

# **TAGUNGSBAND**

**Beiträge zum Fachkolloquium**

**„Elektroenergie aus Biomasse in dezentraler  
Anwendung – Technik, Ökonomie, Ökologie –“,  
12.-13. Mai 2011 in Zittau**

**Autorenmanuskripte**

**Organisationskomitee:**

Prof. Tobias Zschunke (Hochschule Zittau/Görlitz)

Kontakt: [T.Zschunke@hszg.de](mailto:T.Zschunke@hszg.de)

Roman Schneider (Hochschule Zittau/Görlitz)

Diana Pfeiffer (DBFZ)

Angela Gröber (DBFZ)

**ISBN 978-3-941521-05-6**



**Energetische  
Biomassenutzung**



## **Kurzreferat**

Biomasse enthält chemisch gebundene Solarenergie und bedarf deshalb einer sorgsamten Berücksichtigung im Energiesystem. Der Drang, die chemische Energie in eine möglichst hochwertige Energieform, also z.B. Elektroenergie, umzuwandeln, darf nicht davon abhalten, insgesamt mit Hilfe der biogenen Energierohstoffe eine größtmögliche Menge fossiler oder nuklearer Energierohstoffe zu substituieren. Dies führt auf ein Optimierungsproblem. Es steht inzwischen fest, dass eine umfangreiche Nutzung für Wärmebereitstellungsaufgaben und additiv dazu eine effiziente Stromerzeugung, insgesamt also konsequente Kraft-Wärme-Kopplung ein energetisch und wirtschaftlich vielversprechender Weg sind. Die hier vorgestellte Tagung stellt einen Beitrag zur Fachdiskussion dar.



## Inhaltsverzeichnis

Seite

Kurzreferat .....	III
Inhaltsverzeichnis .....	V
Vorwort ( <i>Prof. Tobias Zschunke, Hochschule Zittau/Görlitz</i> ) .....	- 7 -
„BioEnergieDat“ – Die Open Source Datenplattform für Bioenergie in Deutschland ( <i>Dr. Witold Roger Pogonietz, KIT; Prof. Lieselotte Schebek, KIT</i> ) .....	- 9 -
Chancen und Risiken dezentraler Biomasseanlagen in der gesamten Wertschöpfungskette vom Ast bis zu kWh ( <i>Dr. Thomas Lux, A+S NaturEnergie GmbH; Markus Rebmann, MVV Energiedienstleistungen GmbH</i> ) .....	- 17 -
Zum Stand der energetischen Nutzung wasserarmer Biomasse mit anaerober Vergärung ( <i>Dr. Hagen Hilse, GICON GmbH</i> ) .....	- 27 -
Dampfmotoren in KWK-Anlagen zur Verstromung fester Biomasse ( <i>Till Augustin, Spilling Energie Systeme GmbH</i> ) .....	- 43 -
Der ORC-Prozess auf Biomassebasis – derzeitiger Einsatz und Optimierungsansätze ( <i>Markus Preißinger, Universität Bayreuth</i> ) .....	- 57 -
Direkte Rauchgaswärmenutzung über ORC-Anlagen ( <i>Tim Schulzke, Fraunhofer UMSICHT</i> ) .....	- 65 -
Stromerzeugung mit Holz-Mikro-KWK(K) Stirlingmotoren für Wohngebäude und Kleingewerbe ( <i>Dr. Bodo Gross, IZES</i> ) .....	- 77 -
Stirlingtechnologie in Kombination mit Holzvergasung im Holzheizkraftwerk Langballig – Konzept und Betriebserfahrungen ( <i>Karsten Müller-Jannßen, Stadtwerke Flensburg</i> ) .....	- 79 -
Anwendungschancen und –grenzen für Dampfturbinen ( <i>Cornelia Liebmann, Siemens Turbomachinery Equipment GmbH</i> ) .....	- 93 -
Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW ( <i>Ingmar Schübler, SP Technical Research Institute of Sweden</i> ) .....	- 99 -
Felderfahrungen mit Holzgas-BHKW ( <i>Georg Kuffer, Spanner Re<sup>2</sup> GmbH</i> ) .....	- 111 -

**Effiziente Biomassenutzung in einem HPCR-BHKW (*Reinhold Altensen, TH Mittelhessen*)..... - 123 -**

**Chancen und Grenzen des Einsatzes der Wirbelschichtvergasung für die energetische Biomassenutzung im kleinen Leistungsbereich (*Tim Schulzke, Fraunhofer UMSICHT*)..... - 131 -**

**Ergebnisse der Diskussion und Versuch einer Zusammenfassung (*Prof. Tobias Zschunke, Hochschule Zittau/Görlitz*) ..... - 143 -**

## **Vorwort**

*(Prof. Tobias Zschunke, Hochschule Zittau/Görlitz)*

Der Bereitstellung von Strom und Wärme aus Biomasse wird eine gewisse Bedeutung bei der Ablösung nuklearer und fossiler Primärenergieträger zugesprochen. Die Skala der Grundkonzepte reicht von der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, über kommunale Dampfkraftwerke bis hin zu kleinen und kleinsten Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen in Wärmeverbrauchernähe. Gerade der unterste Leistungsbereich bis ca. 500 kWel soll hier gezielt untersucht werden. In diesem Zusammenhang soll zur Objektivierung der Bewertung der Technologien und zur genaueren Bestimmung von weiteren Entwicklungsschritten beitragen.

Ziel der Veranstaltung ist es, den Stand der Stromerzeugung aus relativ trockener Biomasse in Klein- und Kleinstanlagen aufzuzeigen. Insbesondere für Holz verschiedener Qualität als Energierohstoff werden Technologien nachgefragt.

Auch wenn im Titel die Stromerzeugung im Mittelpunkt steht, wird bei genauerer Betrachtung schnell klar, dass nur Kraft-Wärme-Kopplung, also die Verbindung mit umfangreicher und effizienter Wärmenutzung volkswirtschaftlich und auch betriebswirtschaftlich sinnvoll sein kann.

Am 12./13.05.2011 fand in Zittau eine interessante Veranstaltung statt, während der die Fachdiskussion um die Kraft-Wärme-Kopplung aus Biomasse eine Fortsetzung fand.



## **„BioEnergieDat“ – Die Open Source Datenplattform für Bioenergie in Deutschland**

(Dr. Witold Roger Pogonietz, KIT;  
Prof. Lieselotte Schebek, KIT)

*Pogonietz, Witold-Roger, Schebek, Lieselotte (Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse), Ciroth, Andreas (GreenDeltaTC GmbH), Döpmeier, Clemens (Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Informatik), Eltrop, Ludger (Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung), Simon, Sonja (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Technische Thermodynamik), Viebahn, Peter (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Forschungsgruppe „Zukünftige Energie- und Mobilitätsstrukturen“), Wagner, Hermann-Josef (Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft), Zschunke, Tobias (Hochschule Zittau / Görlitz, Fachbereich Maschinenwesen)*

### **1 Thema und Ziel von BioEnergieDat**

Die Nutzung von Biomasse wird als ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz angesehen, auch wenn Forschungsergebnisse verdeutlichen, dass nicht jede technologische Option per se umweltfreundlich ist [SRU 2007]. Eine umfassende Ermittlung und Quantifizierung von Umweltauswirkungen, sowohl im Hinblick auf die Klimaeffekte als auch auf andere wichtige Wirkungskategorien, muss daher integraler Bestandteil einer nachhaltigen Biomassestrategie sein. Solche Bewertungen sollten auf Basis des gesamten Lebenswegs eines Stoffes erfolgen, d.h. vom Anbau der Biomasse über die Produktion regenerativer Energieträger bis hin zur Bereitstellung von Nutzenergie („cradle to grave“; [Bauman 2004]).

