

SCHWACHSTELLENANALYSE AN BHKW-VERGASERANLAGEN

SCHLUSSBERICHT

Ingmar Schüßler, Dieter Bräkow, Konrad Treppe
Bert Salomo, Tobias Zschunke

Gefördert durch die Fachagentur nachwachsende Rohstoffe



Förderkennzeichen 22009106

Herausgegeben von

**Technische Universität Dresden
Institut für Energietechnik**

Ingmar Schüßler, Dieter Bräkow, Konrad Treppe

in Zusammenarbeit mit:

**Hochschule Zittau/Görlitz
Kraftwerks- und Energietechnik**

Bert Salomo, Tobias Zschunke

mit Förderung des Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft
und Verbraucherschutz (BMELV, FKZ 22009106).

Das BMELV und der Projektträger FNR, Gülzow
haben die Erstellung fachlich begleitet.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.

Dresden, 26.02.2009

Die Autoren danken den Mitarbeitern der FNR und den
Anlagenbetreibern für die wertvolle Zusammenarbeit
und die fruchtbaren Diskussionen.

Kontakt:

Prof. Dr.-Ing. Tobias Zschunke; TZschunke@hs-zigr.de
Hochschule Zittau/Görlitz - FG Kraftwerks- und Energietechnik
www.hs-zigr.de

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	- 3 -
Symbolverzeichnis.....	- 6 -
Kurzfassung.....	- 8 -
1 Vorwort.....	- 10 -
2 Projektdurchführung	- 13 -
2.1 Besonderheiten des Projekts	- 13 -
2.2 Methodik und Durchführung der Projektarbeit.....	- 14 -
3 Projektergebnisse	- 19 -
3.1 Ist-Stand der HGM-BHKW-Technologie	- 19 -
3.2 Physikalisch-Chemische Zusammenhänge bei Trocknung und Vergasung.....	- 22 -
3.2.1 HHS-Trocknung	- 23 -
3.2.2 Beherrschung/ Modellierung der Vorgänge in der Reaktionszone.....	- 25 -
3.2.3 Zusammenhang Luftzufuhr-Wassergehalt-Temperatur-Teerbildung ..	- 26 -
3.3 Ergebnisse aus den Messkampagnen	- 27 -
3.3.1 Energetische Bewertungskriterien	- 27 -
3.3.2 Allgemeine Mess- und Auswertungsergebnisse	- 33 -
3.3.3 Spezielle Mess- und Auswertungsergebnisse.....	- 34 -
3.3.3.1 Anlage 7A	- 35 -
3.3.3.2 Anlage 7B	- 39 -
3.3.3.3 Anlage 7C.....	- 43 -
3.3.3.4 Anlage 7D	- 46 -
3.3.3.5 Anlage 7E.....	- 49 -
3.4 Schwachstellen im Zusammenhang mit der Funktionstüchtigkeit.....	- 52 -
3.4.1 Brennstoffaufbereitung und -Trocknung.....	- 52 -
3.4.2 Kontinuierliche Brennstoffzuführung und -weiterleitung	- 56 -
3.4.3 Gasführung	- 58 -

3.4.4	Materialprobleme	- 58 -
3.4.5	Gasreinigung	- 59 -
3.4.6	Motor	- 59 -
3.4.7	Planung und Ausführung des Gesamtsystems	- 59 -
3.4.8	Betriebsführung	- 60 -
3.5	Sicherheit und Gesundheitsschutz	- 60 -
3.6	Schlussfolgerungen zur Mess- und Analysemethodik	- 62 -
3.7	Wirtschaftlichkeit	- 63 -
3.7.1	Aufgabenstellung	- 63 -
3.7.2	Randbedingungen der ökonomischen Bewertung	- 63 -
3.7.3	Sensitivitätsuntersuchungen zur Wirtschaftlichkeit	- 65 -
3.7.4	Diskussion Ergebnisse	- 79 -
4	HGM-BHKW im energiewirtschaftlichen und gesellschaftlichen Umfeld	- 80 -
4.1	Vorbemerkungen	- 80 -
4.2	Relevanz kleiner KWK-Konzepte und Bedeutung des Wärmeabsatzes	- 80 -
4.3	HGM-BHKW im Spektrum von KWK-Technologien für kleine und kleinste Leistungsbereiche	- 81 -
5	Schlussfolgerungen	- 83 -
5.1	Schlussfolgerungen für Interessenten	- 83 -
6	Künftige Entwicklungskosten	- 86 -
7	Literatur	- 87 -
	Abbildungsverzeichnis	- 88 -
	Anhang A Kurzbeschreibung Anlage Gräbner	- 90 -
	Anhang B Kurzbeschreibung Anlage Joos	- 93 -
	Anhang C Kurzbeschreibung Anlage Qalovis	- 96 -
	Anhang D Kurzbeschreibung Anlage SCHMIDT	- 99 -
	Anhang E Kurzbeschreibung Anlage DreBe	- 102 -
	Anhang F Kurzbeschreibung Anlage ENTEC	- 105 -

Anhang G Kurzbeschreibung Anlage Kuntschar.....	- 108 -
Anhang H Kurzbeschreibung Anlage Ankur.....	- 111 -
Anhang I Kurzbeschreibung Anlage BE-Sys.....	- 114 -
Anhang J Kurzbeschreibung Anlage Mothermik.....	- 117 -
Anhang K Kurzbeschreibung Anlage Biomass.....	- 120 -
Anhang L Kurzbeschreibung Anlage BISEA.....	- 123 -
Anhang M Statistischer Überblick zur Anlagenentwicklung.....	- 126 -

SYMBOLVERZEICHNIS

Abkürzungen

BHKW	Blockheizkraftwerk
BS	Brennstoff
BtL	Biomass to Liquid, Herstellung flüssiger synthetischer Kraftstoffe aus Biomasse
HGM-BHKW	Holzgas-Motor-BHKW
HHS	Holzhackschnitzel, Holzpartikel in einer Schüttung
hl	Hektoliter
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWS	Kohlenwasserstoffe
TS-Anteil	Trockensubstanzanteil, Anteil der trockenen Masse in einem feuchten Feststoff
Abkürzungen im Teil Wirtschaftlichkeit	Die im Teil Wirtschaftlichkeit verwendeten Abkürzungen und Symbole sind dort erläutert.

Formelzeichen

h	kJ/kg	spezifische Enthalpie
H_u	MJ/kg bzw. MJ/m_N^3	Heizwert von Brennstoff oder Produktgas
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massestrom
p	kPa	Druck
P	kW	Leistung (hier meist elektrische Leistung)

Q	MJ bzw. kWh	Wärmemenge
\dot{Q}	kW	Wärmestrom
t	°C	Celsiustemperatur
\dot{V}	m_N^3/s	Volumenstrom
W	MJ bzw. kWh	Arbeit (hier meist elektrische Arbeit)
x	kg_{H_2O}/kg_{Lu}	Wassergehalt – Verhältnis Masse Wasserdampf zu Masse trockener Luft
η	- bzw. %	Wirkungs- und Nutzungsgrad
λ	-	Sauerstoffverhältnis (angebotene Sauerstoffmenge geteilt durch stöchiometrisch benötigte Sauerstoffmenge bei vollkommener und vollständiger Verbrennung)
φ	%	relative Luftfeuchte, $\varphi = 100\%$ heißt, der Sättigungszustand der Luft ist erreicht

Indizes

el	elektrisch
H	Heizung (hier Nutzwärme für Heizzwecke)
Lu	trockene Luft
N	Normzustand ($p_N = 101,325 \text{ kPa} / t_N = 0^\circ\text{C}$)
th	thermisch (bezogen auf Wärme)
V	Vergaser

KURZFASSUNG

Der Einsatz von Biomasse zur Nutzwärmebereitstellung und damit zur Verdrängung von fossilen Brennstoffen aus diesem Sektor ist von hohem energievolkswirtschaftlichem Wert. Dieser kann durch die gekoppelte Stromerzeugung noch gesteigert werden. Eine der möglichen Technologien, um Biomasse für die gekoppelte Wärme- und Stromerzeugung (KWK) zu nutzen, ist die thermochemische Vergasung mit anschließender Nutzung des Produktgases im Verbrennungsmotor (Vergaser-BHKW-Anlagen). Es besteht die Notwendigkeit, dass mindestens eine KWK-Technologie für trockene Biomasse für Anlagengrößen unter $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ installierte elektrische Leistung möglichst schnell Marktreife und damit Verbreitung in der Fläche erreicht. Die Voraussetzungen dafür haben sich für die Vergaser-BHKW-Technologie in den letzten drei Jahren stark verbessert.

Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes wurden Anlagen untersucht, die Benutzungsdauern von 4000 Stunden und mehr aufzuweisen haben. Es wurden vierundzwanzigstündige messtechnische Vor-Ort-Untersuchungen an mehreren kommerziell betriebenen Anlagen zur Analyse aller In- und Outputs sowie wichtiger anlageninterner Größen durchgeführt. Auf der Basis der gewonnenen Daten erfolgte eine Bilanzierung. **Die wirtschaftliche Machbarkeit der Technologie wurde durch positive Einzelfälle bestätigt.** Das wirkliche Erreichen wirtschaftlicher Betriebsweise ist dann möglich, wenn - um die zwei wichtigsten in der Praxis auftretenden Problempunkte vorwegzunehmen - bisher unentgeltliche Ingenieur- und Technikerleistungen der Betreiber ihre Vergegenständlichung in der Anlagentechnik finden werden und wenn mindestens 60 bis 80 % der zugeführten Brennstoffenergie einer wirtschaftlichen Nutzung zugeführt werden, sei es als Wärme oder als elektrische Energie.

Wichtige Einzelergebnisse sind:

- Bei der Analyse der Anlagen haben sich elektrische Brutto-Wirkungsgrade der Gesamtanlage von 20 % als sicher erreichbar herausgestellt. Dies ist niedriger als erwartet, stellt aber nicht von sich aus ein Problem dar, da als entscheidende Größe der Brennstoffnutzungsgrad betrachtet werden muss.

- Die Einhaltung der Obergrenzen für die lokalen Schadstoffemissionen ist möglich und zwingend notwendig, erfordert aber gezielte technische und damit wirtschaftlich wirksame Maßnahmen.
- Die Anlagen arbeiten nicht ohne Beaufsichtigung. Es ist sogar zu konstatieren, dass die Funktionstüchtigkeit in allen Fällen vom Können und Engagement des Betreibers abhängt. Es handelt sich um Pilotanlagen in privater Hand.
- Es wird zu wenig beachtet, dass ein Vergaser-BHKW als Gesamtanlage entworfen, geplant, errichtet und in Betrieb genommen werden muss. Dies beinhaltet Brennstofflogistik, Brennstoffkonditionierung, Vergasung, Gasreinigung, Reststoffhandhabung, motorische Nutzung, Wärmenutzung inkl. Pufferung und Emissionsminderung.
- Der großen Bedeutung einer messtechnisch basierten Problemanalyse wird noch zu wenig entsprochen. Ursache ist der Mangel an Fachpersonal und finanzieller Ausstattung.

Zum Berichtzeitpunkt kann echte Marktreife - vergleichbar mit KWK-Anlagen auf fossiler Basis - nicht konstatiert werden. An der Entwicklung der Technologie wird seitens der Hersteller und Betreiber einerseits in großer Breite, andererseits sehr unkoordiniert gearbeitet.

Die noch immer vermisste Marktreife ist nicht auf Mangel an innovativen Konzepten, sondern auf fehlende systematische Ingenieurarbeit zurückzuführen. Hauptangriffspunkte sind das Zusammenwirken der Komponenten unter den realen Bedingungen schwankender Brennstoffqualität. Abhilfe kann nicht nur adäquate Regelungs- und Automatisierungstechnik, sondern vor allem die Anwendung des in den Ingenieurwissenschaften vorhandenen reichhaltigen energieverfahrenstechnischen Erfahrungsschatzes bringen.

1 VORWORT

Eine BHKW-Vergaseranlage ist ein Blockheizkraftwerk (BHKW), in dem eine Brenngaserzeugung aus wasserarmer Biomasse (Masseanteil Wasser in Gesamtmasse überwiegend maximal 20 %) integriert ist. Während in Biogasanlagen sehr wasserreiche Biomasse (z.B. Gülle) durch biochemische Prozesse bei niedrigen Temperaturen um ca. 40 °C in ein Gemisch aus Methan und Kohlendioxid umgesetzt wird, findet in einer Vergaseranlage ein durch hohe Temperaturen oberhalb von 200 °C bis über 1000 °C gekennzeichneter, so genannter thermochemischer Gasbildungsprozess statt.

Die Umwandlung der Biomasse in ein brennbares Gas hat prinzipiell den Vorteil, dass sie damit an die bewährten Energiebereitstellungstechnologien auf Basis von Erdöl und Erdgas angekoppelt werden kann. Das BHKW realisiert die gleichzeitige Bereitstellung von Nutzwärme und Strom, vorrangig auf der Basis eines Verbrennungsmotors.

Die Prozesskette Vergasung - Verbrennungsmotor - Generator muss im Vergleich mit anderen Prozessketten untersucht werden, die aus den gleichen Ausgangsstoffen die gleichen Energieprodukte (Wärme, Strom) bereitstellen, z.B. mit der Prozesskette Verbrennung - Dampfkraftprozess - Generator. Wichtigstes Vergleichskriterium ist, mit welchem der heute diskutierten Technologieansätze in volkswirtschaftlichem Maßstab die größtmögliche Substitution fossiler Energieträger gelingen kann (Treibhausgasproblematik, Importabhängigkeit, Versorgungssicherheit).

Die hier vorgelegte Studie nimmt hauptsächlich die vom gleichen Projektträger beauftragte Arbeit „Analyse und Evaluierung der thermochemischen Vergasung zur energetischen Nutzung von Biomasse“ [1] zum Ausgangspunkt. Nur wo Differenzierung und Weiterentwicklung notwendig erscheinen, wird explizit darauf eingegangen. Dies betrifft z.B. die Zielstellung bei der energetischen Biomassennutzung. Während in [1] die Stromerzeugung aus Biomasse als Motivation dient, hat sich der Blick auf die energetische Biomassennutzung inzwischen gewandelt. Der Substitutionseffekt der Biomasetechnologie ist stärker in den Mittelpunkt der Betrachtung gerückt, was zu einer gestiegenen Bewertung der Wärmenutzung zu Heizzwecken und zunehmend zur Brennstofftrocknung geführt hat. Damit steht im Zusammenhang, dass trotz der bekannten wirtschaftlichen Degressionseffekte im Bereich sehr kleiner Anlagen (bis 250 kW_e) die größten Aktivitäten zu verzeichnen sind. Nachfrageseitig (Stromvergütung, Wärmenutzungspotenzial) sind die

Voraussetzungen für eine Verbreitung der Technologie erfüllt. Hauptsächlich das ungünstige Verhältnis von Entwicklungskosten zu Erlös pro Anlage - also eine Komponente der Degressionsproblematik - verhindert noch den Durchbruch.

Während in [1] Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auf der Basis von Überlegungen zum Up-Scaling durchgeführt werden, hat aus dem oben beschriebenen Grund eher das Down-Scaling an Bedeutung gewonnen. Darauf wird in dem vorliegenden Bericht eingegangen.

In [1] werden umfassende Untersuchungen zur Teerbildung vorgestellt. Die Teerbildung ist eines der Haupthemmnisse, das die einfache Kopplung von Biomassevergasung und Erdgastechnologie verhindert. Die dort gewonnenen Erkenntnisse können eine wertvolle Grundlage für die Weiterentwicklung der Vergasungstechnologie sein.

Die Fortschritte in der Technologieentwicklung haben inzwischen Anlagen hervorgebracht, die in Betreiberhand gefahren und optimiert werden. Deshalb wird auch in der Untersuchung der Schritt von der Forschungsanlage zur praktisch eingesetzten Komplettanlage gegangen. Es werden an kommerziell betriebenen Anlagen Vor-Ort-Messungen durchgeführt und dabei deren Einzelkomponenten mit ihren jeweiligen Input- und Outputströmen betrachtet. Von besonderem wissenschaftlichem Wert ist, dass die Untersuchung der Komponenten im Kontext des Betriebes der Gesamtanlage erfolgt.

Seit Veröffentlichung von [1] sind, wie dort vorausgesagt, Fortschritte in der Zuverlässigkeit der Anlagen erreicht worden, die aber geringer als erwartet ausgefallen sind.

Eine objektive Schwierigkeit für die Durchführung einer Schwachstellenanalyse ist die Tatsache, dass die nunmehr in den Mittelpunkt des Interesses rückenden kommerziellen Anlagen kaum Fördermittel verbraucht haben und deshalb ein Zwang zur Offenlegung von wissenschaftlichen Informationen nicht besteht. Die Form der Berichterstattung muss diesem Sachverhalt Rechnung tragen.

Im Unterschied zu [1], wo teilweise eine Variation des Brennstoffs vorgenommen wurde, konnten im vorgestellten Projekt nur Holzhackschnitzel (HHS) untersucht werden. Allein jedoch durch die Parameter Holzart, Stückigkeit und Wassergehalt ergibt sich eine große Variantenvielfalt.

Wiese und Kather konstatieren 2005 [1]: „konnten ... keine technisch unlösbaren Probleme der Vergasungstechnologie festgestellt werden. Vielmehr ist die große Anzahl an gescheiterten Projekten durch das Zusammenspiel der Schwierigkeiten zu erklären“. Diese Aussage muss mit ihrem negativen und ihrem positiven Aspekt von den in [1] untersuchten Demonstrations- und Pilotanlagen auf die kleineren kommerziellen Anlagen

der letzten beiden Jahre übertragen werden. Schwierigkeiten bis hin zum Scheitern von Projekten entstehen durch das Zusammenwirken von an sich technisch lösbaeren Detailproblemen.

Durch das Wirken vieler Akteure befindet sich die Technologie zur Wärme- und Stromerzeugung aus HHS auf der Basis der thermochemischen Vergasung im kleinen Leistungsbereich in einem dynamischen, stark differenzierten und schwer überschaubaren Entwicklungsprozess. Der hier vorgelegte Schlussbericht beschränkt sich auf die Betrachtung von Holzgas-Motor-BHKW (HGM-BHKW), stellt einen Überblick zum aktuellen Stand dieser Entwicklungen dar und benennt die damit verbundenen Probleme. Er ist das Konzentrat von Informationen, die im direkten Kontakt mit Herstellern und Betreibern und bei selbst durchgeführten Messungen an kommerziell betriebenen Anlagen gesammelt wurden. Er wurde erarbeitet mit Blick auf die Entwicklung auch in anderen europäischen Ländern.

Die Projektarbeit war gekennzeichnet von der nicht widerspruchsfreien Entwicklung. Nach einem ersten Aufschwung im Herbst 2006 war besonders die Startphase des Projektes durch Verzögerungen und Rückschläge an den zur Untersuchung vorgesehenen Anlagen charakterisiert, woraus eine deutliche Zurückhaltung der Hersteller gegenüber externen Darstellungen und Bewertungen resultierte. Für die Hauptarbeit des Messens und Bilanzierens sowie für die Bereitschaft die gewonnenen Ergebnisse für die wissenschaftliche Untersuchung freizugeben, musste Vertrauen wieder aufgebaut und gepflegt werden. Wegen der Innovations- und Wettbewerbssituation ergeben sich daher für die Berichterstattung Besonderheiten.

Die Betrachtungen erstrecken sich auf HGM-BHKW und bezüglich des Leistungsbereichs auf den „kleinen Vergaser“. Entsprechend der Aufgabenstellung wurde die Situationsanalyse zunächst auf den Leistungsbereich bis 1 MW_{el} gerichtet. Die entscheidenden Entwicklungen vollzogen sich aber im Bereich um und unter - teilweise weit unter - 250 kW_{el}, so dass die meisten Informationen und Ergebnisse diesem Leistungsbereich zuzuordnen sind. Es wurden Recherchen, Befragungen und ein Messprogramm durchgeführt, aus denen ein Datenmassiv¹ entstanden ist.

¹ Als Datenmassiv wird hier eine Sammlung von Daten und Informationen verstanden, deren Umfang dem einer Datenbank entspricht, deren direkte Nutzung auf Grund fehlender informationstechnischer Aufbereitung derzeit nur durch das Projektteam möglich ist.

2 PROJEKTDURCHFÜHRUNG

2.1 BESONDERHEITEN DES PROJEKTS

- Das Projekt befasst sich mit dem Stand der HGM-BHKW-Technik im „kleinen Leistungsbereich“, der nach bisherigen Studien (z.B. [1]) als nicht wirtschaftlich gestaltbar gilt. Die Berechtigung der Untersuchung ergibt sich aus der Tatsache, dass entgegen pauschaler Prognosen in den letzten vier Jahren gerade in diesem Bereich die dynamischste Entwicklung erfolgte und die meisten Anlagen in die Praxis überführt wurden.
- Gegenstand der experimentellen Untersuchung waren Anlagen folgender Betreiberarten:
 - Betreiber 1A: Energietechnisches Unternehmen (Unternehmensziel u.a. Contracting),
 - Betreiber 1B: Handwerksbetrieb (ca. 20 Beschäftigte),
 - Betreiber 1C: Dienstleister im ländlichen Raum,
 - Betreiber 1D: Landwirt,
 - Betreiber 1E: Landwirt.
- Die Arbeitsbeziehungen zu Herstellern ergaben sich mittelbar über die Zusammenarbeit mit den Betreibern.
- Das Wesentliche des Projektes sind die auf der Basis von Messungen und direkten Kontakten gewonnenen Einschätzungen.
- Die Kontakte und Informationsflüsse wurden teilweise durch technische oder unternehmerische Rückschläge beeinflusst.
- Im Projekt wird zur Ermittlung von Schwachstellen eine stark empirisch orientierte Arbeitsweise realisiert.
- Alle Anlagen wurden nach der gleichen Methodik untersucht. Davon ausgehend ergibt sich die Möglichkeit, einen Analysestandard zu entwickeln
- Die Autoren sind sich bewusst, dass 24-h-Messungen nur einen Ausschnitt für die Bewertung eines HGM-BHKW darstellen. Sie kennen Überlegungen zu längeren Untersuchungen und haben registriert, dass manche Mängel mitunter erst nach tausenden Betriebsstunden offensichtlich werden. Sie legen dafür aber im bisher kaum untersuchten Leistungsbereich Analysen vor, auf deren Basis mit Hilfe von Bilanzen sowohl Verbesserungen im Detail eingeleitet, als auch Vorschläge für

eine systematische koordinierte Technologieentwicklung unterbreitet werden können.

Bei den Recherchen, beim Aufbau und der Nutzung der Kontakte sowie bei der Bearbeitung von Projektpassagen konnten sich die Autoren auf die Zusammenarbeit mit der AG Vergasung von Biomasse der Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V. (FEE) stützen. Zum Gelingen der Messungen haben die Betreiber maßgeblich beigetragen.

2.2 METHODIK UND DURCHFÜHRUNG DER PROJEKTARBEIT

- Das Projekt startete mit der Vorauswahl von Informationen und Kontakten zu ca. 30 Herstellern von HGM-BHKW.
- Nach einer ersten Sichtung technischer Informationen wurde ein engerer Kreis von zehn Herstellern definiert, die für Anwendungen in der Land- und Forstwirtschaft von Interesse sind.
- In Gesprächen wurden den potentiellen Projektpartnern Ziele und Vorgehensweise des Projektes individuell vorgestellt. Es gab mehr Interessensbekundungen als im Zuge des Projektes aufgegriffen werden konnten. Allerdings stabilisierten sich die meisten Entwicklungen erst ab dem II. Halbjahr 2007.
- Im Rahmen von zwei Tagungen^{2, 3}, erfolgte eine Diskussion des Standes der Technik sowie der Vorgehensweise im Evaluationsprojekt.
- Es wurden fünf Anlagentypen in die engere Wahl gezogen. Besondere Voraussetzung hierfür waren,
 - dass die Anlage nicht der Demonstration sondern dem normalen Betrieb dient,
 - Phasen der Stabilisierung bereits durchlaufen waren und
 - ein hohes Maß an Kooperationsbereitschaft des jeweiligen Betreibers gegeben war.
- Zur Vorbereitung der Messung wurde an jeder Anlage vor Ort das Anlagenkonzept erfasst, das Evaluierungskonzept ausgearbeitet und mit dem Betreiber diskutiert.

² In Eisenbrechtshofen wurde am 25.08.2007 beim Workshop mit Herstellern die Einschätzung zum Stand der HGM-BHKW-Technik durch das Projekt-Teams vorgetragen und von den Anwesenden bestätigt.

³ In Sulzbach-Rosenberg wurden am 10.09.2007 beim Treffen der AG Vergasung von Biomasse der FEE das Grundkonzept für die Versuche und für den Umgang mit Daten beraten.

Das Konzept sollte die Erfassung aller Stoff- u. Energieströme der Anlage ermöglichen, ohne dabei den normalen Anlagenbetrieb zu beeinflussen. Bei der Vorbereitung und während der Messung wurde größte Sorgfalt darauf gerichtet, den realen Anlagenbetrieb zu erfassen.

- Es wurde das Ziel der Komplettbilanzierung der Gesamtanlage angestrebt, wobei prinzipiell eine Unterteilung des Gesamtsystems in die Teilbilanzsysteme Brennstoffaufbereitung⁴, Gaserzeugung und -Reinigung sowie Motor vorgenommen wurde.
- Es wurden 24-h-Messungen angestrebt und auch weitestgehend erreicht.
- In persönlichen Gesprächen mit den Betreibern wurden positive und negative Erfahrungen beim Betrieb der Anlage diskutiert und dokumentiert

Insgesamt wurden -relativ gleichmäßig auf die Anlagentypen verteilt- ca. 150 Messstunden akkumuliert. An den Anlagen wurden dabei folgende Messungen durchgeführt:

- Die Massebestimmung der zugeführten HHS-Menge über Abwiegung.
- Die Bestimmung des energetischen Zustandes der Hackschnitzel durch regelmäßige Probennahme über die gesamte Untersuchungsperiode.

Die Proben wurden im institutseigenen Labor einer Brennstoffanalyse unterzogen, in der die Bestimmung des Heizwertes sowie die Ermittlung der Anteile an Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Asche jeweils im Einklang mit den lautenden Normen erfolgte. Die Wassergehaltsbestimmung wurde bereits vor Ort bzw. fortgesetzt ebenfalls im Labor in Anlehnung an die Vornorm DIN CEN/TS 14774-2 durch Trocknung im Ofen durchgeführt⁵. Aufgrund des Verwechslungspotentials zwischen Feuchte und Wassergehalt, wurde vom Projektteam der aus der Verfahrenstechnik bekannte Ansatz der Angabe des Trockensubstanzanteils (TS-Anteil) gewählt. Damit ist ein eindeutiges Instrument geschaffen, den Holzzustand hinsichtlich des Wasseranteils zu definieren.

- Die Ermittlung der verbrauchten Ölmenge bei den Zweistoffmotoren.
- Die Massebestimmung des Reststoffanfalls über Abwiegung.

⁴ Die zur Brennstoffaufbereitung zählende Brennstofftrocknung wurde zusätzliche an einer Anlage messtechnisch erfasst.

⁵ Siehe Kapitel 3.4 Schwachstellen

Aufgrund des bei einigen Anlagen doch noch relativ hohen Kohlenstoffgehaltes in der so genannten „Asche“ wurde der Begriff Reststoff gewählt, um Verwechslungen mit der tatsächlichen Holzasche auszuschließen.

- Die Bestimmung des Reststoffzustandes (analog HHS) über Probennahme und Laboranalyse.
- Die Ermittlung der elektrischen Energie am Netzübergabepunkt durch Erfassung des Einspeisezählers vor und nach der Messkampagne.

In fast allen Fällen konnte ebenfalls die Menge der vom Generator bereitgestellten elektrischen Arbeit dokumentiert werden.

- Die Ermittlung der Wärmeenergie über die Aufnahme der anlageneigenen Wärmezähler.

War an der Anlage kein Wärmezähler eingebaut, wurde zumindest versucht eine Abschätzung über die ausgekoppelte Wärme zu treffen.

- Die kontinuierliche Aufnahme der Produktgaszusammensetzung über Absaugung aus der Produktgasleitung, zeitweise im Roh- und Reingas.

Zum Einsatz kam dabei ein mobiles Gasanalyzesystem zur Messung der Komponenten Kohlenmonoxid CO (Sensorprinzip Infrarot), Kohlendioxid CO₂ (Infrarot), Wasserstoff H₂ (Wärmeleitfähigkeit), Methan CH₄ (Infrarot) und Sauerstoff O₂ (O₂-Zelle). Bei der Bewertung der Gaswerte gilt es die Quereinflüsse für den Wasserstoffsensoren (hauptsächlich durch CH₄, CO₂ und H₂O) sowie den Methansensoren (andere Kohlenwasserstoffe) zu beachten. In regelmäßigen Abständen bzw. vor jeder Messkampagne wurde das Messgerät mit Prüfgas beaufschlagt und falls notwendig kalibriert.

- Die Absaugung des Produktgases in Gasprobenbeutel und anschließende Laborkontrolle auf Permanentgase (O₂, CO, CO₂, H₂,) und gasförmige Kohlenwasserstoffe (bis C₅).

Durch die Laboranalyse kann einerseits ein Abgleich mit dem Online-Messsystem erfolgen, andererseits wird dadurch erst eine Aufschlüsselung und Quantifizierung der einzelnen Kohlenwasserstoffe möglich.

- Die kontinuierliche Aufnahme der Abgasemissionen über Absaugung aus der Abgasleitung.

Zum Einsatz kam ein mobiles Messsystem zur Überwachung der Komponenten Sauerstoff O₂, Kohlenmonoxid CO, Stickoxide NO_x und den unverbrannten Kohlenwasserstoffen (kalibriert auf Propan).
- Die Ermittlung der Volumenströme von Vergaserluft und Produktgas durch die kontinuierliche Aufnahme des Differenzdrucks über Einlaufstrecken und Blenden.

Für die Bestimmung des Produktgasvolumens fiel die Wahl auf Messblenden aufgrund deren relativer Unanfälligkeit hinsichtlich eines Gasstroms, der Teer-, Staub- und Kondensatbelastet sein kann. Die Integration der Blenden in die Anlagen wurde erschwert, da es zum einen mitunter unmöglich war, im Produktgasweg eine längere störungsfreie Rohrstrecke zu finden, um vor allem die nach Norm geforderten Ein- und Auslaufwege einzuhalten. Zum anderen wurde dadurch in die Anlage eingegriffen, was die Erlaubnis und Mithilfe des Betreibers erforderlich machte. Bei der Auslegung und Fertigung der Messblenden wurde die Konformität zur DIN ISO 5167 angestrebt. Zusätzlich erfolgte eine Kalibrierung dieser Volumenstrommessstrecken an der TU Dresden.
- Die Abschätzung des Wasserdampfanteils sowie eventueller Störkomponenten im Produktgas (wie z.B. Teerbestandteile) durch Gasabsaugungen über Waschflaschen.
- Die Aufnahme von Temperaturen und Drücken an und in der Anlage.

Aufgrund der Messung der Temperaturen können Aussagen getroffen werden zum Vergaserverhalten (Thermoelement im bzw. direkt am Gasaustritt des Vergasers), zur Abschätzung der Güte der Wärmeauskopplung im BHKW (Thermoelement im Abgaskanal) oder zur Abschätzung der über Konvektions- und Strahlungsverluste abgeführten Wärmemenge. Des Weiteren ist die Erfassung von Drücken und Temperaturen innerhalb des Gasweges nötig, um eine Umrechnung der gemessenen Volumina auf Normzustand durchführen zu können.
- Die Ermittlung weiterer Stoff-, Energie- und Hilfsströme von und zur Anlage.

Unter den weiteren Stoff- und Energieströmen ist z.B. das Kondensat aus der Produktgasreinigung oder das Wasser bzw. ein anderweitiges Lösungsmittel für die Produktgaswäsche zu verstehen.

Soweit vorhanden wurde auch auf die anlageneigene Messtechnik zurückgegriffen, zum einen um redundante Messwerte zu erhalten und zum anderen wäre es in manchen Fällen sonst nur schwer möglich gewesen, an die benötigten Daten zu gelangen. Im Besonderen trifft das auf die Ermittlung der elektrischen Arbeiten und die Wärmemengen zu. Ein Großteil der in den Anlagen installierten Messtechnik (meist für Druck- und Temperaturmessung) wird jedoch nicht elektronisch aufgezeichnet und hätte handschriftlich erfasst werden müssen. Im Allgemeinen ist die messtechnische Ausstattung von HGM-BHKW kleiner Leistung verbesserungswürdig, um mit Blick auf die Sicherheit und Anlagensteuerung⁶ eine Entwicklung zu vollziehen.

Diese Aussage soll exemplarisch an den fünf untersuchten Anlagen untermauert werden. Während der Messkampagnen

- waren an keiner Anlage Konzentrationssensoren zur Abgasemissionsüberwachung installiert,
- konnte an nur einer Anlage die zugeführte Holzmasse automatisch bestimmt werden,
- waren ebenfalls an nur einem Standort Konzentrationssensoren zur Produktgasüberwachung installiert,
- wird nur bei zwei Anlagen die Momentanleistung elektronisch aufgezeichnet,
- wird die Erfassung der Wärmeleistung ebenso nur an zwei Standorten durchgeführt.

⁶ Zurzeit ist es häufig so, dass die Anlage auf einen definierten Brennstoff eingestellt ist. Ändert sich in dieser Hinsicht der Zustand, dann muss die Anlage manuell nachgeregelt werden.

3 PROJEKTERGEBNISSE

3.1 IST-STAND DER HGM-BHKW-TECHNOLOGIE

Folgende Feststellungen über den Ist-Stand der HGM-BHKW-Technologie können getroffen werden.

- Die Holzvergasung ist eine Technologie, die auf technikbegeisterte Menschen eine große Ausstrahlung ausübt. Die Aussage stützt sich auf
 - Anzahl und Zuspruch einschlägiger Konferenzen,
 - Zahl der Anfragen bei der FEE bezüglich Vergasung,
 - Anzahl der jährlich neu an die Öffentlichkeit tretenden Anbieter (Quelle FEE).
- Es kann mit dem Projekt belegt werden, dass bisher das Können und das Engagement der Betreiber von mindestens ebensolcher Bedeutung für das Vorankommen der Biomassevergasung ist, wie die Qualität der Anlagen. Es zeigt sich, dass der erfolgreiche Betrieb von Anlagen eines Herstellers maßgeblich von dem jeweiligen Betreiber bestimmt wird. Die Technologie der Holzvergasung durchläuft in dieser Frage eine analoge Phase wie die Biogastechnik vor einigen Jahren. Es ist die Herausforderung der nächsten Jahre, die Abhängigkeit erfolgreicher Anlagenfahrweise vom Talent der Betreiber zu verringern. Folgende Punkte können beispielhaft für die Betreiberabhängigkeit angeführt werden:
 - Ein Betreiber hat eine Anlage durch vielfältige Umbauten, Vereinfachungen und Anpassungen in den Dauerbetriebszustand überführt.
 - Alle Betreiber verweisen darauf, dass sie Erfahrungen mit dem Brennstoff sammeln mussten und weiter sammeln.
 - Alle Betreiber verweisen darauf, dass zum Dauerbetrieb eine hohe Verfügbarkeit ihrerseits erforderlich ist.
- Nimmt man die in jahrzehntelanger Entwicklungsarbeit ausgereiften Energiebereitstellungsanlagen auf Basis standardisierter fossiler Brennstoffe zum Maßstab, sind HGM-BHKW bezüglich des Komforts der Handhabung noch sehr entwicklungsbedürftig.

Die in Tabelle 1 zusammengestellten Anlagen wurden in einem frühen Projektstadium in die engere Auswahl gezogen, da ein guter Informationsfluss mit Herstellern und Betreibern und hohe Erfolgsaussichten in der Startphase des Projektes bestanden.

Es kann kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. Zur Funktionstüchtigkeit der Anlagen kann zum Berichtszeitpunkt keine Aussage getroffen werden. Tabelle 1 dient der Vermittlung eines Eindrucks über den Stand der Entwicklung und sollte nicht für Entscheidungen herangezogen werden, die einzelne Hersteller oder Anlagen betreffen. Auch zur Wertung oder Wichtung soll die Tabelle nicht dienen. Interessenten sollten den im Abschnitt 3.4.1 zusammengestellten Hinweisen folgen und zusammen mit Erfahrungsträgern nach einer für Ihre Situation angemessenen Lösung suchen.

Tabelle 1: Ausschnitt aus der Übersicht über installierte Vergaser (Stand Dezember 2008) bezüglich der zu Projektbeginn getroffenen Herstellerwahl, umfassendere und detailliertere Darstellung der aktuellen Übersicht (drei Tabellen mit teilweise anlagenindividuellen Bemerkungen) in Anhang M.

