicht selbst verifiziert werden.

3.4.3.3 Ermittlung der geeigneten Zündenergie wegen Beeinflussung der Zünd- und Brenneigenschaften

In diesem Punkt konnten enorme Erkenntnisse gewonnen werden. Die Tests mit Zündkerzen verschiedenster Hersteller zeigten extreme Unterschiede in den Qualitäten und Eignung auf. Für eine gute Zündung bei Holzgas kann hier die Empfehlung zu einer Zündung gemacht werden, welche intern einen Fehlerspeicher besitzt und Zündkerzenbruch oder Verschleiß detektieren kann. Solche Zündanlagen sind am Markt verfügbar, bilden aber das obere Preissegment ab. Diese Zündungen sind auch in der Lage genügend Einstellparameter zur Verfügung zu stellen. Dies ist die Grundvoraussetzung dafür, einen Motor für ein veränderliches Schwachgas einzustellen. Hierbei kann auch der festgestellte Zündkerzenverschleiß minimiert oder sogar eliminiert werden, obwohl diese Geräte eine deutlich höhere Zündenergie aufweisen. Deutlich zeigen sich hier die Auswirkungen von Zündgerät, Spule und Zündkerze. Bei den Zündkerzen geht die Empfehlung

Richtung Vorkammerkerzen, wie im Biogasbereich oft üblich. In diesem Punkt führt der hohe Preis dieser Kerzen und die mangelnde Verfügbarkeit allerdings zu einer Kompromisslösung, da Vorkammerkerzen meist nur für Großmotoren verfügbar sind.



Abbildung 6 Zündkerzen Alternative

Bild Nr.6 zeigt eine Zündkerze, die als gute Alternative angesehen werden kann. Diese ist technisch zwischen Vorkammer und üblicher Zündkerze anzusiedeln. Preislich ist sie wie übliche Iridium-Zünderkerzen am Markt verfügbar. Diese Zündkerzen wurden bei den bisher verwendeten GM Motoren bereits mit Erfolg getestet.

3.4.3.4 Umbau der Motorkühlung insbesondere Kopfkühlung

Durch die Anströmung über den Zylinderkopf konnte die Kühlung des Kopfes und des Motors verbessert werden. Auswirkungen waren besonders in einem leichten Anstiege des Öldruck bemerkbar (0,1-0,2 bar). Dies weist auf eine leicht höhere Viskosität des Öls hin, wodurch der Druck leicht steigt. Dies hat auch zur Folge, dass die Ölalterung etwas gesenkt wird. Diese Effekte sind aber bei Holzgasmotoren besonders ausgeprägt. Holzgas besitzt durch seine Gaszusammensetzung die Eigenschaft besonders heiß zu Verbrennen. Dies hat eine besondere thermische Belastung des Motors zur Folge. Ob diese Umrüstung bei herkömmlichen Gasmotoren zu einer nennenswerten Verbesserung führt ist daher fraglich. Hier wird davon ausgegangen, dass diese Maßnahme bei Holzgasmotoren Sinn machen kann, bei herkömmlichen Motoren aber nicht von Nöten ist.

3.4.3.5 Gerissene Kolben

Nach Behebung der der aufgeführten Probleme konnte mit erheblicher Planverzögerung endlich der Probetrieb aufgenommen werden. Dieser zeigte, dass die meisten angestrebten Ziele bereits alleine mit dem Umbau der Kolben realisierbar waren. In Folge der ersten Abgasmessung, wurde erst erkannt, dass ein Schaden am Motor vorliegen musste. Bemerkenswertes Fazit der ganzen Kolbenschäden ist, dass der Motor immer Funktionsfähig war; Schäden konnten nur anhand des Ölverbrauchs oder im Fall des Zündungsschadens an der Leistung detektiert werden. Gerade letzterer zeigt die guten Notlaufeigenschaften des Materials auf. Mit herkömmlichen Werkstoffen wäre ein Totalschaden des Motors unausweichlich gewesen. Bei dem „abgebrannten“ Kolben war ein Ersetzen der Laufbüchse nicht nötig und es reichte aus diesen durch einen Neuen zu ersetzen.

3.4.3.6 Kolbenschäden (Ringfresser)

Die aufgetretenen Kolbenschäden traten in zwei Erscheinungsbildern auf. Erstes waren die gerissenen Kolben, welche durch großen Aufwand und intensive Toleranzermittlung am Kolbenbolzenauge eliminiert werden konnten. Eine weitere technische Verbesserung wäre hier die

Verwendung eines Kolbenbolzenmaterials, welches in der Wärmeausdehnung günstigere Eigenschaften aufweist.