Zahlreiche lebenswegbasierte Studien zur energetischen Nutzung von Biomasse zeigen aber auch, dass die Bilanzierung solch komplexer Systeme die Festlegung einer Vielzahl von Randbedingungen und methodischen Konventionen verlangt, die sehr unterschiedlich ausfallen. Als Folge unterscheiden sich die in den Studien ermittelten Umweltauswirkungen unterschiedlicher Optionen der Biomassenutzung und der Nutzung konkurrierender fossiler Energieträger allein aufgrund der gewählten Methodik gravierend [GreenDeltaTC 2009].

Ein weiteres grundsätzliches Problem besteht in der Aktualisierung der Datengrundlagen entsprechend der Technologieentwicklung, die i.a. unzureichend erfolgt. Dies ist gerade für den Bereich der Biokraftstoffe relevant, der durch eine umfangreiche Forschungstätigkeit gekennzeichnet ist. Daher lässt sich feststellen, dass auch Datensätze aus neueren Projekten häufig faktisch veraltet sind [GreenDeltaTC 2009].

Aufgrund der beschriebenen Problemstellungen ergibt sich daher der Bedarf nach einer konsistenten und aktuellen Datengrundlage für die Entwicklung einer nationalen Biomassestrategie, die eine reproduzierbare, nachvollziehbare und wissenschaftlich abgesicherte Abschätzung der Umweltauswirkung über den gesamten „Lebenszyklus“ mittels einer einheitlichen und normkonformen methodischen Vorgehensweise erlaubt, die aktuelle technologische und ökonomische Kenngrößen einbezieht und das schnelle Reagieren auf wirtschaftliche oder politische Veränderungen unterstützt.

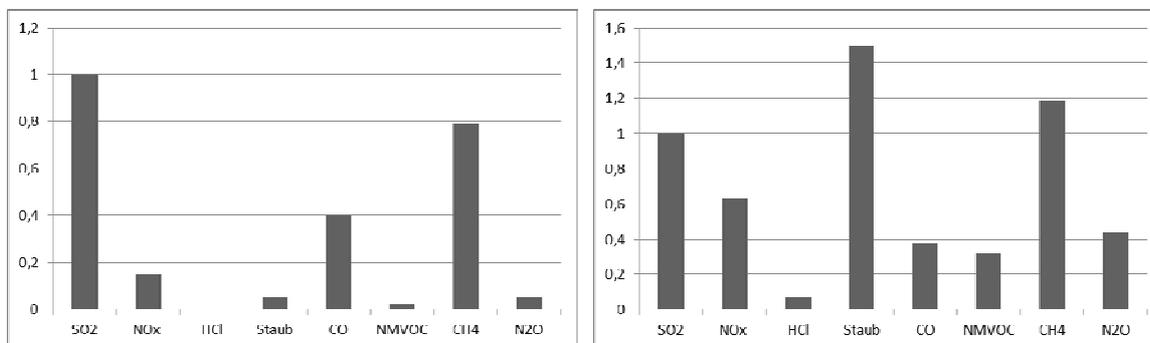
Das Vorhaben BioEnergieDat – „Bereitstellung einer aktuellen und harmonisierten Datenbasis als Beitrag zur Weiterentwicklung einer nachhaltigen Bioenergiestrategie“ setzt an diesen Entwicklungen an und fokussiert hierbei auf folgende Ziele:

- Bereitstellung einer validen, konsistenten Datenbasis auf Grundlage existierender Datensätze zu Technologien der energetischen Nutzung von Biomasse;
- Erweiterung der vorliegenden Datenbasis, insbesondere im Hinblick auf in Entwicklung befindliche Technologien;
- Erarbeitung repräsentativer Datensätze für Technologien und biomassebasierte Energieträger für deutsche Rahmenbedingungen;
- Bereitstellung einer webbasierten IT-Infrastruktur für eine flexible, modulare Nutzung und Fortschreibung der Datenbasis.

## 2 Stand der Wissenschaft

### 2.1 Datengrundlagen und Methodik der Bilanzierung von Technologien der energetischen Nutzung von Biomasse

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment, Ökobilanz) zur energetischen Nutzung von Biomasse durchgeführt. Diese Studien zeigen, dass die Bilanzierung komplexer Systeme die Festlegung einer Vielzahl von Randbedingungen und methodischen Konventionen verlangt, die in der Praxis sehr unterschiedlich getroffen werden. Dazu zählen z.B. der Ausweis von biogenem CO<sub>2</sub>, der Umgang mit Multi-Outputprozessen (Allokation) oder die Auswahl der Stoffflüsse. Infolgedessen divergieren die in den Studien ermittelten Umweltauswirkungen für unterschiedliche Optionen der Biomassenutzung und der Nutzung konkurrierender fossiler Energieträger allein aufgrund der Wahl der Methodik gravierend (Abb. 1).



Anm.:

- Die Werte wurden wegen nicht verfügbarer Bezugsgrößen für den PE-Datensatz je Datensatz auf SO<sub>2</sub> bezogen und dann durcheinander geteilt. [GreenDeltaTC 2009].
- Die Darstellungen basieren auf den folgenden Datensätzen:
  - Gemis: 20-MW-el-Gegendruck-(GD) Dampfturbinen-Heizkraftwerk (HKW) mit zirkulierender Wirbelschichtfeuerung (WSF) für Holz-Hackschnitzel aus Waldrestholz, „Holz-HS-Waldholz-HKW-GD-DE-2005/brutto“ [Gemis 2010].
  - ecoinvent: Heizkraftwerk mit Wirbelschichtfeuerung für Holz-Hackschnitzel aus Waldrestholz, Leistung 20 MW), Datensatz „wood chips, burned in cogen 6400 kWth, emission control – CH“.
  - PE International: Wirbelschichtverbrennung von naturbelassenem Holz [Betz et al. 2002].