	Entwickler, Hersteller, Anbieter	Leistungsbereich lt. Herstellerangaben		Anzahl der übergebenen Module nach Inkrafttreten des nov. EEG					realisierte Anlagenleistung [kW _{el}]
		Modulleistung [kW _{el}] von	bis	2004	2005	2006	2007	2008	
1	Gräbner (Jun.) Behälter- und Apparatebau Holzgasanlagen	10	30		2	2	3	3	>200
2	B. Joos und Partner/Lizenznehmer wie Spanner RE2 GmbH	15	40	1	1	2	4	3	>300
3	Qalovis Farmer Automatic Energy GmbH	20						1	20
4	Schmidt Ingenieurdienstleistungen	30						1	30
5	Drebe GmbH	40	60		-1	3-2	3-n	2	>400
6	ENTEC Corp. & Co. POWER SYSTEMS KG	90					6	8	1260
7	Kuntschar Energieerzeugung GmbH & Co KG	125	150		-n	2-n	7-n	2	>1250
8	(ANKUR-Systeme von) Reg-energy GmbH u. SCULTURA Engineering & Consulting GmbH und im Selbstbezug*	250				1+1*	1	1*	>750
9	Bioenergy Systems GmbH	220	250			-1	3	1	2000
10	Mothermik GmbH	250		2-1	4	8-4	5	1	5000
11	Biomass Energiesysteme GmbH & Co KG und Partner	270				1	1	2	1080
12	Bisea GmbH und Investor	400					1		400
				ca. 2	ca. 6	13-n	34-n	25	>12500

Aus den im Rahmen des Projektes durchgeführten umfangreichen Befragungen und Vor-Ort-Besichtigungen ergeben sich folgende Situations- und Trendbeschreibungen:

- Im Unterschied zur Situation zum Zeitpunkt der Projektbeantragung (Studie [1]) gibt es HGM-BHKW von mehreren Anbietern, die mehrere tausend Betriebsstunden absolviert haben. Damit kann die prinzipielle technische Machbarkeit der

HGM-BHKW-Technologie als nachgewiesen gelten (Wie oben dargestellt, handelt es sich um unterschiedliche Anlagenkonzepte unterschiedlicher Hersteller).

- Betreiber 2A: April 2008: 7500 Betriebsstunden,
- Betreiber 2B: März 2008 5600 Betriebsstunden,
- Betreiber 2C: Mai 2008: 5000 Betriebsstunden,
- Betreiber 2D: August 2008: 4000 Betriebsstunden,
- Betreiber 2E: März 2008: 500 Betriebsstunden.
- Es gibt erst in Ansätzen Anlagen, die schon Gebrauchseigenschaften (Verfügbarkeiten) aufweisen, welche für konventionelle BHKW-Systeme auf der Basis von Diesel oder Erdgas typisch sind. Dabei bedeutet "in Ansätzen", dass teilweise Planungssicherheit hergestellt werden konnte, aber nicht, dass Betrieb ohne Beaufsichtigung möglich ist.
- Für die bisher erfolgreichsten Anlagen gilt, dass sie nicht über Projekte sondern in der Regel über kommerzielle Geschäftsbeziehungen und einen hohen unentgeltlichen Arbeitsaufwand der Betreiber entstanden sind und betrieben werden.
- Genau so wahr ist aber auch, dass Verfahrensträger (Hersteller, Entwickler), die vor zwei Jahren die Entwicklung mitprägten, wirtschaftliche Probleme haben. Andere mussten sich wieder zurückziehen, es werden Erstanlagen aufgegeben, Anlagen sind außer Betrieb oder wieder demontiert, Gerichtsverfahren sind anhängig.
- Dennoch
 - gehen Anlagen von Anbietern, die sich bisher an öffentlichen Diskussionen kaum beteiligt haben in Betrieb wie z.B. von der ENTEC Corp. & Co. POWER SYSTEMS KG, Auerbach,
 - starten neue Entwicklungen wie die der Engelmänn-Metallbau GmbH Fürstenwalde,
 - lösen sich Betreiber von den Herstellern und werden selbst zu Entwicklern und Herstellern.
- Ständig verändert sich der Kreis der auf dem Gebiet der Vergasung tätigen Akteure. Dies hat mit immer wieder auftretenden technischen und wirtschaftlichen Problemen einerseits und der schon erwähnten, von der Technologie ausgehenden, Faszination andererseits zu tun.

- Immer wieder werden technisch interessierte Menschen aktiv, die glauben, dass das Ganze doch nicht so schwer sein kann, weil es doch im Prinzip schon vor 60 Jahren umfangreich praktiziert wurde. Sie werden teilweise zu Anlagenentwicklern.
- Die Begeisterung führt jedoch in manchen Fällen dazu, dass einfachste Überlegungen, wie die gründliche Prüfung von Referenzen/Erfolgen und Misserfolgen außer Acht gelassen werden.
 - Der in der Studie recherchierte Stand von ca. 75 im „kleinen“ Leistungsbereich angesiedelten Anlagen wird maßgeblich durch die Arbeit von Universalpraktikern aus kleinsten und kleinen Unternehmen bestimmt. Im zunehmenden Maße werden mittlere Unternehmen aus dem Anlagenbau und aus Heizungstechnik aktiv. Symbiosen von Technik und Wissenschaft sind bisher (Stand August 2008) bei den wenigsten Anbietern zu registrieren, Ausnahmen bilden z.B. die Entwickler/Betreiber 3A, 3B und 3C.
- Das heißt nicht, dass es keinen Beziehungen zur Wissenschaft gab und gibt, aber die entscheidenden Schritte und Maßnahmen gehen von den Unternehmen aus. Die meisten von der Hochschulforschung ausgehenden Lösungen sind noch weit von praktischer Relevanz entfernt. Bei Forschungsanlagen fehlen Dauerbetriebserfahrungen sowie die Bewährungsprobe für die gesamte Prozesskette von der Brennstoffaufbereitung über die Vergasung und Gasreinigung bis hin zum Motor und Generator.

3.2 PHYSIKALISCH-CHEMISCHE ZUSAMMENHÄNGE BEI TROCKNUNG UND VERGASUNG

In diesem Abschnitt, der der Benennung und ersten Analyse von Schwachstellen vorangeht, wird der Wissensstand zu einigen wichtigen physikalischen und chemischen Zusammenhängen der Trocknung und Vergasung kurz diskutiert, ohne dabei eine umfassende Darstellung abzugeben.

3.2.1 HHS-Trocknung

Die physikalischen Eigenschaften von Holz sind stark richtungsabhängig⁷, für Stückholz relativ gut untersucht und teilweise modellierbar. Mit der zunehmenden energetischen Holznutzung rücken jedoch die physikalischen Eigenschaften von Holzstückchen bzw. Partikeln in einer Schüttung - hier als HHS bezeichnet - immer stärker in den Blickpunkt. Es kann festgestellt werden, dass die für das Stückholz bekannten Eigenschaften nur bedingt auf HHS zutreffen sind. Es sind keine Modelle bekannt, um die schon vom Stückholz bekannten Eigenschaftsmerkmale mit ausreichender Genauigkeit auf HHS zu übertragen. Die Herausforderung besteht dabei vor allem darin, die Wechselwirkungen der Partikel untereinander zu beschreiben.

Als physikalische Holzeigenschaft ist das Trocknungsverhalten in diesem Projekt von besonderem Interesse. Die Trocknung von Holz ist wegen seiner kapillar-porösen unregelmäßigen Struktur ein schwer modellierbarer Prozess. Die vereinfachte Modellvorstellung vom ersten (Phasenübergang auf Gutoberfläche: flüssiges Wasser → Dampf) und zweiten Trocknungsabschnitt (Zurückziehen der Phasengrenze in das Gutinnere) wurde vor Jahren für die technologische Trocknung von Nutzholz geschaffen und ist für solche Prozesse geeignet, jedoch auf die Geometrie und Anordnung von HHS derzeit nicht anwendbar. Nach wie vor sind die theoretischen Grundlagen der HHS-Trocknung nicht ausreichend untersucht, um die HHS-Trocknung anhand von Modellen optimieren zu können. Die Erfahrung des Betreibers bestimmt derzeit noch maßgeblich über ein günstiges⁸ oder ungünstiges Regime bei der HHS-Trocknung. Die für die Nutzholzerstellung entwickelten und optimierten Trocknungstechnologien sind nicht einfach auf Energieholztrocknung übertragbar. Grund sind die Unterschiede in der Stückigkeit und die Verschiebung der Priorität von Holzqualität zu Energieeffizienz.

Eine Trocknungsanlage als integrierter Bestandteil eines HGM-BHKW muss folgende Anforderungen erfüllen:

- **Abwärmenutzung:** Sinnvolle Anwendung eines möglichst großen Teils nutzbarer Abwärme erstens für Heizungszwecke und zweitens (mit der zum Heizen nicht erforderlichen Abwärme) für die Brennstofftrocknung.

⁷ Die Anisotropie von Holz resultiert aus der Lage und Anordnung der Gefäße.

⁸ Ein günstiges Trocknungsregime ermöglicht eine zügige HHS-Trocknung mit geringem Wärme- und Energieeinsatz.

- **Flexibilität:** Die Trocknung muss mit einer im Jahresverlauf stark schwankenden Wärmemenge arbeiten. Die Menge getrockneten Brennstoffs ist demnach über den Jahresverlauf nicht konstant.
- **Lagerung:** Dies erfordert eine Vorrattrocknung im Sommer und die Möglichkeit zur Lagerung im Voraus getrockneter HHS für deren Nutzung im Winter. Dadurch wird Abwärme im Heizwert des Brennstoffs gespeichert. Die hygroskopischen Eigenschaften von Holz sind dabei zu beachten. (zum hygroskopischen Verhalten des Holzes wird weiter unten Stellung genommen)

Nachfolgend werden aus dem geforderten Zustandsverlauf der Luft bei der Trocknung Rückschlüsse für ein günstiges Trocknungsregime gezogen.

- Die mit der vorgewärmten Trocknereingangsluft zugeführte Wärme soll so weit wie möglich zur Verdunstung des flüssigen Wassers aus den HHS und somit zur Aufsättigung der Trockneraustrittsluft beitragen, vgl. Abbildung 1. Wenn die vorgewärmte Luft beim Durchströmen der Schüttung nicht aufgesättigt wird und in diesem Zustand in die Umgebung gelangt, dann wird ungenutzte thermische Energie über den Trockner an die Umgebung abgegeben.

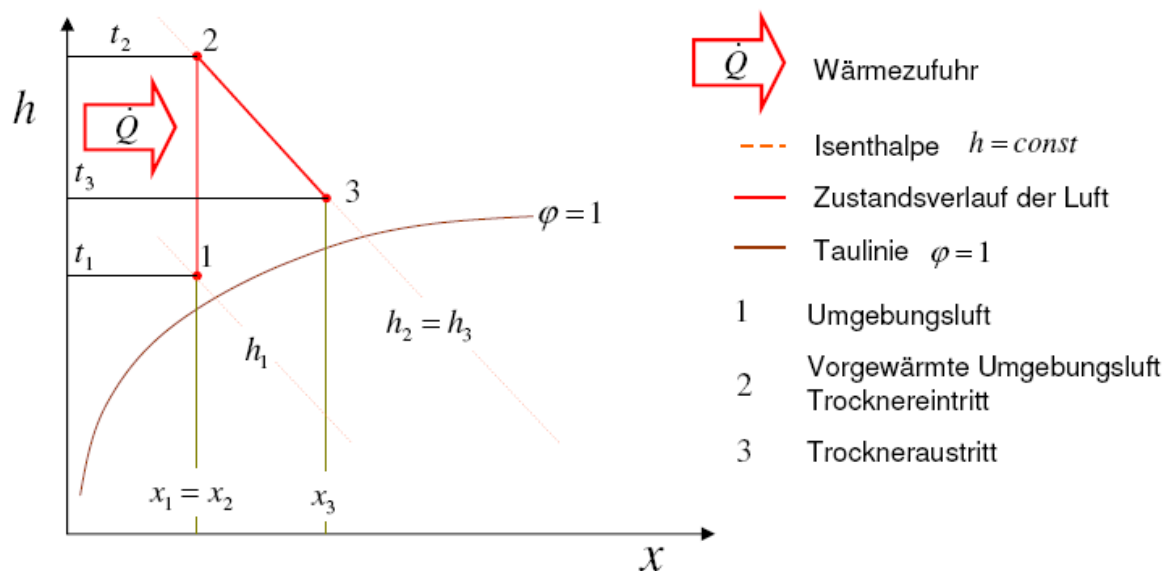


Abbildung 1: qualitative Darstellung des Zustandsverlaufs der feuchten Luft bei der Vorwärmung (Zustandspunkt 1 \rightarrow 2) und Trocknung der HHS (Zustandspunkt 2 \rightarrow 3) im Mollier h-x-Diagramm für feuchte Luft

- Da die zur Trocknung verfügbare Wärmemenge jahreszeitlich schwankt, muss auch die Trocknungsluftmenge regelbar sein, damit eine optimale Steuerung der Lufttemperatur gewährleistet werden kann.
- Um die Trocknung thermodynamisch günstig zu gestalten, ist das Gegenstromprinzip zwischen den zu trocknenden HHS und der vorgewärmten Luft anzuwenden. Das Gegenstromprinzip ermöglicht, dass die schon trockenen HHS am Lufteintritt von der vorgewärmten Luft mit geringer Feuchtigkeit umströmt werden und dadurch auf einen geringen Wassergehalt getrocknet werden.
- Die Überwachung des Trocknungsfortschrittes der HHS sollte messwertgestützt erfolgen, um so dem Betreiber eine Kontroll- und Steuermöglichkeit für die Trocknung in die Hand zu geben. Als Messgröße ist die relative Feuchte φ der Trockneraustrittsluft geeignet. Nimmt diese ab, ist die Trocknung der HHS vorangeschritten und ein Teil der getrockneten HHS kann (automatisch) entnommen und feuchte HHS können (ebenfalls automatisch) wieder zugeführt werden. Dies entspricht einer quasikontinuierlichen Trocknung.

3.2.2 Beherrschung/ Modellierung der Vorgänge in der Reaktionszone

Die Vergasung ist ein Prozess, der in der Beschreibung traditionell in vier Teilprozesse unterteilt wird. Diesen Teilprozessen werden an konkreten Anlagen Zonen zugeordnet.

Diese Art der Modellierung kann dazu dienen, dem Außenstehenden eine Vorstellung von den ablaufenden Vorgängen zu geben. Im Laborversuch mit Brennstoffproben lassen sich diese ineinander übergehenden Teilprozesse zeigen. Der Vorgang in einem Vergaser ist weitaus komplexer. Es handelt sich um einen dreidimensionalen, zweiphasigen Vorgang, bei dem in der festen Phase, an der Oberfläche der festen Phase und in der Gasphase sowohl Wärme- und Stofftransportvorgänge als auch chemische Umwandlungen stattfinden. Auch die in der Literatur angegebenen Gleichgewichtsreaktionen sind als Modelle nur unzureichend für die Optimierung des Vergasungsvorganges geeignet. Die bekannten Gleichungen stellen Modelle dar, die das chemische Gleichgewicht zwischen ausgewählten Substanzen beschreiben. **Vorgänge in Vergasungsanlagen sind aber kinetisch bestimmt.** Deswegen ist die Modellierung dieser Vorgänge anspruchsvoll.

3.2.3 Zusammenhang Luftzufuhr-Wassergehalt-Temperatur-Teerbildung

Diese Mehrdimensionalität ist ebenfalls zu beachten bei der Beschreibung der Teerentstehung im Vergasungsreaktor. „Nester“ zu niedriger Temperatur, hervorgerufen durch lokale Wärmesenken (verursacht durch „Wassernester“, deren Verdampfung Energie bindet und die Temperatur lokal verringert) oder durch lokalen Mangel an Energiezufuhr (lokales Versagen sowohl des autothermen als auch des allothermen Prinzips) führen zu einer lokal stark ausgeprägten Bildung verketteter Kohlenwasserstoffe (Teere). Diese Teere können besonders bei schwerkraftgetriebenem Brennstofftransport durch Verklebungen zu schweren Betriebsstörungen führen.

- Je niedriger das Sauerstoffverhältnis λ ist⁹, umso geringer ist der zum Zwecke der Temperaturerhöhung oxidierte Anteil des Brennstoffs und umso geringer ist die Temperatur.
- Je niedriger die Temperaturen sind, umso langkettiger sind die gasförmigen Reaktionsprodukte.
- Je langkettiger die gasförmigen Reaktionsprodukte sind, umso höher ist der Energiegehalt im Rohgas.
- Je langkettiger die gasförmigen Reaktionsprodukte sind, umso stärker ist hingegen auch der Anteil kondensierender Kohlenwasserstoffe (Teere), womit jedoch wiederum auch der Energieinhalt im Reingas gesenkt wird.

Zu hohe Temperaturen sind ein Ausdruck von Energieverschwendung. Zu niedrige Temperaturen führen hingegen zur Bildung langkettiger Kohlenwasserstoffe und damit möglicherweise zu Teerproblemen.

Letzterer Fall kann zwei Ursachen haben:

- Lokal ist zwar Sauerstoff vorhanden, Oxidationsenergie wird aber durch die Phasenumwandlung von Wasser gebunden.
- Lokaler Sauerstoffmangel (λ kleiner als 0,2) führt zu mangelnder lokaler Energiefreisetzung, lokale Temperaturerhöhung erfolgt nur durch Wärmeleitung und Konvektion, wobei sich material- und schüttungsbedingt Energietransportengpässe einstellen können.

⁹ Werte von 0,5 mit angestrebtem Trend zu 0,4

Es existieren keine Modellvorstellungen von den Vorgängen im Vergaser, die für eine computergestützte Gestaltung von Geometrie und Betriebsweise (Mechanik, Brennstoff- und Luftzufuhr) Verwendung finden können. Erste Ansätze zur CFD-Modellierung sind für die Praxis noch nicht relevant.

Beleg für die Bedeutung des Wassergehaltes für eine stabile Betriebsweise ist, dass die Betreiber von Anlagen 4A und 4B darüber berichten, dass bei der Zufuhr von Holz mit Wassergehalten über 20 % sicher Brückenbildung und damit Betriebsausfall hervorgerufen wird. Für die Ursache gibt es folgende Hypothese: Aufgrund der feuchten Oberflächen der Holzpartikel, hervorgerufen durch Kondensation von Wasserdampf oder Teer, haften die HHS verstärk aneinander und begünstigen damit die Brückenbildung.

3.3 ERGEBNISSE AUS DEN MESSKAMPAGNEN

3.3.1 Energetische Bewertungskriterien

Die Bewertung energietechnischer Anlagen erfolgt oftmals nur über Wirkungs- und Nutzungsgrade, welche in ihrer Schlichtheit Objektivität suggerieren, um verschiedene Technologien einfach über einen Zahlenwert vergleichen und beurteilen zu können. Ganzheitlich betrachtet greift die Reduzierung der Anlage auf eine Zahl aber zu kurz, denn sie zieht nicht die vorherrschenden, möglicherweise differierenden Randbedingungen in Betracht. Die Qualität des vorliegenden Brennstoffes bezüglich Größenverteilung und Zusammensetzung, die Präferenz des Betreibers an die Anlage hinsichtlich der Bedienungsfreundlichkeit sowie schlicht die Anforderung an die Leistungsgröße sind nur einige Beispiele für solche Randbedingungen.

Die Autoren schlagen nicht vor auf die etablierten Bewertungskriterien zu verzichten. Im Gegenteil, die Kennwerte helfen, die Anlagen selbst sowie einzelne Teilkomponenten zu bewerten und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Jedoch muss angegeben sein, unter welchen Voraussetzungen und Randbedingungen die Ermittlung erfolgte. Erst dann ist ein objektiver Vergleich möglich, dessen Ergebnis je nach Anforderung auch unterschiedlich ausfallen kann.

Neben der Beachtung der so genannten weichen Faktoren sollen für die Bewertung von Vergasungsanlagen daher die folgend dargelegten Kriterien in Betracht gezogen werden.

Elektrischer Anlagenwirkungsgrad

Der elektrische Anlagenwirkungsgrad gibt das Verhältnis von elektrisch erzeugter zu eingesetzter Energie an. Üblich ist dabei die Definition des so genannten Brutto- und Nettowirkungsgrades, wobei die eingesetzte Energie aus der chemisch gebundenen Energie des Brennstoffes sowie der thermischen Energie der zugeführten Stoffströme gebildet wird. Auf der anderen Seite erhält man bei Verwendung der vom Generator in das Stromnetz abgegebene Elektroenergie den Brutto- sowie nach Verringerung letzterer durch den zum Anlagenbetrieb nötigen elektrischen Eigenbedarf den Nettowirkungsgrad¹⁰.

Auf die Berücksichtigung der thermischen Energie der zugeführten Stoffströme soll in dieser Untersuchung verzichtet werden. Erstens aufgrund des Fehlens einer größtmäßig signifikanten Energiemenge im Verhältnis zur chemischen Energie (bei keiner der untersuchten Anlagen wird eine externe Vorwärmung der Stoffströme durchgeführt) und zweitens aufgrund der Unkenntnis der thermischen Holzenergie (spezifische Wärmekapazität von Holzhackschnitzeln). Für die chemisch gebundene Energie des Brennstoffes soll weiterhin, wie in der Kraftwerkstechnik üblich, der untere Heizwert eingesetzt werden, auch wenn die Autoren vor allem in Hinblick auf den Vergleich mit Heizungsanlagen die einheitliche Verwendung des Brennwertes bevorzugen würden.

Aufgrund der Tatsache, dass nahezu alle Anlagen die vom Generator erzeugte elektrische Energie direkt in das Stromnetz einspeisen, der Eigenbedarf wiederum aber über den eigenen Verbrauchstromanschluss gedeckt wird (womit er nur schwer vom übrigen objekt-eigenen Strombedarf zu trennen ist), soll der elektrische Anlagenwirkungsgrad als Bruttowirkungsgrad über die Gleichung (1)

$$\eta_{el,Brutto} = \frac{W_{el,Brutto}}{\sum m_{BS} \cdot H_{u,BS}} \quad (1)$$

ermittelt werden. Wie an der Wahl der Absolutmengen zu sehen, kennzeichnet er damit keinen Momentanwert sondern den durchschnittlichen Anlagenwirkungsgrad über der Messkampagne. Im Zähler wird die an der Bilanzgrenze Netzeinspeisepunkt erfasste elektrische Arbeit eingetragen, da diese Größe auch für die ökonomische Vergütung

¹⁰ Natürlich wäre es auch möglich den benötigten Eigenbedarf als aufzuwendende Energie zu deklarieren, was je nach Höhe des Eigenbedarfs zu merklichen Unterschieden in den Zahlenwerten führen kann.

maßgebend ist¹¹. Im Nenner stehen dabei die der Anlage zugeführten Masseströme Holzhackschnitzel und Öl mit den jeweils zugehörigen Heizwerten. Bezüglich der HHS ist die Bilanzgrenze die Vergaserzuführung, also stromabwärts einer möglicherweise vorangestellten Trocknungseinrichtung. Damit wird genau der für den Betrieb des Vergasers vorgesehene Hackschnitzelzustand erfasst¹².

Die vorgetragenen Sachverhalte sollen exemplarisch verdeutlichen, wie wichtig die Angabe der Randbedingungen ist, wenn schon bei einer eigentlich trivialen Kenngröße so große Variationsmöglichkeiten bestehen.

Brennstoffnutzungsgrad

Die Bildung des Brennstoffnutzungsgrades erfolgt aus dem Verhältnis der - von der Anlage abgeführten - nutzbaren Energieströme, elektrische Arbeit und Wärme, und der eingesetzten Energie. Prinzipiell entspricht die Ermittlung der Kenngröße dem elektrischen Anlagenwirkungsgrad, wobei die eingespeiste elektrische Arbeit summarisch um den Wert der genutzten Wärmeenergie erhöht wird. Die gesonderte Angabe eines Nutzungsgrades ist dementsprechend nur für die KWK sinnvoll, da ohne Wärmenutzung die Zahlenwerte der beiden Kenngrößen übereinstimmen. Aufgrund der analogen Definition zum elektrischen Wirkungsgrad gelten in der Betrachtung des Brennstoffnutzungsgrades dieselben Sachverhalte, die Berechnung erfolgt über Gleichung (2)

$$\eta_{\text{KWK,Brutto}} = \frac{W_{\text{el,Brutto}} + Q_{\text{H}}}{\sum m_{\text{BS}} \cdot H_{\text{u,BS}}} \quad (2)$$

Durch die Nichtbeachtung des Eigenbedarfs kann man somit auch in diesem Fall von einem Bruttonutzungsgrad sprechen. Als Zahlenwert für Q_{H} ist dabei die jeweils während der Messkampagne aus der Anlage zur Nutzung abgeführte Wärme anzusetzen. Durch die Verwendung der Wärmeenergie auf der Erzeuger- und nicht der Verbraucherseite gibt

¹¹ Die Wahl der Bilanzgrenze Generator oder Einspeisepunkt in das Stromnetz ist auch in anderer Hinsicht bedeutend, bestimmt sie doch die Zuordnung der zwischen den beiden Punkten auftretenden Netzverluste zur Anlage oder zum Stromnetz.

¹² Es sei darauf hingewiesen, dass durch die Variation des Holzeingangszustands der Wirkungsgrad für dieselbe Messkampagne verändert werden könnte. Beispielhaft würde sich bei einem TS-Anteil nach und vor Trockner von 0,9 bzw. 0,6 sowie eines Heizwertes (wasserfrei) von 18,9 MJ/kg der elektrische Wirkungsgrad mit der Veränderung der Bilanzgrenze auf den Zustand vor dem Trockner rechnerisch um 7,85 % erhöhen. Richter Weise müsste man in diesem Fall jedoch auch den Nutzungsgrad um die Trocknungswärme senken.

der Zahlenwert jedoch keine Auskunft über die Güte der Wärmenutzung. Anlagen mit nicht optimaler Trocknung oder mit großen Verlusten behaftete Leitungsnetze sind damit begünstigt. Der Ansatz ist jedoch allein praktikabel und auch in der Kraftwerkstechnik so üblich. Eine eventuelle zunächst aus der Anlage ausgekoppelte Wärmeenergie, welche dann doch über einen Notkühler an die Umgebung abgeführt wird, verfälscht den tatsächlichen Brennstoffnutzungsgrad.

Eine weitere übliche Kenngröße ist das Verhältnis von elektrischer Arbeit zur genutzten Wärmeenergie, auch Stromkennziffer genannt. Da nach Meinung der Autoren die Angabe dieses Wertes in Hinblick auf Vergleich bzw. Anlagenauslegung nur sinnvoll ist, wenn die Wärmeauskopplung maximiert wird, soll in dieser Arbeit auf die Angabe der Stromkennziffer verzichtet werden.

Vergaser- und BHKW-Wirkungsgrad

Die Angabe des elektrischen Anlagenwirkungsgrades lässt im Grunde keine Aussage zu, über die Güte und das Optimierungspotential der einzelnen Teilkomponenten eines HGM-BHKW. Ein unbefriedigender Anlagenwirkungsgrad könnte dementsprechend ausschließlich bzw. zu großen Teilen durch eine unvorteilhafte Energieumsetzung im Vergaser oder im Motor bedingt sein. Aus diesem Grund sind die über eine Bilanzierung der Einzelkomponenten ermittelbaren Vergaser- und Motorwirkungsgrade von Bedeutung.

Der Vergaserwirkungsgrad beschreibt dabei das Verhältnis der zugeführten und der mit dem Produktgas abgeführten Energie. Bei allen in diesem Projekt untersuchten Anlagen wird das Prinzip der autothermen¹³ Vergasung angewendet, die zugeführte Energie kann in guter Näherung allein durch die chemische gebundene Energie der Holzhackschnitzel beschrieben werden¹⁴. Auf der Seite des Produktgases ist es möglich den Zustand vor oder nach einer Reinigung in die Berechnung einzubeziehen. Durch Abscheidung oder Umwandlung brennbarer Gasbestandteile (z.B. der verketteten KWS) sowie durch die erfolgte Abkühlung des Gases verändert sich die mit dem Produktgas transportierte chemische und thermische Energie (auch als fühlbare Wärme bezeichnet), aus dem Unterschied zwischen Roh- und Reingas ist der Einfluss der Gasreinigung definierbar.

¹³ Bei der autothermen Vergasung wird die zur thermochemischen Umwandlung benötigte Wärmeenergie durch die partielle Oxidation des eingesetzten Brennstoffes bereitgestellt. Im Gegensatz dazu werden bei der allothermen Vergasung zusätzliche externe Energieströme dem Vergasungsprozess zugeführt.

¹⁴ Manchmal wird auch bei allothermer Vergasung die Produktgasenergie allein auf den eingesetzten Brennstoff bezogen. Aufgrund der Nichtbeachtung der externen Energiequellen ergeben sich dadurch höhere, aber bilanztechnisch verfälschte Vergaserwirkungsgrade.

Maßgebend für den Anlagenbetrieb und damit nach Ansicht der Autoren auch für Berechnung des Vergaserwirkungsgrades ist der Zustand des dem Motor zuströmenden Reingases. In dieser Betrachtungsweise bilden Vergaser und Reinigung dementsprechend eine Einheit. Im Allgemeinen wird eine möglichst niedrige Produktgastemperatur¹⁵ angestrebt, wodurch auch beim Produktgasstrom die thermische Energie vernachlässigt werden kann. Damit erhält man den Vergaserwirkungsgrad über Gleichung (3)

$$\eta_{V,Rein} = \frac{\dot{V}_{PG} \cdot H_{u,PG}}{\dot{m}_{BS} \cdot H_{u,BS}} \quad (3)$$

Aufgrund der alleinigen Berücksichtigung der chemisch gebundenen Energien nennt man diese Kenngröße auch Kaltgaswirkungsgrad. Analog den anderen Wirkungsgraden könnte auch der Vergaserwirkungsgrad als über die Messkampagne durchschnittlicher Wert ermittelt werden. Aufgrund der nicht immer lückenlosen Datenaufzeichnungen (vor allem in Hinblick auf die Produktgaszusammensetzung) soll jedoch dafür ein über einen stabilen Messzeitraum gemittelter Wert verwendet werden.

Der elektrische BHKW-Wirkungsgrad gibt die Güte der Energieumsetzung im Motor an und entspricht dem Verhältnis der erzeugten elektrischen Arbeit und der dem Motor zugehenden Brennstoffenergien. Die Berechnung erfolgt damit nach der Gleichung (4)

$$\eta_{el,BHKW} = \frac{P_{el}}{\dot{V}_{PG} \cdot H_{u,PG} + \dot{V}_{Öl} \cdot H_{u,Öl}} \quad (4)$$

Wird der Motor ausschließlich mit dem Produktgas betrieben, dann erhält man über das Produkt von Vergaser- und BHKW-Wirkungsgrad den elektrischen Anlagenwirkungsgrad.

Produktgasqualität/Heizwert

Die Kenntnis der Produktgaszusammensetzung ermöglicht eine Beurteilung der Vergasungsführung, die Auslegung und Steuerung des Motors sowie natürlich formell erst die Berechnung der zuletzt angegebenen Wirkungsgrade. Der Vorteil der Online-Analyse in-

¹⁵ Motoren erzielen höhere Leistungen und Wirkungsgrade bei der Ansaugung kalter Gasgemische.

klusive Aufzeichnung zeigt sich in der Bewertbarkeit der Zeitstabilität, es können dadurch Einflüsse von Regelungs- und Störgrößen erkannt und beobachtet werden.

Die Vergasung mit Luft erzeugt ein so genanntes Schwachgas, also ein Gas mit im Gegensatz zum Erdgas geringem Heizwert, auf das der Motor hinsichtlich Luftzufuhr und Verbrennungssteuerung abgestimmt werden muss. Die Höhe des Heizwertes wird durch den Anteil der weiter oxidierbaren Gasbestandteile Kohlenmonoxid CO, Wasserstoff H₂ und den gasförmigen Kohlenwasserstoffen (hauptsächlich Methan CH₄) bestimmt. Zusätzlich erlaubt die Kenntnis der Absolutwerte bzw. der Verhältnisse der Gasbestandteile zueinander weitere Rückschlüsse, z.B. auf die Reaktionstemperatur im Vergaser. Ein hoher Heizwert ist vorteilhaft hinsichtlich Motorbetriebsstabilität¹⁶ und Vergaserwirkungsgrad und ist damit anzustreben, führt jedoch manchmal auch zu einem Zielkonflikt. Aufgrund der sehr hohen molaren Heizwerte der KWS wirkt sich ein bedeutender gasförmiger Anteil dieser Verbindungen positiv auf Produktgasheizwert aus. Gleichzeitig ist der hohe Gehalt an gasförmigen KWS aber ebenso ein Indikator für hohe Anteile langkettiger KWS (Teere), die den Motorbetrieb stören können und in einer aufwendigeren Reinigung entfernt und entsorgt werden müssen. Genau dieser Aufwand kann es optimaler erscheinen lassen, hinsichtlich eines einfachen Anlagenaufbaus auf eine Maximierung des Vergaserwirkungsgrades zu verzichten.

Die in dieser Untersuchung aufgeführten Gasheizwerte sind aus den gemessenen Produktgaszusammensetzungen errechnet, in dem die Bestandteile CO, H₂ sowie CH₄ als Vertreter der Kohlenwasserstoffe berücksichtigt werden. Ebenfalls angemerkt werden soll, dass sich die dargestellten Gasqualitäten und Heizwerte auf das trockene Produktgas beziehen. Je nach Gastemperatur ist damit ein mehr oder minder hoher Wasserdampfanteil zu berücksichtigen. Die kontinuierliche Messung dieses Anteils ist leider nicht durchführbar, kann also nur abgeschätzt bzw. stichprobenartig ermittelt werden. Für die Motorsteuerung bzw. die Anlagenbilanzierung ist die Kenntnis dieses Anteils jedoch wichtig.

Abgasqualität

Die Aufnahme der Abgasqualität ist im Allgemeinen eine Darstellung der Güte der Verbrennung. Die Bestandteile Kohlenmonoxid, Stickoxide, unverbrannte KWS sowie

¹⁶ Operiert der Motor aufgrund der Zufuhr eines Schwachgases bereits an der unteren Grenze der Zündfähigkeit, dann ziehen bereits kleine Störungen hinsichtlich Gasqualität oder Volumenstrom zwangsläufig Zündaussetzer nach sich.

Sauerstoff lassen Rückschlüsse auf die Verbrennungstemperatur bzw. auf den Verbrennungsablauf zu. Auch ermöglicht die kontinuierliche Darstellung Aussagen über die Gleichmäßigkeit und Stabilität des BHKW-Betriebs.

Anhand des Vergleichs mit zutreffenden Emissionsgrenzwerten kann die Motorsteuerung angepasst bzw. zusätzliche Reduktionsmaßnahmen in Betracht gezogen werden. Da die TU Dresden keine zertifizierte Einrichtung hinsichtlich Emissionsmessungen ist, sind die Darstellungen lediglich als Unterstützung der gewonnen Erkenntnisse bezüglich der Qualität der Kraft-Wärme-Kopplung, der Anlagen- und BHKW-Stabilität sowie als Anregungen für eventuelle Handlungen zu verstehen.

3.3.2 Allgemeine Mess- und Auswertungsergebnisse

Die messtechnische Vor-Ort-Untersuchung wurde an fünf unterschiedlichen Anlagentypen (Anlagen 5A, 5B: Festbettvergaser / Anlagen 5C, 5D, 5E: Bewegtbettvergaser) durchgeführt. Der elektrische Leistungsbereich der detailliert vermessenen Anlagen erstreckt sich von 10 kW_{el} bis 200 kW_{el}. (Anlage 6A: 10 kW_{el}, 6B: 30 kW_{el}, 6C: 60 kW_{el}, 6D: 100 kW_{el}, 6E: 200 kW_{el}). In allen Anlagen wurde Nutzwärme ausgekoppelt, welche sich jeweils aus der Energie der Motorkühlung sowie einem Teil der Abgasenthalpie zusammensetzte. In keiner Anlage wurde die fühlbare Wärme des Produktgases in die Wärmenutzung integriert. Die Abgabe dieser Wärmenergie an den Raum, in welchen das BHKW bzw. der Vergaser steht, wird dabei nicht als Integration in ein Wärmenutzungskonzept verstanden.

Die Untersuchung der während der Messkampagnen eingesetzten Holzhackschnitzel ergab jeweils ein sehr gleichmäßiges Bild hinsichtlich Größenverteilung und Trockensubstanzanteil. Es wurden sehr trockene HHS verwendet, der geringste TS-Anteil lag bei 86,5 %. Durch die Kontrolle und gegebenenfalls erforderliche Aussortierung nicht geeigneter Hackschnitzelgrößen¹⁷ konnte dem Vergaser jeweils ein relativ homogener Brennstoff zugeführt werden. Vier der fünf Betreiber wiesen auch ausdrücklich darauf hin, dass aufgrund der Einhaltung der Anforderungen an Hackschnitzelgröße und TS-Anteil ein stabiler und störungsfreier bzw. störungsunanfälliger Anlagenbetrieb gewährleistet werden kann.

¹⁷ Der Aussortierverlust wurde bei der Bildung der Bewertungskriterien nicht berücksichtigt, muss aber in die wirtschaftliche und organisatorische Kalkulation einbezogen werden, besonders wenn dieser Brennstoffanteil nicht anderweitig verwendet wird.

In den Zeiträumen in denen keine manuellen Regelungen oder Störungen den Anlagenbetrieb beeinflussten, kann man der Produktgaszusammensetzung jeweils einen konstanten und reproduzierbaren Verlauf bescheinigen. Die Motoren wiesen keine Probleme auf, das jeweilige Produktgas zu verbrennen. Die Abgasemissionen sind vor allem bezüglich des Kohlenmonoxids zwingend verbesserungsbedürftig. Dass dies möglich ist, konnte ebenfalls im Rahmen der Untersuchungen messtechnisch nachgewiesen werden.