Die zweite Schadenserscheinung zeigt sich jedoch technisch als größere Herausforderung. Da hier Ringfresser im Bereich des Öl Abstreifringes auftreten. Bei diesen Schäden ist die Ursache nicht so eindeutig wie bei den gerissenen Kolben. Hier trat zwar auch in regelmäßigem Abstand von ca. 1.500 Betriebsstunden immer der gleiche Schaden auf, die technische Kuriosität aber war, dass immer andere Laufbuchsen betroffen waren. Auch hatten die Laufbuchsen ohne Beschädigung oft mehr Laufstunden als die Beschädigten. Die Betriebsstunden der beschädigten Laufbuchsen waren immer unterschiedlich, lediglich die Zeitspanne wann der Schaden auftrat war regelmäßig.

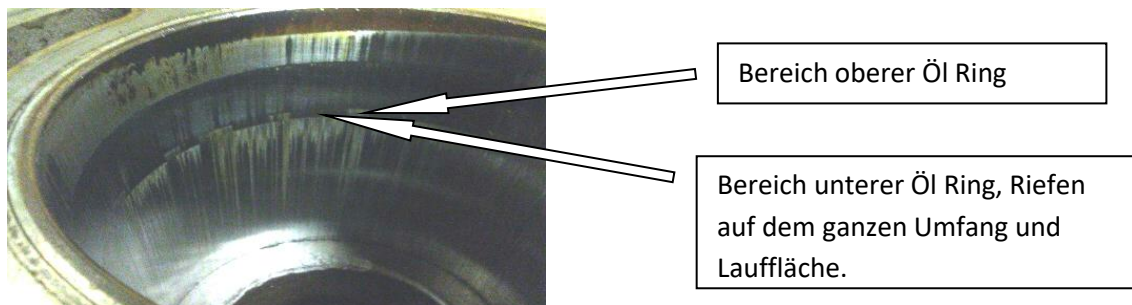


Abbildung 7 Ringfresser

In Bild 7 sind die aufgetretenen Riefen deutlich zu sehen. Auch ist hier gut zu erkennen, dass die meisten im Bereich des unteren Öl-Rings entstanden. Nur an einzelnen Stellen waren diese auch am oberen Öl-Ring zu sehen. Auch dies ist technisch nicht ganz erklärbar, da der obere Ring auch über die Beschädigungen gleitet, und somit das gleiche Schadensbild des Unteren aufweisen müsste. Das Phänomen zu lösen ist die größte Herausforderung um die Graphitkolben zum Dauerbetrieb zu bekommen. Hier wurden bereits Fachfirmen mit in die Schadensanalyse einbezogen. Diese Art der Weiterentwicklung übersteigt aber die Möglichkeiten dieses Projektes. Aus diesem Grund wurde in Abstimmung mit dem Innovationsfond das Projekt an dieser Stelle beendet. Weitere Schritte wurden zwar schon mit den Fachfirmen abgestimmt, die Art des weiteren Vorgehens muss aber noch abgeklärt werden, da hierfür eine noch speziellere Laborumgebung gegeben sein müsste als zur Verfügung steht.

3.4.3.7 Projektphase 2

Durch die extreme Zeitverzögerung der IBN in Phase 1 und den ersten sehr vielversprechenden Ergebnissen aus dieser Phase, wurde Planung und Umsetzung von Phase 2 in den Meilensteinen etwas vorgezogen. Da fast alle aufgetretenen Probleme in Phase 1 lokalisiert und diese auch behoben werden konnten und die Probleme in Phase 2 nicht mehr im technischen Bereich gesehen wurden. In der Vorabplanung zeigte sich, dass viele Arbeiten von Günter Zapf selbst übernommen werden mussten. Dies betraf besonders die Kernaufgabe in der Programmierung. Hier wurden alle Regel und Steuerkreise von Günter Zapf definiert. Auch beinhaltet dieses Arbeitspaket sämtliche Vorgaben zur Steuerung und deren Umsetzung bis hin zur Physikalischen Umsetzung im Schaltschrank. Durch dieses doch sehr umfassende Arbeitspaket wurden die Eigenleistungen weiter gesteigert. Diese Arbeiten beinhalten die ganzen Vorschriften zur Netzeinspeisung sowie BHKW Aufbau und Betrieb. Eine genaue Auflistung würde den Umfang dieses Berichts gänzlich sprengen. Aus diesem Grund wird auf ein genaues Eingehen verzichtet. Diese Entscheidung wurde auch

getroffen, da dieses Arbeitspaket die technische Umsetzung der Vorschriften beinhaltet, und dies als normale Ingenieurstätigkeit angesehen wird.