**Abb. 1: Vergleich ausgewählter Luftemissionen bei der Verbrennung von Holz hackschnitzeln in der Wirbelschicht aus drei Datenquellen Gemis, ecoinvent und PE International. Links: PE International zu Gemis; rechts: ecoinvent zu Gemis**

Die Aktualisierung von in der Literatur oder in Datenbanken bereitgestellten Daten entsprechend der Technologieentwicklung erweist sich häufig als ein Problem. Häufig fehlt die Abbildung zukünftiger Entwicklungen über Lernkurven von Technologien; zu neuesten Technologien liegen teilweise nur einzelne Angaben vor. Gegenwärtig ist dies gerade für den Bereich der Biokraftstoffe relevant, der durch eine umfangreiche Forschung zur Technologieentwicklung als auch zur Erweiterung der Rohstoffbasis gekennzeichnet ist. Demgegenüber ist bei zahlreichen Projekten zur Evaluierung von Bioenergie-Technologien ein Überhang an Sekundärdaten und Metadiskussion festzustellen, ohne dass eine kritische Auseinandersetzung mit der komplexen Situation gesellschaftlicher Interessen, naturwissenschaftlicher Voraussetzungen und technologischer Möglichkeiten geführt wurde. Daher lässt sich feststellen, dass auch Datensätze aus neueren Projekten nicht unbeeinflusst von Interessen und häufig faktisch veraltet sind [GreenDeltaTC 2009].

Während derzeit auf internationaler Ebene in verschiedenen Staaten Anstrengungen unternommen werden, um eine einheitliche Methodik und national einheitliche Datenbanken für Lebenszyklusdaten aufzubauen (Beispiele: EU 25, USA, Kanada), ist die Forschung in Deutschland bisher nach wie vor auf einzelne Projekte fokussiert und teilweise kurzfristig ergebnisorientiert: In Forschungsprojekten modellierte Daten werden nicht immer veröffentlicht, eine „Nach-Nutzung“ in anderen Zusammenhängen ist mühsam und fehleranfällig, eine systematische Fortschreibung erfolgt nicht. Weiterhin wird die Nachführung der erhobenen Daten aufgrund von internationalen Entwicklungen nicht systematisch betrieben, wie bspw. die Abbildung von Feinstaubemissionen in der Datenbank des Umweltbundesamtes „ProBas“ [ProBas 2010] zeigt. In verfügbaren deutschen Projekte werden i.a. „Partikeln“ oder „Staub“ erfasst, während in internationalen Datenbanken zwischen  $PM_2$ ,  $PM_5$ ,  $PM_{10}$  und Grobstaub unterschieden wird.

## 2.2 IT-Technisches Konzept

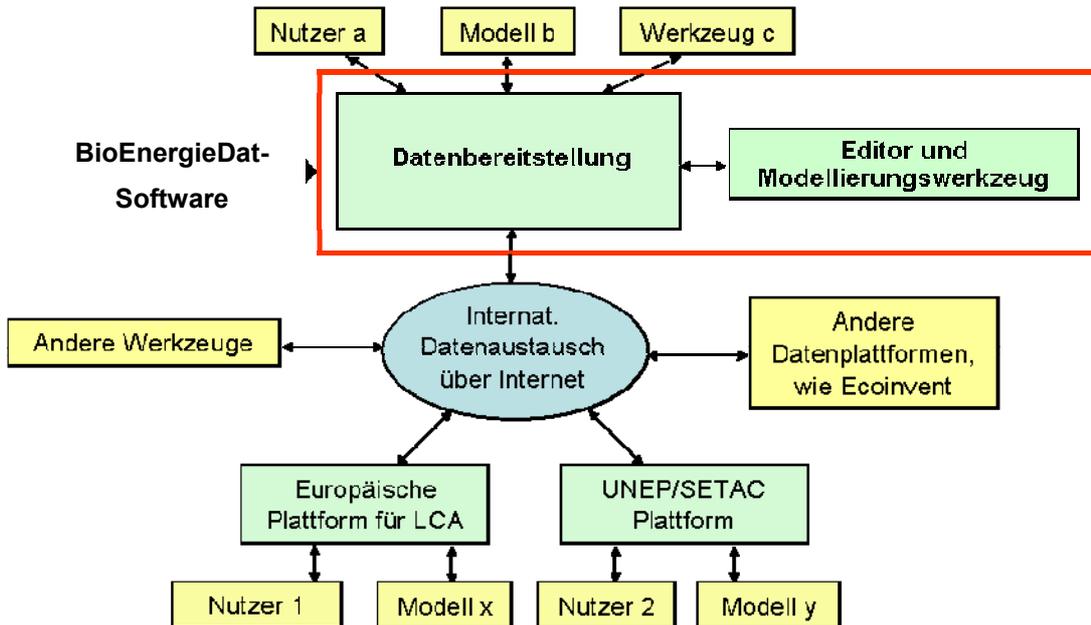
Um eine möglichst breite Nutzung der bereitgestellten Daten zu erreichen, wird ein IT-Technisches Konzept benötigt, welches

- breite Nutzungsmöglichkeiten der Projektergebnisse und Synergien durch dezentrale Weiterentwicklung ermöglicht;
- keine Folgekosten für die Nutzung von Software in sich birgt;
- Glaubwürdigkeit und Neutralität der Datensätze durch Transparenz der Berechnungen sichert.

Im Vorhaben BioEnergieDat soll dies zum einen durch den Aufbau einer relationalen, internetfähigen Datenbankanwendung für die Datenhaltung erreicht werden, die gängige LCI Datenaustauschformate unterstützt. Die Datenbank wird als Open Source erstellt und ist damit auch für staatliche Institutionen wie das Umweltbundesamt nutzbar. Zum anderen wird im Projekt durch eine Open Source Modellierungssoftware ergänzt.

Ein wesentlicher Mehrwert der hierbei gewählten Architektur (Service Oriented Architecture – SOA [SOA 1996]) ist die einfache Integration und Vernetzung mit anderen deutschen, euro-päischen und weltweiten Initiativen (wie dem weltweiten ILCD-Netzwerk [EC 2009] oder der ecoinvent Dateninfrastruktur [ecoinvent 2010]). Dies macht die Basisplattform auch für verschiedene kommerzielle LCA-Softwarehersteller und Datenbankanbieter interessant (Abb. 2). Hiermit wird sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene die Zusammenarbeit mit unterschiedlichen

Partnern ermöglicht, auf deren Basis ggf. Kooperationslösungen für eine Folgenutzung und Aktualisierung von Datenbeständen abgeleitet werden könnten.