Die Feststellung, dass ein stabiler störungsfreier Betrieb während der Messkampagne möglich war, ist keine Garantie für eine dauerhaft hohe Zuverlässigkeit. In Analogie dazu müssen bei den Anlagen aufgetretene Beeinträchtigungen ebenso nicht regelmäßig vorkommen. Für Aussagen hinsichtlich der Zuverlässigkeit oder Störungsanfälligkeit der HGM-Technik sind Langzeituntersuchungen anzustreben, die auch größtenteils vom Betreiber durchgeführt werden können.

Die aus wissenschaftlicher Sicht wünschenswerte mehrfache Untersuchung der Anlagen oder gar das Absolvieren von 72-h- oder 150-h-Versuchen war im Rahmen des hier dargestellten Projektes nicht zu leisten.

3.3.3 Spezielle Mess- und Auswertungsergebnisse

Die Autoren weisen darauf hin, dass sich die dargelegten Ergebnisse nur auf den untersuchten Messzeitraum beziehen. Die Bewertungskriterien können anders ausfallen, zum einen bei der Benutzung eines Brennstoffes abweichender Spezifikation und zum anderen nach Anlagenveränderung oder -alterung. Die Ergebnisse sind auch nicht auf jedes HGM-BHKW des gleichen Typs einfach übertragbar, aufgrund der fortschreitenden Entwicklung sind viele Anlagen voneinander abweichend aufgebaut und werden durch unterschiedliche Betreiber bedient.

Wie bereits erwähnt, war es das Ziel, den normalen Anlagenbetrieb zu untersuchen und durch die Messung nicht zu beeinträchtigen. Hinsichtlich der zweiten Bedingung muss dabei angemerkt sein, dass durch den Einbau von Strömungsmessgeräten und Thermoelementen sowie durch die Gasabsaugung natürlich, wenn auch minimal, in den Prozess eingegriffen wurde. Des Weiteren ergaben sich aufgrund der Notwendigkeit des Auf- und Einbaus nicht vorgesehene bzw. längere Pausen im Anlagenbetrieb.

3.3.3.1 Anlage 7A

Anlage 7A ist ein Bewegtbettvergaser, der mit einem Zweistoffmotor inklusive Turbolader kombiniert wurde, d.h. der Motor kann sowohl im reinen Ölbetrieb als auch in Verbindung mit dem Produktgas betrieben werden. Der Strömungstransport des Produktgases erfolgt aufgrund des ausgeübten Saugzuges des BHKW, unterstützend durch ein Produktgasgebläse, welches stromabwärts der Gasreinigung eingebaut ist. Die Reinigung des Rohgases wird über Staubfilter und Nasswäsche vollzogen, die fühlbare Energie des Gases wird nicht genutzt. Das Vergasungsmittel Luft gelangt über ein weiteres, regelbares Gebläse in die Reaktionszone, wobei die Steuerung sicherstellt, dass im System Vergaser jederzeit ein Unterdruck zur Umgebung vorherrscht. Die Holzhackschnitzelzufuhr erfolgt automatisch aus einem Vorratsbehälter, welcher anlagentechnisch vom Trockner entkoppelt ist. Die erzeugte elektrische Energie wird ins Stromnetz eingespeist, der elektrische Eigenbedarf aus dem Stromnetz entnommen. Für den elektrischen Eigenbedarf verantwortlich zeichnen sich hauptsächlich die Antriebe der Transportvorrichtungen für Feststoff und Gas. Die ausgekoppelte Energie wird zu Heizzwecken sowie zur Holzhackschnitzeltrocknung verwendet.

Die Messkampagne war nicht eingebettet in einen regelmäßigen Betrieb, der Start der Anlage erfolgte mit Untersuchungsbeginn.

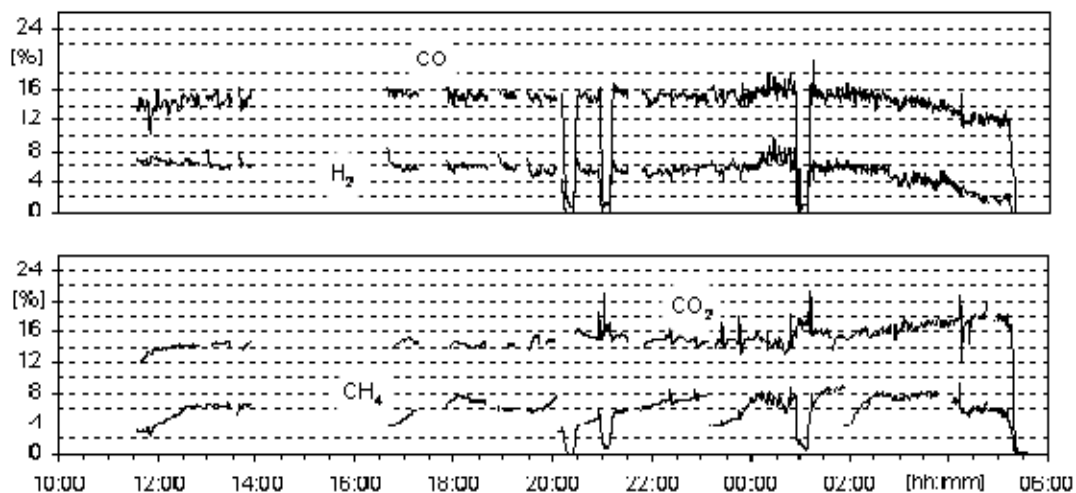


Abbildung 2: Produktgas Anlage 7A

Die während der Messung aufgenommene Zusammensetzung des trockenen Rohproduktgases ist in Abbildung 2 dargestellt. Aufgrund der Anordnung der Gasent-

nahmesonde stromaufwärts der Reinigung verstopfte der Absaugkanal sehr schnell und musste in regelmäßigen Abständen vom Staub befreit werden. Daher sind die Gaswerte nur lückenhaft vorhanden.

Wie aus den Verläufen ersichtlich, gab es Störungen im Anlagenbetrieb, welche zurückzuführen sind auf Probleme in der Holzzufuhr (Verklemmung in der Transportvorrichtung) sowie der Reststoffabfuhr (Ausfall der Austragsschnecke). Die Probleme wurden manuell behoben und der Betrieb konnte zumindest im Fall der Holzzufuhrstörungen zügig wieder aufgenommen werden.

Die hohe Staub- und Teerbelastung des Rohgases führte im Laufe der Messkampagne zum Zusetzen des ersten Reinigungsfilters der Anlage, wodurch im letzten Drittel der anvisierten 24-Stunden-Messung ein Druckabfall in der Produktgasleitung registriert wurde, was ein Absinken der Gasqualität, des Produktgasvolumenstromes und damit der Motorleistung bedingte. Daraufhin wurde der Versuch vorzeitig abgebrochen.

Abseits der Störungen konnten keine starken Schwankungen in Leistungsverlauf und Gasqualität beobachtet werden, der Heizwert des trockenen Produktgases ist aufgrund der Komponenten CO , H_2 und CH_4 zu $4\text{-}5 \text{ MJ/m}_\text{N}^3$ berechenbar. Ein stabiler Anlagenbetrieb lag jedoch aufgrund der geschilderten Ereignisse nicht vor.

Die Abgasemissionen sind in Abbildung 3 aufgetragen, die Position der Absaugsonde befand sich dabei stromaufwärts des Abgaswärmeübertragers, wobei jeweils vor und nach dem Oxidationskatalysator gemessen wurde. Die Wirksamkeit des Katalysators ist an den Sensorwerten für Kohlenmonoxid sowie an der Abgastemperatur zu erkennen, jedoch ist das Ergebnis noch verbesserungswürdig.

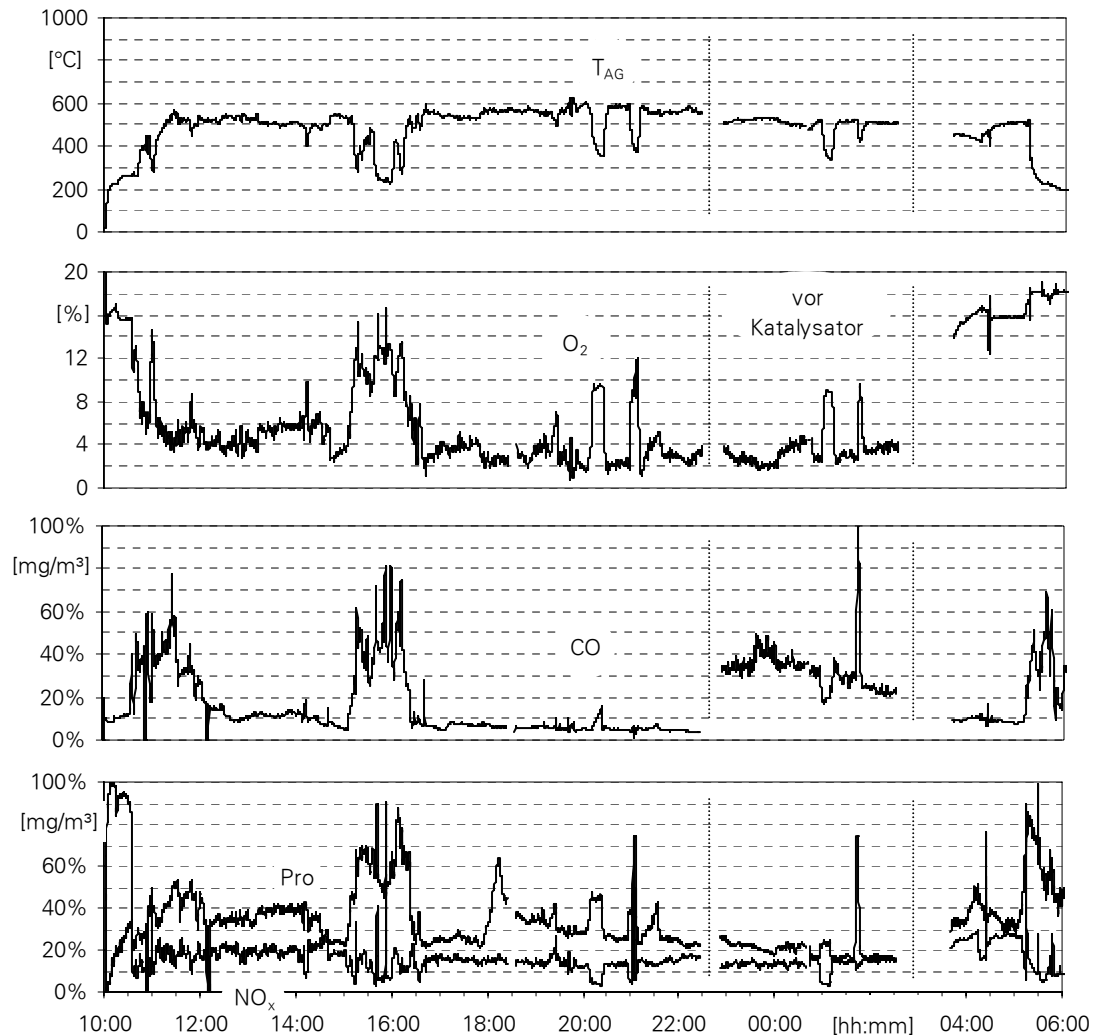


Abbildung 3: Abgasqualität Anlage 7A

Aufgrund der aufgenommen Messdaten ergeben sich die folgenden Kennzahlen

- elektrischer Anlagenwirkungsgrad: $\eta_{el,Brutto} = 14,0 \%$
- Brennstoffnutzungsgrad: $\eta_{KWK,Brutto} = n.n.$

Der Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad bezieht sich dabei auf das eingesetzte Öl sowie die HHS mit einem Heizwert von 16,85 MJ/kg (TS-Anteil 90,2 %). Dabei soll die unterschiedliche Wertigkeit der dem Motor zugeführten Energieströme erwähnt werden. Während das Öl direkt in den Motor gelangt, also mit der vollen Brennstoffenergie dem BHKW zur Verfügung steht, führt der Weg des Holzes über den Vergaser, in dem hinsichtlich der chemisch gebundenen Energie ein Umwandlungsverlust auftritt. Bei einer Aufteilung der Arbeiten auf die einzelnen Brennstoffe sollte der elektrische Wirkungsgrad des Holzes also unter dem angegebenen Wert liegen, der des Öles darüber

(entsprechend dem Motorwirkungsgrad). Auf die Höhe des Unterschieds zwischen den beiden Wirkungsgraden, lässt sich aus dem Vergaserwirkungsgrad bzw. aus der Differenz von Anlagen- und BHKW-Wirkungsgrad schließen.

Die Wärmenutzung konnte nicht quantitativ bestimmt werden. Die Abschätzung des Wertes ist aufgrund der gemessenen Gasabkühlung im Abgaswärmeübertrager möglich, dabei konnte eine Verringerung der Gastemperatur um ca. 250-300 K bestimmt werden. Über den Reststoff wurde mit 25,6 % verhältnismäßig viel der zugeführten Brennstoffenergie wieder ausgetragen¹⁸.

Für einen Zeitraum mit vergleichsweise stabiler Fahrweise wurden Vergaser- und BHKW-Wirkungsgrad ermittelt. Aufgrund der aufgetretenen Betriebsstörungen ist die Aufteilung des Holzmassestroms mit Unsicherheiten belegt. Trotzdem können die Zahlenwerte Anhaltspunkte für die Beurteilung der Komponenten liefern. Sie belaufen sich auf

- Vergaserwirkungsgrad: $\eta_{V,Rein} = 33,0 \%$
- BHKW-Wirkungsgrad: $\eta_{el,BHKW} = 28,4\%$

¹⁸ Der Zahlenwert beschreibt das Verhältnis der absoluten chemisch gebunden Energien von Reststoff und Holz, wenn man so will, ist das der „Kaltreststoffwirkungsgrad“. Berechnet wird er über die Reststoffmasse m_{RS} multipliziert mit dessen Heizwert $H_{u,RS}$ im Verhältnis zur eingesetzten Holzmasse m_H multipliziert mit deren Heizwert $H_{u,H}$.

3.3.3.2 Anlage 7B

Anlage 7B ist ein Bewegtbettvergaser kombiniert mit einem Gasmotor. Der Produktgas-transport erfolgt aufgrund des Motorsaugzuges, ein Staubfilter im Strömungsweg zwischen Vergaser und Motor bildet die alleinige Gasreinigung. Ein Teil der fühlbaren Wärme des Produktgases wird benutzt, um die Vergaserluft sowie die Holzhackschnitzel auf deren Weg in den Vergaser vorzuwärmen. Der restliche Anteil erwärmt über Konvektion und Strahlung die Umgebungsluft im BHKW-Aufstellungsraum. Die Vergaserluft wird über ein Gebläse der Reaktionszone zugeführt. Der Holzhackschnitzeltransport erfolgt automatisch aus einem Vorratsbehälter, welcher anlagentechnisch vom Trockner entkoppelt ist. Die Befüllung des Vorratsbehälters erfolgt üblicherweise einmal am Tag. Dafür wird die Anlage manuell abgeschaltet, die Funktionstüchtigkeit der Systeme Vergaser, Gasreinigung und Motor kontrolliert und nach vollzogener Befüllung wieder gestartet. Ein weiteres Eingreifen ist im Regelfall nicht erforderlich. Dies wurde ebenfalls in der von der TUD begleiteten Untersuchungsperiode festgestellt. Die Messkampagne war eingebettet in den normalen Anlagenbetrieb, wobei die Stillstandszeit vor und nach der Messung aufgrund der Integrierung des Messequipments in die Anlage länger ausfiel als üblich. Auch bei dieser Anlage wird der elektrische Eigenbedarf durch die Transportvorrichtungen für Gas und Holz hervorgerufen. Der elektrische Eigenbedarf im Betrieb wird jedoch nicht aus dem Stromnetz, sondern vom BHKW-Generator bereitgestellt. Da das BHKW ebenfalls die Energieversorgung des Hofes direkt übernimmt und nur die überschüssige elektrische Energie in das Netz einspeist, wurde in Abweichung von den anderen Anlagen bei der Ermittlung der Kennzahlen die an der Bilanzgrenze Generator abgegebene Energie angesetzt. Die Wärmeauskopplung erfolgt zu Heizzwecken und Trocknung der Holzhackschnitzel. Der Verlauf der Produktgaszusammensetzung ist aus Abbildung 4 zu entnehmen.

Bezüglich der Gasqualität kann von einer konstanten Fahrweise ausgegangen werden. Merkbliche Veränderungen in den Messwerten traten nur am Untersuchungsbeginn auf. Die ist möglicherweise der abgekühlten Anlage aufgrund einer längeren Standzeit geschuldet. Der rechnerische Heizwert des trockenen Produktgases liegt im Bereich $5-5,5 \text{ MJ/m}_N^3$.

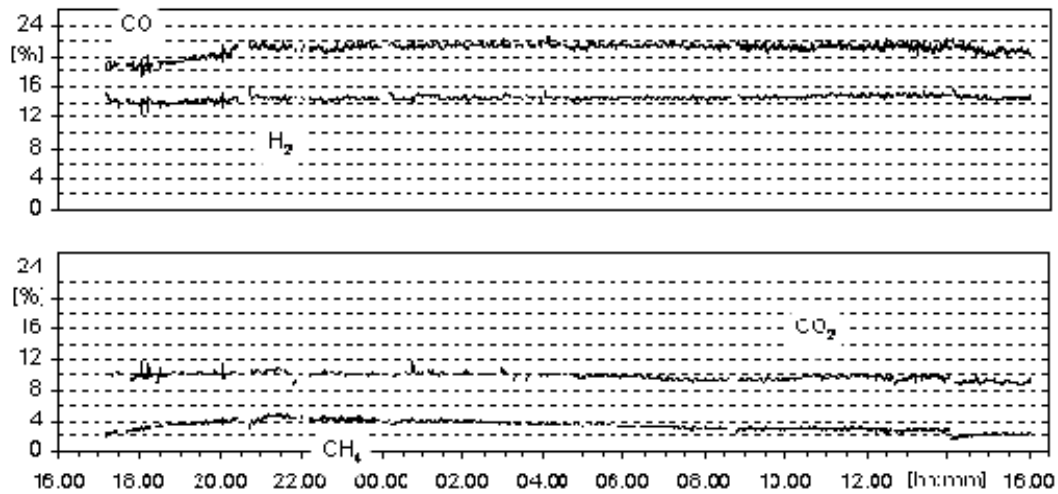


Abbildung 4: Produktgas Anlage 7B

Die Sensorwerte für das Abgas sind in Abbildung 5 aufgetragen, die Sondenposition lag dabei stromabwärts des Abgaswärmeübertragers.

An den Abgaswerten ist die gleichmäßige Fahrweise ebenfalls ersichtlich. Das BHKW wird mit einer nahezu stöchiometrischen Verbrennung betrieben, deutlich zu erkennen an den stark schwankenden Kohlenmonoxid-Emissionen, deren Absolutwert durch die Nachrüstung eines Katalysators noch gesenkt werden sollte.

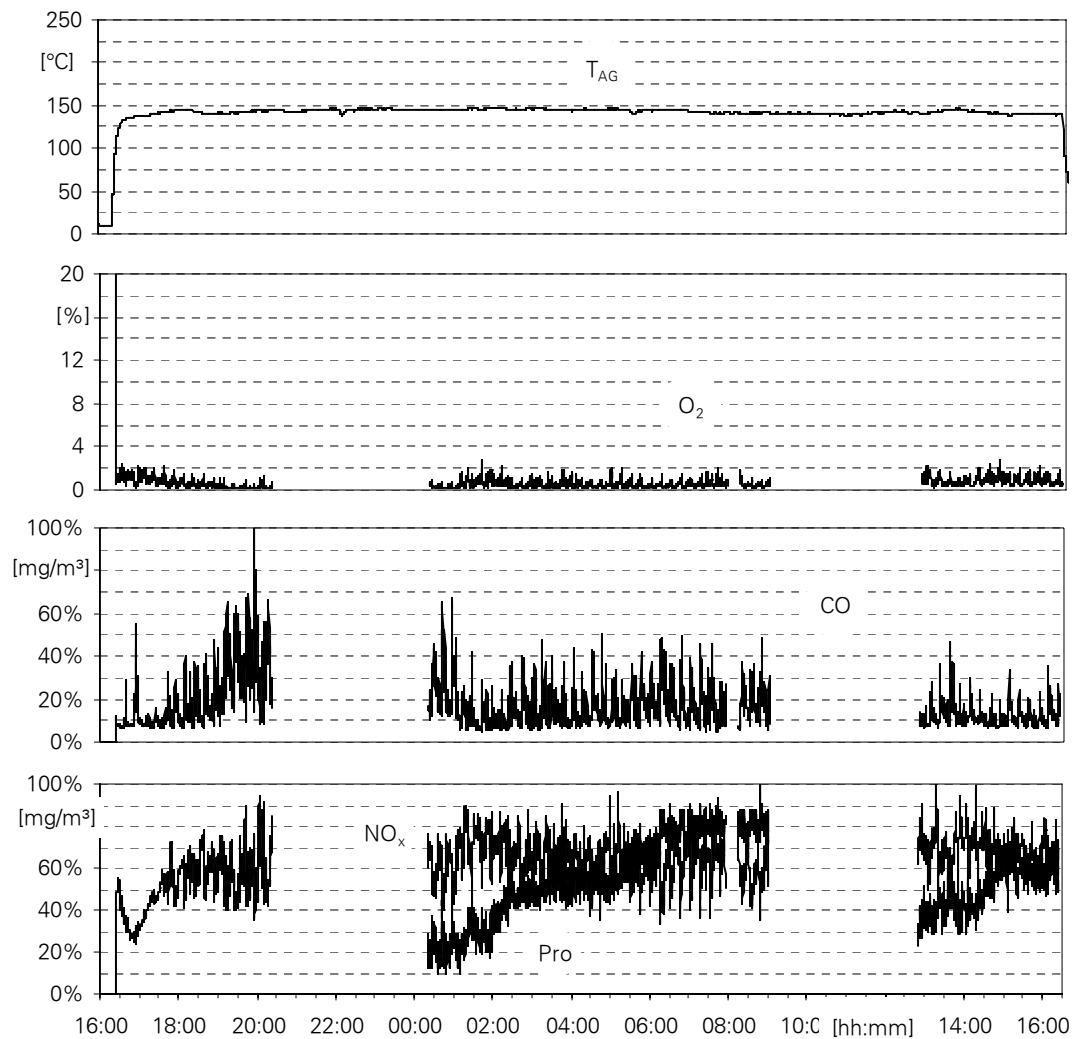


Abbildung 5: Abgasqualität Anlage 7B

Aus der Aufstellung der energetischen Kennzahlen folgt

- elektrischer Anlagenwirkungsgrad: $\eta_{el,Brutto} = 20,5 \%$
- Brennstoffnutzungsgrad: $\eta_{KWK,Brutto} = n.n.$

Eingesetzt wurden Holzhackschnitzel mit einem Heizwert von $17,5 \text{ MJ/kg}$ (TS-Anteil 93,3 %), mit dem Reststoff wurden 12,5 % der eingesetzten Brennstoffenergie ausgetragen. Die Aufnahme der Wärme konnte auch hier nicht quantitativ erfolgen, eine Abschätzung über die Abgasabkühlung ist aufgrund der Unkenntnis der Gastemperatur vor dem Abgaswärmeübertrager ebenfalls nicht möglich. Die gemessene Abgastemperatur nach dem Wärmeübertrager von knapp 150 °C lässt jedoch bei Annahme üblicher Motoraustrittsbedingungen auf eine mehr als 60-prozentige Ausnutzung der thermischen Abgasenergie schließen.

Eine merkliche und störende Teerbelastung des Produktgases konnte nicht festgestellt werden, der Einsatz von HHS mit hohem TS-Anteil sowie eine geeignete Vergasungssteuerung scheinen der Bildung schwer siedender Teerbestandteile entgegenzuwirken. Leichter siedende Bestandteile konnten über eine Reingasabsaugung und -untersuchung ermittelt werden, sie befinden jedoch im gasförmigen Zustand und beeinträchtigen den Motorbetrieb nicht.

3.3.3.3 Anlage 7C

Anlage 7C ist ein Festbettvergaser, kombiniert mit einem Gasmotor. Der Produktgas-transport erfolgt aufgrund des Motorsaugzuges. Die Vergaserluft strömt unterstützt durch ein regelbares Gebläse in die Reaktionszone, womit die Steuerung den vorgegebenen Unterdruck im Vergaser einstellt. Die Reinigung des Rohproduktgases erfolgt allein über einen Staubfilter. Die fühlbare Wärme des Produktgases wird in einem Wärmeübertrager an Umgebungsluft abgegeben, die zunächst nur in die Vergaserhalle abgeleitet wird. Die Integrierung in ein Wärmekonzept wäre somit jedoch relativ einfach möglich. Die ausgekoppelte Nutzwärme dient wiederum der Heizung sowie der Holzhackschnitzel-trocknung.

Die vom Generator abgegebene elektrische Energie wird direkt in das Stromnetz eingespeist, der benötigte elektrische Eigenbedarf für Gebläse und Transportvorrichtungen für das Holz wird aus dem Stromnetz entnommen.

Der Vergaser ist anlagentechnisch mit einem Trockner gekoppelt, besitzt jedoch für eventuelle Störfälle im Trockner einen zwischengeschalteten Vorratsbehälter. Die Zuführung der Holzhackschnitzel in den Trockner erfolgt manuell, von dort übernimmt die Automatik den weiteren Transport in den Vergaser. Der Anlagenbetrieb wird im Regelfall nicht unterbrochen, der Betreiber füllt den Trockner täglich, obwohl auch längere Intervalle denkbar wären.

Der Befüllungsturnus wurde von der TUD als Start- und Endpunkt der Untersuchung gewählt, vor und nach dem Messzeitraum lief die Anlage unverändert weiter. Störungen während der Untersuchung traten nicht auf, ein Eingreifen war nicht erforderlich. Der Anlagenbetrieb kann somit als stabil angesehen werden.

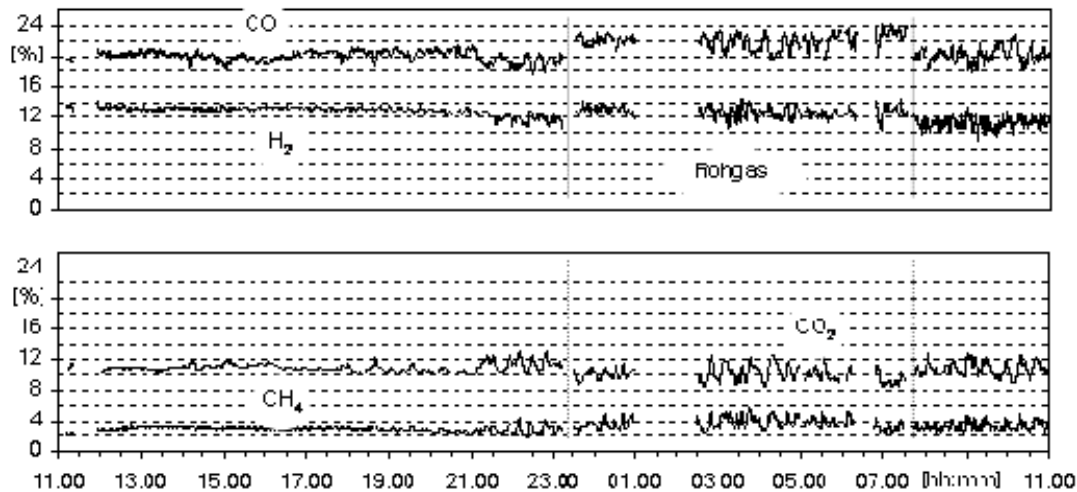


Abbildung 6: Produktgas Anlage 7C

Die Zusammensetzung des Produktgases ist aus Abbildung 6 zu entnehmen. Während der Untersuchung wurde die Möglichkeit genutzt, die Gaswerte von Roh- und Reingas aufzunehmen. Deutlich erkennbar ist der Einfluss der Gasreinigung, in der aufgrund zusätzlicher Luftzugabe ein sehr hoher Kohlenstoffumsatzgrad hinsichtlich des abgetrennten Reststoffes erzielt wird. Durch die Reaktionen der festen Kohlenstoffpartikel und der gasförmigen Gasbestandteile mit dem zugeführten Sauerstoff sowie durch die aufgrund der Luftzugabe erhöhte Reingasmenge ändert sich die relative Gaszusammensetzung nach der Reinigung.

Die Gasanalysewerte während des Untersuchungszeitraumes können als konstant angesehen werden, der Heizwert des trockenen Reingases beträgt ca. 5 MJ/m_N^3 .

Auch bei der Aufnahme der Abgasqualität war es möglich die Absaugsonde an zwei Positionen einzusetzen, stromaufwärts und stromabwärts des Katalysators und Abgaswärmeübertragers. Die Ergebnisse dieser Absaugungen sind in Abbildung 7 ersichtlich. Analog Anlage 7B unterliegen die Kohlenmonoxid-Emissionen aufgrund des nahe-stöchiometrischen Luft-Gas-Gemisches starken Schwankungen. Warum der Katalysator seine Aufgabe, die Minderung dieser Emissionen, nicht erfüllt, bedarf einer Klärung.

Des Weiteren ist der Einfluss der regelmäßigen Filterreinigung durch einen Gegendruckimpuls feststellbar, wodurch die Gaszuführung zum Motor kurzzeitig unterbrochen wird.

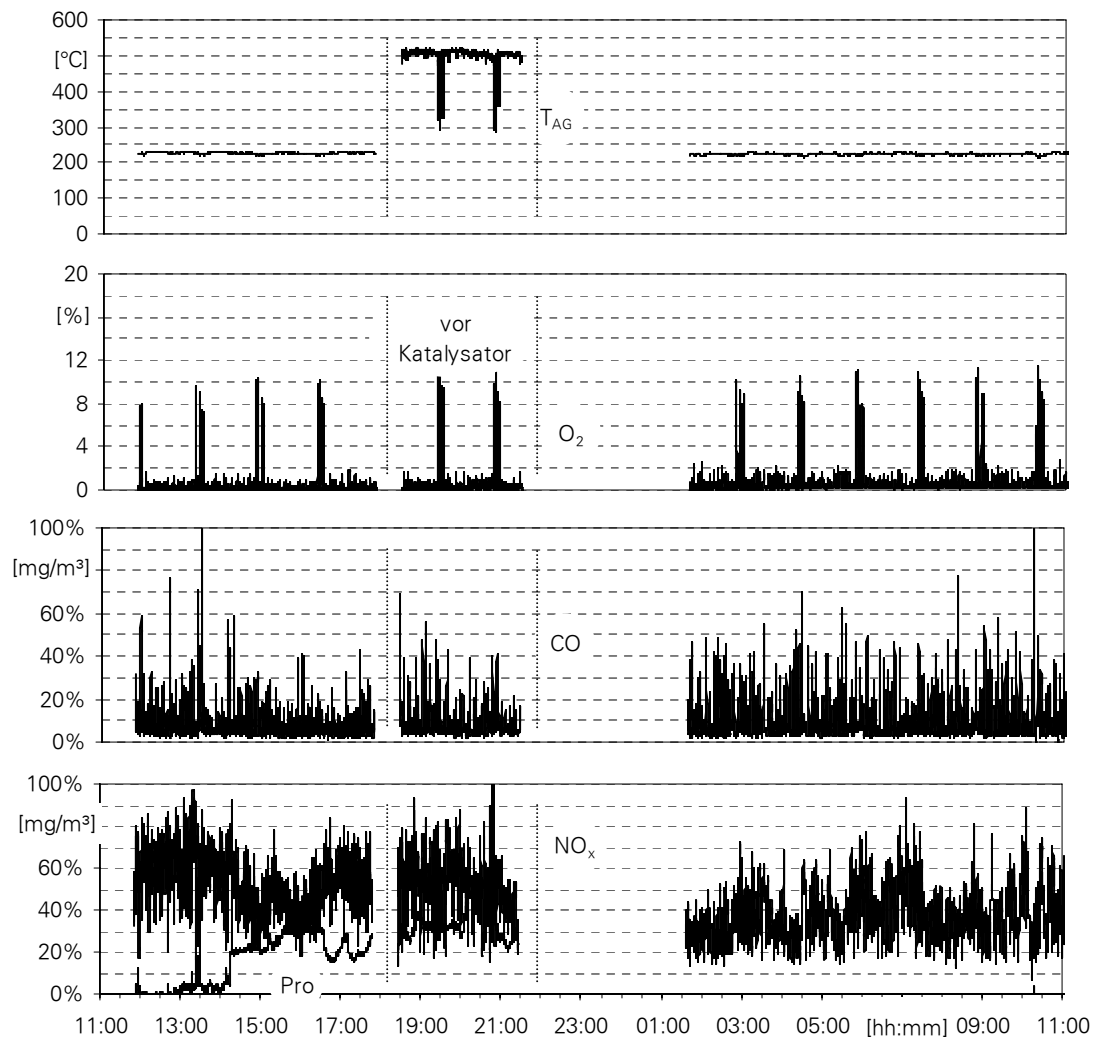


Abbildung 7: Abgasqualität Anlage 7C

Die energetischen Kennzahlen für Anlage 7C berechnen sich zu

- elektrischer Anlagenwirkungsgrad: $\eta_{el,Brutto} = 20,2\%$
- Brennstoffnutzungsgrad: $\eta_{KWK,Brutto} = 48,9\%$,

bezogen auf die dem Vergaser zugeführten HHS mit einem Heizwert von 18,1 MJ/kg (TS-Anteil 96,6 %). Die mit dem Reststoff ausgetragene Energiemenge ist kleiner als ein Prozent der zugeführten Energie.

Eine merkliche Teerbelastung konnte auch an dieser Anlage nicht festgestellt werden, die nachweisbaren gasförmigen Anteile leicht siedender KWS (z.B. Phenol) im Reingas beeinträchtigen den BHKW-Betrieb nicht.

3.3.3.4 Anlage 7D

Anlage 7D ist ein Bewegtbettvergaser der mit einem Zweistoffmotor kombiniert wurde. Die Förderung des Produktgases zum Motor übernimmt ein Produktgasgebläse, welches stromabwärts der Gasreinigung folgt. Die Reinigung des Rohgases erfolgt durch Staubfilter und Nasswäsche, die fühlbare Wärme des Produktgases wird teilweise durch Erwärmung der Vergaserluft in den Prozess rückgeführt. Letztere wird durch ein Zuluftgebläse in den Reaktionsraum transportiert. Die Holzhackschnitzelzuführung in und durch den Vergaser erfolgt automatisch über mechanische Transportvorrichtungen. Der Vorratsbehälter ist dabei anlagentechnisch vom Trockner entkoppelt, die Befüllung des Behälters erfolgt manuell in unregelmäßigen Abständen. Die vom Generator abgegebene elektrische Energie wird direkt in das Stromnetz eingespeist, der Eigenbedarf aus diesem bezogen.

Die Messkampagne war eingebettet in den normalen Anlagenbetrieb, wobei vor Messbeginn eine längere Filterreinigung durchgeführt wurde. Während der Untersuchung wurden vom Betreiber mehrere Lastzustände abgefahren, was gut an den Verläufen der Produktgasqualität in Abbildung 8 ersichtlich wird. Die Sondenposition für die Absaugung des Produktgases lag stromabwärts der Produktgasreinigung.

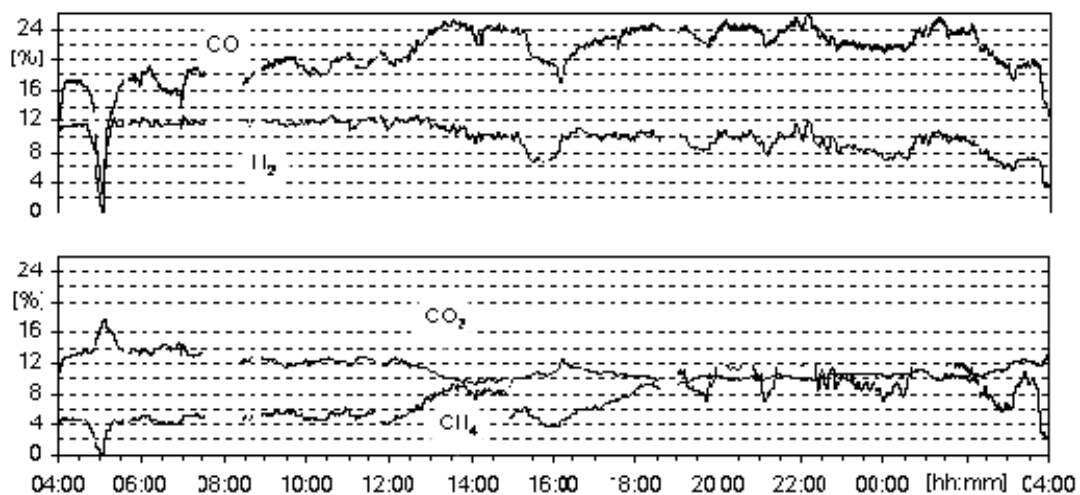


Abbildung 8: Produktgas Anlage 7D

Der Abfall der Gasbestandteile CO, H₂ und CH₄ kurz nach Beginn der Untersuchung ist auf eine unterbrochene Holzzufuhr in den Vergaser zurückzuführen. Die Störung wurde manuell behoben und der Vergasungsbetrieb zügig wieder aufgenommen. Während der Störung konnte jedoch aufgrund der automatischen Anpassung der Ölzufuhr die Leistung

des Motors konstant gehalten werden. Diese Automatisierung in der BHKW-Steuerung ermöglicht die anvisierte Motorleistung konstant bereitzustellen, auch wenn es wie in Abbildung 8 sichtbar zu Schwankungen in der Gasqualität kommt. Ein stabiler Anlagenbetrieb wurde somit während der Messkampagne gewährleistet.