3.5 Ökologischer Nutzen

3.5.1 Einsparung an Primärenergie

Bei KWK Anlagen ist prinzipiell mit keiner Primärenergieeinsparung zu rechnen. Da hier bereits Strom und Wärme einer Nutzung zugeführt wird und die Verwendung dieser Technik zu einer Verschiebung der Nutzenergien in Richtung der Stromproduktion führt. Bei EEG Anlagen, welche keine gute oder überhaupt keine Wärmenutzung aufweisen, ist durch die Steigerung der Stromausbeute eine Reduktion der Einsatzstoffe zu erwarten. Hier liegt der Grund in der Deckelung der Stromeinspeisung durch das EEG Gesetz. Solche Anlagen könnten durch Reduzierung der Einsatzstoffe die gleiche Einspeisemenge erzielen. So steigt nicht nur die Wirtschaftlichkeit sondern es wird auch die Reduzierung von Primärenergie erreicht. Gerade hier werden auch Chancen gesehen, da besonders bei Biogasanlagen die Konkurrenz von Energiepflanzenanbau und Nahrungsmittelanbau kontrovers in der Bevölkerung diskutiert wird. Hier könnte diese Technik zur Minderung dieses Interessenkonflikts beitragen.

3.5.2 Reduktion der CO₂-Emissionen

Die Potentiale der CO₂ Reduktion sind bei dieser Technik erst in der Folge erkennbar. Gerade bei Anlagen ohne oder schlechter Wärmenutzung, wie bei vielen Kläranlagen oder Biogasanlagen auf der „grünen Wiese“, hat die Verschiebung in der Energieumwandlung in Richtung Strom zur Folge, dass mehr regenerativer Strom im Netz verfügbar ist. Da Strom aus solchen Anlagen von den Netzbetreibern als Regelenergie angesehen wird, könnte dies zur Reduzierung der eingesetzten Regelenergie aus Fossilen Brennstoffen führen und zur Netzstabilität beitragen. Beide Punkte sind in Bezug auf die Energiewende Schlüsselpunkte um diese technisch Umzusetzen.

3.6 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit

3.6.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten konnten nicht in dem geplanten Rahmen gehalten werden. Grund hierfür waren die auftretenden Probleme. Daher weicht der reale Invest von dem Geplanten ab. Auch sind hier Kosten durch Mindereinnahmen durch Stillstands Zeiten anzumerken, welche in diesem Umfang nicht in der Planung enthalten waren.

3.6.2 Betriebskosten

Eine übertragbare Aufstellung von Betriebskosten kann an dieser Stelle nicht getroffen werden, da sich das Projekt stark in die Grundlagenforschung verlagerte. Die benötigten Betriebskosten können daher nicht direkt auf andere Anlagen übertragen werden.

Hier kann nur angefügt werden, dass ein deutlich verminderter bis fast gar kein Ölverbrauch im Normalbetrieb festzustellen war. Auch wies die Gesamtanlage in diesem Betrieb ein deutlich stabileres Betriebsverhalten auf. Wodurch auch die Wartungszeiten des Holzvergasers sich deutlich reduzierten. In den Normalbetriebsphasen wurden fast immer Betriebsstunden von ca. 750-800 Std. ohne Störung absolviert. Diese Phasen wurden dann immer von einer der aufgelisteten Störungen in

2.4.2 beendet. Dies betraf jedoch immer den Motor, an der Holzvergasungsanlage vielen meist keine besonderen Wartungsarbeiten an. Hier beschränkten sich die Tätigkeiten meist auf übliche Kontroll- und die regelmäßigen Wartungsarbeiten. Hier zeigte sich eindeutig eine Verbesserung des Vergasungsprozesses durch die neue Motorentechnik. Dieser doch sehr positive Effekt wird auf die Motorauswahl zurückgeführt, hier zeigt sich das gerade bei Holzvergasungsanlagen eine gute Abstimmung von Vergaser und Motor einen sehr wichtigen Punkt darstellen. Hier konnte sehr viel Fachwissen bei Günter Zapf aufgebaut werden.

3.6.3 Verbesserung der Wirtschaftlichkeit

Im Versuchsbetrieb konnten die angestrebten Ergebnisse erzielt werden. Zu einer dauerhaften verbesserten Wirtschaftlichkeit kam es aber leider durch die aufgetretenen Probleme nicht. Wäre ein konstanter Dauerbetrieb realisierbar könnten die angestrebten Ziele, in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des Projekts, erreicht werden.