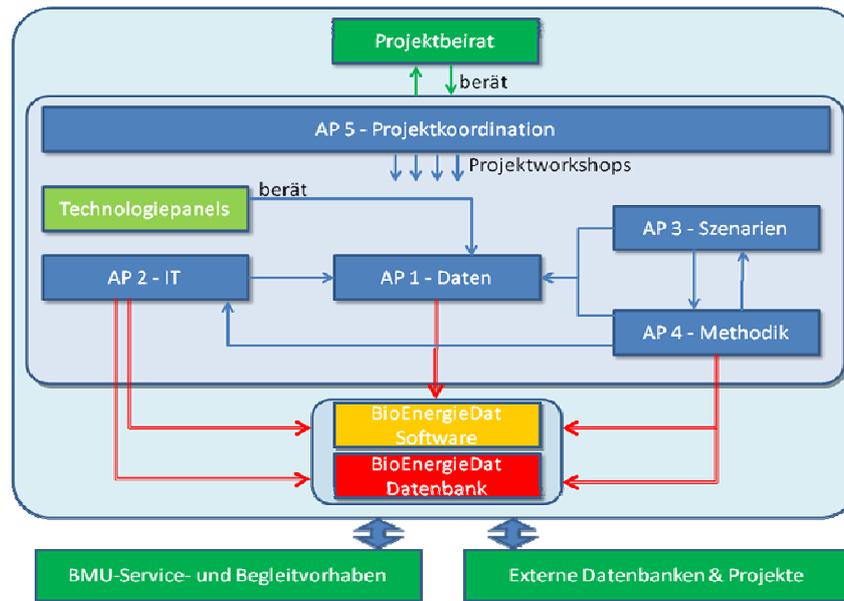
**Abb. 2: Integration der Dienstleistungsplattform**

Die beschriebenen Open Source Ansätze definieren keine neue Methodik, sondern ergänzen gängige Ökobilanz-/ LCA-Methodik [Heijungs 2002] durch eine Open Source basierte Werkzeugplattform, die auf den neuesten Entwicklungen zur Instrumentierung der LCA-Methodologie basiert.

### 3. Struktur und Arbeitspakete

Zur Erreichung der einzelnen Ziele besteht das Projekt aus fünf Arbeitspaketen. Weiterhin wird eine enge Vernetzung mit verschiedenen Anspruchsgruppen im Bereich Bioenergie angestrebt. Hierfür wurde einerseits ein Projektbeirat eingerichtet. Der Projektbeirat hat die Aufgabe die Unterstützung der nationalen Biomassenstrategie durch BioEnergieDat zu sichern sowie eine intensive Vernetzung des Projektes mit den relevanten aktuellen Förderaktivitäten der Bundesrepublik Deutschland zur energetischen Nutzung von Biomasse zu erreichen. Daher sind im Beirat die Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), sowie einschlägige Bundeseinrichtungen, bspw. das Umweltbundeamt (UBA) vertreten.

Andererseits werden Technologiepanels durchgeführt. Die Technologiepanels, in denen einschlägige Experten vertreten sein werden, sollen die im Projekt erarbeiteten Datensätze zu den Technologien validieren. Darüber hinaus bestehen enge Kontakte zu den BMU-Service- und Begleitvorhaben sowie zu wesentlichen externen Datenbanken und Projekten (s. Abb. 3).



**Abb. 3: Projektstruktur**

Im Zentrum des Projektes steht das AP1, das die Datenbasis erarbeitet. Die für die Datenbasis relevanten Prozessketten wurden in Abstimmung mit dem Projektbeirat ausgewählt. Ziel bei der Auswahl war es die Bandbreite an Biomasserohstoffkategorien, von Energiepflanzen bis zu organischen Nebenprodukten, ebenso abzubilden wie die aktuell relevanten Technologielinien, von Biokraftstoffen der 1. Generation bis Biomassenutzung für Strom und Wärme (s. Tab. 1).

Technologien	Rohstoffe															
	Raps	Getreide	Zuckerrübe	Getreide (Ganzpflanze)	Mais (Ganzpflanze)	Ackergras	Miscanthus	Kurzumtriebsplantage	Stroh	Waldrestholz	Gülle	Holz. Pflegeschnitt	Industrierestholz	Altholz	Altspeisefett	organische Abfälle
PME	x														x	
Ethanol		X	x													
Biomass to liquid								x	x	x						
PÖL	x															
Einzelfeuerung (Ofen)											x					
Pellet 15 kW								x		x				x		
Pellet 300 kW								x		x				x		
HS Kessel 50 kW										x						
HS Kessel 800 kW								x		x		x	x			
Biogas 100 kW					x											
Biogas 250 kW				x	x	x					x					x
Biogas 500 kW					x											
ORC 1 MW								x		x		x	x			
Verg. – BHKW										x						
Dampfturbine 5 MW								x		x			x			
Dampfturbine 20 MW										x			x	x		

**Tabelle 1: Auswahl der Rohstoff-Technologie-Kombinationen**

Die Anwendung von Prozesskettendaten zur Biomassenutzung erfolgt dort, wo es um Planung oder Monitoring des Ausbaus der regenerativen Energieträger geht. Entscheidend für die zukünftige Einsatzfähigkeit der im Projekt erarbeiteten Prozessdaten ist daher eine abgesicherte Fortschreibung der Prozessketten entlang von Lernkurven. Zur Ermittlung der Lernkurven wird in AP3 eine Analyse der künftigen Märkte und Marktchancen durchgeführt. Diese stellen die Mengengerüste dar, unter welchen sich die Technologieentwicklung in unterschiedlicher Geschwindigkeit vollziehen wird. In der volkswirtschaftlichen bzw. globalen Betrachtung steht zusätzlich der Substitutionseffekt bezüglich der Klimagase, aber auch bezüglich anderer Emissionen, des menschlichen Arbeitseinsatzes und der Kosten im Mittelpunkt.

Die Erarbeitung einer vorhabensübergreifenden Methodik dient zwei wesentlichen Projektzielen: Zum einen der Bereitstellung von konsistenten und abgestimmten Vorgehensweisen zur Bilanzierung von Prozessketten, und zum anderen der Entwicklung von methodischen Prozeduren für eine zukünftige Qualitätssicherung von Datensätzen. Innerhalb des AP4 werden damit die notwendigen methodischen Festlegungen im Hinblick auf die Vorgehensweise bei der Bilanzierung von Prozessketten für die Arbeiten der AP1 - 3 vorgelegt. Über das Vorhaben BioEnergieDat hinaus dienen die Ergebnisse der Verwendung in zukünftigen Projekten zur Generierung nachnutzbarer Daten. Die Vorgehensweisen zur Bilanzierung von Prozessketten zielen nicht auf methodische Neuentwicklung, sondern vorrangig auf die kritische Prüfung und Harmonisierung von Konventionen.

Die Entwicklung von methodischen Prozeduren zur Qualitätssicherung soll der Vorbereitung einer zukünftigen stufenweisen Einführung von Anforderungen an die Qualität von Datensätzen dienen. Weiterhin werden Mechanismen erarbeitet, die es erlauben, Datensätze entsprechend unterschiedlicher Modellierungsmethoden und -konventionen, für unterschiedliche Nutzer und Anwendungsbereiche, darzustellen und umzurechnen. Das ist insofern wichtig, als es nicht immer gelingen wird, einen Konsens über eine alleinig anzuwendende Methode zu finden, bspw. bei Allokations- oder Substitutionsfragen.

Als Voraussetzung für eine koordinierte Erstellung und weite Verbreitung der im Projekt erarbeiteten Datensätze und Methoden wird in AP2 eine moderne und einfach zugängliche IT-Infrastruktur mit einem zentralen, internetbasierten Datenmanagement erarbeitet. Sie wird bereits während der Projektlaufzeit innerhalb des Projektes zur Unterstützung der Arbeiten eingesetzt.