Auffällig an den Gaswerten ist vor allem der hohe Sensorwert für Methan, welcher teilweise außerhalb des Messbereiches lag. Das deutet auf einen hohen Anteil an Kohlenwasserstoffen sowohl im Roh- als auch im Reinproduktgas hin. Im Fall des Reingases sind das neben Methan weitere gasförmige Kohlenwasserstoffe. Letztere verändern ebenso den Sensorwert für Methan, so dass dieser Absolutwert als Summenparameter zu verstehen ist. Mit dieser Kenntnis kann für das trockene Reinproduktgas in den letzten beiden Dritteln der Kampagne rechnerisch ein Heizwert von $7\text{-}8 \text{ MJ/m}_N^3$ ermittelt werden.

Die Gasreinigung arbeitete während der Untersuchung ohne erkennbare Störungen und stellte dem Motor ein nutzbares Produktgas zur Verfügung. Die Laboranalyse des Reinigungskondensates bestätigt das Vorhandensein höherkettiger KWS (Teere).

Die Abgasemissionen sind in Abbildung 9 dargestellt, die Position der Absaugsonde befand sich stromabwärts des Abgaswärmeübertragers. Der stabile Motorbetrieb ist an den Kurvenverläufen gut zu erkennen. Aufgrund der überstöchiometrischen Luft-Gas-Mischung im Motor sind die Schwankungen der Sensorwerte geringer als bei den Anlagen 7B und 7C. Für eine weitere Reduzierung der Kohlenmonoxidemissionen könnte ein Oxidationskatalysator nachgerüstet werden.

Die Berechnung der energetischen Kenngrößen für Anlage 7D ergibt

- elektrischer Anlagenwirkungsgrad: $\eta_{el,Brutto} = 31,9 \%$
- Brennstoffnutzungsgrad: $\eta_{KWK,Brutto} = 62,5 \%$,

beide Größen bezogen auf die eingesetzten Brennstoffe Pflanzenöl und Holzhackschnitzel mit einem Heizwert von $16,6 \text{ MJ/kg}$ (TS-Anteil 88,6 %). Wie bei Anlage 7A sei die unterschiedliche Wertigkeit der beiden Brennstoffenergien erwähnt, d.h. der auf das Holz bezogene Wirkungsgrad ist etwas geringer und der des Öls etwas höher als der angegebene Anlagenwert. Weniger als fünf Prozent der zugeführten Holzenergie werden über den Reststoff aus dem Vergaser abgeführt.

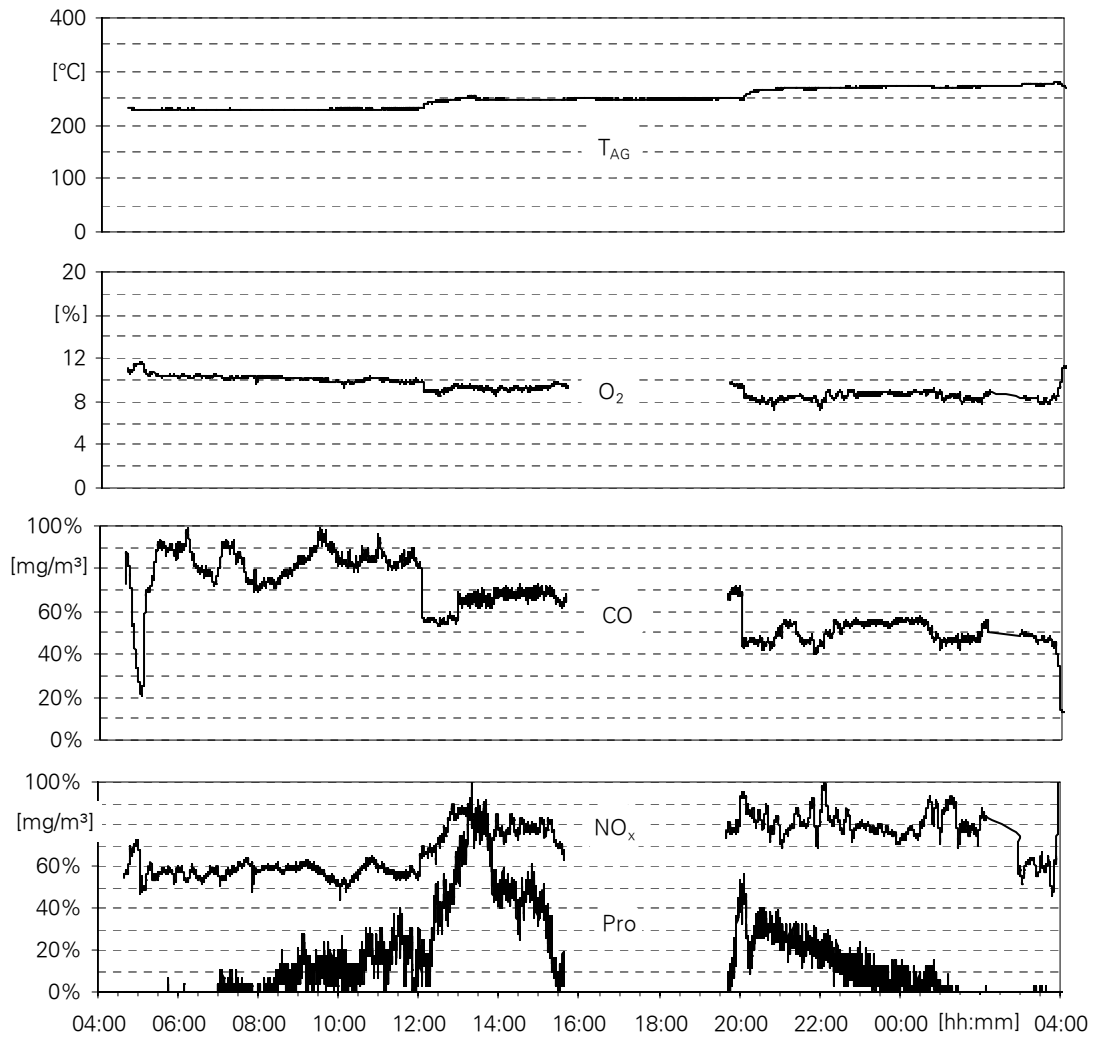


Abbildung 9: Abgasqualität Anlage 7D

3.3.3.5 Anlage 7E

Anlage 7E ist ein Festbettvergaser mit Gasmotor. Der Produktgastransport erfolgt aufgrund des Motorsaugzuges, welcher ebenso für den Zufluss der Vergaserluft in die Reaktionszone verantwortlich ist. Ein Unterstützungsgebläse für den normalen Anlagenbetrieb ist nicht vorhanden. Die Zufuhr der Holzhackschnitzel in den Vergaser erfolgt manuell. Aufgrund des beschriebenen Anlagenaufbaus kann mit Ausnahme der Startphase von einem Anlagenbetrieb ohne Eigenleistung ausgegangen werden¹⁹. Die Gasreinigung besteht aus einer Staubfilterung sowie der Gaskühlung, die fühlbare Wärme des Produktgases wird nicht genutzt. Die am BHKW anfallende Wärmeenergie wird ausschließlich im Heiznetz genutzt, die Trocknung der Holzhackschnitzel wird an anderen Orten durchgeführt. Aufgrund der manuellen Beschickung ist die Anlage nicht im Dauereinsatz, ein daher üblicher Betriebstag über ca. 7 Stunden wurde durch das Projektteam dokumentiert. Während der Untersuchung kam es zu keinen Störungen, der Anlagenbetrieb kann somit als stabil betrachtet werden. Einziger Eingriffspunkt seitens des Betreibers neben der regelmäßigen Brennstoffzufuhr waren Versuche der Motoreinstellung, um Auswirkungen auf das Emissionsverhalten zu untersuchen.

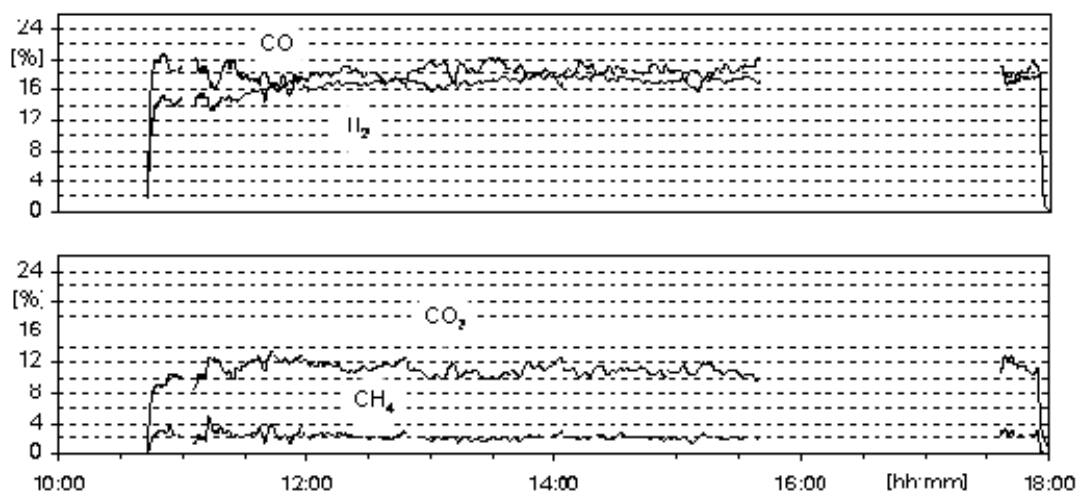


Abbildung 10: Produktgas Anlage 7E

Der Verlauf der Produktgaswerte in Abbildung 10 unterstützt die Aussage bzgl. des Betriebsverhaltens. Erkennbar ist eine konstant bleibende Zusammensetzung über dem Messzeitraum, mit einem trockenen Gasheizwert von ca. 5 MJ/m_N^3 .

¹⁹ In der Startphase bis zum Erreichen eines brennfähigen Gases wird der Gastransport durch ein Gebläse sichergestellt.

In den Verläufen der Abgasemissionen Abbildung 11 sind die bereits erwähnten Versuche der Motoreinstellung an dem merklich erhöhten Kohlenmonoxidanteil erkennbar. Außerhalb dieser Zeiträume bestätigen die Daten den stabilen und konstanten Anlagenbetrieb. Die Position der Absaugsonde war dabei direkt stromabwärts des Abgaswärmeübertragers angeordnet. Sehr gut zu erkennen, ist die über den Betriebszeitraum ansteigende Abgasaustrittstemperatur, welche durch die ebenfalls stetig steigende Temperatur des Heizwassers im Pufferspeicher bedingt ist.

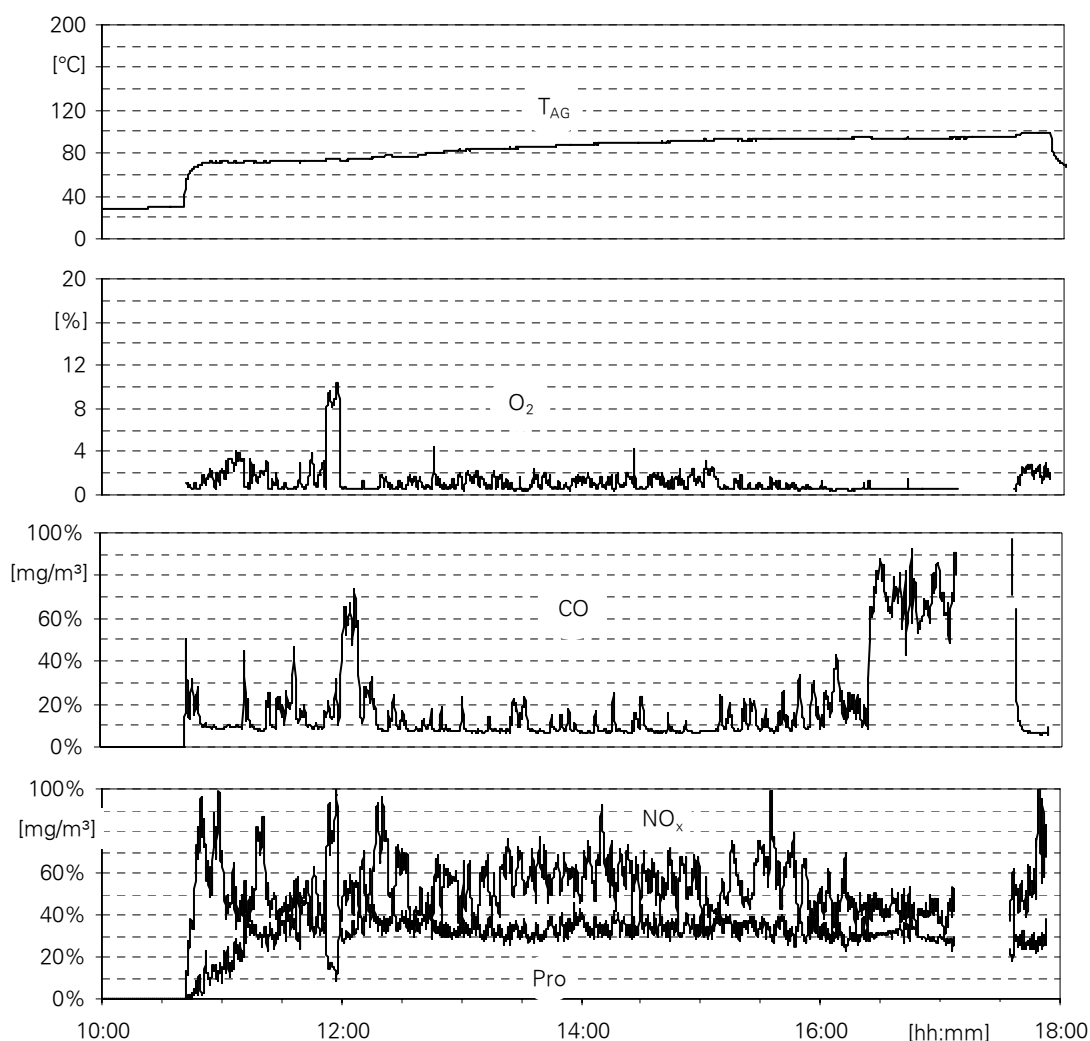


Abbildung 11: Abgasqualität Anlage 7E

Im Gegensatz zu den 24-Stunden-Messkampagnen ist aufgrund der geringen Betriebsdauer die Ermittlung der energetischen Kennzahlen stärker fehlerbehaftet hinsichtlich der Bestimmung der im Vergaser umgesetzten Brennstoffenergie. Die aus der Untersuchung gewonnenen Daten führen zu den Werten

- elektrischer Anlagenwirkungsgrad: $\eta_{el,Brutto} = 15,5 \%$
- Brennstoffnutzungsgrad: $\eta_{KWK,Brutto} = n.n. ,$

bezogen auf die eingesetzten Holzhackschnitzel mit einem Heizwert von 16,0 **MJ/kg** (TS-Anteil 86,5 %). Aufgrund der nicht quantifizierbaren Wärmeauskopplung ist der Nutzungsgrad nicht bestimmbar, die gemessenen Abgastemperaturen nach dem Wärmeübertrager lassen aber auf eine kaum noch steigerbare Nutzung der BHKW Abwärme schließen²⁰. Die Ermittlung von Vergaser- und Motorwirkungsgrad ergab folgende Werte

- Vergaserwirkungsgrad: $\eta_{V,Rein} = 57,9\%$
- Motorwirkungsgrad: $\eta_{el,BHKW} = 26,7 \%$.

20 „Kaum noch steigerbar“ bedeutet, aufgrund der Temperatur des Heizwassers ist eine weitere Abkühlung des Abgases in dieser Anordnung nicht möglich. Bei Annahme üblicher Motoraustrittstemperaturen kann man von einer über 80-prozentigen Nutzung der Abgasenthalpie ausgehen. Um diesen Anteil zusteigern und eventuell eine Brennwertnutzung herbeizuführen, müsste ein Wärmeabnehmer im Niedertemperaturbereich (Flächenheizung oder Brauchwassererwärmung) in die Anlage integriert werden.

3.4 SCHWACHSTELLEN IM ZUSAMMENHANG MIT DER FUNKTIONSTÜCHTIGKEIT

An den besichtigten und untersuchten Anlagen wurde eine Reihe von Schwachstellen identifiziert, von denen die wichtigsten im Folgenden aufgezählt werden. Ein Anspruch auf Vollständigkeit erhebt diese Zusammenstellung nicht. Oft treten Schwachstellen als Folge von Eigenheiten einzelner Anlagenkonzepte auf.

3.4.1 Brennstoffaufbereitung und -Trocknung

Viele Betreiber haben die Erfahrung gesammelt, dass die Funktion der HGM-BHKW-Anlage stark vom Wassergehalt der HHS abhängt. Nach Aussage der Betreiber gilt die Faustformel: je trockener der Brennstoff, desto gleichmäßiger arbeiten Vergaser und Motor und desto weniger Störungen des Anlagenbetriebes treten auf. Der Zusammenhang zwischen Brennstofffeuchte und Teerbildung mit der damit einhergehenden Brückenbildungsproblematik wurde in Abschnitt 3.2.3 bereits beschrieben.

Die Erkenntnis, dass dem Wassergehalt des Brennstoffs und damit dessen Trocknung eine fundamentale Bedeutung bei der Entwicklung der dezentralen Vergasungstechnik zukommt, wurde von den meisten Herstellern und Betreibern mittlerweile aufgegriffen. Das zeigt sich daran, dass sowohl bei der Planung von Neuanlagen zunehmend ein HHS-Trockner berücksichtigt wird, als auch, dass auf Initiative der Betreiber schon bestehende HGM-BHKW-Anlagen nachträglich um einen Trockner erweitert wurden.

Die Vor-Ort-Untersuchungen und die Einschätzung der Betreiber zeigen, dass keine der untersuchten Anlagen mit einem HHS-Trockner ausgestattet ist, der die in Abschnitt 3.2.1 benannten Anforderungen erfüllt und eine praktikable Betriebsführung gewährleistet. Nachfolgend werden Schwachstellen bei der HHS-Trocknung und der damit verbundenen Lagerung benannt sowie Empfehlungen für die Planung zukünftiger Anlagen abgeleitet.

- **Kontrolle und Einhaltung energetisch sinnvoller HHS-Entnahme- und -Befüllzyklen:** Die Messungen zeigen, dass mit fortschreitender Trocknung der HHS die Sättigung der Austrittsluft abnimmt. Mit der ungesättigten Austrittsluft wird ungenutzte Wärme an die Umgebung abgegeben, die eigentlich zur HHS-Trocknung zur Verfügung steht. Die Entnahme trockener HHS bei gleichzeitiger Befüllung mit feuchten HHS kann demnach häufiger und in kürzeren Abständen durchgeführt

werden. Dadurch ist die Menge getrockneter HHS ohne zusätzlichen energetischen Aufwand zu steigern.

- **Staubfreie Entnahme der getrockneten HHS:** Bei einigen der untersuchten Anlagen kann eine starke Staubbelastung bei Entnahme getrockneter HHS beobachtet werden. Bei der Trocknung nimmt der Feinanteil der HHS durch die mechanische Beanspruchung im Trockner und durch abnehmende Haftung des Staubes auf den getrockneten Partikeloberflächen zu. Konstruktive Lösungen zur Staubvermeidung sind einer elektrisch betriebenen Absaugung vorzuziehen.
- **Erfassung der HHS-Masse im Trockner:** Keine der untersuchten Anlagen erfüllt die Voraussetzungen zur automatischen Erfassung der HHS-Masse, obwohl diese z.B. durch eine Wägung bei der Zuführung der feuchten und bei der Entnahme der getrockneten HHS relativ einfach möglich ist. Es wird daher bei der Konzeption neuer Anlagen empfohlen, standardmäßig eine automatische Wägung einzuplanen bzw. diese in bestehenden Anlagen nachzurüsten. Diese Maßnahme würde dem Betreiber auch die Durchführung der Lohntrocknung erleichtern. Außerdem bietet die automatische Mengenerfassung eine zusätzliche Kontrolle des HHS-Lagerbestandes, womit die Brennstoffbeschaffung längerfristig planbar wird.
- **Messtechnisch gestützte Kontrolle und Überwachung der Trocknung anhand der Luftparameter:** Keiner der untersuchten Trockner ist mit Sensoren zur Erfassung der Temperatur, der Luftfeuchte und des Volumenstroms der Trocknungsluft ausgerüstet. Eine Minimalausstattung zur Messung der Luftein- und -Austrittstemperatur sowie der Luftfeuchte sollte bei Neuplanungen berücksichtigt werden.
- **Kontrolle und Überwachung HHS-Feuchte:** Die sichere Bestimmung der HHS-Feuchte durch den Betreiber ist nach Kenntnis der Autoren mit handelsüblichen Verfahren nicht möglich. Die bei den Betreibern angewendeten Schnellprüfverfahren zu Bestimmung der HHS-Feuchte sind im hohen Maße ungenau. Die angewendeten Schnellprüfverfahren nutzen die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Gutfeuchte. Aus eigener Erfahrung wird von den Autoren die Ofentrocknung von HHS-Proben als ein sicheres Verfahren zur Feuchtebestimmung vorgeschlagen. Folgende Vorgehensweise ist an die Vornorm DIN CEN/TS 14774-2 angelehnt und hat sich in der Praxis bewährt:

- Um eine räumliche Verteilung des Wassergehalts zu berücksichtigen, erfolgt die Probennahme an verschiedenen Stellen der HHS-Charge.
- Abhängig von der Größe der zu untersuchenden HHS-Charge sollten mehrere Proben von jeweils 0,5 - 1,0 kg genommen werden.
- Die Trocknung der Proben erfolgt im Ofen bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz. Je nach Größe des Ofens können dabei auch mehrere Proben gleichzeitig untersucht werden.
- Der Wassergehalt der Probe errechnet sich aus $\omega = (m_{fe} - m_{tr}) / (m_{tr} - m_{Ge})$, wobei m_{Ge} gleich der Masse des Probengefäßes sowie m_{fe} und m_{tr} gleich der Masse der feuchten bzw. trockenen HHS inkl. des Probengefäßes. Der TS-Anteil ist damit $(1 - \omega)$.
- **Luftführung am Austritt:** Eine Schwachstelle bei den untersuchten Trocknern ist das Befeuchten der oberen HHS-Lage im Trockner durch kondensierenden Wasserdampf. Abhilfe bieten folgende Gegenmaßnahmen:
 - Durch Führung der Austrittsluft ist diese auf kurzem Wege in die Umgebung zu leiten.
 - Durch Isolation des Trockners am Luftaustritt sind Wärmebrücken zu vermeiden.
- **Lagerungsmöglichkeiten:** Lohntrocknung bzw. die in Abschnitt 3.2.1 benannte Vorrattrocknung erfordern **überdachte** Lagermöglichkeiten für die HHS. Da feuchte HHS aufgrund der biologischen Zersetzung einen Biomasseverlust von jährlich bis zu 10 % aufweisen, sind dabei vor allem getrocknete HHS zu lagern.
- **Zielfeuchte der zur Lagerung getrockneten HHS:** Zum Einsparen von Trocknungswärme ist vorteilhaft beim Trocknen der zur Lagerung bestimmten HHS die Gleichgewichtsfeuchte nicht zu unterschreiten (~ 10 %). Die getrockneten HHS nehmen ansonsten während der Lagerung auf Grund ihrer hygroskopischen Eigenschaften wieder Wasser auf, bis sie im Gleichgewicht mit der Umgebungsfeuchte stehen. Vor dem thermischen Einsatz der gelagerten HHS können diese in einem zweiten Trocknungsschritt von der Gleichgewichtsfeuchte bis auf die gewünschte Endfeuchte getrocknet werden.
- **Gestaltung des Lagers für getrocknete HHS:** Bei der Planung des Lagers für die getrockneten HHS ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der geringeren Haftung zwischen den Partikeln deren Schüttkegel flach ausläuft. Zur Minimierung des Flä-

chenbedarfs ist das Lager für getrocknete HHS einzuhausen. Darin können größere Höhen aufgeschüttet werden.

- **Vermeidung von Verunreinigungen innerhalb der HHS:** Voraussetzung dafür ist, dass die HHS konsequent auf betonierten und gesäuberten Flächen gelagert und umgeschlagen werden.
- **Planung der Gesamtanlage entsprechend den örtlichen Gegebenheiten:** Zur Vermeidung unnötigen Arbeitsaufwandes bei der Beschickung und Entleerung des Trockners durch Transportwege, sollten der Trockner und die HHS-Lager möglichst nah beieinander angeordnet sein.

Ein wichtiger Schritt bei der Brennstoffaufbereitung ist die Siebung der HHS. Diese ist erforderlich, da die meisten Hersteller den störungsfreien Betrieb ihrer Anlagen nur gewährleisten, wenn bestimmte Anforderungen an die Partikelgrößenverteilung erfüllt sind. Die Integration einer Siebeinrichtung in die Anlage verringert damit die Abhängigkeit des Betreibers vom Brennstofflieferanten, da bei der Beschaffung der HHS keine erhöhten Anforderungen an die Qualität gesetzt werden müssen. Das wirkt sich vorteilhaft auf Angebot und Preis aus.

Die meisten Betreiber versuchen mittels Schwing- o. Rüttelsieben zu große und zu kleine Partikel aus den HHS auszusortieren. Aus den Erfahrungen mit den untersuchten Anlagen lassen sich für die Benutzung solcher Siebe folgende Empfehlungen ableiten:

- Die Siebeinrichtung besteht in der Regel aus zwei untereinander angeordneten, horizontalen Sieben, dabei gelangt der Brennstoff auf das obere grobmaschige Sieb. Große HHS werden auf dem Sieb zurückgehalten und somit separiert. Der Großteil des Brennstoffs fällt auf das darunter angeordnete, feinmaschige Sieb, wo wiederum der Feinanteil abgetrennt wird. Auf dem feinmaschigen Sieb verbleibt also der Brennstoff entsprechend der geforderten Partikelgrößenverteilung.
- Die Zuführung der zu siebenden Brennstoffmenge ist so zu dosieren, dass die HHS die Öffnungen des engmaschigen Siebes nicht komplett bedecken, da sonst zu kleine HHS über das Sieb rutschen und anschließend in die Anlage befördert werden (Vermeidung von Haufenbildung).
- Die Siebeinrichtung ist zweckmäßig in die Brennstoffzuführung zu integrieren und so zu gestalten, dass diese mit einem geringen Arbeits- und Maschinenaufwand zu betreiben ist.

- Die Anordnung der Siebung vor der Trocknung bietet den Vorteil, dass nur die für den Betrieb der jeweiligen Anlage erforderliche HHS-Fraktion getrocknet wird. Nachteilig ist allerdings, dass der durch die Trocknung entstehende Feinanteil u.U. eine zweite Siebung nach der Trocknung erforderlich macht.
- Die Anordnung der Siebung nach der Trocknung bietet den Vorteil, dass der Feinanteil in einem Siebschritt komplett aus dem Brennstoff entfernt wird. Der Nachteil dabei ist, es wird Wärme zur Trocknung des Feinanteils aufgewendet, ohne diesen in der Anlage der thermischen Nutzung zuzuführen. Außerdem wird die Luftströmung im Trockner durch den großen Feinanteil behindert.
- Die ausgesiebten HHS können abhängig von der Ausgangsqualität einen großen Anteil ausmachen und sollten ebenfalls sinnvoll genutzt werden.

3.4.2 Kontinuierliche Brennstoffzuführung und -weiterleitung

Ein kontinuierlicher Anlagenbetrieb scheitert oft an dem trivial erscheinenden Problem der kontinuierlichen Brennstoffzufuhr. Die Probleme werden unterschätzt. Es hat sich gezeigt, dass auch im hier untersuchten Leistungsbereich (vgl. auch [1]) die Herstellung eines Produktgases keine gravierende Herausforderung darstellt, sondern eher die kontinuierliche automatisierte Versorgung des Reaktors mit Holz der spezifizierten Stückigkeit und des spezifizierten Wassergehaltes.

Der Brennstoff HHS ist wegen seiner geometrischen und mechanischen Eigenschaften schwierig zu fördern.

- Eine Charakterisierung eines Brennstoffes mit einem einzigen Größenparameter lässt offen, welche Form und Qualität die Teile haben. Die Standard-Klassifizierung (z.B. G50) lässt hier noch deutlichen Interpretationsspielraum. Gerade an der Konsistenz und Qualität des Brennstoffes lässt sich generell eine wichtige Entscheidung für den Entwickler eines HGM-BHKW festmachen.
 - Variante 1: Brennstoffspezifikation an die Anlage anpassen. Dies führt zu Verlusten bei der Brennstoffausnutzung
 - Hacker anpassen
 - Hackzeitpunkt

- Ausgangsmaterial (Stangenholz, Kronenholz)
 - Siebtechnologie.
 - Variante 2: Anlagentechnischen Zusatzaufwand betreiben, der die Verarbeitung eines breiteren Spektrums von Brennstoffen ermöglicht²¹.
- Die verwendete Siebtechnik reicht nicht aus, um Störungen sicher zu vermeiden (z.B. Anlage 8A, 8B, 8C, 8D). Das Herstellen einer geeigneten Größenfraktion durch Sieben stellt ein zwar lösbares, aber für den Brennstoff HHS nicht triviales verfahrenstechnisches Anliegen dar²². Die folgenden Probleme können durch ungeeignete Partikel hervorgerufen werden:
 - Ein zunehmender Feinanteil im Brennstoff führt zu einer starken Erhöhung des Druckverlusts im Reaktor. Folglich verringert sich der geförderte Produktgasvolumenstrom, falls keine Nachregelung erfolgt. Außerdem erhöht sich damit die Gefahr, dass den HHS im Reaktor nur unzureichend Luft zugeführt wird, mit den in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Auswirkungen auf die Teerbildung.
 - Eine häufige Ursache für Störungen des Anlagenbetriebs sind zu große Partikel welche Fördereinrichtungen (Schnecken) blockieren und dadurch die Brennstoffzufuhr unterbrechen. Dies führt zum Stillstand der Anlage.
 - Verklemmen sich zu große Partikel in Klappen bzw. Schleusen, können diese nicht mehr dicht schließen und es tritt Fremdluft in die Anlage ein.
 - Blockieren zu lange Partikel Füllstandssensoren, signalisieren diese unabhängig vom tatsächlichen Füllstand in der Anlage „VOLL“. Die Brennstoffzufuhr wird durch die Regelung unterbrochen und die Anlage kommt zum Stillstand.

Bei Festbettvergasern hat sich das bereits in der Literatur beschriebene Problem der Brückenbildung als nach wie vor präsent erwiesen, weshalb diese nur mit trockenem Brennstoff ohne Feinanteil betrieben werden können. In der vorgelagerten Prozesskette tritt aber zwangsläufig ein Feinanteil auf, dessen Quantität von der Art des Holzes

²¹ In diese Richtung geht die massiv einsetzende Integration von Zwangsvorschubsystemen. Das Prinzip des Zwangsvorschubreaktors mit kleiner oder linienförmig langgestreckter Reaktionszone ist in Bezug auf Regelbarkeit und Multifuehfähigkeit als besonders erfolgversprechend anzusehen. Diese Aussage kann durch konkrete Anlagenerfahrungen belegt werden.

²² Beispielhaft seien die in Abschnitt 3.4.1 erwähnten Siebe genannt, welche die Sortierung mit zweidimensionalen Schablonen durchführen. Damit kann es z.B. immer wieder vorkommen, dass schmale, aber eigentlich zu lange Partikel in die Brennstoffzuführung gelangen

(Stammholz, Astholz) und der Einordnung des Hackens in den technologischen Prozess abhängt. Je trockener das Holz ist, umso stärker treten bei mechanischen Vorgängen (Transport, Zerkleinerung) Feinanteile auf.

Bisher am erfolgreichsten wurde den Problemen des kontinuierlichen Brennstofftransportes durch Verzicht auf diese Anforderung entsprochen, womit aber ebenso ein automatisierter und kontinuierlicher Betrieb ausgeschlossen ist. Hierzu sei auf den im Abschnitt „Wirtschaftlichkeit“ angesprochenen Betrieb mit sehr niedriger Jahresbenutzungsdauer verwiesen.

3.4.3 Gasführung

Der folgende Sachverhalt steht im Zusammenhang mit der oben angesprochenen Brennstoffspezifikation. Die Vergasungsanlagen der untersuchten Größenordnung werden meistens unter leichtem Unterdruck betrieben. Undichtheiten führen zu Falschlufteintrag. Kontinuierlicher Falschlufteintrag lässt sich nur mit sehr großem Aufwand völlig vermeiden, stellt aber normalerweise kein Problem dar. Der Brennstoffeintrag in den Unterdruckbereich erfolgt durch Schleusensysteme (z.B. Zellradschleusen, Doppelkammerschleusen). Kommt es hier zu Versperrungen durch einzelne Holzpartikel, wird der Prozess gestört.

3.4.4 Materialprobleme

Bei stark konzentrierter (bzw. zu wenig verteilter) Luftzufuhr treten lokal sehr hohe Temperaturen auf, die gelegentlich zu Materialproblemen führen. Dem wird z.B. durch den Einsatz von Feuerfestbeton begegnet. Dies gilt teilweise auch für Konzepte, die ursprünglich reinen Stahlbau bevorzugten. Aber auch der Einsatz spezieller Stähle wird teilweise erwogen.

Naheliegender ist, dass die aus der Kraftwerkstechnik bekannten Materialprobleme in Zonen hohen CO-Gehaltes (unterstöchiometrische Verbrennungsstufen) im Dauerbetrieb auch bei Vergasungsanlagen auftreten werden (Stichwort Hochtemperaturkorrosion).

Materialprobleme können bezüglich der Warmfestigkeit bei bewegten Bauteilen in oder in der Nähe der heißen Reaktionszone auftreten, wie sie verstärkt zur Behebung von Brückenbildungen eingesetzt werden.

3.4.5 Gasreinigung

Die Gasreinigung baut auf den bekannten verfahrenstechnischen Komponenten

- Trägheitsabscheidung (Zyklon),
- Filterung,
- Wäsche²³,

auf. In vielen Fällen werden von oben erwähnten Universalpraktikern aus Kapitalmangel hier Eigenbaulösungen geschaffen. Es ist jedoch unvermeidlich, dass die eingesparten Kosten sich damit in einem größeren Entwicklungsbedarf widerspiegeln. Unnötigerweise werden hier die im Anlagenbau bereits absolvierten Entwicklungsschritte teilweise wiederholt.

3.4.6 Motor

Die am Markt verfügbaren, hoch entwickelten Motoren sind prinzipiell nicht optimal für den Betrieb mit Holzgas geeignet. Die Anpassung der Gasqualität an die Motoranforderungen scheint mittelfristig gesehen komplizierter zu sein als die Anpassung des Motor-konzeptes an die Besonderheiten der Holzgasbereitstellung.

3.4.7 Planung und Ausführung des Gesamtsystems

Die folgenden Ausführungen werden aus den teilweise negativen Vor-Ort-Erfahrungen abgeleitet und sind ein Extrakt der von den Betreibern erhaltenen Informationen

- Es kann der bereits in der Literatur beschriebene Sachverhalt bestätigt werden, dass die Variantenvielfalt der Anlagenkonzepte auf Grund der großen Anzahl notwendiger Komponenten beinahe unüberschaubar groß ist. Der Trend ist ungebrochen und wird zusätzlich unterstützt durch die stetigen Veränderungen an den Anlagen auf Seiten der Betreiber und Hersteller.
- Auf Grund der Einbindung in örtliche Gegebenheiten, vor allem hinsichtlich Platz- und Brennstoffangebot sowie Wärmenutzungskonzept, kann nicht davon ausgegangen werden, dass es eine perfekte Anlagenkonfiguration geben wird, die jeder Anforderung entspricht. Erfahrene Planer werden allerdings in wenigen

²³ Das Problem der Regeneration der Waschflüssigkeit bzw. der Entsorgung belasteter Waschflüssigkeit stellt eine Herausforderung dar.

Jahren in der Lage sein, Standardmodule der Vergaser- und Trocknungstechnologie sowie der Brennstofflogistik an lokale Gegebenheiten anzupassen²⁴.

- Das heutige Anforderungsprofil an Planer wird u.a. noch dadurch charakterisiert, dass die gesamte Prozesskette von der Rohbiomasse bis zum Endenergieverkauf (Elektroenergiekonzepte, Wärmeversorgung) fachlich abgedeckt werden muss. Ursache dafür ist, dass die Technik noch in der Entwicklung und verlässliches Wissen zu wenig verfügbar ist.
- Es sind bisher jedoch nur sehr wenige Planer bekannt, die sich auf der Basis von langjährigen Erfahrungen in der Energieanlagentechnik dem Arbeitsgebiet „Biomassevergasung“ zugewendet haben. Pioniere auf diesem Gebiet müssen sich oft wegen wirtschaftlicher Probleme wieder zurückziehen. Dies hängt u.a. damit zusammen, dass öffentliche Förderungen nur selten für die Planungsphase eingesetzt werden können. So ist nicht untypisch, dass von einzelnen Betreibern nur Einzelkomponenten gekauft werden, mit dem Ziel, das anlagentechnische Gesamtkonzept in Eigenregie zu erstellen.

3.4.8 Betriebsführung

Der Betrieb eines HGM-BHKW ist gegenwärtig nur durch ausgebildetes Personal möglich. Eine zertifizierte Ausbildung, die mittelfristig anzustreben ist („Vergaser-Führerschein“) wird bei einigen Betreibern durch engagiertes Selbststudium und durch aktive Erfahrungen mehr als ausgeglichen.