Die aufgeführten Potentiale zeigen aber eine eindeutige Steigerung der Wirtschaftlichkeit auf, wenn die Probleme an den Ringzonen behoben werden können.



Abbildung 8 Messung Energieanalysator Fluke

In Bild 8 ist ein erzielter Extremwert gezeigt. Hier muss angefügt werden, dass die Maschine kurz danach gedrosselt wurde, da bei diesen Werten die Kompensation nicht ausreichend war und der Generator überbelastet wurde. Die Abbildung dient nur dazu das mögliche Potential aufzuzeigen. Als Messgerät diente ein Fluke Energieanalysator. Im Normalbetrieb wurde das BHKW auf eine Durchschnittsleistung von max. 72kVA eingestellt, jedoch bei verbessertem cosPhi. Somit konnte eine Dauerlast im Mittel von 65-67 kW_{el} erzielt werden. Diese Leistung wurde für alle Versuche beibehalten und ist im Bericht als Normalbetrieb bezeichnet. Für eine noch bessere Wirkleistungsausbeute sollte eine Blindstromkompensationsanlage für das Verbundsystem installiert werden. Dies ist aber nicht umfang dieses Projektes.

4 Wirkung der Umsetzung

4.1 Auswirkungen auf den zukünftigen Betrieb

Da die Ringfresser als einziges Problem noch nicht gelöst sind, wurden Lösungsansätze gesucht. Sollte dies mit Hilfe der Hersteller nicht behoben werden können, muss ein Umrüsten auf herkömmliche Aluminiumkolben angedacht werden. Hierdurch kann ein dauerhafter Betrieb der BHKW Anlage

wieder hergestellt werden. Durch das im Laufe des Projektes erworbene Fachwissen ist es möglich einen stabileren und wirtschaftlicheren Betrieb auch ohne Graphitkolben zu realisieren.

4.2 Übertragbarkeit der Projektergebnisse

Die Erfahrungen und Ergebnisse sind durchaus auf andere Anwendungsbereiche übertragbar. Hier muss angeführt werden, das Holzgas in Bezug auf Gasreinheit, Gaszusammensetzung, Brennwert, Zündfähigkeit sowie Brennverhalten etc. als der schlechteste Brennstoff für eine Kolbenmaschine angesehen werden kann. Daraus ergibt sich die Behauptung, dass die Ergebnisse mit anderen üblichen Brennstoffen auch erreichbar sind und die Probleme dabei weitaus geringer ausfallen sollten. Der Einsatz von Holzgas kann also als „Worst Case“ angesehen werden und alle anderen Einsatzgebiete als weitaus einfacher zu behandeln.

Auch ist das gewonnene Fachwissen, welches von Günter Zapf angesammelt wurde zu erwähnen. Hier handelt es sich um allgemeines Spezialwissen, welches unabhängig der Graphitkolben eingesetzt werden kann.

5 Öffentlichkeitsarbeit

5.1 Führungen und Vorträge

Laienführungen wurden noch nicht durchgeführt. In Expertenkreisen machte das Projekt aber seine Runde und stieß auf großes Interesse, über die Landesgrenzen Deutschlands hinaus. Hier wurden sogar Besuchergruppen aus Japan und China begrüßt, welche mittlerweile das Projekt mit großem Interesse verfolgen. Gerade aus China sind die Interessen sehr groß, da durch diese Technik viele Umweltprobleme durch Abgase entschärft werden könnten. Die Effizienzsteigerung steht hier gar nicht im Fokus.

Deutschlandweit erzielte das Projekt bei Herstellern von BHKW's und Notstromaggregaten Aufmerksamkeit. Auch hier stehen die positiven Effekte in Bezug auf die Abgaswerte im Vordergrund, da die Bestimmungen für die Abgaswerte auch einer Verschärfung unterliegen. Mit dieser Technologie wäre eine Einhaltung der verschärften Regelwerke in Zusammenhang marktüblicher Abgasreinigungstechnik auch in Zukunft durchführbar.

Bemerkenswert an dieser Resonanz ist jedoch das bisher keine aktive Werbung für das Projekt stattfand, sondern die Personen durch „Mundpropaganda“ aufmerksam wurden, und sich dieser Effekt anscheinend bis nach China und Japan erstreckt.