#### **4 Perspektiven**

Das Vorhaben BioEnergieDat wird grundsätzlich verwertbare Ergebnisse in den folgenden Bereichen liefern:

- Harmonisierte und validierte Datensätze zu Bioenergietechnologien und -energieträgern auf Basis eines vereinheitlichten methodischen Vorgehens (AP1, 3, 4)
- IT-Infrastruktur (AP2): Die erarbeiteten IT-Elemente werden als flexibel einsetzbare und quellcodeoffene (Open Source) Module bereitgestellt.

Datensätze, Methodik und Software können jeweils unabhängig voneinander genutzt werden.

Ausschlaggebend für eine langfristige Verwertbarkeit der Projektergebnisse ist eine Fortschreibung und Erweiterung des Datenbestands, die eine Nachführung hinsichtlich der Technologieentwicklung, sowie hinsichtlich neuer wissenschaftlicher und

methodischer Erkenntnisse (z.B. Relevanz bestimmter Schadstoffe) sicherstellt, eingebettet in eine adäquate IT-Struktur.

Notwendige Arbeitsschritte für die inhaltliche Verwertung sind das Monitoring der Technologieentwicklung und hierauf basierend die Identifikation von Aktualisierungsbedarf, sowie die Durchführung der Aktualisierung durch Überarbeitung bzw. Neu-Erstellung entsprechender Datensätze. Für eine entsprechende Fortschreibung des Datenbestands sind Folgekosten zu erwarten.

Um die Folgekosten zu tragen sind grundsätzlich langfristig tragfähige organisatorische und finanzierungstechnische Lösungen erforderlich. Im Rahmen des Projektes wird ein Geschäftsmodell entwickelt, das die bisherigen Erfahrungen im In- und Ausland berücksichtigt und sich an die Bedürfnisse der einzelnen Anspruchsgruppen orientieren wird.

## 5 Weitere Informationen

Kontakt: Frau Prof. Liselotte Schebek  
Karlsruhe Institut für Technologie  
Herrmann-von-Helmholtz-Platz 1  
77344 Eggenstein-Leopoldshafen  
**Email:** [info@bioenergiedat.de](mailto:info@bioenergiedat.de)  
Homepage: [www.bioenergiedat.de](http://www.bioenergiedat.de)  
Laufzeit: 01.09.2010-30.08.2012

Partner:

- Karlsruher Institut für Technologie / Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), [www.itas.fzk.de](http://www.itas.fzk.de)
- Karlsruher Institut für Technologie / Institut für Angewandte Informatik (IAI), [www.iai.fzk.de](http://www.iai.fzk.de)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), [www.dlr.de](http://www.dlr.de)
- GreenDeltaTC GmbH, [www.greendeltatc.com](http://www.greendeltatc.com)
- Hochschule Zittau/Görlitz - Fakultät Maschinenwesen, [www.hs-zigr.de](http://www.hs-zigr.de)
- Ruhr-Universität Bochum / Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, [www.lee.ruhr-uni-bochum.de](http://www.lee.ruhr-uni-bochum.de)
- Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), [www.ier.uni-stuttgart.de](http://www.ier.uni-stuttgart.de)
- Wuppertal Institut, <http://www.wupperinst.org>

## Dank

Die Autoren möchten sich beim BMU und dem Projektträger Jülich, Berlin, für die Unterstützung bedanken.

Das Projekt wird durch die Bundesrepublik Deutschland gefördert. Fördergeber ist basierend auf einem Beschluss des Deutschen Bundestages das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Das Förderprogramm wird durch den Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich (PtJ) koordiniert. Die Programmleitung des Förderprogramms hat Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ) inne.

## Literatur

[Baumann 2004] H. Baumann, A.-M. Tillmann. *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application, Professional Public Service, USA, (2004)*

[Betz et al. 2002] Betz, M., Coen, D., Daimling, S., Kreissig, J.: Thermische Verwertung von Holzprodukten, Inputabhängige Modellierung der End-of-Life Prozesse von Holz, PE Europe, Projektbericht, Leinfelden 2002.

[EC 2009] European Commission Joint Research Center, ELCD core database version II und ILCD format Homepage, <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>.  
Zuletzt besucht am 03.03.2010

[ecoinvent 2010] ecoinvent Swiss Centre for Life Cycle Inventories – EcoSpold02 Release Beta 5, <http://www.ecoinvent.org/database/ecospold-data-format/ecospold-v2/>, Februar 2010

[GEMIS 2010] Öko-Institut, Webseite der GEMIS Software, <http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm>, zuletzt besucht 16. März 2010

[GreenDeltaTC 2009]: Validierung der Emissionsfaktoren ausgewählter erneuerbarer Energiebereitstellungsketten, Projekt im Auftrag des Umweltbundesamts Berlin/Dessau, FKZ: 360 16 013, 2008-2009

[Heijungs 2002] Heijungs, R. / Sangwon Suh, Sangwon: *The Computational Structure of Life Cycle Assessment*, Springer, 2002

[ProBas 2010] UmweltBundesAmt, Webportal der ProBas Datenbank, <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>

[SOA 1996] Schulte, W. Roy, Natis ,Yefim V.: "Service oriented Architecture" Architectures Part I, Veröffentlichung SPA-00-7425 der Gartner Group, 1996

[SRU 2007] Sachverständigenrat für Umweltfragen. Sondergutachten „Klimaschutz durch Biomasse“, Erich Schmicht Verlag Berlin, 2007

## Chancen und Risiken dezentraler Biomasseanlagen in der gesamten Wertschöpfungskette vom Ast bis zu kWh

(Dr. Thomas Lux, A+S NaturEnergie GmbH;  
Markus Rebmann, MVV Energiedienstleistungen GmbH)

### Einleitung

Wie können Holzvergasungsanlagen in einem wirtschaftlichen Kontext von kleinen, dezentralen Biomasseanlagen hineingestellt werden und mit anderen Technologien zur Wärme- und Stromerzeugung, wie zum Beispiel herkömmliche, standardisierten Kesselanlagen verglichen werden? Dieser Fragestellung möchten wir in einigen Aspekten nachgehen. Dazu werden Ergebnisse von Vergleichsrechnungen vorgestellt und einige Anregungen gegeben. Zum einen aus der Sicht eines Contractors, der Anlagen über 15 Jahre wirtschaftlich und technisch sicher betreiben muss und zum anderen wollen wir auch die Sicht eines Aufbereiters für Holzbrennstoffe einbringen.