Ansätze zur Online-Bilanzierung als Basis für einen effizient und sicher geregelten Betrieb existieren nach Kenntnisstand des Projektteams nur bei den Firmen Mothermik und Bioenergy Systems. Eine Verifikation konnte aus organisatorischen Gründen nicht durchgeführt werden. Die Online-Bilanzierung ist mittelfristig gesehen ein wichtiges Hilfsmittel, um die Prozesse regeln zu können.

3.5 SICHERHEIT UND GESUNDHEITSSCHUTZ

Die zu Projektbeginn als bedeutend eingestuften Fragen der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes sind immer noch hoch aktuell, selbst wenn an den vom Projektteam untersuchten Anlagen keine Vorfälle mit Personengefährdung bekannt wurden.

²⁴ Mit Planer ist hier die in einer Hand liegende Ingenieur Tätigkeit gemeint, diese kann von einem Ingenieurbüro, einem Contractor oder auch einem Generalunternehmer erfüllt werden

- Viele Betreiber und selbst Anbieter sind sich aber der bekannten Gefahr für Menschen, die von Kohlenmonoxid (CO) ausgehen kann, nicht bewusst. (Die Erzeugung von CO mit einem Anteil von über 20 % im Produktgas ist ein Ziel der Reaktionsführung. Mögliche Gefährdungen gehören deshalb zum Wesen des Verfahrens.)
- Dagegen werden Anforderungen des Explosionsschutzes zumindest bei Herstellern ernst genommen, ohne damit aber immer professionell umzugehen. Verunsicherung herrscht besonders bei der Festlegung von Explosionsschutzzonen. Oft wird in Maßnahmen investiert, ohne schon alle Möglichkeiten zum Verhindern des Entstehens gefährlicher Atmosphären ausgeschlossen zu haben.
- Dem Schutz der Haut und der Atmungsorgane vor Kontakt mit festen oder flüssigen Nebenprodukten der Vergasung (kanzerogene KWS bzw. Aerosole) wird dagegen oft zu wenig Beachtung geschenkt. Aschen werden bisher zu schnell als für Mensch und Umwelt unbedenklich deklariert und die Reaktivität kohlenstoffreicher Rückstände unterschätzt.
- Die Betreiber schenken der Gefahr durch am Holzstaub anhaftende Pilzsporen zu wenig Bedeutung. Dadurch steigt die Gefahr für Atemwegserkrankungen. Beim Umgang mit Hackschnitzeln bzw. bei der Arbeit in Räumen in denen diese gelagert werden, ist stets ein Atemschutz (z.B. Einwegmaske) zu tragen.
- Sehr viele Betreiber sind sich bisher über ihre spezifische (nicht auf den Hersteller übertragbare) eigene Verantwortung nicht im Klaren. Dies beginnt schon bei der Vorbereitung der Arbeitsstätte. Hier herrscht akuter Unterweisungs- und Handlungsbedarf.
- Das Grundproblem besteht darin, dass eine formale Anwendung aller geltenden Vorschriften durch übliche, hauptsächlich technische Lösungen zu solchen Aufwendungen führen würde, dass ein wirtschaftlicher Betrieb von kleinen HGM-BHKW nahezu ausgeschlossen wäre.

Der Ausweg liegt in der Zusammenführung und Anwendung vorhandenen Wissens bei der Analyse und Lösung der sicherheitstechnischen sowie den Umwelt-, Gesundheits- und Arbeitsschutz betreffenden Fragen, verbunden mit der Kombination von technischen Maßnahmen sowie bewusstem und geschultem Handeln. Hierzu werden im parallel begonnenen EU-Projekt „Gasification Guide“ Grundsätze herausgearbeitet.

3.6 SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR MESS- UND ANALYSEMETHODIK

Die Vor-Ort-Messungen an kommerziellen Anlagen durch das Projektteam wurden durch ein inzwischen am Markt erhältliches Holzgas-Analysegerät ermöglicht. Die Ausstattung von HGM-BHKW im Leistungsbereich unter 1 MW_{fwl} mit Gasanalysetechnik ist bisher sehr gering. Dies ist als Mangel anzusehen.

- Die Vor-Ort-Messung mit dem Ziel der Komplettbilanzierung ist notwendig, um dem Zusammenwirken der Komponenten im praktischen Betrieb näher zu kommen. Sie ist aber relativ aufwändig.
- Trotz der auf dem Gebiet der mobilen Messtechnik erreichten Fortschritte sind die Messmethoden weiter entwicklungsbedürftig. Reserven werden besonders in der Entwicklung von Auswertungsmethoden gesehen. Dazu gehört z.B. das rechnerische Herausfiltern von systematischen Fehlern unter Verwendung redundanter Messungen.
- Als messtechnische Probleme wurden bei der Vor-Ort-Diagnostik z.B. erkannt:
 - Durchlaufzeit der Biomasse durch den Vergaser/ Trägheit des Systems gegenüber Änderungen,
 - Querverbeeinflussungen auf dem Gebiet der Gasanalytik,
 - Standzeiten (Filter, Sensoren),
 - Falschlufteinfluss im Messkanal,
 - Speicherwirkungen in der Anlage (z.B. Teer und Staubablagerungen im Vergaser und Reinigungssystem).
- Das Spektrum der Gaszusammensetzungen im Rohgaszustand ist sehr groß. Gaszusammensetzungen allein sind als Qualitätsmerkmal aber nicht geeignet. Trotzdem ist eine umfassende Analyse auch an kleinen Anlagen erforderlich, um die Stabilisierung der Prozesse und Optimierungsinnovationen zu ermöglichen.
- Bei der Auswertung von Messungen sind die Methoden der Mittelung von ausschlaggebender Bedeutung. Eine Komplettbilanzierung ist hier hilfreich.

Für den praktischen und automatisierten Betrieb eines HGM-BHKW sollte die Konzentration auf die Aufnahme und Überwachung so genannter Leitwerte genügen. Die Menge, Art und Höhe dieser Leitwerte ist für den jeweiligen Anlagentyp zu ermitteln und in die Steuerung zu integrieren.

3.7 WIRTSCHAFTLICHKEIT

3.7.1 Aufgabenstellung

Es soll untersucht werden, ob aus betriebswirtschaftlicher Sicht Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Volkswirtschaftliche Untersuchungen werden nicht angestellt. Es wird die Annuitätenmethode angewendet.

Das Instrument der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird gewöhnlich angewendet, um verschiedene Varianten für die Erfüllung einer Versorgungsaufgabe miteinander zu vergleichen. Die Methode wird hier in modifizierter Form angewendet. Die Randbedingungen der ökonomischen Bewertung werden nach gegenwärtigem Wissensstand festgelegt oder partiell variiert. Die Investitionskosten werden so berechnet, dass die Summe der Annuitäten null ergibt, dass also gerade so Wirtschaftlichkeit im betrieblichen Maßstab gegeben ist.

3.7.2 Randbedingungen der ökonomischen Bewertung

- **Jahresvollbenutzungsdauer:** Dieser Parameter wird variabel gehalten. Er wird in der Realität sowohl von der Verfügbarkeit der Anlage, als auch vom energie-wirtschaftlichen Konzept beeinflusst.
- **Investitionskosten:** Dieser Parameter wird variabel gehalten. Es besteht eine starke Abhängigkeit der Investition von den Anforderungen an den automatisierten Betrieb und von den Festlegungen zur Sicherheitstechnik. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die von den Herstellern und Betreibern genannten Summen nicht belastbar sind.
 - Es handelt sich bisher um Einzelanfertigungen.
 - Auf Grund des komplexen Charakters einer HGM-BHKW-Anlage sind oft wichtige Kostenpositionen nicht berücksichtigt (z.B. Brennstofflogistik und Brennstofftrocknung, die anspruchsvoller sind als für eine Verbrennungsanlage).
- **Brennstoffkosten:** Dieser Parameter wird variabel gehalten. Die Brennstoffkosten sind einer starken Schwankung unterworfen, eine belastbare Prognose für einen mittelfristig anzusetzenden Brennstoffpreis existiert nicht. Ursache dafür sind die Abhängigkeiten der Marktentwicklung von der Technologieentwicklung, also eine Rückkopplung in den Prognosesystemen, aber auch die generelle Entwicklung der

Brennstoffpreise Hier wird auf spezielle Untersuchungen einschlägiger Fachinstitutionen verwiesen.

- **Stromerlöse:** Orientierung für die angesetzten Stromerlöse gibt das Erneuerbare-Energien-Gesetz. Mittelfristig sind hier die Grenzkosten der Strombereitstellung anzusetzen. Es wird deshalb mit einem Wert von über 20 EUROcent/kWh_{el} gearbeitet.
- **Wärmeerlöse:** Wärme wird nicht als „gerade noch verkaufsfähiges Nebenprodukt“, sondern als Hauptprodukt betrachtet. Demzufolge können Erlöse in der Größenordnung des Wärmemarktpreises angesetzt werden. Bei den untersuchten Betreibern kann vom Heizölpreis (6 bis 9 EUROcent/kWh) ausgegangen werden.
- **Nutzungsdauer:** Auf Grund der Ungewissheiten bezüglich der Standfestigkeit der Materialien unter den besonderen Bedingungen der Vergasung (reduzierende Atmosphären, belastete Gase) wird die Nutzungsdauer in Abhängigkeit von der jährlichen Vollbenutzungsdauer festgelegt. Vorsichtig wird hier von nur ca. 10'000 Vollbenutzungsstunden ausgegangen.
- **Finanzieller Personalaufwand:** Während die spezifischen Personalkosten für einen Vollzeitbeschäftigten (VZÄ, Vollzeitäquivalent) relativ sicher mit 50'000 EURO/a angenommen werden, spielt die Abschätzung des Arbeitskräfteeinsatzes eine wichtige Rolle für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Bei den im Projekt untersuchten Betriebsformen und Anlagengrößen, kann langfristig von der Anwesenheit technisch geschulten Personals ausgegangen werden, welches die Anlagenbetreuung in Teilzeitbeschäftigung übernehmen kann. In die Wirtschaftlichkeitsberechnung werden zwei Komponenten aufgenommen
 - fixe jährliche Personalkosten in Abhängigkeit von der elektrischen Nennleistung der Anlage,
 - variable Personalkosten in Abhängigkeit von der Benutzungsdauer.

Die entsprechenden Parameter sind der Anteil betreuer Betriebsstunden (E: Anteil betr. Std.), der Stundensatz der Lohnkosten (M: Stundensatz) und ein an die installierte elektrische Leistung gebundener fixer Personalkostenansatz (L: Pers.-Kosten). Angesichts dessen, dass an den untersuchten Anlagen eine Bewertung der Personalkosten durch Anlagenhersteller und Betreiber nicht stattfindet, ist eine Wahl praxisnaher Parameter schwierig. Der in den Beispielen gewählte Wert für E = 0.001 kommt einer Eliminierung dieses Parameters gleich. Das Berech-

nungsmodell enthält für Nachfolgearbeiten noch Untersuchungsspielraum. Mit dem implementierten Datensatz wird eine 100-kW_{el}-Anlage mit Personalkosten in Höhe von 20'000 EURO/a belastet. Dieser Wert liegt oberhalb dessen, was von den Betreibern derzeit als sinnvoll angesehen wird und unterhalb sonst typischer Ansätze in der Energiewirtschaft.

3.7.3 Sensitivitätsuntersuchungen zur Wirtschaftlichkeit

Bevor in die Rechenbeispiele eingeführt wird, seien die wichtigsten Erkenntnisse der Variationsrechnungen vorweggenommen:

- Die Wirtschaftlichkeit einer Holzvergaser-BHKW-Anlage hängt von vielen Faktoren ab. Der Vielfalt der Einflussmöglichkeiten und deren gegenseitiger Beeinflussung sollte sich der künftige Nutzer bewusst sein.
- HGM-BHKW haben nach gegenwärtigem und in nächster Zeit zu erwartendem Stand der Technik nur eine wirtschaftliche Chance, wenn die Anlage als Wärmebereitstellungsanlage mit ergänzender Stromerzeugung gesehen wird.
- Die Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades sollte im Rahmen einer betriebswirtschaftlichen Gesamtoptimierung erfolgen und nicht Selbstzweck sein. Die Bewertung einer Anlage allein anhand des elektrischen Wirkungsgrades und der auf elektrische Leistung bezogenen Investitionskosten ist schwierig
- Der Bewertung des Personalaufwandes sollte in Nachfolgearbeiten – möglicherweise in Zusammenarbeit mit Wirtschafts- und Sozialfachleuten - eine vertiefte Aufmerksamkeit geschenkt werden.
- Die Plausibilität des in der Praxis beobachteten Falles, dass eine Anlage mit einer Vollbenutzungsdauer von 2000 h/a nach Betreiberangaben Wirtschaftlichkeit erreicht, kann unter gewissen Voraussetzungen verifiziert werden.

Es folgen zwei Lesebeispiele für die Abbildungen 12 bis 19, deren Berechnungsgrundlage in Tabelle 2 dargestellt ist. Die Abbildungen greifen exemplarisch aus der sehr großen Vielfalt möglicher Parameterkombinationen einige heraus, um interessante Trends darzustellen. Auf der Basis des hier angegebenen Rechenmodells müssen im Einzelfall oder für anderen als die hier verwendeten Eckdaten konkrete Berechnungen durchgeführt werden.

Lesebeispiel 1:

In Abbildung 12 wie auch in den folgenden Abbildungen 13 bis 19 sind jeweils sechs Szenarien grafisch dargestellt. Entsprechend der speziell zu diskutierenden Abhängigkeit wird durch das Säulendiagramm der variierte Parameter dargestellt. Dabei handelt es sich um die Volllast-Benutzungsdauer des elektrischen (VBDEL) und des thermischen Energiestroms (VBDKWK). VBDKWK muss kleiner oder gleich VBDEL sein. Unterhalb der Diagramme sind die kompletten Datensätze für die Wirtschaftlichkeitsberechnung lt. Tabelle 2 angegeben. Damit wird maximale Transparenz der Berechnung hergestellt und weitere Variationsrechnungen ausgehend von den angegebenen Datensätzen sind leicht möglich.

Standardfall der Diskussion der Wirtschaftlichkeit von KWK-Anlagen ist der Betriebsfall 3 in Abbildung 13. Betrachtet man zunächst im untersten Diagramm die durchgezogene Linie, erhält man für diesen Standardfall mit einer Volllastbenutzungsdauer von 5550 h/a mit ständiger Abwärmenutzung²⁵ eine rechnerische Obergrenze für die Anlageninvestition (Wirtschaftlichkeit) in Höhe von 2'800 EURO/kW_{el}. Eine der Annahmen für diesen Fall ist ein elektrischer Wirkungsgrad von $\eta_{el} = 19 \%$ (F) und ein Gesamtenergieausnutzungsgrad (leistungsbezogen) von $\eta_{KWK} = 65 \%$ (F: η_{el} + G: η_{th}).

Die unterbrochene Linie stellt bei sonst gleichen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen die Werte für eine Anlage mit einem elektrischen Wirkungsgrad von $\eta_{el} = 23 \%$ (F) dar. Der Gesamtenergieausnutzungsgrad η_{KWK} (F+G) wird unverändert beibehalten, was sich rechnerisch in einer niedrigeren Ausbeute an Nutzwärme ($\eta_{th} = 42 \%$ [G]) äußert. Eine solche Anlage muss, was zunächst paradox erscheinen mag, theoretisch deutlich billiger sein. Ursache ist der große Einfluss der kommerziellen Wärmenutzung. Nur wenn man das Verhältnis Stromerzeugung und Wärmeerzeugung beibehält, steigt die Investitionsobergrenze.

Die Zusammenhänge werden deutlich, wenn man Abbildung 15 und Abbildung 19 hinzuzieht. Abbildung 15 zeigt bei sonst unveränderten Randbedingungen eine Erhöhung des Brennstoffpreises auf 150 % des Referenzfalles. Im Betriebsfall 3 sinken für beide elektrischen Wirkungsgrade die maximal wirtschaftlichen Investitionssummen. Bei niedrigerem elektrischem Wirkungsgrad sinkt diese jedoch schneller, der Unterschied wird gerin-

²⁵ Der Begriff Abwärmenutzung impliziert, dass es sich um die Deckung eines ohnehin vorhandenen, bisher fossil gedeckten Wärmebedarfs handelt.

ger. Steigt hingegen der als Orientierung für den Wärmepreis herangezogene Ölpreis um 50 %, steigen beide Investitionsobergrenzen an, diejenige für den Fall mit $\eta_{el} = 19 \%$ schneller.

Die Schlussfolgerung dieser Trends ist nicht, dass niedrige elektrische Wirkungsgrade besser sind als hohe. Es muss hingegen die Konsequenz gezogen werden, dass eine Fixierung auf spezifische Investitionskosten, die allein auf die elektrische Leistung bezogen werden, nicht für die Betrachtung ausreicht. Wegen der Bedeutsamkeit des Wärmeabsatzes ist es möglicherweise sogar aussagekräftiger, die spezifischen Investitionskosten durch Bezug auf die thermische Leistung abzubilden. Bei dieser Darbietung der Berechnungsergebnisse (siehe mittlere Diagramme aller Abbildungen) sind die Trends leicht nachvollziehbar.

Lesebeispiel 2:

Die Bedeutung der Wärmenutzung wird deutlich, wenn man die in Abbildung 13 dargestellten drei Fälle vergleicht. Neben der Standard-Vollbenutzungsdauer von 5550 h/a sind zwei kürzere Benutzungsdauern aufgetragen, die kürzeste mit 1850 h/a im Bereich der Vollbenutzungsdauer von Raumwärme mit Brauchwarmwasserbereitstellung. Wie erwartet sinkt in diesem Fall die für die Wirtschaftlichkeit der Anlage gerade noch zulässige Investitionssumme auf ca. 60 %, bezogen auf eine Volllastbenutzungsdauer von 5550 h/a.

Weiter zu untersuchen ist die Abhängigkeit der maximal zulässigen Investitionskosten von der geplanten Vollbenutzungsdauer. Je höher die Vollbenutzungsdauer ist, umso stärker nimmt der Aufwand für Automatisierung und Betrieb ohne Beaufsichtigung zu. Aus den praktischen Untersuchungen leitet sich die Hypothese ab, dass die tatsächlichen, maximal zulässigen Investitionskosten, aufgetragen über der im Energiekonzept vorgesehenen Volllastbenutzungsdauer, steiler verlaufen als die in den Abbildungen gezeigten Obergrenzen. Vereinfacht ausgedrückt heißt das, dass für ausgeführte Anlagen mit geringen Vollbenutzungsdauern möglicherweise eher Wirtschaftlichkeit erreichbar ist als für hohe Vollbenutzungsdauern. Diese Hypothese wird durch untersuchte Fälle empirisch gestärkt.

Von negativer Wirkung auf die Wirtschaftlichkeit ist es, eine für die Kraft-Wärme-Kopplung ausgelegte Anlage ohne Wärmenutzung aus der Stromerzeugung zu betreiben. Dies wird aus dem Vergleich von Abbildung 12 und Abbildung 13 deutlich. Die für höhere Benutzungsdauer ausgelegte Anlage müsste preiswerter sein als diejenige mit kürzerer jährlicher Betriebsdauer.

Die hier diskutierten Effekte hängen, auch im Vergleich zu [1] damit zusammen, dass ein relativ hoher Wärmepreis in Ansatz gebracht wird. Dieser ist zum einen dadurch gerechtfertigt, dass bei kleinen Wärmebereitstellungsanlagen direkt Heizöl verdrängt wird und zum anderen dadurch, dass man von einem dauerhaft hohen Preisniveau für Heizöl ausgehen kann.

Generelle Bemerkungen:

Prinzipiell wurden sehr konservative Annahmen bezüglich der für die Berechnung der maximal möglichen spezifischen Investitionskosten benötigten Parameter getroffen. Dies äußert sich z.B. in der Annahme von Reisezeiten (Laufzeiten) von 10'000 Betriebsstunden. Dieser Wert ist niedrig, wenn man die üblicherweise in der Energietechnik angesetzten Nutzungsdauern von 15 Jahren bei Vollastbenutzungsdauern von über 6000 h/a vergleichend heranzieht. Damit wird z.B. das Risiko minimiert, dass bisher nicht identifizierte Materialprobleme über Kausalketten zum wirtschaftlichen Ruin führen.

Die Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeit von der großen Anzahl variabler Randbedingungen bedarf im konkreten Planungsfall der objektbezogenen Berechnung. Die hier angebotene Darstellung stellt wichtige Abhängigkeiten bildlich dar und zeigt vor allem das Gewicht der oft unterschätzten Wärmenutzung.

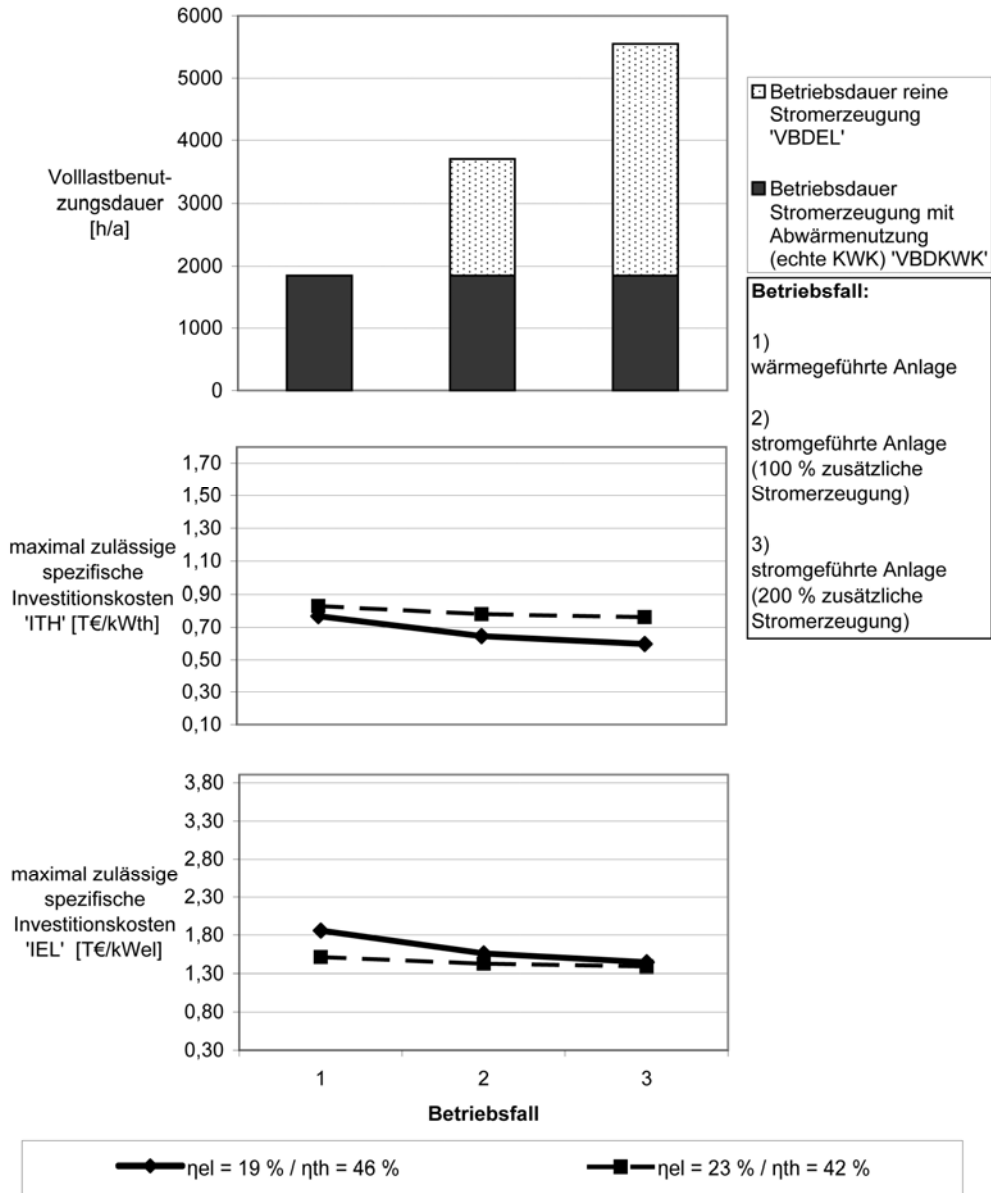
Es ist realistisch, dass die hier ermittelten spezifischen Investitionsobergrenzen bei der Realisierung von Anlagen unterschritten werden.

Tabelle 2: Rechenschema

1	A Bemerkung	B Einheit	C Berechnung	D Wert
2				
3	Szenario		1	1
4				
5	Bezugsgröße	kW _{el}	1	1
6				
7	Technische Daten			
8				
9	Wirkungsgrad el.		F: η_{el}	0,19
10	Wirkungsgrad Wärme		G: η_{th}	0,46
11				
12	thermische Leistung der KWK-Anlage	kW _{th}	D5/D9*D10	2,42
13				
14	Jahresvollbenutzungsdauer Strom	h/a	C: VBDEL	1850
15	Jahresvollbenutzungsdauer Wärme	h/a	D: VBDKWK	1850
16				
17	Anteil betreute Stunden		E: Anteil betr. Std.	0,001
18				
19	Stromerzeugung pro kW installierte el. Leistung	MWh _{el} /a / kW _{el}	-D5*D14/1000	-1,85
20	Wärmeauskopplung pro kW installierte el. Leistung	MWh _{th} /a / kW _{el}	-D12*D15/1000	-4,48
21				
22	Brennstoffverbrauch pro kW _{el} installierte Leistung	MWh _{BS} /a / kW _{el}	-D19/D9	9,74
23				
24	el. Jahresnutzungsgrad	MWh _{el} /a / MWh _{BS} /a	-D19/D22	0,19
25	th. Jahresnutzungsgrad	MWh _{th} /a / MWh _{BS} /a	-D20/D22	0,46
26				
27	Wirtschaftliche Rahmendaten			
28	allgemeine wirtschaftliche Rahmenbedingungen			
29	Nutzungsdauer in Betriebsstunden absolut	H	H: Lebensdauer	10000
30	Nutzungsdauer in Jahren	A	D29/D14	5,41
31	kalkulatorischer Zinssatz		I: kalk. Zinssatz	0,065
32	Annuität	1/a	KAPZ(D31;D30;D30;1;;0)	-0,21

1	A Bemerkung	B Einheit	C Berechnung	D Wert
33				
34	spezielle wirtschaftliche Rahmenbedingungen			
35	jährliche Wartungskosten + Hilfsstoffe + Versicherung bezogen auf Investitionssumme	1/a	K: jährl. Wart.-K.	-0,012
36				
37				
38				
39	Jährliche Personalkosten (fix)	TEUR / kW _{el}	L: Pers.-Kosten	0,2
40				
41				
42	Stundensatz	EUR / h	M: Stundensatz	30
43				
44	Angenommene Investition	TEUR / kW _{el}	D64	1,86
45				
46				
47	Preis des ersetzten Strombezugs (Orientierung: EEG)	EUR/kWh	N: Strompreis	0,213
48	Preis der ersetzten Wärmebereitstellung (nur Brennstoff) (Zukunftsszenario)	EUR/kWh	O: Wärmepreis	0,09
49				
50	Wirtschaftlichkeit nach Annuitätenmethode			
51	Brennstoffpreis, massebezogen	EUR / t	P: BS-Preis	58
52	Brennwert	MJ / kg	Q: Brennwert	16
53	Brennstoffpreis heizwertbezogen	EUR / kWh	D51*3,6/1000/D52	0,013
54				
55	Wert der verkauften Wärme	TEUR/a	-D48*D20	0,40
56	Wert des verkauften Stroms	TEUR/a	-D47*D19	0,39
57	Brennstoffkosten	TEUR/a	-D53*D22	-0,13
58	Personalkosten	TEUR/a	-D39*D5-D14*D17*D42/1000*D5	-0,26
59	Kapitaldienst	TEUR/a	D44*D32	-0,39
60	jährliche Wartungskosten +Hilfsstoffe + Versicherung	TEUR/a	D44*D35	-0,022
61	SUMME	TEUR/a	SUMME(C55:C60)	0,00

Einfluss der Anlagenfahrweise von Klein-KWK-Anlagen auf Basis von Holzvergaser BHKW ($\eta_{ges} = 65\%$) Referenzbeispiel [1]

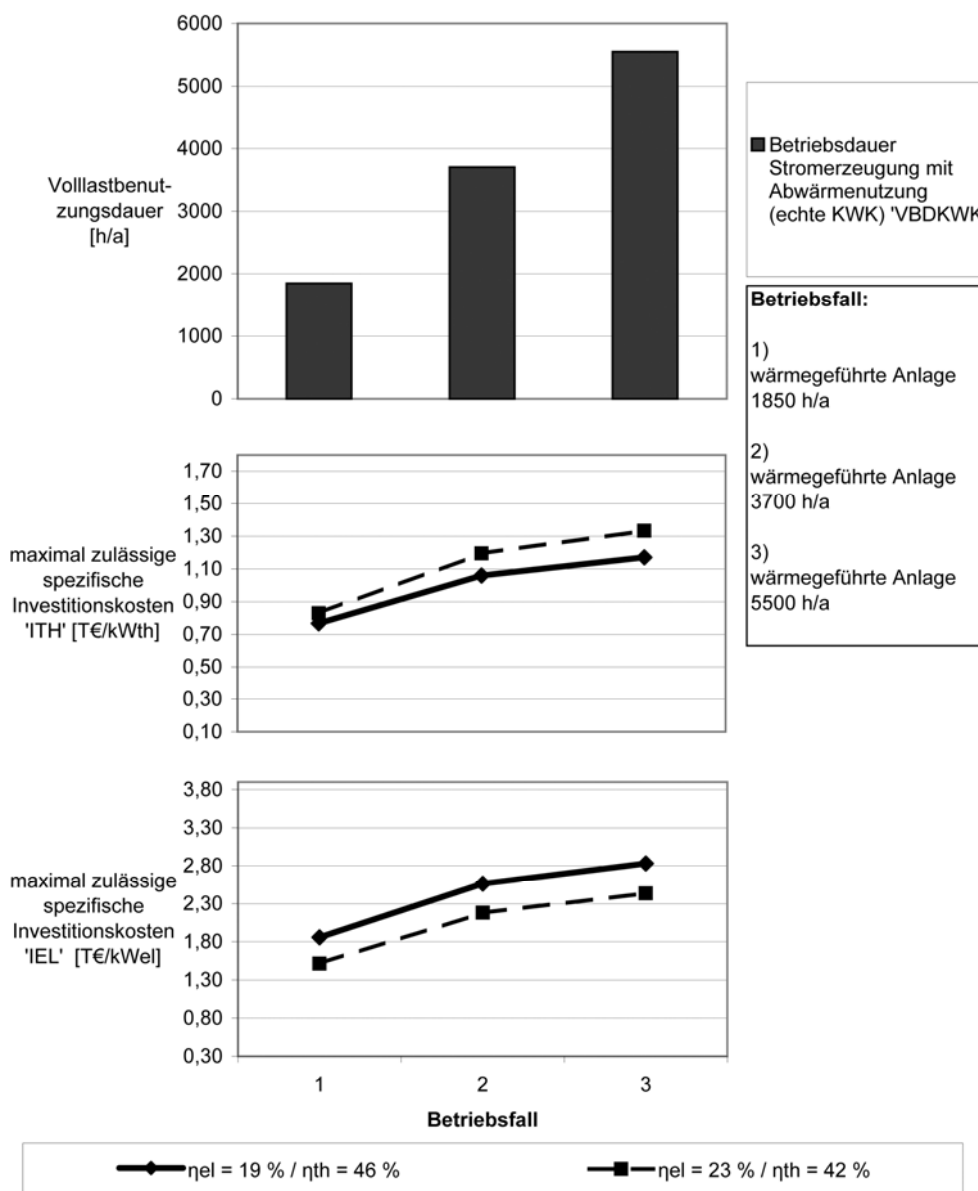


A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q
[T€/kW _{el}]	[T€/kW _{th}]	[h/a]	[h/a]	[h _{be} /h _{th}]	[-]	[-]	[h]	[-]	[1/a]	[T€/kW _{el} a]	[€/h]	[€/kWh _{el}]	[€/kWh _{th}]	[€/t]	[MJ/kg _{ges}]
1,86	0,77	1850	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
1,56	0,64	3700	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
1,45	0,60	5550	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
1,51	0,83	1850	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
1,42	0,78	3700	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
1,39	0,76	5550	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16

A: IEL	C: VBDEL	E: Anteil betr. Std.	G: η_{th}	I: kalk. Zinssatz	L: Pers.-Kosten	N: Strompreis	P: BS-Preis
B: ITH	D: VBDKWK	F: η_{el}	H: Lebensdauer	K: jährl. Wart.-K.	M: Stundensatz	O: Wärmepreis	Q: Brennwert

Abbildung 12: Holzvergaser BHKW Referenzbeispiel [1]

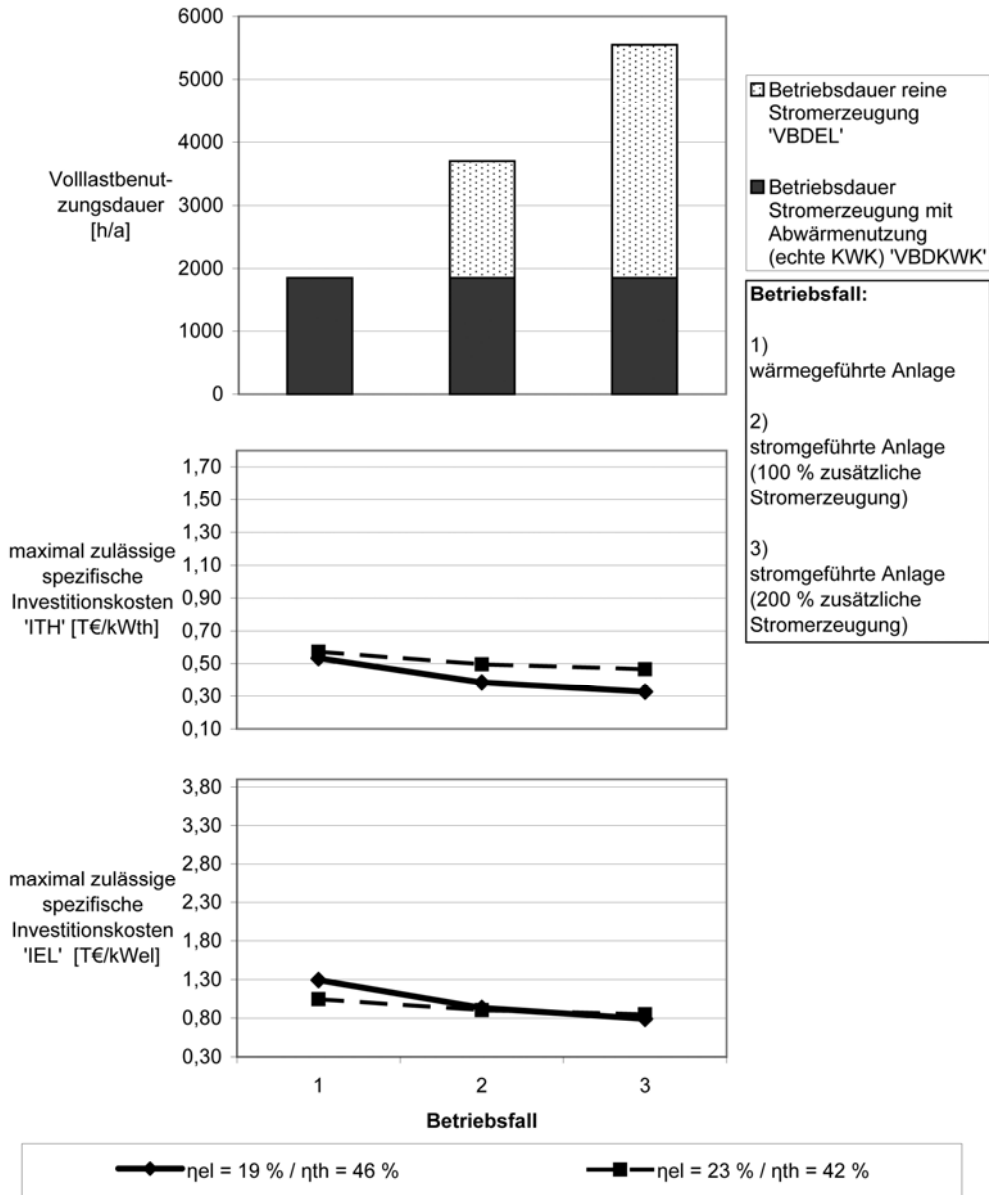
Einfluss der Anlagenfahrweise von Klein-KWK-Anlagen auf Basis von Holzvergaser BHKW ($\eta_{ges} = 65\%$) Referenzbeispiel [2]



A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q
[T€/kW _{el}]	[T€/kW _{th}]	[h/a]	[h/a]	[h _{ges} /h _{th}]	[-]	[-]	[h]	[-]	[1/a]	[T€/kW _{th} a]	[€/h]	[€/kWh _{th}]	[€/kWh _{el}]	[€/t]	[MJ/kg _{ges}]
1,86	0,77	1850	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
2,56	1,06	3700	3700	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
2,83	1,17	5550	5550	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
1,51	0,83	1850	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
2,18	1,19	3700	3700	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
2,44	1,33	5550	5550	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	58	16
A: IEL		C: VBDEL		E: Anteil betr. Std.		G: η_{th}		I: kalk. Zinssatz		L: Pers.-Kosten		N: Strompreis		P: BS-Preis	
B: ITH		D: VBDKWK		F: η_{el}		H: Lebensdauer		K: jährl. Wart.-K.		M: Stundensatz		O: Wärmepreis		Q: Brennwert	