6 Zusammenfassung/Fazit

Die gesteckten Ziele in Bezug der Wirkungsgrad Steigerung konnten trotz der erheblichen Probleme übertroffen werden. Die erreichten Werte von 40% elektrischer Wirkungsgrad entsprechen weder

der momentanen Technik, noch ist dies mit dieser bei Schwachgasen überhaupt erreichbar. Dies zeigt das enorme Potential des verwendeten Materials auf. Auch konnten die Abgaswerte erheblich verbessert werden, obwohl die Rahmenbedingungen für die Messung als nicht optimal bezeichnet werden konnten. Für eine Weiterentwicklung sollte ein Motoren- oder BHKW Hersteller, mit Realteststand, integriert werden, da sich im Realbetrieb gänzlich andere Ergebnisse zeigten als die Untersuchungen anderer Stellen im Vorfeld ergaben. Hier wurde das Material auf Motorenprüfständen bereits über eine ganze Motorenlebenszeit getestet. Hier zeigt sich der Unterschied zwischen Labor und Realbetrieb. Eine weitere Entwicklung sollte daher weiterhin unter Realbedingungen erfolgen.

Das umfangreiche Wissen welches in den Versuchsreihen aufgebaut werden konnte wird momentan anderen Betreibern zur Verfügung gestellt. Hier können gerade in Bezug auf die richtige Motorenauswahl einige Probleme im Feld behoben werden. Die positiven Effekte auf die Vergasung konnten dadurch bestätigt werden, auch ohne Verwendung von Graphitkolben. Auch konnten die gewonnenen Erkenntnisse im Bereich der Zündanlage bei anderen Betreibern eingesetzt werden.

Durch die Verlagerung des Projektes in Richtung Grundlagenforschung konnte ein enormes Wissen aufgebaut werden, welches anderen Anlagenbetreibern prinzipielle Lösungsansätze liefert. Ein Wissenstransfer hat bereits begonnen, wodurch momentan Anlagen mit verbesserter Motorentechnik mit höherem Wirkungsgrad ausgerüstet werden. Hier werden viele der gewonnenen Erkenntnisse weitergegeben. Dies betrifft momentan den gesamten Bereich der gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen, außer den Graphitkolben. Was aber letztendlich doch zu einer höheren Verfügbarkeit, Effizienz und somit Wirtschaftlichkeit führt.

7 Ausblick

In dem Projekt konnten die gesteckten Ziele, bezüglich der Leistungssteigerung und dem Abgasverhalten, als technisch realisierbar dargestellt werden. Die aufgetretenen Probleme konnten alle, bis auf die Ringfresser, behoben werden. Für dieses Problem benötigt es aber weiterer Untersuchungen und Entwicklung, da diese Thematik nicht als trivial angesehen werden kann. Hier spielen viele Faktoren zusammen, Ölkühlung, Kolbenkühlung, Öl Spezifikationen etc. In diesem Punkt wurden schon spezialfirmen kontaktiert und zur Problemlösung einbezogen. Sollte dieser Punkt auch einer technischen Lösung zugeführt werden, steht dem Dauereinsatz von Graphitkolben bei BHKW Anlagen nichts mehr im Wege.

8 Anlage: Projekterkenntnisse

Darstellung drei wesentlicher Erkenntnisse aus dem Projekt.

(Je Punkt maximal 300 Zeichen.)

1.	Die prinzipiellen positiven Eigenschaften konnten aufgezeigt werden. Hier sind besonders die Verbesserte Verbrennung und einhergehende Abgaswerte hervorzuheben. Durch diese Eigenschaft kommt es auch zu einer Verschiebung im Wirkungsgradverhältnis in Richtung der Stromproduktion. Dies ist vor allem an Standorten interessant wo keine geeignete Wärmeabnahme besteht. Es zeigte sich auch im Normalbetrieb ein verminderter Ölverbrauch.
2.	Grundlegende Probleme von Graphitkolben konnten erkannt und behoben werden. Dies ist besonders in den benötigten Fertigungstoleranzen zu sehen. Diese Werte sind für eine weitere Entwicklung und Verwendung als einer der wichtigsten Punkte anzusehen. Es besteht aber weiterhin Entwicklungsbedarf im Bereich der Kolbenringe, da diese momentan einen Dauerbetrieb, und somit weiteren Einsatz, verhindern
3.	Das gewonnene Fachwissen durch das Projekt kann im Bereich von Holzgas als sehr umfassend bezeichnet werden. Hierdurch können Lösungsansätze und Verbesserungen anderen Betreibern durch Günter Zapf bereitgestellt werden. Da dieses Wissen über den Bereich der Graphitkolben hinausgeht, können die zusätzlichen Erkenntnisse auf andere Anlagen und Technik übertragen werden.