### Kurze Vorstellung der Unternehmen

Die MVV Energie AG mit ca. 6000 Mitarbeitern und einen Umsatz von 3,2 Milliarden € im Geschäftsjahr 2009 ist ein Energieversorgungsunternehmen und hat ihren Sitz in Mannheim. Anfang 2000 sind schon die gesamten Energiedienstleistungen der MVV in einer Gesellschaft, der MVV Energiedienstleistungen GmbH (EDL), gebündelt worden. Diese Gesellschaft hat ca. 900 Mitarbeitern und einen Umsatz von ca. 300 Millionen € im Geschäftsjahr 2009. In dem Unternehmen werden verschiedene Geschäftsfeldern verfolgt. Ein, diese Tagung betreffendes Geschäftsbereich, ist das Contracting. Darunter versteht man die Versorgung von Industrie, Gewerbe, Krankenhäusern und anderen Kunden mit Strom und Wärme aus dezentralen Erzeugungsanlagen. Dabei spielen nachwachsende Rohstoffe wie Holz und Biogas eine zunehmend wichtiger werdende Rolle (**siehe Abb.1 in der Anlage**). Die EDL betreibt vier Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Gesamtleistung von 2,6 MW. In dem hier interessierenden Themenbereich -Biomasse Holz- werden zahlreiche Heizwerke und Heizkraftwerke zwischen 100 KW bis 20 MW Leistung betrieben. Eingesetzt wird überwiegend Holz, dass der Nawaro-Klassifikation entspricht, wie Landschaftspflegematerial, Waldholz und ähnliches. Die installierte Gesamtleistung beträgt ca. 17 MW elektrisch und 85 MW thermisch. Man sieht schon an diesen Zahlen, dass die Wärmeerzeugung eine größere Rolle gegenüber der Erzeugung von elektrischer Strom spielt.

### Übersicht bestehender Biomasse-Anlagen

Für den wirtschaftlich und technisch einwandfreien Betrieb ist eine preiswerte und qualitätsgerechte Versorgung mit Holz unabdingbar. Die sichere Verfügbarkeit des Brennstoffes auch bei schwierigem Wetter und daraus folgenden Versorgungsengpässen muss ein Punkt hoher Aufmerksamkeit sein. Aus diesem Grunde hat sich die MVV Energiedienstleistungen GmbH an einen Holzaufbereiter in Baden-Württemberg, der A + S Naturenergie GmbH, beteiligt. Damit ist die EDL GmbH einen wesentlichen Schritt in einen, für Energieversorger neuen Abschnitt der gesamten Wertschöpfungskette gegangen. Die A + S Naturenergie bereitet Landschaftspflegematerial oder Waldmaterial zu Hackschnitzel auf und beliefert Heiz- bzw. Heizkraftwerke. Auf **Abb.2 in der Anlage** können Sie einige Biomasse-Heiz(Kraft)Werke der MVV EDL GmbH sehen. In den drei Klassen kleiner 1 MW, kleiner 5 MW und kleiner 20 MW werden Beispiele aufgezeigt. Während in dem

kleinsten Bereich die Nahwärme-Versorgung mit Holzpellets oder aufbereiteten, getrockneten Hackschnitzeln dominiert, stehen in dem nachfolgenden Bereich bis 5 MW eher die Versorgung mit Prozesswärme, Dampf oder Heißwasser, aber auch die Nahwärme-Versorgung mit Kraft-Wärme-Kopplung, hier am Beispiel einer ORC-Anlage dargestellt, im Vordergrund. Der Thermoölkessel wird mit Landschaftspflegematerial, Waldrestholz oder Stammholz betrieben. Im Größenbereich zwischen 5-20 MW, gezeigt wird die Anlage bei der Molkerei Zott in Mertingen (Bayern), kommt überwiegend gering aufbereitetes Holz als Brennstoff zum Einsatz.

### **Anforderung an die Anlagen aus Sicht eines Contractors**

Werden die Erfahrungen der letzten zehn Jahre aus der Sicht eines Contractors zusammenfasst, so kann man Anforderungen für Holzvergasungsanlagen kleiner 0,5 MW elektrischer Leistung ableiten. Im Folgenden werden Anforderungen aus technischer Sicht formuliert. Diese Herangehensweise macht jedoch sehr schnell auch auf wirtschaftliche Aspekte aufmerksam.

- Der Personalaufwand

muss deutlich vermindert werden. Herkömmliche Kesselanlagen benötigen in diesem Größenordnungsbereich kein Personal. Hier steht ganz klar die Forderung nach so genannten "Knopfdruckanlagen" im Vordergrund. Das gilt besonders auch für die Brennstoffbereitstellung und die Zuführung des Brennstoffes, die automatisch und vor allen ohne manueller Eingriffe störungsfrei funktionieren muss. Bei vergleichbaren Anlagen zu den Holzvergasungsanlagen ist dies technischer Stand.

- Die Gasreinigung

nach der Vergasung muss die Betriebssicherheit der nachgeschalteten Gasmotoren sicher gewährleisten und die Teer- und Kondensatsentsorgung muss technisch und genehmigungsseitig für jeden Standort gelöst sein.

- Benutzungsstunden

Eine weitere große Herausforderung ist es die Anzahl der Benutzungsstunden von heute ca. 7000 h auf nahe oder über 8000 h im Jahr zu steigern.

- Verfügbarkeit und Preis Nawaro-Brennstoff

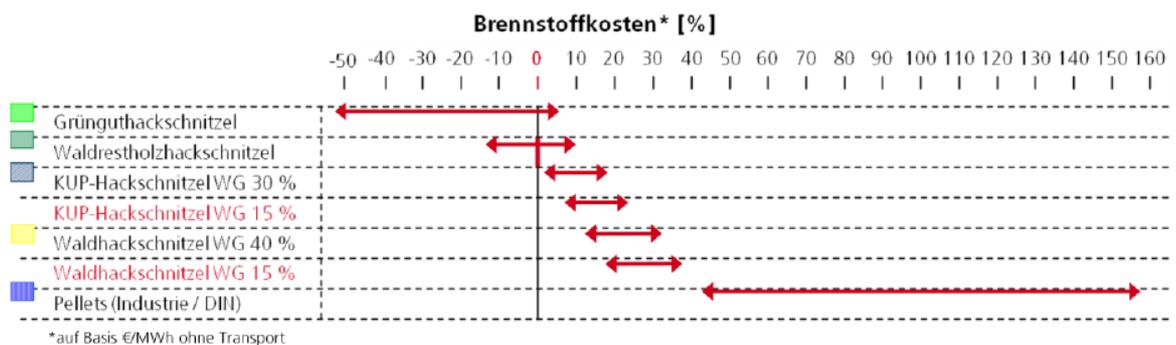
Da bis zu 70 % der laufenden Kosten beim Betrieb einer Anlage Brennstoffkosten sind, ist die Verfügbarkeit und der Preis des Brennstoffes die wesentlichste Komponente zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit. Biomasse-Anlagen kommen zumeist an den Rand der Wirtschaftlichkeit, nicht durch technische Mängel oder fehlerhafte Konstruktion, sondern, und das zeigte sich besonders im letzten Winter, durch nicht bedarfsgerechte Brennstoffqualitäten oder durch zu niedrig einkalkulierte Preissteigerungsraten. Deshalb ist es notwendig sich mit dem Thema Brennstoff sehr intensiv zu beschäftigen. Es ist die Frage zu beantworten: an welcher Stelle setzt man welchen Brennstoff ein? Die Brennstoffspezifikation der Brennstoffe sollte möglichst breit sein, um eine langfristige und günstige Verfügbarkeit sicherzustellen. Dabei sollten Brennstoffe mit einem möglichst geringen Aufbereitungsgrad gewählt werden. Zu beachten ist zum einen, dass der jahreszeitliche Verlauf des Rohstoffanfalls mengenmäßig sehr unterschiedlich ist und zum anderen auch noch wesentliche Qualitätsunterschiede im Jahresverlauf auftreten. Brennstoff-Angebot und Bedarfsverlauf ist nicht deckungsgleich. Zum Beispiel ist beim

Landschaftspflegematerial im Winter/Frühjahr der Holzanteil deutlich höher als im restlichen Jahr, während Waldrestholz eine relativ konstante Qualität über den Jahresverlauf aufweist.