Abbildung 13: Holzvergaser BHKW Referenzbeispiel [2]

Einfluss der Anlagenfahrweise von Klein-KWK-Anlagen auf Basis von Holzvergaser BHKW ($\eta_{ges} = 65\%$) bei 150 % Brennstoffpreis [3]

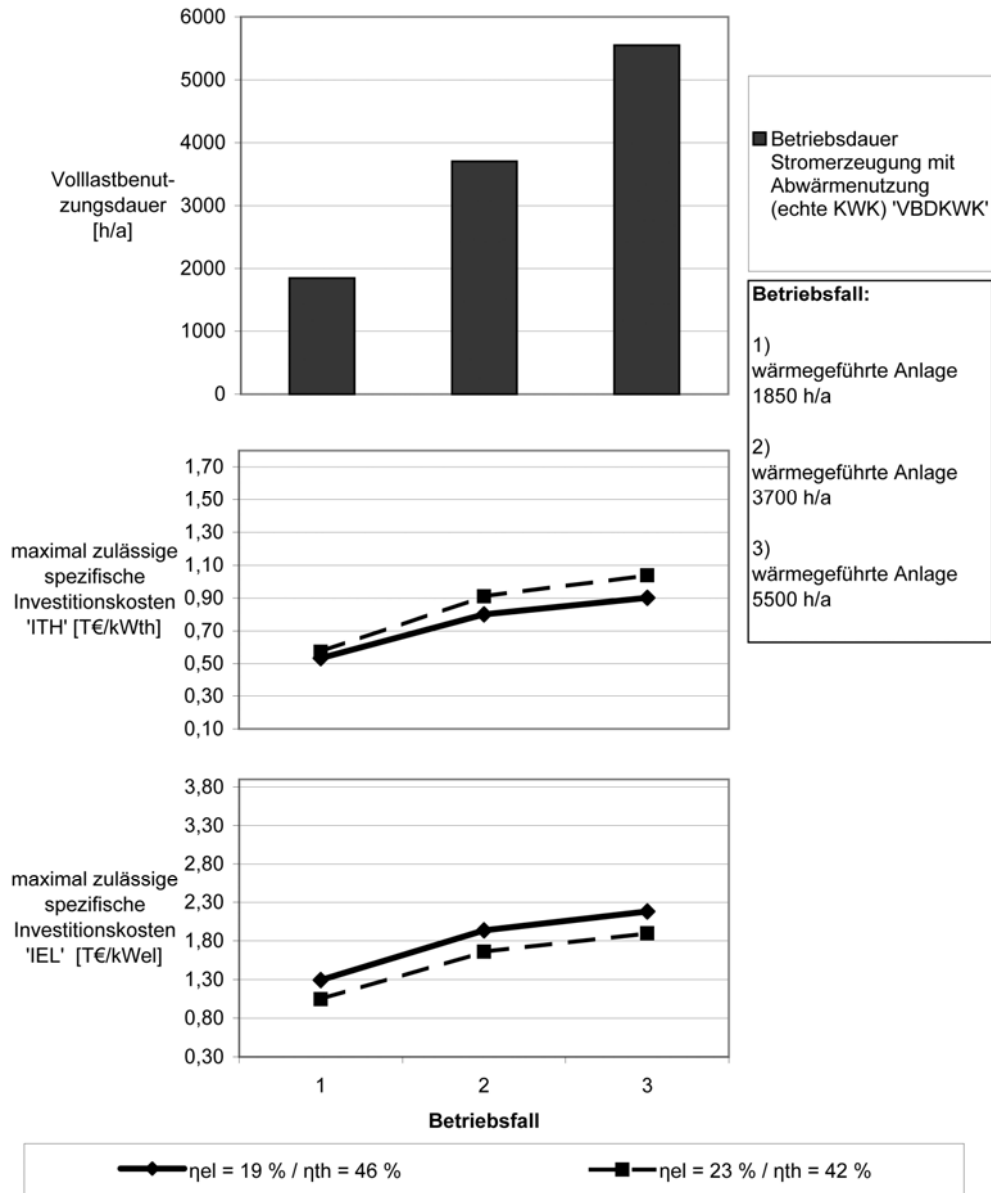


A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q
[T€/kW _{th}]	[T€/kW _{el}]	[h/a]	[h/a]	[h _{th} /h _{el}]	[-]	[-]	[h]	[-]	[1/a]	[T€/kW _{el} a]	[€/h]	[€/kW _{th}]	[€/kW _{th}]	[€/t]	[MJ/kg _{gas}]
1,29	0,53	1850	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
0,93	0,39	3700	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
0,79	0,33	5550	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
1,05	0,57	1850	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
0,90	0,50	3700	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
0,85	0,47	5550	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16

A: IEL	C: VBDEL	E: Anteil betr. Std.	G: η_{th}	I: kalk. Zinssatz	L: Pers.-Kosten	N: Strompreis	P: BS-Preis
B: ITH	D: VBDKWK	F: η_{el}	H: Lebensdauer	K: jährl. Wart.-K.	M: Stundensatz	O: Wärmepreis	Q: Brennwert

Abbildung 14: Holzvergaser BHKW bei 150 % Brennstoffpreis [3]

Einfluss der Anlagenfahrweise von Klein-KWK-Anlagen auf Basis von Holzvergaser BHKW ($\eta_{ges} = 65\%$) bei 150 % Brennstoffpreis [4]

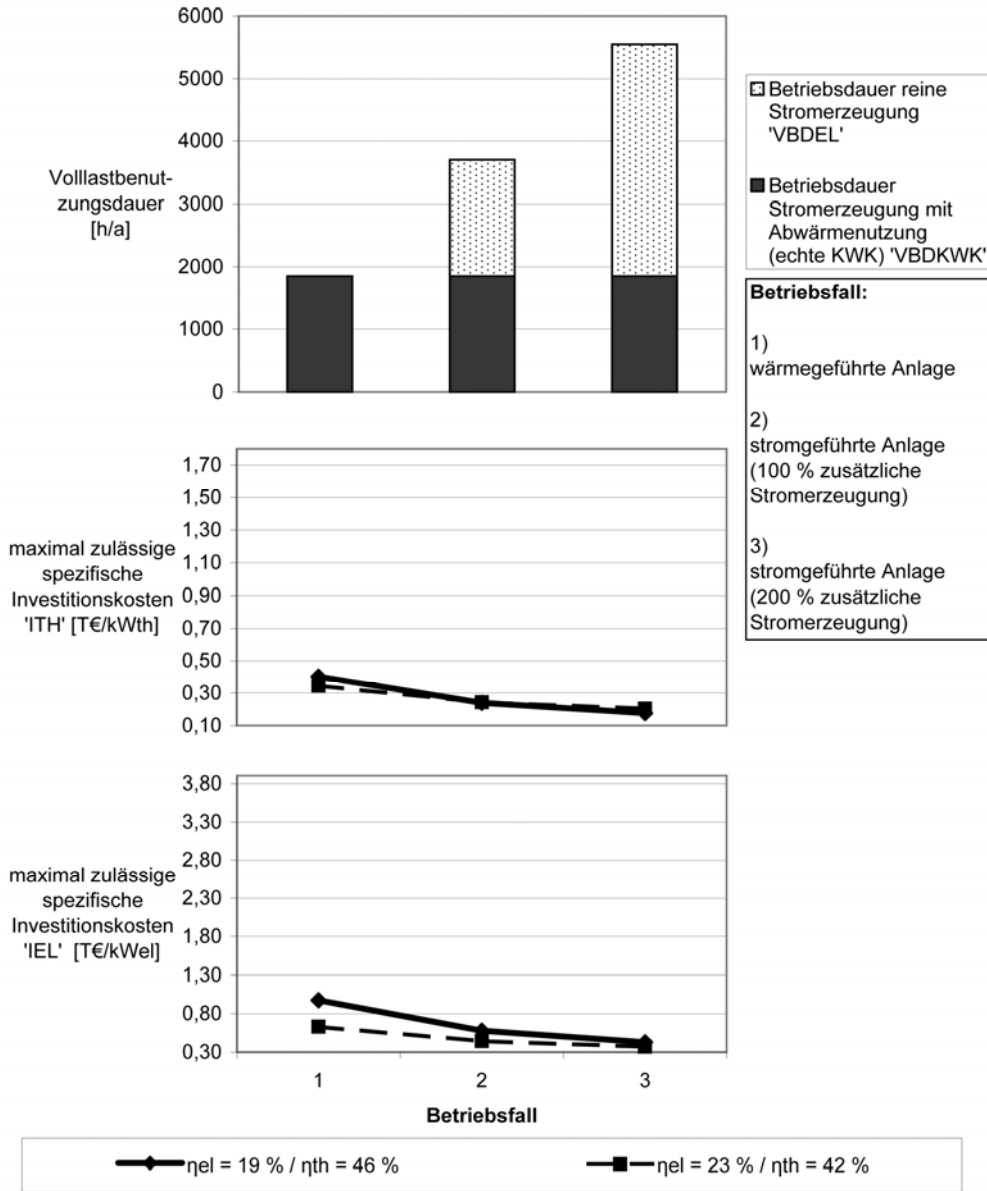


A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q
[T€/kW _{el}]	[T€/kW _{th}]	[h/a]	[h/a]	[h _{th} /h _{el}]	[-]	[-]	[h]	[-]	[1/a]	[T€/kW _{el} a]	[€/h]	[€/kW _{th}]	[€/kW _{th}]	[€/t]	[MJ/kg _{gas}]
1,29	0,53	1850	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
1,94	0,80	3700	3700	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
2,18	0,90	5550	5550	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
1,05	0,57	1850	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
1,66	0,91	3700	3700	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16
1,90	1,04	5550	5550	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,09	115	16

A: IEL	C: VBDEL	E: Anteil betr. Std.	G: η_{th}	I: kalk. Zinssatz	L: Pers.-Kosten	N: Strompreis	P: BS-Preis
B: ITH	D: VBDKWK	F: η_{el}	H: Lebensdauer	K: jährl. Wart.-K.	M: Stundensatz	O: Wärmepreis	Q: Brennwert

Abbildung 15: Holzvergaser BHKW bei 150 % Brennstoffpreis [4]

Einfluss der Anlagenfahrweise von Klein-KWK-Anlagen auf Basis von Holzvergaser BHKW ($\eta_{ges} = 65\%$) bei 50 % Stromvergütung [5]

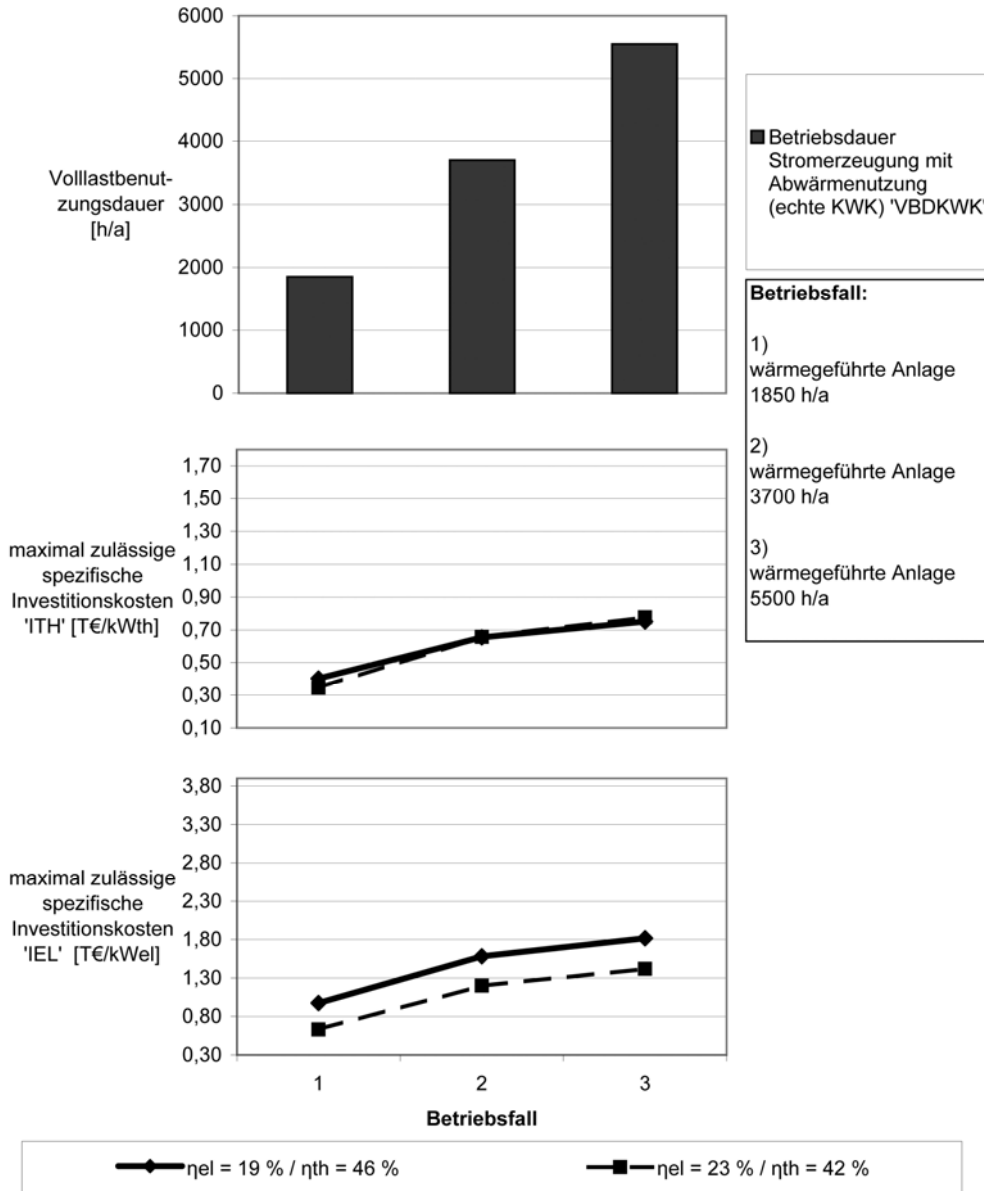


A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q
[T€/kW _{th}]	[T€/kW _{el}]	[h/a]	[h/a]	[η_{el}/η_{th}]	[-]	[-]	[h]	[-]	[1/a]	[T€/kW _{th} a]	[€/h]	[€/kW _{th}]	[€/kW _{th}]	[€/t]	[MJ/kg _{ges}]
0,98	0,40	1850	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
0,58	0,24	3700	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
0,43	0,18	5550	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
0,63	0,35	1850	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
0,44	0,24	3700	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
0,37	0,20	5550	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16

A: IEL	C: VBDEL	E: Anteil betr. Std.	G: η_{th}	I: kalk. Zinssatz	L: Pers.-Kosten	N: Strompreis	P: BS-Preis
B: ITH	D: VBDKWK	F: η_{el}	H: Lebensdauer	K: jährl. Wart.-K.	M: Stundensatz	O: Wärmepreis	Q: Brennwert

Abbildung 16: Holzvergaser BHKW bei 50 % Stromvergütung [5]

Einfluss der Anlagenfahrweise von Klein-KWK-Anlagen auf Basis von Holzvergaser BHKW ($\eta_{ges} = 65\%$) bei 50 % Stromvergütung [6]

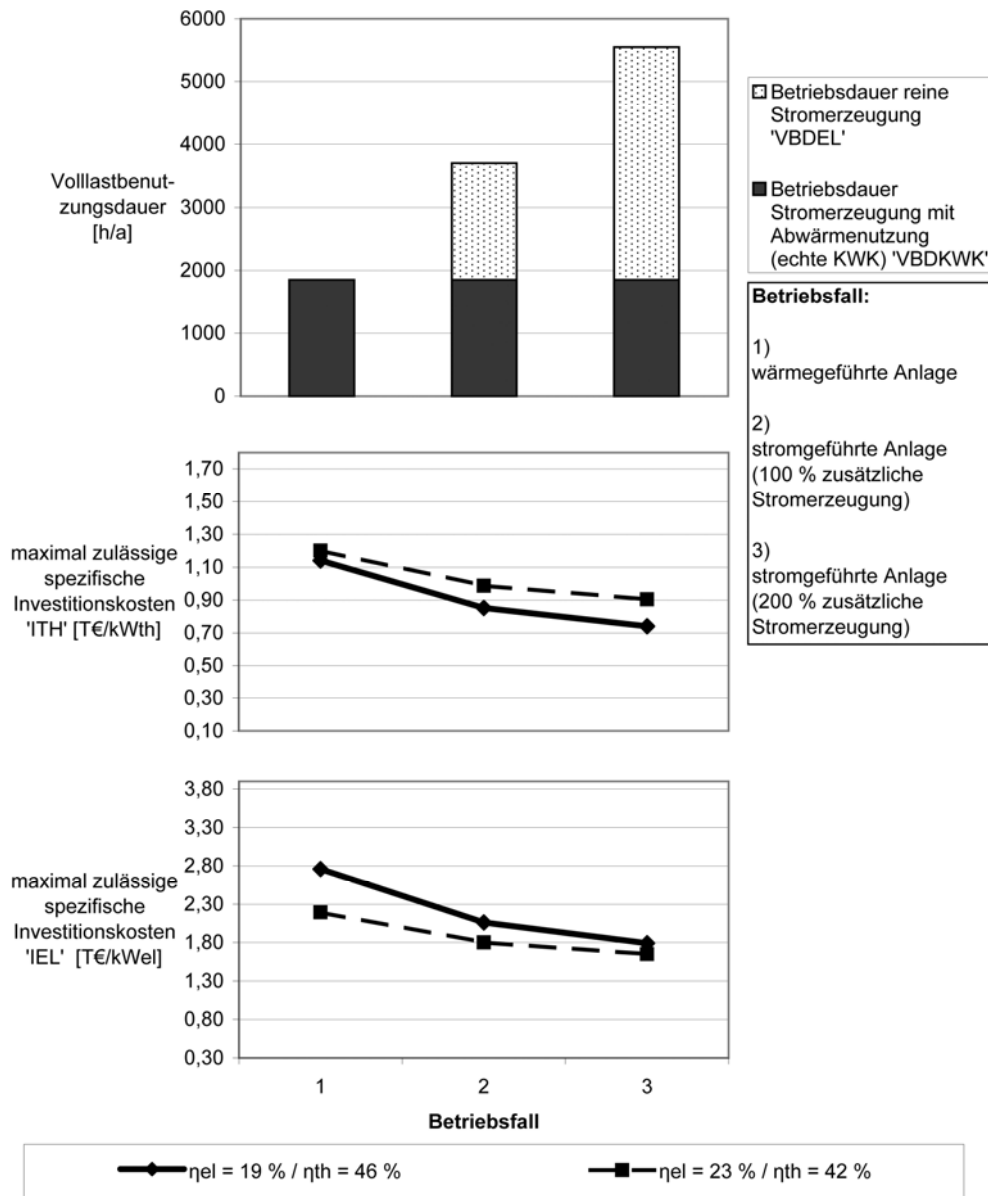


A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q
[T€/kW _{th}]	[T€/kW _{el}]	[h/a]	[h/a]	[h _{th} /h _{el}]	[-]	[-]	[h]	[-]	[1/a]	[T€/kW _{el} a]	[€/h]	[€/kW _{th}]	[€/kW _{th}]	[€/t]	[MJ/kg _{ges}]
0,98	0,40	1850	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
1,58	0,65	3700	3700	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
1,82	0,75	5550	5550	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
0,63	0,35	1850	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
1,20	0,66	3700	3700	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16
1,42	0,78	5550	5550	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,1065	0,09	58	16

A: IEL	C: VBDEL	E: Anteil betr. Std.	G: η_{th}	I: kalk. Zinssatz	L: Pers.-Kosten	N: Strompreis	P: BS-Preis
B: ITH	D: VBDKWK	F: η_{el}	H: Lebensdauer	K: jährl. Wart.-K.	M: Stundensatz	O: Wärmepreis	Q: Brennwert

Abbildung 17: Holzvergaser BHKW bei 50 % Stromvergütung [6]

Einfluss der Anlagenfahrweise von Klein-KWK-Anlagen auf Basis von Holzvergaser BHKW ($\eta_{ges} = 65\%$) bei 150 % Ölpreis [7]

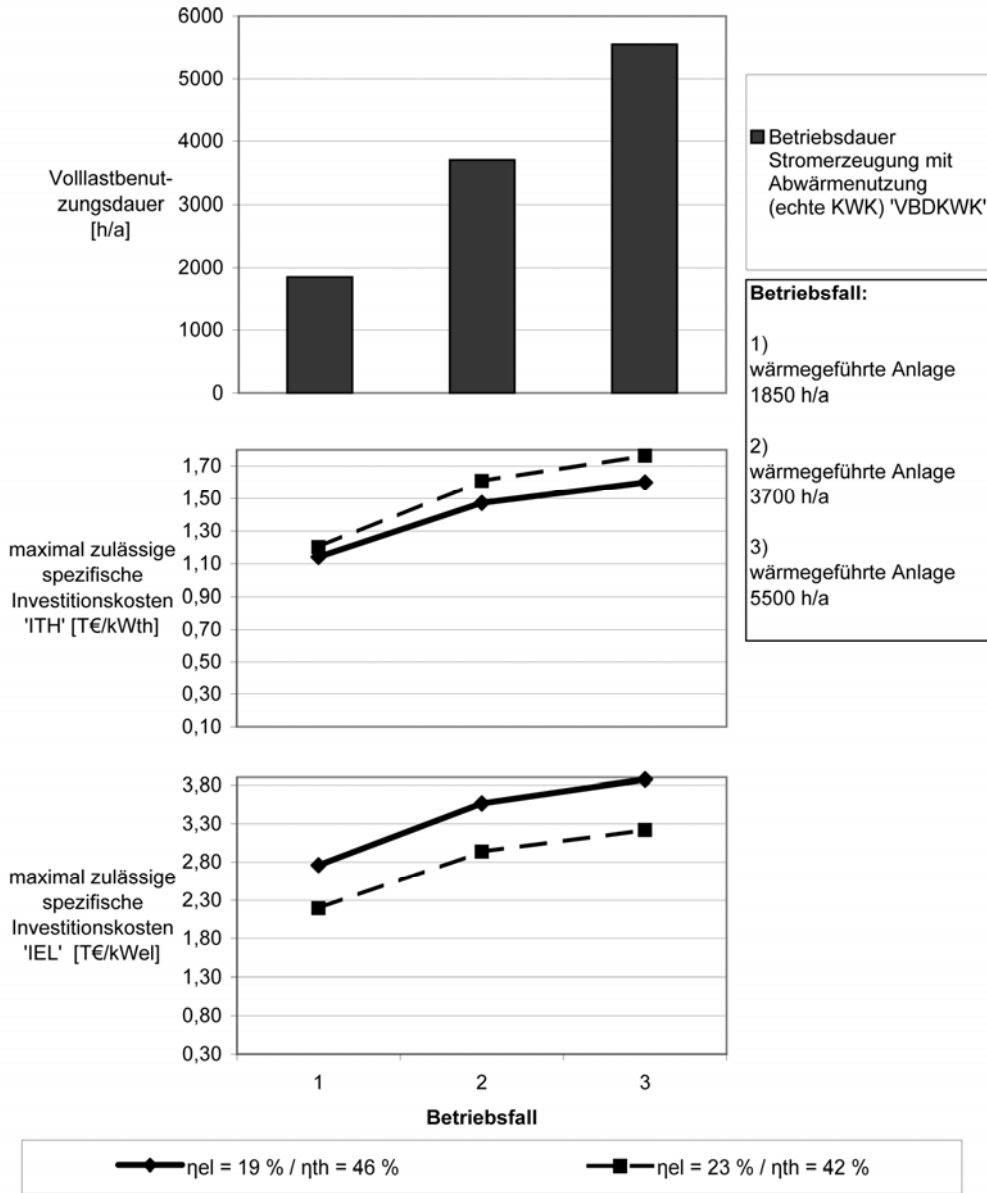


A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q
[T€/kW _{th}]	[T€/kW _{el}]	[h/a]	[h/a]	[h _{th} /h _{el}]	[-]	[-]	[h]	[-]	[1/a]	[T€/kW _{el} a]	[€/h]	[€/kWh _{el}]	[€/kWh _{th}]	[€/t]	[MJ/kg _{ges}]
2,76	1,14	1850	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
2,06	0,85	3700	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
1,79	0,74	5550	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
2,19	1,20	1850	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
1,80	0,99	3700	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
1,65	0,90	5550	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16

A: IEL	C: VBDEL	E: Anteil betr. Std.	G: η_{th}	I: kalk. Zinssatz	L: Pers.-Kosten	N: Strompreis	P: BS-Preis
B: ITH	D: VBDKWK	F: η_{el}	H: Lebensdauer	K: jährl. Wart.-K.	M: Stundensatz	O: Wärmepreis	Q: Brennwert

Abbildung 18: Holzvergaser BHKW bei 150 % Ölpreis [7]

Einfluss der Anlagenfahrweise von Klein-KWK-Anlagen auf Basis von Holzvergaser BHKW ($\eta_{ges} = 65\%$) bei 150 % Ölpreis [8]



A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	O	P	Q
[T€/kW _{el}]	[T€/kW _{th}]	[h/a]	[h/a]	[h _{bet} /h _{th}]	[-]	[-]	[h]	[-]	[1/a]	[T€/kW _{th} a]	[€/h]	[€/kW _{th} a]	[€/kW _{th} h]	[€/t]	[MJ/kg _{gas}]
2,76	1,14	1850	1850	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
3,57	1,47	3700	3700	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
3,87	1,60	5550	5550	0,001	0,19	0,46	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
2,19	1,20	1850	1850	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
2,94	1,61	3700	3700	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16
3,22	1,76	5550	5550	0,001	0,23	0,42	10000	0,065	-0,012	0,2	30	0,213	0,135	58	16

A: IEL	C: VBDEL	E: Anteil betr. Std.	G: η _{th}	I: kalk. Zinssatz	L: Pers.-Kosten	N: Strompreis	P: BS-Preis
B: ITH	D: VBDKWK	F: η _{el}	H: Lebensdauer	K: jährl. Wart.-K.	M: Stundensatz	O: Wärmepreis	Q: Brennwert

Abbildung 19: Holzvergaser BHKW bei 150 % Ölpreis [8]

3.7.4 Diskussion Ergebnisse

- HGM-BHKW können eine wirtschaftlich sinnvolle Technologie zur energetischen Nutzung von Biomasse darstellen.
- Es wird gezeigt, mit welchen Parameterkombinationen die Wirtschaftlichkeit erreichbar ist.
- Als grobe Orientierung kann aus den Berechnungen herausgefiltert werden, dass Investitionskosten für das Komplettsystem in der Größenordnung von 3'500 bis 4'000 EURO/kW_{el} ein wirtschaftlich sinnvolles Gesamtkonzept ermöglichen können.
- Die Prognose, dass kleine und kleinste KWK-Anlagen auf Basis der Vergasung wirtschaftlich sein können, wird kontrovers diskutiert. Folgende Punkte sollten hier in der Diskussion stärker Beachtung finden:
 - Die Möglichkeiten, mit dem Produkt Nutzwärme einer KWK-Anlage fossile Energieträger zu verdrängen, steigen mit sinkender Anlagengröße. Damit gehen die eingesparten Kosten für Heizöl oder Erdgas in volle Höhe als rechnerischer Erlös in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ein.
 - Bei der Motorentchnik wird die Kostendegression nicht so wirksam wie bei anderen energietechnischen Anlagen.²⁶ Ein kleiner Motor ist spezifisch nicht teurer als ein großer Motor.
 - Bei kleinen HGM-BHKW wird Personalaufwand betriebswirtschaftlich nicht wirksam.²⁷
- Für Betreiber, die für die Entwicklungsarbeit (zu unterscheiden vom Beaufsichtigungsaufwand im Normalbetrieb) eingesetzte eigene Arbeitszeit rechnerisch nicht zum Ansatz bringen, ist wirtschaftlicher Betrieb schon heute möglich. Dies soll hier als „gefühlte“ Wirtschaftlichkeit bezeichnet werden.

²⁶ Der Motor ist von Hause aus eine kleine Energiemaschine. Dies lässt sich auch an der historischen Entwicklung ablesen, die von kleinen hin zu großen Anlagen verlief. Größere Energiemaschinen auf Motorenbasis werden in Modulbauweise errichtet. Bei Turbomaschinen wird hingegen versucht, den kleinen Leistungsbereich ausgehend von bewährten Konzepten durch down-scaling zu erreichen.

²⁷ Je kleiner das HGM-BHKW ist, umso mehr passt es sich dem Betrieb einer herkömmlichen Heizungsanlage an. Der Betreuungsaufwand inkl. Brennstoffzufuhr wird bei kleinen Heizungsanlagen durch ohnehin beschäftigtes Personal zusätzlich erledigt. Diese Tatsache führt dazu, dass Land- und Forstwirte dem Betrieb einer solchen Anlage keine Personalkosten zuordnen. Dies ist vergleichbar mit dem Prinzip, nach dem ein Finanzierungskonzept für ein Einfamilienhaus durch einen Eigenleistungsanteil ermöglicht werden kann.

4 HGM-BHKW IM ENERGIEWIRTSCHAFTLICHEN UND GESELLSCHAFTLICHEN UMFELD

4.1 VORBEMERKUNGEN

- HGM-BHKW entfalten wirtschaftliche Stärke bei wärmeorientierter Fahrweise. Dies resultiert bei einer Anwendung zur Deckung des Raumwärmebedarfs in
 - Variante A: Kombination mit einer Spitzenlastanlage, so dass die thermische Leistung des BHKW nur ein Viertel bis ein Drittel des Wärmeleistungsbedarfs deckt,
 - Variante B: Verzicht auf eine Spitzenlastanlage und Begrenzung auf Jahresvollbenutzungsdauern um 2000 Stunden.
- Der Einsatz von HGM-BHKW ist geeignet, mehrere Ziele²⁸ des integrierten Energie und Klimaprogramms der Bundesregierung umzusetzen.

Überwog am Anfang des Projektes als treibendes Moment ihrer Entwicklung noch die Variante, Erlöse aus verfügbarer Biomasse über den gesetzlich gesicherten Stromverkauf realisieren zu wollen, so beginnt das Motiv, Heizöl abzulösen und über den erzeugbaren Strom die (Heizungs-) Anlage zu refinanzieren, Gewicht zu erhalten.

4.2 RELEVANZ KLEINER KWK-KONZEPTE UND BEDEUTUNG DES WÄRMEABSATZES

- Mit einer Biomasse-KWK-Anlage heutiger Qualität können pro eingesetzte Tonne HHS mit einem Wassergehalt von 29 % durch Substitutionseffekte 4 hl Erdöläquivalent eingespart werden, bei Ausnutzung von Optimierungspotenzialen mehr als 5 hl. Zum Vergleich wird mit einem ausgereiften BtL-Konzept (CHOREN) künftig ein Substitutionseffekt in Form von 3 hl Erdöläquivalent, bezogen auf die gleiche Brennstoffmenge und -qualität erreicht (Berechnung: Substitutionseffektanalyse, SEA). [3,Zschunke]

²⁸ Dies betrifft vor allem Punkt 1 Kraft-Wärme-Kopplung und Punkt 2 Ausbau Erneuerbarer Energien im Strombereich und berührt die Punkte 7 und 8 bezogen auf die Energieeffizienz und Punkt 12 als eine Maßnahme, um das CO₂-Gebäudesanierungsprogramm im ländlichen Raum umzusetzen

- Mit einer KWK-Anlage auf Basis eines HGM-BHKW wird schon heute ein primärenergetischer Substitutionseffekt²⁹ von ca. 0.7 erreicht. Zum Vergleich: Der Substitutionseffekt von BtL-Anlagen wird bei Erreichen der optimistischsten Vorstellungen einen primärenergetischen Substitutionseffekt von 0.66 (Quelle: DENDROM-Bericht, in Bearbeitung) erreichen, während das erreichbare Entwicklungsziel bei reinen Biomasse-Wärmeerzeugern und Biomasse-KWK-Anlagen oberhalb von 0.9 liegt.
- HGM-BHKW sind deshalb am wirtschaftlichsten an Standorten, an denen Anwender selbst über Biomasse verfügen, ganzjährig Wärme benötigen bzw. bezahlt abgeben und damit Heizöl ablösen und Strom (nach dem EEG) veräußern können.

4.3 HGM-BHKW IM SPEKTRUM VON KWK-TECHNOLOGIEN FÜR KLEINE UND KLEINSTE LEISTUNGSBEREICHE

- Schlüssel zur effektiven Ausnutzung der in Biomasse akkumulierten Energie ist die Nutzung der Wärme.
- HGM-BHKW sind eine der möglichen Varianten, um eine wärmegeführte KWK zu realisieren.
- Rüstet man eine reine Wärmeerzeugungsanlage zu einer KWK-Anlage um, wird mit einem anlagentechnischen Zusatzaufwand eine zusätzlich aufzuwendende Brennstoffmenge in zusätzliche Elektroenergie umgewandelt. Eine solche Herangehensweise führt zu einem elektrischen Grenz-Wirkungsgrad von beinahe 80 % (Zusatz-Elektroenergie geteilt durch Zusatz-Brennstoff). Aus wirtschaftlicher Sicht kommt es nun nicht mehr auf das Verhältnis von Elektroenergie zu Gesamt-Brennstoffenergie (el. Wirkungsgrad) an, sondern auf das Verhältnis von Elektroenergie zur Zusatzinvestition und zum Brennstoffpreis. Die Bedeutung des elektrischen Wirkungsgrades tritt in den Hintergrund.
- Ungeachtet dessen haben HGM-BHKW verglichen mit anderen Biomasse-KWK-Konzepten ein günstiges Verhältnis von Investitions- und Betriebskosten zu Elektroenergieerzeugung. In dieses Verhältnis geht der elektrische Wirkungsgrad ein, dessen Entwicklungspotenzial bei HGM-BHKW bei ca. 30 % und damit weit ober-

²⁹ Der primärenergetische Substitutionseffekt ist eine dimensionslose Größe, die zum stark komprimierten Vergleich zwischen unterschiedlichen energietechnischen Prozessketten verwendet werden kann. [Dendrom-Bericht] Der Wert 1 stellt dabei einen Grenzfall dar, der theoretisch dann eintreten kann, wenn die substituierende Prozesskette verlustfrei arbeitet.

halb dessen von Dampfkraftprozessen der gleichen Leistungsgröße liegt. Ebenso bedeutsam sind aber die Investitionskosten. Eine durch Entwicklungsarbeit erzielte Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades auf das 1,2-fache durch Steigerung der Investitionskosten auf das 1,3-fache ist kontraproduktiv. Eine Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades auf das 1,2-fache durch Steigerung der Investitionskosten auf das 1,1-fache ist hingegen betriebswirtschaftlich sinnvoll. Aber auch eine Senkung der Investitionskosten bei gleich bleibendem el. Wirkungsgrad ist zweckmäßig.

- Das hohe technische Potenzial der HGM-BHKW entsteht durch das mögliche günstige Verhältnis von Investition und Stromerzeugung.
- HGM-BHKW mit maximal möglicher Wärmenutzung arbeiten energieeffizienter als kleine konventionelle Biomasseverbrennungs-HKW und deutlich energieeffizienter als 20 -MW_{el}-Holzkraftwerke ohne Wärmenutzung.

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

HGM-BHKW sind eine nützliche Technologie für die energetische Nutzung von Biomasse und sind zum Teil schon Realität geworden. Sie werden besonders im kleinen Leistungsbereich von Käufern aus der Land- und Forstwirtschaft sowie von Gewerbetreibenden nachgefragt. Von dieser Nachfrage gehen Impulse für die Entwicklung aus. Dieser Stand ist durch politisch aktivierten Marktanzreiz und unter einem hohen persönlichen und sehr risikobehafteten Engagement von Entwicklern, Herstellern, Betreibern und Finanzierern erreicht worden.

5.1 SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR INTERESSENTEN

- Das Betreiben von HGM-BHKW beweist sich als technisch machbar und kann unter aktiver Mitwirkung der Betreiber wirtschaftlich gestaltet werden, wenn ein finanzieller Gegenwert für eingebrachte Arbeitszeit nicht oder nur in geringem Maße berücksichtigt wird.
- Die Technik ist noch mit Risiken behaftet und befindet sich nach wie vor in Entwicklung.
- Kleine Anlagen sind vorerst nur sinnvoll zu betreiben, wenn sie der Einsparung von Heizöl oder Erdgas dienen.
- Gewinnerwirtschaftung durch reine Stromerzeugung ist auch mit EEG nicht möglich.
- Die technischen und wirtschaftlichen Bedingungen für den Erwerb und den Einsatz von HGM-BHKW müssen gründlich kalkuliert werden. Die ersten Ideen sollten deshalb gemeinsam mit Spezialisten der Heizungstechnik und mit einschlägigen Wirtschaftsberatern, z.B. Landwirtschaftsberatern, geprüft werden. Mit diesen gemeinsam muss ein kompetenter Gesamtplaner in das Projekt integriert werden.
- Wichtige Basisinformation ist der Jahresverlauf des Wärmebedarfs.
- Es muss zu zwei Grundvarianten eine Vorauswahl getroffen werden
 - a) Die Koppelwärmeleistung kann 6000 bis 7000 Stunden im Jahr abgefragt werden. Das bedeutet bei reinen Brauchwasser- und Raumheizungsprojekten, dass eine Spitzenlastanlage - z.B. in Form eines HHS-Kessels -

vorgesehen wird und die Koppelwärmeleistung auf maximal ein Drittel des Wärmeleistungsbedarfs ausgelegt wird.