### Biomasse Nawaro-Holz

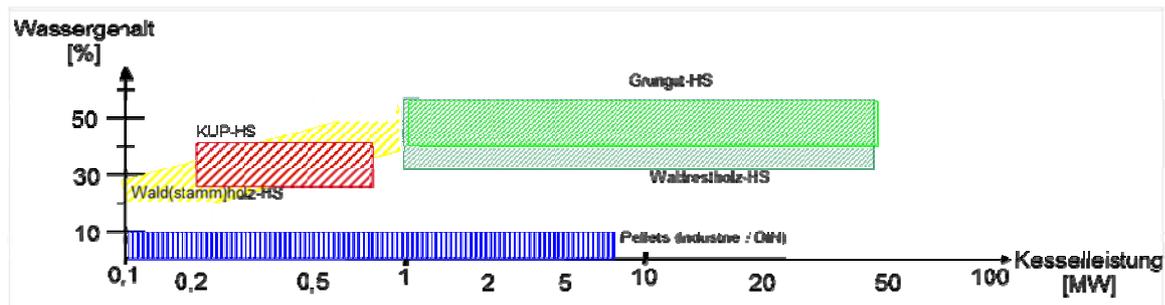
**Abb. 3 in der Anlage** stellt die wesentlichen Brennstoffarten: Hackschnitzel aus Stammholz, Hackschnitzel aus Waldrestholz oder Grüngut vor. Holzvergassungsanlagen kleinerer Bauart werden vorrangig mit Stammholz-Hackschnitzel betrieben. Waldstammholz wird vielfältig und in großen Mengen in der Holzindustrie genutzt. Stammholz als Rohstoffquelle für Hackschnitzel ist aus diesem Grunde einem hohen Konkurrenzdruck ausgesetzt. Das führt neben mangelnder, zeitlicher und regionaler Verfügbarkeit zu hohen Einkaufspreisen. Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) wird eine zunehmende Bedeutung bei der Erweiterung des Brennstoffportfolios gewinnen. KUP-Hackschnitzel sind in ihren Eigenschaften dem Stammholz-Hackschnitzel ähnlich. Bei Verwendung von Plantagen mit Weiden oder Pappeln, können jedoch Hackschnitzel deutlich preiswerter zur Verfügung gestellt werden.

Die Preise von Holzbrennstoffen sind regional und jahreszeitlich sehr unterschiedlich. Zudem gibt es schon jetzt Holzangelgebiete in Deutschland z.B. in Teilen von Baden-Württemberg oder auch Bayern, da dort eine größere Anzahl von Biomasseanlagen in Betrieb vorhanden ist und weitere Projekte entwickelt werden. In **Abb. 4** wird der Versuch unternommen Brennstoffpreise Holz zusammenzustellen. Die Preise werden in Bandbreiten angegeben und beziehen sich in Relation auf den Basispreis von Waldrestholz. Von Region zu Region in Deutschland werden sicherlich -absolut- unterschiedliche Preise zu sehen sein, jedoch wird die Relation der Preise der Brennstoffarten in einer Region zu einander ähnlich sein.



**Abb.4: Aktuelle Preisrelationen Nawaro-Holz**

Man sieht in der **Abb. 4** deutlich, dass Waldhackschnitzel (Wassergehalt (WG) 15 %) aus Stammholz, die vorrangig in Holzvergassungsanlagen eingesetzt werden, mit 30 bis 40 % deutlich teurer als Hackschnitzel aus Waldrestholz oder Grüngut sind. In **Abb. 5** kann man die wirtschaftlich sinnvollen Einsatzgebiete der Brennstoffe bezogen auf die Anlagengröße ablesen. Anlagen mit Pellets dringen zunehmend in eine Größenordnung oberhalb von fünf MW thermische Leistung vor. Sie bilden damit trotz ihres hohen Brennstoffpreises für kleine, dezentrale Anlagen mit Wärmeauskopplung eine Benchmark.

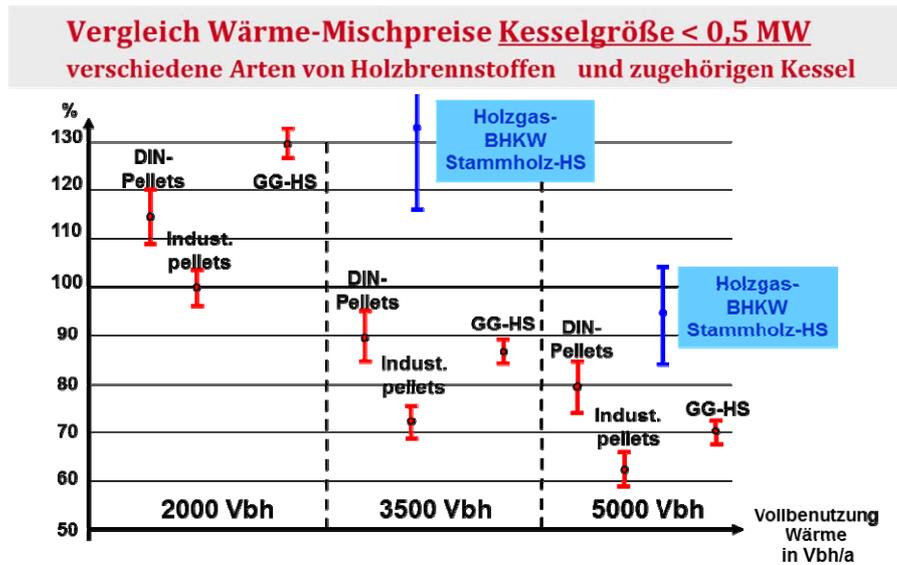


**Abb.5: Einsatzgebiete von Nawaro-Brennstoffen in thermischen Anlagen**

Einen weiteren Aspekt der Stromerzeugung aus Holz, haben wir uns intensiv angeschaut: die Thematik der EEG-Stromvergütung. Bei der Entwicklung von neuen Projekten wird die Vergütung des Stromes nach EEG deutlich überbewertet. Schaut man sich bestehende Projekte an, so erkennt man sehr schnell, dass die Preissteigerung der Biomasse im Laufe der Projektlaufzeit dadurch, dass eine feste Vergütung für den erzeugten Strom festgelegt ist, nicht adäquat berücksichtigt werden kann. Die Kosten steigen, jedoch bleiben die möglichen Umsatzerlöse, durch die Fixierung der Einspeisevergütung, auf gleichem Niveau. Das kann bei Preissteigerungen des Brennstoffes von 2 bis 5 %, dies sind durchaus realistische Szenarien für die nächsten Jahre, nach 7-9 Jahren zur Unwirtschaftlichkeit der Anlagen führen. Deshalb ist es notwendig Wärmesenken zu nutzen und potentielle Abnehmer in Industrie und Gewerbe mit Prozessdampf bzw. Prozesswärme zu versorgen. Neben der Nutzung des KWK-Bonus ergeben sich daraus weitere Erlöse für das Projekt. Die Preissteigerung der Biomasse kann zumindest teilweise weitergegeben werden. Es ist eine möglichst große Auskopplung von Wärme anzustreben. Aus unserer Sicht ist die Stromerzeugung aus Biomasse nur in wärmegeführten Anlagen, bei einem Verhältnis der erzielbaren Umsatzerlöse Wärme/Strom von mindestens 40/60, über die gesamte Projektlaufzeit wirtschaftlich.