- b) Mit der Koppelwärmeleistung kann der komplette Wärmeleistungsbedarf gedeckt werden. Hier ist in Zeiten fehlenden Wärmebedarfs konsequent auf Stromerzeugung zu verzichten. Teillastzustände müssen durch sinnvolle taktende Fahrweise über einem Pufferspeicher realisiert werden.
- Frühzeitig ist die verfügbare Biomasse zu spezifizieren und die Brennstoffversorgung zu sichern. Zu klären ist besonders, in welcher Menge, zu welcher Zeit, mit welcher Form und mit welchem Wassergehalt die HHS bereitgestellt werden können. Die Vergasungstechnologie stellt sehr hohe Ansprüche an Stückigkeit und Wassergehalt.
- Ein Gesamtkonzept muss entwickelt werden, das die gesamte Prozesskette von der Biomasseanfallstelle bis zum Stromverkauf und bis zur Substitution von Heizöl bzw. Erdgas einschließt.
- Folgende Informationsquellen sollten neben der FNR mindestens herangezogen werden:
 - Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung e.V. (B.KWK),
 - Holzgasseminar auf der RENEXPO in Augsburg (jährlich),
 - Fördergesellschaft Erneuerbare Energien FEE e.V..
- Darstellungen im Internet sind äußerst kritisch zu hinterfragen.
- Vom Eigenbau - auch einzelner Komponenten - wird dringend abgeraten.
- Halten die ursprünglichen Überlegungen diesen Prüfungen stand, sollte nicht an sinnvollen Investitionen gespart werden. Empfohlen wird dann, sich möglichst für einen Planer mit nachweislichen Erfahrungen für Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung auf Basis von Holz zu entscheiden.
- Zwischen den Anlagen, Betreibermodellen oder Contracting-Angeboten mehrerer Hersteller muss dann ausgewählt werden. Erst ab diesem Zeitpunkt lohnt es, Referenzanlagen aufzusuchen und sich mit konkreten technischen Lösungen zu beschäftigen. Das spart eigene Zeit und Kosten und die der Hersteller und Entwickler.
- Es folgen dann die Schritte, die sich mit denen von Investitionsvorhaben im Biogasbereich decken, wobei auf die Besonderheiten der Brennstoffbereitstellung

sowie die besonderen Anforderungen aus Umwelt-, Gesundheits- und Arbeitsschutz geachtet werden muss.

- Besonderes Augenmerk ist auf die Integration und Ausbildung der Trocknung zu richten. Es besteht bisher ein gravierendes Missverhältnis zwischen der Bedeutung des Wassergehaltes im Brennstoff für den Gesamtprozess und der Berücksichtigung dieses Zusammenhangs durch Anlagenhersteller und Betreiber. Das Zusammenwirken von Trocknung, Lagerung, und Förderung mit den mechanisch-verfahrenstechnischen Brennstoffeigenschaften stellt ein ingenieurtechnisches Betätigungsfeld dar. Auch hier ist professionelle Planungshilfe unbedingt erforderlich.
- Ähnliches gilt für die Einhaltung der vom Vergaserhersteller vorgegebenen Parameter Stückigkeit und Feinanteil. Abweichungen hiervon können zu gravierenden Störungen und im Extremfall zur Zerstörung von Anlagentechnik führen.
- Spätestens mit dem Erwerb muss eine intensive Vorbereitung für Betrieb der Anlage beginnen, eine Beschäftigung auch mit Chemie, Energie- und Messtechnik. Vergasungstechnik ist keine Landtechnik, aber sie kann - wie bewiesen wird - von sachkundigen und engagierten Land- und Forstwirten beherrscht werden. Hierzu sollte der Kontakt zu Einrichtungen gesucht werden, die Wissens- und Erfahrungsvorlauf haben.

6 KÜNFTIGE ENTWICKLUNGSKOSTEN

Die HGM-BHKW-Technologie kann ein wertvoller Baustein im Energie-Technologie-Mix sein. Durch das Anwenden von energieverfahrenstechnischem Know-how sind die noch bestehenden Mängel systematisch zu beheben. Die Kosten für die Entwicklung einer reifen 10-kW_{el}-Anlage liegen absolut gesehen in der gleichen Größenordnung wie für einen 1000-kW_{el}-Anlagentyp. Erfahrungen sind wegen der Nichtlinearität der Zusammenhänge kaum übertragbar. Wegen des verbesserten Zuganges zu Wärmequellen und der Möglichkeit, Personalkosten zumindest teilweise niedriger anzusetzen, ist das energie-wirtschaftliche Potenzial jedoch um so größer, je kleiner die Anlagengröße ist.

7 LITERATUR

- [1] Wiese, L., Kather, A.: *Analyse und Evaluierung der thermochemischen Vergasung zur energetischen Nutzung von Biomasse* – Schlussbericht, FNR-Förderkennzeichen 00NR180, 2005
- [2] DGMK Tagungsbericht 2006-2: *Energetische Nutzung von Biomassen*, Velen, 2006
- [3] DGMK Tagungsbericht 2008-2: *Energetische Nutzung von Biomassen*, Velen, 2008
- [4] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.: *Biomasse-Vergasung – Der Königsweg für eine effiziente Strom- und Kraftstoffbereitstellung?*, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Band 24, Münster, 2004
- [5] Vogel, A.: *Dezentrale Strom- und Wärmeerzeugung aus biogenen Festbrennstoffen – eine technische und ökonomische Bewertung der Vergasung im Vergleich zur Verbrennung*, Leipzig, 2007

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: qualitative Darstellung des Zustandsverlaufs der feuchten Luft bei der Vorwärmung (Zustandspunkt 1 → 2) und Trocknung der HHS (Zustandspunkt 2 → 3) im Mollier h-x-Diagramm für feuchte Luft	- 24 -
Abbildung 2: Produktgas Anlage 7A	- 35 -
Abbildung 3: Abgasqualität Anlage 7A	- 37 -
Abbildung 4: Produktgas Anlage 7B	- 40 -
Abbildung 5: Abgasqualität Anlage 7B	- 41 -
Abbildung 6: Produktgas Anlage 7C	- 44 -
Abbildung 7: Abgasqualität Anlage 7C	- 45 -
Abbildung 8: Produktgas Anlage 7D	- 46 -
Abbildung 9: Abgasqualität Anlage 7D	- 48 -
Abbildung 10: Produktgas Anlage 7E	- 49 -
Abbildung 11: Abgasqualität Anlage 7E	- 50 -
Abbildung 12: Holzvergaser BHKW Referenzbeispiel [1]	- 71 -
Abbildung 13: Holzvergaser BHKW Referenzbeispiel [2]	- 72 -
Abbildung 14: Holzvergaser BHKW bei 150 % Brennstoffpreis [3]	- 73 -
Abbildung 15: Holzvergaser BHKW bei 150 % Brennstoffpreis [4]	- 74 -
Abbildung 16: Holzvergaser BHKW bei 50 % Stromvergütung [5]	- 75 -
Abbildung 17: Holzvergaser BHKW bei 50 % Stromvergütung [6]	- 76 -
Abbildung 18: Holzvergaser BHKW bei 150 % Ölpreis [7]	- 77 -
Abbildung 19: Holzvergaser BHKW bei 150 % Ölpreis [8]	- 78 -
Abbildung 20: Vergaser und Gasreinigungsteil für ein Holzgas-BHKW Fabrikat Gräbner, bereitgestellt von Hans Gräbner jun.	- 92 -
Abbildung 21: Holzvergaser Baugruppe eines 30 kW _{el} BHKW-Moduls der Spanner RE GmbH, Stand Herbst 2008, Darstellung bereitgestellt vom Hersteller	- 95 -

- Abbildung 22: Aufnahme eines Stirlingmotors mit Blick auf den Wärmeübertragerkopf, Darstellung bereitgestellt von Qalovis - 98 -
- Abbildung 23: Darstellung des Prototyps, Darstellung bereitgestellt von Dipl.-Ing. Stefan Schmidt im Zusammenhang mit der Bewerbung um den FEE- Innovationspreis 2008 - 101 -
- Abbildung 24: Gärreste Gaserzeuger zwischen Bremen und Hamburg im Test, Inbetriebnahme KW 3-4 2008, Darstellung bereitgestellt vom Hersteller - 104 -
- Abbildung 25: Eine aus drei Modulen bestehende Anlage mit 270 kW_{el} während der Montage Ende Dezember 2008, Quelle: Vortrag von Herrn Baumann auf der CEP Stuttgart 2009 - 107 -
- Abbildung 26: Referenzanlage 1, Hessischer Bioenergiehof in Breuberg Rai Breitenbach, Vergaser in der Mitte, Darstellung bereitgestellt vom Hersteller - 110 -
- Abbildung 27: Aufbau eines ANKUR Holzvergaser-BHKW mit 250 kW_{el} (ausgewählt um die Verfahrensstufen zu zeigen, seit 2008 komplett eingehaust und in Betrieb), Quelle: Vortrag von Herrn Menon im Februar 2008 - 113 -
- Abbildung 28: Bioampere® Anlage, Darstellung bereitgestellt vom Unternehmen - 116 -
- Abbildung 29: Referenzanlage HEH Holzenergie Hunsrück, Pfalzfeld 4 x 250 kW_{el}, Darstellung bereitgestellt vom Hersteller - 119 -
- Abbildung 30: Reaktor der Holzgasanlage, Dortmund Anfang 2008, Darstellung bereitgestellt von Biomass Energiesysteme GmbH & Co KG- 122 -
- Abbildung 31: Integration der Prototypanlage in einer Halle, Darstellung bereitgestellt durch BISEA GmbH - 125 -

ANHANG A

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE GRÄBNER

Gräbner, Hans Sen., Holz-Energie, Thurnau und
Gräbner, Hans Jun., Behälter- und Apparatebau, Wonsees

Gräbner Vater und Sohn stehen für die Überleitung sehr einfacher und robuster Holzvergaser aus den 1940iger Jahren³⁰, zu Holzvergasern für den stationären BHKW-Betrieb. Ihre Vergaser-Motor-Kombinationen arbeiten diskontinuierlich aber stabil. Mehrere dieser Ausführungen haben mit über 3000 bis 6000 Jahresstunden im meist 6 bis 8-stündigen Betrieb ihre Funktionstüchtigkeit schon seit mehreren Jahren bewiesen. In Kooperation und Kleinstfertigung können jetzt jährlich ca. vier Holzgas-BHKW geliefert werden. In Betrieb sind inzwischen Anlagen im Leistungsspektrum zwischen 10 und 30 kW_{el}.³¹

Brennstoffspezifikation

Die für die klassischen Holzvergaser erforderlichen Holzstücke konnten im Zuge der über Jahre laufenden Entwicklung abgelöst werden durch:

grobe Holzhackschnitzel G 40 bis G 70 aus naturbelassenem Holz, mit 15 - 20 % Wassergehalt (WG). Hackgut unter G 40 und mit höherem WG ist auszuschließen. Zur Definition und dem zulässigen Anteil von Feingut werden genaue Absprachen empfohlen.

Brennstoffaufbereitung/Brennstoffweg

Es wird vorausgesetzt, dass Brennstoff der vereinbarten Güte (besonders bezüglich der Stückigkeit und des WG) bereitsteht. Die meisten Vergaser mit einem Fassungsvermögen von 1 m³ werden dann kalt direkt von Hand befüllt, verschlossen und angefahren. Eine Vortrocknung mit Abwärme gehört in der Regel nicht zum Lieferumfang.

³⁰ Die für den Fahrzeugbetrieb mit Holzstücken und hohem Wartungsaufwand funktionierten, allerdings nur für relativ wenige Stunden pro Tag.

³¹ In einem Sonderfall wurden auch schon ein Anlage mit mehr als 100 kW_{el} gebaut.

Thermochemische Vergasung:

- in einem Apparat/Reaktor,
- autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel Luft,
- im Unterdruck (durch die Saugwirkung des Motors),
- im Festbett,
- im Gleichstrom, absteigend,
- ausgebildet als Schachtreaktor (mit entsprechendem Brennstoffvorrat).

Die Vergasung wird **ergänzt um:**

- eine Staubabscheidung und eine mehrstufige trockene Gasreinigung /-filtration,
- eine Gas-(Zwischen-) Speicherung und -kühlung und einen Motor-/Generatorsatz, wobei auf den Einsatz von Motoren mit großem Hubraum und relativ langsamen Lauf Wert gelegt wird.

Besonderheiten:

- Einfache, robuste und erprobte technische Lösung.
- Voraussetzung ist die Bereitschaft des Anwenders, die Anlage händisch zu beschicken, vor Ort zu steuern und in Abständen zu überwachen und sich dem diskontinuierlichen Betrieb anzupassen. (Bei einem wärmegeführten Betrieb ist das häufig durch die Verknüpfung mit Pufferspeichern gelöst.)
- Preiswert.



Abbildung 20: Vergaser und Gasreinigungsteil für ein Holzgas-BHKW Fabrikat Gräbner, bereitgestellt von Hans Gräbner jun.

ANHANG B

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE JOOS

Joos, Bernd; Entwickler aus Bodnegg

und Lizenznehmer

Ausgehend von eigenen Erfahrungen mit dem Betrieb eines reaktivierten Holzvergaser-Traktors arbeitet Herr Joos als Landwirt seit Jahren nebenberuflich an Varianten der Festbettvergasung. Er hat dabei einen eigenen Typ herausgebildet, hält Patente (wie z.B. DE202007002014U1 28.06.2007) und hat Unterlagen bzw. Lizenzen zum Nachbauen verkauft. Auf dieser Grundlage sind ca. 30 Anlagen unterschiedlichster Funktionstüchtigkeit entstanden.

In Etappen gab es viele Formen von Kooperationen und Enttäuschungen. Unterstützung gaben/geben z.B. der Erfinderpool „Nachhaltiges Wirtschaften“ oder das Ingenieurunternehmen „sesolutions“ (der Herren Böttger und Dobelmann). Die Entwicklung erfolgte ohne Förderung aus öffentlichen Mitteln. Neben der zur Wärmeerzeugung seit dem Jahr 2000 von Herrn Joos selbst genutzten Anlage sind in letzter Zeit die Ausführungsformen der Fam. Baumann³², von Herrn Heine und der Spanner RE² GmbH am weitesten vorangekommen.

Nach der Grundlösung von Herrn Joos arbeiten Anlagen im Bereich von **30 - 60 kW_{el}**.

Brennstoffspezifikation

Bevorzugt wird stückiges Material, als Holzhackschnitzel G 30 bis G 40, nicht faserig gehackt, mit max. 15 % (+/- 3 %) Wassergehalt.

Der Feinanteil unter 5 mm Kantenlänge soll auf max. 30 % begrenzt sein.

Brennstoffaufbereitung

Angenommen und eingesetzt werden soll nur Holz, welches für den Vergaser geeignet erscheint. Die Bewertung der Güte erfolgt in der Regel per Hand und visuell.

Ab den Vorrats-/Tages- oder Beschickungsbehältern wird (je nach Lizenznehmer) in der Regel eine automatische, füllstandsabhängig betriebene, mit Schnecke versehene

³² Wobei die aktuell betriebene Anlage der Fam. Baumann und Partner einer eigenen Entwicklung entspricht.

Förderung in den Reaktor eingesetzt. Dort sorgt eine Vorrichtung für eine gleichmäßige Materialverteilung der Oberfläche des Reaktionsguts.

Thermochemische Vergasung³³:

- in einem Apparat/Reaktor,
- hauptsächlich autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel (vorgewärmte) Luft,
- im Unterdruck (durch die Saugwirkung des Motors) oder im Überdruck (durch Druckgebläse)
- im Bewegtbett,
- im Gleichstrom, absteigend,
- ausgebildet als Schachtreaktor mit definierter Glutzone über dem Rost.

Die Vergasung wird **ergänzt von**:

- einer Gaskühlung/Vergasungsmittelvorwärmung (meist ohne gesonderte Staubabscheidung),
- einer trockenen Gasfiltration bei ca. 120 °C,
- einem Motor/Generator-Satz und
- Ausrüstungen zur Strom- und Wärmeauskopplung,
- sowie E- und leittechnischen Anlagen.

Besonderheiten:

- Die Reaktorgeometrie, die getaktete Brennstoffzugabe in sehr kleinen Einheiten und die ständige Vergleichmäßigung der Reaktionsgutoberfläche sowie die Gasführung sorgen für eine definierte Glutzone.
- Sie ist mit entscheidend für die Erzeugung eines nahezu teerfreien motorverträglichen Gases, ohne aufwändige Gasreinigung.
- Es gibt mehrer Varianten von Holzvergasung-BHKW der hier beschriebenen Art, die für ihre Betreiber, die sie oft wärmegeführt nutzen, zufriedenstellende Verfügbarkeiten aufweisen.

³³ Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die Weiterentwicklung der 30 kW_{el}-Module der Spanner RE² GmbH.

- Herr Joos und seine o.g. Partner haben viel zur Transparenz der Holzvergasungs-Technologie beigetragen. Er stellte sich schon 2002 einem 150/200 Stunden-Versuch, durchgeführt und getragen vom Ingenieurbüro „sesolutions“. Die Ergebnisse sind seit 06/2002 öffentlich. Die Entwicklungsschritte der Spanner RE² GmbH können über <http://holz-vergaser.blogspot.com> verfolgt werden.



Abbildung 21: Holzvergaser Baugruppe eines 30 kW_{el} BHKW-Moduls der Spanner RE GmbH, Stand Herbst 2008, Darstellung bereitgestellt vom Hersteller

ANHANG C

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE QALOVIS

Qalovis Farmer Automatic Energy GmbH, Lear

Qalovis verfolgt ein ganzheitliches Konzept für Ausrüstungen zur Tierhaltung mit integrierter Umwandlung von biogenen Reststoffen in Wärme, Strom und ggf. Kälte, bis hin zur Stallklimatisierung, Langfristig wird auch die Nutzung der Asche als Dünger angestrebt. Im Qalovis Power System wird der vorgetrocknete Kot (ca. 80 % TS) in einem Vergasungs-Heißgasgenerator, dem Herzstück der Anlage, umgesetzt und das Gasgemisch anschließend verbrannt. Über einen nachgeschalteten Stirling-Motor mit Generator wird kontinuierlich elektrische Energie erzeugt und über einen Abgaswärmeübertrager Wärme bereitgestellt. Natürlich ist dieses Konzept auch für Holzhackschnitzel einsetzbar.

Das Biomasse-Vergaser-Stirling-Konzept gründet sich auf die Entwicklungen der Energietechnologien Manfred Köpke, Rheine, von dort wurden die Grundzüge der Technik übernommen. Zum DeBiT-Projekt, geleitet von Prof. Eberling, FH Münster, gab es Kontakte. Bisher arbeiten Vergaser-Einheiten bei Kunden zur Wärmeerzeugung und ein Prototyp mit Stirling-Motor/Generatorsatz a **20 kW_{el}** beim Hersteller.

Brennstoffspezifikation:

Möglich ist der Einsatz eines breiten Bandes biogener Brennstoffe, soweit diese heute nach nationalem Recht genehmigungsfähig sind. Einsetzbar sind alle Stoffe, die während der Vergasung ein gut durchströmbares Koksgerüst ausbilden.

Für die ersten Vergaser spezifiziert der Hersteller die Hackschnitzeln in Anlehnung an OENORM M 7133 mit G 30 und W 20. Einen unteren Mindestheizwert spezifiziert der Hersteller nicht.

Brennstoffaufbereitung / Brennstoffweg

Zum Qalovis Power System gehört eine Abtrennung der festen Exkremete von den flüssigen sowie die Trocknung und Pelletierung der Feststoffe (Vermarktet unter den Begriffen Separation System und Drying System). Dazu wird Wärme aus dem Prozess genutzt.

Die Einführung des Brennmaterials erfolgt nach einer aufgesetzten Bevorratung über ein füllstandsgeregeltes Schleusensystem.

Thermochemische Vergasung:

- in einem Apparat/Reaktor, (mit besonderem Unterbau)
- autotherm,
- mit Luft als Vergasungsmittel,
- bei annäherndem Umgebungsdruck (erzeugt vom Vergasungsluftgebläse und dem Kaminzug),
- im Festbett (auf einem Doppelboden-Rost), gravimetrisch bewegt,
- im Gleichstrom,
- ausgeführt als Kombination von Schachtvergaser mit
- darunter befindlicher horizontaler Brennkammer und Abgasrohr.

Die Vergasung wird **ergänzt von:**

- einen Flexgen Stirlingmotor/Generatorsatz (Nennleistung des Stirling 38 kW_{el} der Stirling Biopower Inc., USA, einer 50%-igen Tochter der Qalovis),
- dessen Heißgas-Wärmeübertrager direkt in das Abgasrohr zwischen Brennkammer und einem stehenden Abgaswärmeübertrager eingepasst ist, komplettiert um
- E-und Leittechnik und die
- Ausstattung zur Strom- und Wärmeabführung.

Besonderheiten:

- Zur Erzeugung von Strom können verschiedene Biomassen mit geminderten feuerungstechnischen Eigenschaften eingesetzt werden, solange sie ein entsprechendes Glutbett bilden und genehmigungsfähig sind.
- Das erzeugte Gas wird unmittelbar nach der Entstehung verbrannt. Auf eine aufwendige Gasreinigung kann verzichtet werden, wenn die Entstaubung beherrscht wird und die Verbrennungstemperaturen unter denen für die Ascheschmelzpunkte liegen. Für die Reinigung der Stirling-Wärmeübertragerflächen ist eine praktische Lösung zu finden, daran wird gearbeitet.
- Die relativ geringen elektrischen Leistungen müssen immer im Zusammenhang mit dem relativ passfähigen und stetigen Bedarf an Wärme auf Höfen insbesondere mit Schweinehaltung betrachtet werden.

- Die Vergasungsanlage wird nicht nur als Teil der Energieerzeugung gesehen, sondern immer auch als eine technische Komponente im Nährstoffkreislauf, z.B. für die Phosphorrückgewinnung.



Abbildung 22: Aufnahme eines Stirlingmotors mit Blick auf den Wärmeübertragerkopf, Darstellung bereitgestellt von Qalovis

ANHANG D

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE SCHMIDT

SCHMIDT Ingenieurdienstleistungen, Olsberg

Das Ingenieurunternehmen, gewachsen als Planungsunternehmen der Energietechnik, belegte 2008, dass die Entwicklungen auf dem Gebiet der thermochemischen Vergasung von Biomasse auf dem Sektor kleinster Leistungen nicht abreißen. Es bestätigte die Tendenz der letzten 2 Jahre, dass Neuerungen erst bis zur Inbetriebnahme einer Referenzanlage vorangebracht werden, ehe Schritte in die Öffentlichkeit erfolgen.

SCHMIDT Ingenieurdienstleistungen hat mehrere, seit längerem diskutierte Teilaspekte zur Verbesserungen von Biomassevergasungs-BHKW zu einer technischen Lösung für **30 kW_{el}** kombiniert und realisiert.

Brennstoffspezifikation:

Die erste Ausführung ist ausgelegt, um Holz in Form von Hackschnitzeln für den BHKW-Prozess bereitzustellen. Konzipiert ist die Anlage aber auch für den Einsatz von Pellets, Gärresten und Grünschnitt. (Die Verwendung von Ersatzbrennstoffen ist anvisiert.)

Da zum Anlagenkonzept auch eine selbstentwickelte Trocknungsanlage gehört und für das Vergasungsverfahren Feinanteile keine Einschränkungen ergeben, kann vom Einsatz eines breiten, wenig spezifizierten, Brennstoffbandes ausgegangen werden, vorausgesetzt, dass stückige bis pastöse biogene Brennstoff frei von Störstoffen (Steine, Metallteile, Kunststoffe) sind.

Brennstoffaufbereitung /Brennstoffweg

Biobrennstoffe gelangen über den Trockner mit gleichzeitiger Vorheizung und örtlich angepasster Fördertechnik zu einer Zentralschleuse und über eine Fallstrecke mit nachgeschalteter Förderschnecke in den Vergaser.

Thermochemische Vergasung:

- in einem Apparat/ Reaktor,
- hauptsächlich autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel komprimierte Luft,

- im Unterdruck (erzeugt über die Saugwirkung des Gasmotors oder des Abgasgebläses),
- im mechanisch bewegtem mineralischen Bett aus katalytisch wirkendem Material,
- im einer Wirbelschicht ähnlichem Verfahren,
- ausgebildet als Drehtrommelvergaser,
- mit darunter befindlichem Rost, folgendem Schacht und zweitem Rost für die Koksvergasung.

Die Vergasung wird **ergänzt von:**

- einer Gasreinigung in einem, dem Vergaser ähnlichem Reaktor, als Heißgasreinigung nach dem Prinzip der partiellen katalytischen Oxidation an Nickel- oder Palladiumoberflächen als reststofffreie Entteerung,
- einen Wärmeübertrager,
- einen Polzeifilter,
- sowie einen Gas-Motor/Generatorsatz und entsprechende
- E- und Leittechnik, einschließlich der Stromübergabe.

Besonderheiten:

- Die technische Lösung der SCHMIDT Ingenieurdienstleistungen vereinigt mehrere Prinzipien der Vergasungstechnologie in einem Apparatepaar.
- Sie ist eine Kombination von mehreren Teiltechnologien, in Form von Vergasungsapparaturen kleinster Leistung und damit geeignet für viele Anwendungen der Kraft-Wärme-Kopplung.
- Ihre wirbelschichtähnliche Reaktionsweise lässt ein sehr breites Spektrum für den Einsatz wenig vorzubehandelnder Biomassen zu, was den Anwendungsbereich noch erweitert.



Abbildung 23: Darstellung des Prototyps, Darstellung bereitgestellt von Dipl.-Ing. Stefan Schmidt im Zusammenhang mit der Bewerbung um den FEE- Innovationspreis 2008

ANHANG E

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE DREBE

DreBe GmbH, Markoberdorf

Der Verfahrensträger Herr Bernd Dreßler befasst sich seit über 10 Jahren vor allem mit praktischen Fragen der Biomassevergasung, speziell mit Vergasern mit ausgeprägter Pyrolysephase.

Er hat sich über die BHKW-Technik der thermochemischen Vergasung zugewandt und kooperiert mit Vertreibern sehr robuster Motoren.

Die Anlagen sind durch die Kombination mehrerer im Gleichstrom betriebener Schneckenvergaser gekennzeichnet.

Gegeben sind inzwischen mehrere Anlagen mit unterschiedlichem Erfolg im Leistungsspektrum zwischen **25 - 60 kW_{el}**. Zu Dauerbetriebsergebnissen gibt es divergierende Informationen.

Brennstoffspezifikation

Die Anlagen wurden entwickelt für Holz-Feinhackgut G 05 – G 30 (und nach Herstellerangaben auch) für Heckenmaterial, gepresste Dinkelspelzen, für Altholz aus dem Sanierungs- und Modernisierungsbereich. Der Einsatz solcher und diverser anderer Materialien ist möglich, aber bisher ohne Langzeiterfahrungen. In jüngster Zeit laufen erfolversprechende Versuche mit Gärrückständen aus Biogasanlagen, mit Miscanthus sowie Reisstroh und -spelzen.

Der max. Wassergehalt soll auf 15 - 20 % eingestellt sein, optimal sind 10 - 15 %.

Bevorzugt wird bisher stückiges Material, Kantenlänge 10 mm x 30 bis max. 50 mm, Rindenanteil spielt keine einschränkende Rolle. Auch faseriges Material soll beherrscht werden. Sägemehl soll beigemischt werden können, solange der Feinanteil vom Holzstaub und Sägemehl unter 40 - 50 % bleibt.

Brennstoffaufbereitung/Brennstoffweg

Es wird vorausgesetzt, dass Brennstoff der vereinbarten Güte bereitsteht.

Von einem Silo wird das Material (Holzhackgut) zum Vorratsbehälter über einen Fallschacht mit Doppelklappen und schräg gestellter Förderschnecke zum Reaktor geführt. Eine Vortrocknung mit Abwärme ist optional möglich.

Thermochemische Vergasung:

- in einem Apparat/Reaktor,
- autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel Luft, (ergänzt um Wasserdampf),
- im Unterdruck (durch motorbedingten Saugzugbetrieb),
- im bewegten Festbett (in übereinander angeordneten Reaktionskammern, bestückt mit Förderschnecken,
- im Gleichstrom, nahezu horizontal,
- ausgeführt als 6 Stufenkammerreaktor, mit übereinander angeordneten Reaktionsrohren.

Die Vergasung wird **ergänzt um:**

- eine katalytische Gasfiltration,
- eine nasse Gaswäsche mit nachgeschalteter Tropfenabscheidung, einschließlich einer Rückstands-aushaltung und anteiligen Teer(-wasser)rückführung vor/in den Vergasungsprozess,
- sowie den Betrieb eines Gas- oder Zündstrahlmotors mit angeflanschem Generator.
- Neben dem Gas wird Holzkohle erzeugt, welche zur weiteren thermischen Nutzung der nächstgelegenen Kesselanlage für Festbrennstoffe zur Verfügung gestellt wird, bzw. an deren nachgeschalteter bzw. parallelen Vergasung gearbeitet wird.

Besonderheiten:

- die Kombination von Rohrreaktoren,
- die Möglichkeit, je Rohr/Kammer die Reaktionsbedingungen anpassen zu können,
- die leichte, einfache Bauweise, die ein schnelles An- und Abfahren ermöglicht, (der Gaserzeuger ist in ca. 10 - 15 min. nach dem Zünden des Holzgutes auf Nenngasleistung, wobei die Zündung über elektrische Heizstäbe erfolgt und Holzhackgut nach ca. 3 - 5 min zündet.

Nachdem die ersten Anlagen max. 22 h Gas produzieren und dann für 2 Std. in ein sogenanntes Selbstreinigungsprogramm übergehen, wobei kein Gas produziert wird, sind die 6-Stufenkammer-Vergaser neuer Bauart auf Dauerbetrieb ausgerichtet.

Gearbeitet wird an der Ablösung von Zündstrahlmotoren durch Gasmotoren, an einer Kombination mit nachgeschaltetem Festbettvergaser zur Verminderung des „unverbrannten“ Anteils.

Die Entwicklungen zielen auf eine Stabilisierung der ausgelieferten und neuen Anlagen und auf die Ausweitung des Brennstoffbandes.



Abbildung 24: Gärreste Gaserzeuger zwischen Bremen und Hamburg im Test, Inbetriebnahme KW 3-4 2008, Darstellung bereitgestellt vom Hersteller

ANHANG F

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE ENTEC

ENTEC Corp. & Co. POWER SYSTEMS KG, 91275 Auerbach

Die Entwickler der heutigen ENTEC haben die ersten konkreten Schritte zur Konstruktion eines Biomasse-Vergasers im Jahr 2001 begonnen und sich auf die Holzgasproduktion mittels Schachtvergaser festgelegt. Sie blickten dabei auf eine langjährige Ingenieur-tätigkeit im Bereich Technischen Gebäudeausrüstung und des Maschinenbaus zurück.

Ihre Holzgas-Heizkraftwerke sind besonders durch ihren modularen Aufbau von je einem Vergaser, zuzüglich Gasreinigung und -kühlung, und deren Kombination mit drei Gasmotor-Generatorsätzen a 30 kW_{el} (d.h. zusammengenommen **90 kW_{el}**) charakterisiert. Mehrere Module können zu einer Gesamtanlage kombiniert werden.

Die Auslieferung der Anlagen begann 2007.

Brennstoffspezifikation

Die Anlagen wurden für definiertes Holz-Hackgut der Größe zwischen G 50 und G 80 und einem Wassergehalt von bis zu 32 % entwickelt. Um über Qualitätshackschnitzel verfügen zu können, wurde eine feste Partnerbindungen zur IVM GmbH & Co. Objekt- und NawaRo-Management KG aufgebaut³⁴.

Über diese Beziehung und die in Planung befindliche Hackschnitzeltrocknung wird auch die bevorzugte Brennstoff(lager)feuchte von 20 Masse-% WG sichergestellt.

Brennstoffaufbereitung/Brennstoffweg

Über die eigene Versorgungsschiene für Holzhackschnitzel, hergestellt mit einem Schneckenhacker HP 25 und HK 50, werden bevorzugt Hackschnitzel G 50 bereitgestellt. Ab 2009 werden die Brennstoffe vorgetrocknet geliefert und eingesetzt. Zum Konzept gehört eine Schubbodenanlage. Die Holzzufuhr zum Reaktor erfolgt automatisch mittels Förderschnecken systemen über eine Fallschachtschleuse.

³⁴ Die IVM GmbH & Co. Objekt- und NawaRo-Management KG plant außerdem eine Pelletproduktion auf dem Unternehmensstandort.

Thermochemische Vergasung:

- in einem Apparat/Reaktor (pro BHKW-Modul),
- betrieben hauptsächlich autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel Luft,
- im Unterdruck (durch den Saugzug der Motoren)
- im Festbett, welches durch eine Axialbewegung oberhalb der Brennkammer unterstützt wird,
- im Gleichstrom (von Brennstoff und Vergasungsmittel).
- Kurzcharakteristik: Gleichstrom-Schachtvergaser mit mechanisch unterstützter Oxidation oder Saugzug-Festbett-Reaktor/Vergaser.

Die Vergasung wird **ergänzt durch:**

- eine kombinierte Gaskühlung und -wäsche mit RME zuzüglich Gasfilter,
- je 3 Gas-Otto-Motoren/Generatorsätze,
- eine Schaltanlage mit Last- und Steuerungsteil, die spezielle für „Holzgas“ entwickelt wurde und einen BOB³⁵ sicherstellt.

Besonderheiten:

- ENTEC steht neben der Produktion und Lieferung der ENTEC - Holzgas - HKW-Module auch für komplette Leistungen von der Hackschnitzelproduktion bis zum Energie-, einschließlich Wärme-/Kälte-Contracting und liefert betriebsfertige Holzvergaser-BHKW bzw. schlüsselfertige Gesamtanlagen³⁶.
- Die Anlagen sind im eigenen Hause entwickelt und betrieben worden, ehe die ersten Module mit Seriencharakter verkauft wurden. Das Einfahren der Anlagen bis zur Nennleistung begrenzt sich auf wenige Tage der Inbetriebsetzung.
- Durch den modularen Aufbau sind eine hohe Verfügbarkeit und eine gute Anpassung an den Strom- und Wärmebedarf möglich.

³⁵ Betrieb ohne ständige Beaufsichtigung.

³⁶ Der Umfang umfasst neben der Maschinentechnik auch das erforderliche Technikgebäude mit Brennstofflager, die komplette Einspeisung und das Nahwärmenetz.



Abbildung 25: Eine aus drei Modulen bestehende Anlage mit 270 kW_{el} während der Montage Ende Dezember 2008, Quelle: Vortrag von Herrn Baumann auf der CEP Stuttgart 2009

ANHANG G

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE KUNTSCHAR

Kuntschar - Energieerzeugung GmbH & Co. KG, Wolfenhagen-Ippinghausen

Das Unternehmen hat von der Kuntschar+Schlüter GmbH die Weiterentwicklung, Herstellung und den Vertrieb von Holzgaskraftanlagen nach dem Holzgas-Reduktionsverfahren³⁷ mit motorischer Nutzung im Leistungsbereich von 120-150 kW_{el} übernommen.

Die Entwicklungen begannen Anfang der 90iger Jahre. Sie waren ursprünglich auf die Verwertung von Klärschlamm gerichtet, zielen aber schon seit ca. 15 Jahren auf die gasmotorische Nutzung von Holz. Sie war gekennzeichnet durch eine vor allem praktische Auseinandersetzung mit den Festbett-Vergasungssystemen, die zwischen den 1930er Jahren und 1945 genutzt wurden. Als ein Ergebnis wurde angeknüpft an das Patent der Gustloff-Werke, das bei der Entgasung freigesetzte Gas definiert über eine Glutzone zu zwingen.

Herr Kuntschar hat seine Entwicklungen maßgeblich mit eigenen Mitteln finanziert und verfügte vor dem Verkauf der ersten Anlagen über viele Erfahrungen, gesammelt an den am Unternehmensstandort betriebenen Anlagen. Zu Fragen der Analyse und Bilanzierung der Stoffströme gab es eine Zusammenarbeit u.a. mit der Universität Kassel, dem Institut für Thermische Energietechnik. Letztlich wurde die technische Lösung aber über Aufträge und die Einbeziehung der Kunden realisiert.

Brennstoffspezifikation

Benötigt wird „frisches“ Holz mit einem max. Wassergehalt von 15 - 20 % und den Kantentlängen 30 x 70 (G 50). Der Feinanteil sollte 2 % nicht unterschreiten. Morsches, zerfallenes oder zu feines Holz ist für das Verfahren nicht geeignet.

Brennstoffaufbereitung

Sie obliegt in den meisten Fällen dem Auftraggeber, der somit maßgeblich auch die Verantwortung für die Einhaltung der geforderten Brennstoffgüte übernimmt und darüber für das Funktionieren der Gesamtanlage. Der Eintrag in den Reaktor erfolgt aus einem

³⁷ Ein Terminus des Unternehmens.

aufgesetzten Vorratsbehälter über eine Doppelklappenschleuse eine rückbrandsichere Schleuse.

Thermochemische Vergasung in einem:

- Apparat/Reaktor,
- autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel Luft,
- im Unterdruck durch den Saugzugventilator in der Verbrennungsphase (beim Anfahren, Abfahren, bei Störung) und durch den Saugzug des Motors in der Vergasungsphase,
- im Festbett,
- im Gleichstrom,
- ausgeführt als Schachtreaktor mit gravimetrischer Brennstoffbewegung.

Die Vergasung wird **ergänzt von:**

- einer mechanischen Staubabscheidung im Zyklon,
- einer eigenentwickelten Hochtemperatur - Heißgasfiltration mit katalytischer Wirkung,
- einer Gaskühlung, sowie
- einem angepassten MAN Gasmotor mit Generator sowie
- E- und Leittechnik und
- Ausrüstungen zur Strom- und Wärmeabführung.

Besonderheit:

- Die Vergasung erfolgt im ursprünglichen Konzept (reaktorintern) gestuft unter Ausnutzung eines Hohlraums am Holzkohleglutstock und einer vorherigen Oxidation der Pyrolyseprodukte.
- Für diese Vorgänge muss das Koksgerüst eine spezifische Stabilität und Reaktivität besitzen, woraus sich die Anforderungen an die hohe Güte des Brennstoffes ableiten.
- Für das Verfahren sprechen (die prinzipiell guten Voraussetzungen) mit geometrischen und strömungstechnischen Verhältnissen, letztlich über konstruktive Mittel, ein teearmes Brenngas bereitstellen zu können.

- Die katalytisch unterstützte Heißgasfiltration ergänzt das Vergasungsprinzip in Richtung einer relativ einfachen Gesamtanlage.
- Die Stärken für das Funktionieren des Konzepts liegen im Beherrschen der Vergasung. Die meisten Probleme sind mit einer unzureichenden Brennstoffgüte und -bereitstellung verbunden.



Abbildung 26: Referenzanlage 1, Hessischer Bioenergiehof in Breuberg Rai Breitenbach, Vergaser in der Mitte, Darstellung bereitgestellt vom Hersteller

ANHANG H

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE ANKUR

Ankur Scientific Energy Technologies Pvt.Ltd., Baroda, Indien

vertreten durch

Scultura Engineering & Consulting GmbH, Berlin und

Reg-Energy GmbH, Aschaffenburg

ANKUR-Vergaser werden in Indien seit 1988 gefertigt und haben ihre Funktionstüchtigkeit im Dauerbetrieb, wie für Stromerzeugungsanlagen gefordert, in mehreren Ländern unter Beweis gestellt. Das Unternehmen produziert 200 Vergaser im Jahr. Scultura und Reg-Energie importieren diese Anlagen für definierte, besonders an den Brennstoff gebundene, Bedingungen. Die Vertreter sind integriert in den Prozess, dass immer mehr Funktionsgruppen automatisiert werden. Die bisher eingeführten Anlagen benötigen allerdings noch eine intensive Betreuung.

Bei der notwendigen Anpassung der Holzvergasungs-BHKW mit **250 kW_{el}** kooperieren beide Anbieter eng mit den Käufern und Betreibern, die die Anlagen um die Brennstoffbereitstellung und -aufbereitung und den Bauteil ergänzt haben.³⁸

Brennstoffspezifikation:

ANKUR verfügt über Erfahrungen mit einem breiten Brennstoffband von Biomassen. An den Brennstoff naturbelassenes Holz sind herstellerseitig relativ hohe Anforderungen mit folgenden Kennwerten gebunden:

- Holzhackschnitzel mit mind. 1 cm, max. 8 cm Kantenlänge,
- max. 20 % Wassergehalt,
- Feinanteile \leq 1 cm max. 4 % (wobei die Form im Einzelnen abzustimmen ist).

Die Einhaltung der Parameter ist eine Voraussetzung für die ordnungsgemäße Funktion des Gesamtsystems. Die Brennstoffform sollte durch die Zuführungsanlagen nicht beeinträchtigt werden.

³⁸ Neben den beiden genannten Importeuren haben auch Dritte ANKUR-Erzeugnisse z.B. auf direktem Weg, mit unterschiedlichem Erfolg in Deutschland zur Aufstellung gebracht. 2008 arbeiteten z.B. Unternehmen wie innoenergy daran, sie in Funktion zu bringen oder wie Herr Roth und Partner, ihre Funktion zu verbessern.

Brennstoffaufbereitung /Brennstoffweg

Es empfiehlt sich, eine Vortrocknung und Klassierung des Brennmaterials vorzuschalten. Bei den bisher installierten Anlagen wird Holz über eine vertikal verführbare Kippmulde bis zum Aufgabetrichter gefördert und über einen Fallschacht in den Reaktor eingeschleust.

Thermochemische Vergasung

- in einem Apparat,
- autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel Luft (sternförmig in die Oxidationsschicht eingeführt),
- im Unterdruck (erzeugt über einen Saugzug in der Gasreinigungsstrecke),
- im Festbett,
- im Gleichstromverfahren, absteigend,
- ausgebildet als Schachtreaktor mit Rost und mit gravimetrischer Reaktionsgutbewegung.

Die Vergasung wird **ergänzt um**:

- eine Gasreinigung mittels Zyklon, Scrubber (Gaskühlung + Wäsche) und mehrere Filter³⁹, sowie einen
- Gas-Motor/Generatorsatz und entsprechende
- E- und Leittechnik, einschließlich der Stromübergabe.

Besonderheiten:

- Die Ausbildung der ANKUR-Vergaser gründet sich auf eine stetige (und nicht wie in Deutschland immer wieder unterbrochene) technische Entwicklung, in Zusammenwirken von Wissenschaft und Anwendung. Gegeben sind besonders Erfahrungen, in Vergasern verschiedenster Durchmesser (ohne mechanische Unterstützung) Brückenbildungen zu vermeiden bzw. zu beherrschen.
- Die Vergaser liefern stabil ein teearmes und nach der Gasreinigung motorverträgliches Gas, wenn sie mit definiertem Holz und von Fachkräften betreut

³⁹ Wobei daran gearbeitet wird, die Waschwasserkreisläufe zu schließen, Reststoffausträge zu mechanisieren und Beeinträchtigungen durch Frost auszuschalten.

betrieben werden, was im Dezember 2008 durch indische Techniker in Deutschland nachgewiesen wurde.

- An einem BOB (Betrieb ohne ständige Beaufsichtigung) wird gearbeitet. Im Umgang mit Waschlösungen und Reststoffen und bei der Anpassung an europäische Sicherheitsbestimmungen besteht noch Handlungsbedarf.



Abbildung 27: Aufbau eines ANKUR Holzvergaser-BHKW mit 250 kWel (ausgewählt um die Verfahrensstufen zu zeigen, seit 2008 komplett eingehaust und in Betrieb), Quelle: Vortrag von Herrn Menon im Februar 2008

ANHANG I

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE BE-SYS

bioenergy systems GmbH, Merseburg, Artern

Unternehmen der Bioenergy systems N.V., Eindhoven

Teil der NEED Gruppe, Hamburg

Aufbauend auf Entwicklungen am Institut für Umwelttechnik/ Abt. Energietechnik der Martin Luther Universität Halle Wittenberg⁴⁰ und der T&M Engineering, Bad Frankenhausen⁴¹, hat bioenergy systems eine Sonderform der Biomassevergasung kombiniert mit einem angepassten BHKW zur Markteinführung gebracht. Die ersten unter der Marke bioampere® gefertigten modular aufgebauten Bioenergieanlage, zur zeitgleichen Bereitstellung von Wärme und Strom, sind seit 2007 im Leistungsbereich zwischen **220 und 250 kW_{el}** in Betrieb.

Bioenergy system setzt seine Feststoffvergasungs-BHKW-Anlage bevorzugt selbst im Wärme-Contracting ein und bietet sie in der Regel nicht zum Kauf an.

Brennstoffspezifikation

Eingesetzt werden kann eine breite Palette von biogenen Brennstoffen, wie Grünschnitt, Kompostrückstände und andere biogene Rest- und Abfallstoffe, um möglichst preiswerte Biomassen nutzen zu können. Die meisten Betriebserfahrungen wurden bisher mit Holz in Form von Holzhackschnitzeln gesammelt.

Bevorzugt wird Material mit Kantenlänge 15 bis 25 mm (bis max. 50 mm), frei von mineralischen und metallischen Störstoffen, welches mit Schecken transportiert werden kann. Der Wassergehalt sollte bei Annahme 50 Masse-% nicht überschreiten. Angenommen werden kann auch staubförmiges Ausgangsmaterial. Der durchschnittliche untere Heizwert sollte 7 MJ/kg nicht unterschreiten.

⁴⁰ Das das Verfahren unter dem Namen BENA bis zur Versuchsanlage geführt hatte und zwischenzeitlich so nicht mehr existiert, dafür gibt es jetzt Arbeitsbeziehungen zur CUTEC-Institut GmbH und zum ATZ Entwicklungszentrum.

⁴¹ Die die Rechte und ihr Know-how u.a. aus einer Erstanwendung in Sachsen Anhalt an bioenergy systems verkauft hat.

Brennstoffaufbereitung/Brennstoffweg

Vorgehaltenes Material wird in einem Container gelagert und in einen Annahmebunker/Doseur übergeben. Über eine Dosierschnecke und eine Zellradschleuse gelangt das Material dann in die Pyrolyseschnecke des Reaktors.

Thermochemische Vergasung

- in einem Apparat/Reaktor (mit getrennten Reaktionszonen),
- autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel Wasserdampf-Luftgemisch,
- im leichtem Unterdruck (durch Saugzugbetrieb nach der Gasreinigung),
- in einem (für die Pyrolyse über eine Schnecke) bewegten Bett und nachgeschaltetem
- Reaktionsraum (für die Folgereaktionen in aufsteigender Verwirbelung),
- im (durchmischten) Gleichstrom,
- ausgeführt als Reaktor, bei dem die Pyrolysezone quer durch den Reaktionsbehälter verläuft, verbunden über einen Fallschacht und eine weitere Förderschnecke.

Die Gaserzeugung wird **ergänzt um:**

- einen Wärmeübertrager, (genutzt zur regenerativen Luftvorwärmung),
- eine Heißgasfiltration mit Precoating,
- eine Gaswäsche/Kühlung (mit Tropfenabscheidung) sowie,
- einem angepassten Zündstrahlmotor mit großem Hubraum und langsamen Lauf und angeflanschten Generator,
- E- und Leittechnik und
- Ausrüstungen zur Strom- und Wärmeabführung.

Besonderheiten:

- bioampere® Heizkraftwerke sind ausgelegt für die Wandlung preiswerter aber feuerungstechnisch kompliziert zu beherrschender Biomassen.
- Ihr Vergasungsteil ist deshalb mehrstufig und mit regenerativer Wärmeführung ausgebildet. Bioenergy systems beherrscht als einer der ersten Verfahrensträger die gestufte Vergasung von Biomasse im Bereich kleiner Anlagen.

- Über hoher Vergasungstemperaturen und eine kombinierte Reinigung gelingt es, ein sehr teearmes motorverträgliches Gase zu generieren.
- Mit dem Einsatz von am Markt kaum erhältlicher modifizierter Motoren, wird den Verbrennungseigenschaften thermochemisch erzeugter Gase technisch sehr weitgehend entsprochen und können somit vergleichsweise hohe Wirkungsgrade erreicht werden.
- Durch den Einsatz der Systeme im Wärmecontracting bleiben das technische Risiko und die Möglichkeit, schnell verbessernd eingreifen zu können, bei bioenergy systems.
- Der modulare Aufbau, die Containerbauweise und seriennahe Fertigung begünstigen die vorgenannten Alleinstellungsmerkmale
- Das System von bioenergy systems war bis 01/2008 in Deutschland das einzige Konzept, welches ausgehend von einem wissenschaftlich/technischem Ansatz bis zum Markteintritt geführt worden ist.



Abbildung 28: Bioampere® Anlage, Darstellung bereitgestellt vom Unternehmen

ANHANG J

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE MOTHERMIK

Mothermik® fossile und regenerative BHKW Anlagentechnik GmbH,

Pfalzfeld/Hunsrück

seit 2007 ein Unternehmen der Wilms-Gruppe

Gestützt auf die langjährige Tätigkeit als BHKW-Anbieter und Motorenspezialist und aufbauend auf Kontakten zu vielen Vergaser-Entwicklern, u.a. den Werner-Werken, sowie nach mehrjähriger eigenen Entwicklungsarbeiten ist das Unternehmen verstärkt ab 2005 mit einer komplexen vollautomatischen Mothermik® Holzverstromungsanlage (mit integrierter th/ch. Vergasung) auf den Markt getreten. Es konnte als erster Anbieter im Bereich **250 kW_{el}** auf mehrere Module mit 6000-7000 Betriebsstunden pro Jahr verweisen. Aber nicht alle Anlagen erreichten Nennlast. Es gibt auch solche, die nicht mehr betrieben werden. Das Unternehmen wurde übernommen und arbeitet intensivst an der Beherrschung der Teerbildung, -aushaltung und -rückführung. Seit 2008 gibt es dafür einen Prototyp in Pfalzfeld.

Brennstoffspezifikation

Benötigt wird sauberes unbelastetes Waldholz in Form von Hackgut G 50, von Fichte, Tanne, Buche, Eiche etc. Das Material muss ein gut durchströmbares Koksgerüst bilden, anhaftende Rinde, wird mitvergast. Grünschnitt und einjährige Pflanzen sind nicht geeignet. Die Einhaltung der Vorgaben für das einzusetzende Holz ist eine zwingende Voraussetzung für die Funktion des Gesamtsystems.

Brennstoffaufbereitung

Die Anlagen sind ausgelegt, entweder vereinbartes Hackgut oder Rundholz aufzunehmen, welches dann unter Begrenzung von Feingut in definierter Lohnleistung aufzuhacken ist. Mothermik®-Anlagen zeichnet sich durch ein spezielles Holz-Management aus. In der Halle mit Portalkran, der mit einem Feuchtesensor am Greifer ausgestattet ist, gibt es Zwischenlagerflächen und Trockenkammern, die mit Abwärme des Vergasers und des BHKW betrieben werden. Programmgesteuert wird aus verschiedenen Hölzern (darr, lufttrocken und Zugabe von Kondensat) ein Ausgangsmaterial mit dem idealem Prozess-

wassergehalt von <15 % zusammengestellt. Dafür wird ein Teil des Brennstoffes über-trocknet.

Die Beschickung der Reaktoren erfolgt, füllstandsabhängig, über den besagten Kran, ein-schließlich Wägung, und verläuft weiter über eine Vibrationsrinne und Zellradschleuse.

Thermochemische Vergasung:

- in einem Apparat/Reaktor,
- autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel Luft,
- im Unterdruck (durch die Saugwirkung des Zündstrahlmots),
- im Festbett, gravimetrisch und über den Holzkohleaustrag bewegt,
- im Gleichstromverfahren (absteigend),
- ausgebildet als viereckiger Schachtreaktor, ohne Rost in der Oxidationszone.

Die Vergasung wird **ergänzt um:**

- eine Quensche (einschl. Rohgaskühlung/-kondensation sowie Entstaubung und Gaswäsche) sowie einer,
- nachgeschalteten elektrostatischen Gasreinigung und
- versorgt danach einen RME-Zündstrahlmotor mit Generator.

Steuerungen und Strom- und Wärmeabführungen komplettieren das System. Das Quenschen erfolgt mit Wasser im Kreislauf, aus dem Schlamm zur fachgerechten Entsorgung ausgeschleust wird. Überschüssiges Wasser wird (in Beziehung zum über-trocknetem Holz) zur Vergasung geführt und so ein abwasserfreier Betrieb realisiert bzw. angestrebt).

Besonderheit:

- Die Komplexität ist ein Alleinstellungsmerkmal des Verfahrens.
- Die zum Lieferumfang gehörende Brennstoffaufbereitung/(teilweise Über-trocknung ist ein Schlüssel das Funktionieren der Vergasung und des gesamten Wassergehalts-, Kondensat- und Waschwasser-Haushalts d.h. für das abwasser-freie Fahren.

- Der rechteckige Reaktorquerschnitt ermöglicht eine gezielte Luftverteilung, erfordert aber im Zusammenhang mit der keramischen Auskleidung, dass Spannungen beherrscht werden.
- Die Rückführung von teerhaltigen wässrigen Medien in die heißeste Zone und damit ihre Kühlung ist eine anspruchsvolle Aufgabe.
- Die nur teilweise Umsetzung von Holzkohle und ihre Vermarktung und die rostfreie Ausbildung muss über eine Gesamtbilanz bewertet werden. Die Annahme der Holzkohle wird von Mothermik® unterstützt.
- Das Primat der Bearbeitung liegt bei der weiteren Erhöhung der Verfügbarkeit bis zu 8000 h/a und bei der Stabilisierung der Kreisläufe in Richtung eines nach außen teerfreien Betriebs.
- Die dritte Generation von Anlagen wird im I/2009 in Betrieb gehen.



Abbildung 29: Referenzanlage HEH Holzenergie Hunsrück, Pfalzfeld 4 x 250 kW_{el}, Darstellung bereitgestellt vom Hersteller

ANHANG K

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE BIOMASS

Biomass Energiesysteme GmbH & Co KG, Dortmund

Das Dortmunder Ingenieur-Unternehmen vertreibt Frischholzvergasungsanlage vom System Biomass (mit ca. $1 \text{ MW}_{\text{fwh}}$, $410 \text{ kW}_{\text{th}}$, **$270 \text{ kW}_{\text{el}}$** brutto). Es stützt sich dabei auf die Vergasungs- und Gasreinigungstechnik von Biomass Engineering Ltd. (UK), die sich seit mehr als 10 Jahren mit der thermochemischen Vergasung befasst ist und Dauerbetriebsergebnisse verweisen konnte, ehe die erste Anlage nach Deutschland eingeführt wurde. Die Biomass Energiesysteme GmbH & Co KG plant und komplettiert die Anlagen um die Holzbereitstellung und die BHKW-Technik, letztere in Kooperation mit pro2Anlagentechnik. Angeboten werden auch die Finanzierung und das Betreiben solcher Systeme. Die erste Anlage in Deutschland entstanden in Zusammenarbeit mit der Stadtwerke Düsseldorf AG in einen Contracting-Modell. Die Anlagen werden bisher modular sowohl einstraßig als auch als Doppelanlage ausgeführt.

Brennstoffspezifikation

Die Anlagen sind für den Einsatz frischen Waldholzes ausgelegt, welche an der Anlage zu groben Holzhackschnitzel zwischen 25 und 100 mm Kantenlänge gehackt werden. Das Holz verfügt dann in der Regel über einen Wassergehalt von ca. 35 Masse%. Feinanteile sollen auf max. 2 % begrenzt sein.

Brennstoffaufbereitung

Sie beginnt mit der Bevorratung, gefolgt vom o.g. Hacken vor Ort. Optional ist eine Vortrocknung möglich. Ein Muldengurtt Förderer führt das Material dann zum Reaktorkopf. Die Brennstoffeinführung erfolgt von oben über die Brennstoffschleuse. Zur Rückbrandsicherung dienen 2 hydraulisch betriebene dicht schließende Klingenschieber.

Thermochemische Vergasung

- in einem Apparat/Reaktor,
- autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel Luft (von zwei Seiten über der Oxidationsschicht angesaugt),

- unter Normaldruck (am Reaktorkopf),
- im Festbett,
- im Gleichstromverfahren (mit gravimetrischer Brennstoffbewegung),
- ausgeführt als Schachtreaktor mit Rost (abhängig vom Druckverlust geschürt).

Die Vergasungsstufe wird **ergänzt um**:

- eine Gasreinigung über Keramikfilter,
- einen Gaskühler (bis zur Kondensation) und einen Tropfenabscheider,
- einen Gas-Pufferbehälter und
- einem Gas-Ottomotor/Generatorsatz, zuzüglich
- E- und Leittechnik und
- Einrichtungen zur Stromeinspeisung- und Wärmeabgabe.

Das Kondensat wird mittels Aktivkohle gereinigt und in die Kanalisation eingeleitet.

Besonderheiten

- Die Anlage gestattet bei Einhaltung der vorgegeben Stückigkeit und Feinanteile den Einsatz verschiedener Holzarten.
- Die Vergasung und Gasreinigung ist nach den Standards des Energieanlagenbaus industriell gestaltet.
- Die Thermochemische Vergasung, deren Pyrolysezone zur Spezifik der Anlage zählt, liefert neben dem Brenngas auch Koks, der gesondert vermarktet wird.
- Die katalytische Heißgasreinigung ist eine der ersten, die an einem Holzvergasungssystem ihre Funktionstüchtigkeit unter Beweis stellt.
- Der Teergehalt im Brenngas liegt gemäß Untersuchungen des IUTA-Instituts, Duisburg, unterhalb der Nachweisgrenze.
- Die Anlage trägt Seriencharakter.



Abbildung 30: Reaktor der Holzgasanlage, Dortmund Anfang 2008, Darstellung bereitgestellt von Biomass Energiesysteme GmbH & Co KG

ANHANG L

KURZBESCHREIBUNG ANLAGE BISEA

BISEA GmbH, Neuenkirchen

ab 02/2009 VIDAR Energy, Homburg

Die Entwicklung gründet sich auf Erfahrungen des Ingenieurbüros CET Christian Eder Technology, zur Klärschlammbehandlung und zur dezentralen Energiewandlung. Der Anstoß für das eigene Konzept zur Verbindung von Vergasung und der energetischen Nutzung von Gasreinigungsmedien, entstand im Zusammenhang mit dem Wirksamwerden der TA Siedlungsabfall. Die Vergasungsanlage wurde in Kooperation mit dem IVD der TU Stuttgart entwickelt. Erarbeitet wurden daneben Varianten, um Teer aus Rohgasen auszuwaschen und Waschmedien z.B. über ein „Waschöl“-BHKW zur zusätzlichen Energiebereitstellung zu nutzen bzw. über die Option eines ORC- Prozesses eine Wärmesenke zu integrieren, die zur weiteren Stromerzeugung gestaltet werden kann.

In die Praxis überführt wurde bisher eine Demonstrationsanlage (mit noch vereinfachter Teernutzung) mit **400 kW_{el}**, die 2008 als Vergasungsanlage 4500 und in Verbindung mit einem Motor 2000 Stunden in Betrieb war. Die langgestreckte Einführungsphase konnte von der BISEA GmbH nicht mehr allein getragen werden, sodass eine Übernahme notwendig wurde.

Brennstoffspezifikation

Der Brennstoff muss wirbelfähig sein. Als Ausgangsstoffe können die verschiedensten forst- und landwirtschaftlichen Energieträger zum Einsatz gebracht werden. Bevorzugt wird holzartiger Grünschnitt, mit bis zu 120 mm Kantenlänge. Angenommen werden kann Material bis zu 55 % Wassergehalt, da der Vergasung eine Trocknung vorgeschaltet ist, die Hackgut auch für den Weitervertrieb aufwerten soll. Der Fein(korn-)anteil kann bis zu 25 Masse-% betragen.

Brennstoffaufbereitung

Die Vortrocknung der Ausgangsmaterialien mit Restwärme ist fester Bestandteil des Wärmekonzepts. Der Wassergehalt des Brennstoffs wird auf < 20 Masse-% reduziert. Die Brennstoffvorbereitung ist mit einer Homogenisierung verbunden. Die Zuführung bis

vor den Reaktor erfolgt über Bänder und Kratzförderer, die gasdichte Einführung mittels eines eigenentwickelten Pressstempels. Die Presslinge zerplatzen in der Wirbelschicht.

Thermochemische Vergasung

- in einem Apparat/Reaktor,
- hauptsächlich autotherm,
- mit dem Vergasungsmittel vorgewärmte Luft,
- unter Druck mit ca. 10 mbar,
- in einer stationären Wirbelschicht, bei ca. 800 °C, unter Verwendung von Dolomit als katalytisch wirkendem Bettmaterial,
- ausgebildet als Schachtreaktor.

Die Vergasung wird **ergänzt von:**

- einem Heißgaszyklon,
- einer zweistufigen Gaskühlung mit Wärmetauscher,
- einer Feinfiltration,
- einer Gaswäsche mit naturbelassenem Rapsöl (ausgewaschener Teer wird vorerst zum Vergaser zurückgeführt) komplettiert um,
- einem Gas-Otto-Motor/Generatorsatz,
- E- und Leittechnik, sowie
- Strom- und Wärmeauskopplung.

Besonderheiten:

- Der Prototyp der Biostromerzeugungsanlage BISEA mit 1400 kW_{f_{wl}} und ist die erste Wirbelschicht-Vergasungs-Anlage, die seit 2004 in Deutschland zur kommerziellen energetischen Verwertung von Biomasse den Betrieb aufgenommen hat. Sie leitete damit den Eintritt von Anlagen im Bereich von 1 bis 20 MW_{f_{wl}} in die Realität der th/ch. Biomassevergasung zur Kraft-Wärme-Kopplung ein.
- Die Anlage ist dafür ausgelegt, feuerungstechnisch kompliziert zu beherrschende Brennstoffe, wie Grünschnitt und Feinstfraktionen von Siebanlagen, d.h. preiswerte biogene Ausgangsstoffe, für die gekoppelte Wärme- und Strombereitstellung zu nutzen.

- Der zulässige Teergehalt im Brenngas wird über drei Stufen begrenzt. Diese bestehen aus katalytisch unterstützten Reaktionen im Wirbelbett, chemischen Vorgängen beim Waschen mit Rapsöl sowie der Kondensation und Ausschleusung.
- Das technische Konzept ist relativ robust.



Abbildung 31: Integration der Prototypanlage in einer Halle, Darstellung bereitgestellt durch BISEA GmbH

ANHANG M STATISTISCHER ÜBERBLICK ZUR ANLAGENENTWICKLUNG

Tabelle M1

Übersicht zur Entwicklung der Biomasse-Vergasungs-BHKW-Technik in Deutschland 2007/2008

Bearbeitungsstand: Erfassungsschluss 31. Dez. 2008, redaktionelle Überarbeitung Jan. 2009
 aufgestellt in Zusammenarbeit mit der AG "Vergasung von Biomasse" der FEE e.V., bereitgestellt für das Projekt "Schwachstellenanalyse" zu realisierten Kombinationen von Biomassevergaser, Gasreinigung und Maschine/Generator, hier als Module bezeichnet wobei als "realisiert" gezählt wurde, wenn sie zur Strom- und Wärmeproduktion an Kunden oder Betreibergesellschaften übergeben wurden und nicht vorrangig zur Entwicklung betrieben werden

Die Aufstellung gilt nur als Einheit von Tabelle und Text

Entwickler, Hersteller, Anbieter	Leistungsbereich		Status des Akteurs				Anlagenstatus		Anzahl der übergebenen Module nach Inkrafttreten des nov. EEG					inst. Leistung realisierter Anl. in kWel					
	Modul-Leistung von	bis	Entwickler	Hersteller	Vertrieb	Komplettlieferant Contractor	Eigenversorgung	Prototyp bei Kunden Folgeanlagen	Übergang zur 1.Serie										
									Import/Kerntechnologie										
in kWel	in kWel							2004	2005	2006	2007	2008							
1 Gräbner (Jun.) Behälter- und Apparatebau Holzgasanlagen	10	30	1	1	1		1	1		2	2	3	3	>200					
2 B. Joos und Partner/Lizenznehmer wie sesolution/Fam. Baumann u. Spanner RE2 GmbH	15	40	1	1	1	1	1	1	1	1	2	4	3	>300					
3 Qalovis Farmer Automatic Energy GmbH	20		1	1	1		1						1	20					
4 Schmidt Ingenieurdienstleistungen	30		1	1	1		1						1	30					
5 Drebe GmbH	40	60	1	1	1	1	1	1		-1 (3-2=1)	(3-n)		2	>400					
6 ENTEC Corp. & Co. POWER SYSTEMS KG	90		1	1	1		1	1				6	8	1260					
7 Kuntschar Energieerzeugung GmbH & Co KG (ANKUR-Systeme von) Reg-energy GmbH u. SCULTURA	125	150		1			1			(-n)	(2-n)	(7-n)	2	>1250					
9 Engineering & Consulting GmbH und im Selbstbezug*	250		1	1	1	1	1	1		1	+1*	1	1*	>750					
8 Bioenergy systems GmbH	220	250	1	1	1	1	1	1				-1	3	1	2000				
10 Mothermik GmbH	250		1	1	1	1	1	1		(2-1=1)	4 (8-4=4)	5	1	5000					
11 Biomass Energiesysteme GmbH & Co KG und Partner	270		1	1	1		1	1	1			1	1	2	1080				
12 Bisea GmbH und Investor	400		1	1	1		1						1	400					
									jährlicher Zuwachs an Anlagen ohne Angaben der Anlagen von Firmen, die sich (nochmals) zurückgezogen haben					ca. 2	ca. 6	13-n	34-n	25	>12500 Leistungszuwachs in 2008 kWel ca. 2500

Legende und Bemerkung

im Projekt "Schwachstellenanalyse" einbezogene Varianten
 ein Minus steht für schon in Betrieb befindlichen Anlagen, die nicht mehr in Betreuung der Hersteller bzw. außer Betrieb sind
 (-n) steht für die Übergabe von Anlagen die nicht bis zur Zufriedenheit der Beteiligten geführt wurden bzw. nicht in Betrieb sind
 beide Kategorien geben Anlass, Auflistungen zukünftig unter Berücksichtigung zusätzlicher Kriterien stärker auf realisierte Betriebsstunden auszurichten

Hinweise:

Mit der Aufstellung ist kein Anspruch auf Vollständigkeit verbunden.

Die Angaben sollen die Entwicklung veranschaulichen und stehen noch nicht für im Dauerbetrieb befindliche Systeme.

Die Tabelle berücksichtigt hauptsächlich Entwickler und Anbieter, die 2007/08 in Deutschland die Realisierung von Vergasungsanlagen charakterisierten.

Hersteller, die bereits einzelne Anlagen übergeben hatten, die aber nicht im dauernden Betrieb sind, sind hier nicht aufgeführt.

Biomassevergasungs-BHKW-Systeme, die vorrangig Pyrolyseöl erzeugen und verwerten oder mit Klärschlamm als wichtigstem Einsatzstoff betrieben werden sind ebenfalls ausgeklammert.

Solange das Funktionieren der Systeme noch stark von der Beherrschung der Vergasungsvorgänge abhängt, werden vorläufig Module noch einzeln erfasst, allerdings nur, wenn eine Verbindung zwischen Vergaser und einer Kraftmaschine gegeben ist.

Qalovis wird davon abweichend benannt, weil Vergaser bei Landwirten bereits zur Wärmeerzeugung betrieben werden und die Ergänzung mit einem Stirling-Motor als zweite Variante der Kraft-Wärme-Kopplung aus fester Biomasse mittels Vergasung von Entwicklern für möglich erachtet wird.

Noch nicht aufgeführt, aber hier vermerkt werden soll das Vorrangkommen bei der Einführung neuer Systeme wie der Wirbelschichtvergasung mit Heatpipe-Reformer, wofür der Beginn der Inbetriebnahme der Prototypen der Unternehmen hs energieanlagen GmbH und Agnion Highterm Research GmbH stehen.

Kennzeichnend für die Entwicklung 2007/08 war auch, dass an vielen Prototypen noch gearbeitet wird und zur Vorbereitung von Anlagen im MW-Bereich die Planungen und Realisierungen begonnen haben.

Bearbeiter D. Bräkow, Anfragen und Hinweise bitte an info@fee-ev.de

Tabelle M2

Übersicht zur Entwicklung der Biomasse-Vergasungs-BHKW in Deutschland

aufgestellt von der AG Vergasung von Biomasse der FEE e.V. und bereitgestellt für das Projekt "Schwachstellenanalyse" zu realisierten Prinzipien für die Biomassevergasung, Rohgasreinigung und Motoren

Bearbeitungsstand 12/2008

Entwickler, Hersteller, Anbieter	Kennzeichnung der thermochemischen Vergasung						Gasreinigung			Motor	
	Reaktionswärme allotherm autoterm kombiniert	Vergasungsmittel Luft W. Dampf O2		Brennstoffstrom gravimetrisch mechanisch kombiniert fluid		Gasstrom Gegenstrom Gleichstrom Mehrstrom station. WS zikul. WS		trocken naß wässrig naß organisch kombiniert Sonderform	vorrangig Gas-Otto Zündstrahl Stirling		
1 Gräbner Behälter- und Apparatebau Holzgasanlagen	1	1		1		1		1			
2 B. Joos und Partner/Lizenznehmer wie sesolution/Fam. Baumann u. Spanner RE2 GmbH	1	1		1		1		1			
3 Qalovis Farmer Automatic Energy GmbH	1	1		1		1		1		1	
4 Schmidt Ingenieurdienstleistungen	1	1		1		1*		1	1	1	
5 Drebe GmbH	1	1		1		1		1	1	1	
6 ENTEC Corp. & Co. POWER SYSTEMS KG	1	1		1	1	1		1	1	1	
7 Kuntschar Energieerzeugung GmbH & Co KG (ANKUR-Systeme von) Reg-energy GmbH u. SCULTURA	1	1		1		1		1	1	1	
8 Engineering & Consulting GmbH und im Selbstbezug*	1	1	1	1		1	1	1	1	1	
9 Bioenergy systems GmbH	1	1		1		1		1	1	1	
10 Mothermik GmbH	1	1		1		1		1	1	1	
11 Biomass Energiesysteme GmbH & Co KG und Partner	1	1		1		1		1	1	1	
12 Bisea GmbH und Investor	1	1		1		1		1	1	1	

Tabelle M3

Übersicht zur Entwicklung der Biomasse-Vergasungs-BHKW in Deutschland

aufgestellt von der AG Vergasung von Biomasse der FEE e.V. und bereitgestellt für das Projekt "Schwachstellenanalyse" Kurzcharakteristik

Bearbeitungsstand 12/2008

Entwickler, Hersteller, Anbieter	Leistungsbereich		erforderlicher bzw. möglicher Brennstoff	Betriebsweise	Grundprinzip der Vergasung	Besonderheit
	Modulleistung von	bis				
	in kWel	in kWel	wenn die Funktionstüchtigkeit mit Holz stabilisiert ist			
1 Gräbner Behälter- und Apparatebau Holzgasanlagen	10	30	definiertes Holz	diskontinuierl. handbeschickt	Festbett	Weiterentwicklung der klassischen Holzvergasung, mit Anforderungen an den Betreiber, dafür kleinst, einfachst, robust, oft wärmegeführt betrieben
2 B. Joos und Partner/Lizenznehmer wie sesolution/Fam. Baumann u. Spanner RE2 GmbH	15	40	noch def. Holz	automatisiert	mech.bewegt	automatisierte Weiterentwicklung mit speziellem Herd und sehr teerarmen Gas einfach, robust, für wärmegeführten Betrieben gut geeignet
3 Qalovis Farmer Automatic Energy GmbH	20		breites Bst.band*	automatisiert	Festbett	Kombination von Vergaser und Brennkammer, ausgelegt zur Heißgasanzugung aus verschiedenen Biomassen
4 Schmidt Ingenieurdienstleistungen	30		breites Bst.band	automatisiert	mech.bewegt	Kombination mehrerer flüch. Verfahren zur Erzeugung und Reinigung von Gas aus preiswerten Biomassen für sehr kleine Biomassevergasungs-BHKW
5 Drebe GmbH	40	60	breites Bst.band	automatisiert	mech.bewegt	Kombination mehrerer Gleichstromvergaser mit ausgeprägter Pyrolyse für verschiedene Biomassen, einfaches Prinzip, noch aufwendige Gasreinigung
6 ENTEC Corp. & Co. POWER SYSTEMS KG	90		definiertes Holz	automatisiert	Festbett	automatisierte Weiterentwicklung der klassischen Holzvergasung in 1. Serie, für wärmegeführten Betrieben gut geeignet
7 Kuntschar Energieerzeugung GmbH & Co KG (ANKUR-Systeme von) Reg-energy GmbH u. SCULTURA	125	150	definiertes Holz	automatisiert	Festbett	automatisierte Weiterentwicklung der klassischen Holzvergasung mit spez. Gasführung im Herd, liefert mit Heißgasreinigung sehr teerarmes Gas
8 Engineering & Consulting GmbH und im Selbstbezug*	250		definiertes Holz	automatisiert	Festbett	Weiterentwicklung der klassischen Schachtvergasung, mit vielen Betriebserfahrungen in Indien u. noch laufender Anpassung von Automatisierung u. Peripherie
9 Bioenergy systems GmbH	220	250	breites Bst.band	automatisiert	mech.bewegt	sehr differenziertes und wieder kombiniertes Ent- und Vergasungssystem mit Vorteilen für komplizierte Brennstoffe, eingesetzt im Contracting, kein Verkauf
10 Mothermik GmbH	250		definiertes Holz	automatisiert	Festbett	komplexes System von Holzbereitstellung, Vergasung, Gasreinigung, Motorbetrieb, mit den meisten Betriebserfahrungen, die neu umgesetzt werden
11 Biomass Energiesysteme GmbH & Co KG und Partner	270		definiertes Holz	automatisiert	Festbett	automatisierte Weiterentwicklung der klassischen Holzvergasung mit spez. Umsetzung durch Energieanlagenbauer
12 Bisea GmbH und Investor	400		breites Bst.band	automatisiert	stat. Wirbelschicht	einfache, robuste, stationäre Wirbelschichtvergasung und Gasreinigung mit organischer Wäsche, ausgelegt für minderwertige Brennstoffe

*Brennstoffband