### Vergleich verschiedener Anlagentechnologien

In der **Abb. 6** werden verschiedene Anlagentechnologien zur Erzeugung von Wärme im Größenbereich bis 0,5 MW thermischer Leistung miteinander verglichen. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal sind die eingesetzten Brennstoffe, wie Dinpellets, Industrie-Pellets oder Grüngut-Hackschnitzel (GG-HS). Die Vergleichsrechnungen sind unter gleichen unternehmerischen, wirtschaftlichen und technischen Randbedingungen durchgeführt. Ergebnis der Rechnungen sind mindestens zu erzielende Wärmepreise um gleiche Rentabilität zu erreichen. Hoch aufbereitete Brennstoffe benötigen eine unaufwändigere Technik, jedoch, wie in **Abb.4** zu sehen ist, bei deutlich höheren Brennstoffpreisen. Das führt bei niedrigen Benutzungsstunden der Anlage zu einem deutlichen Vorteil von Pelletkesseln. Erst bei hoher Vollbenutzung der Anlage holen die nicht oder gering aufbereiteten Brennstoffe z.B. Grüngut-Hackschnitzel (GG-HS) auf, da dann die variablen Brennstoffkosten (60-70 % der jährlichen Kosten) durch die niedrigeren Brennstoffpreise größeren Einfluss gegenüber den Investitionskosten in der Projektkalkulation gewinnen.



**Abb. 6: Vergleich mindest zu erzielende Wärmepreise**

Nimmt man zu den verschiedenen Kesselarten die Anlagen mit Holzvergasung (Holzgas-BHKW mit Stammholz-HS) hinzu, bei Erzeugung von EEG-Strom und gleicher Wärmeauskopplung wie die Kesselanlagen, so liegen die Vergleichspreise Wärme mit 25-45 % deutlich über den zu erzielenden Mindestpreisen der anderen Technologien. Bei mittleren Benutzungsstundenzahlen von 3500 Vbh ist die Holzvergasung deutlich ungünstiger als die anderen Technologien, holt dann jedoch, mit Steigerung der Vollbenutzungsstundenzahlen, aber auf. Wärme aus Vergasungsanlagen mit Hackschnitzel aus Stammholz ist zu teuer. Es sind zwei wesentliche Folgerungen für die Durchsetzung der Vergasungstechnologie abzuleiten:

1. Eine Anpassung der Anlagentechnik auf preiswertere Brennstoffe mit möglichst geringen Aufbereitungsgrad ist vorzunehmen
2. Neue, preiswertere Brennstoffquellen müssen gesucht und erschlossen werden.

### **Regionale Bündelung Holzvergasungsanlagen mit großmaßstäblichen Kurzumtriebsplantagen**

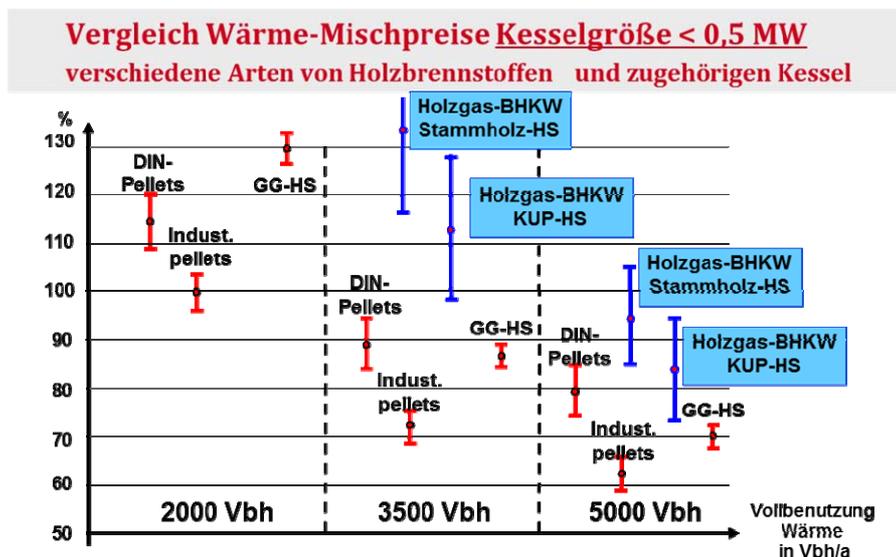
Der Forderung nach einer preiswerteren und dezentral verfügbaren Brennstoffquelle könnte man zukünftig durch eine vermehrte Nutzung von Holz aus Kurzumtriebsplantagen (KUP) beantworten. Es werden schnell wachsende, stockausschlagfähige Baumarten, wie Pappeln oder Weiden über einen Zeitraum von 20-30 Jahren angepflanzt. Geerntet wird nach 3 bis 5 -jährigen Wachstumszyklen. Mit der Anlage von Plantagen erhöht sich die Planungssicherheit für den Betrieb von kleineren, dezentralen Anlagen und werden Preis- und Versorgungsschwankungen abgepuffert.

Um diese Vorteile nutzen zu können ist eine integrierte Wertschöpfungskette "Vom Ast bis zur Kilowattstunde" aufzubauen (**Abb. 7 in der Anlage**). Die Kette besteht aus drei Teilen: den Anbau der Hölzer, der Ernte und Aufbereitung, und der Verwertung der Hackschnitzel in thermischen Anlagen. Die Bäume werden laubfrei im Winterhalbjahr bei einem Wassergehalt von 50-60 % geerntet und am Feldrain abgelegt. Über den Sommer werden die Stämme und Äste bis auf ein Wassergehalt zwischen 25-30 % luftgetrocknet. Die Resttrocknung auf einem Wassergehalt von kleiner 15 % kann

entweder in einer dezentralen, der Vergasungsanlage nachgeschalteten Trocknungsanlage erfolgen oder wie dargestellt in einer zentralen Trocknung nach einer Deponiegasanlage. Diese Wertschöpfungskette besitzt eine hohe Komplexität und erreicht ihre bestmögliche Wirtschaftlichkeit- die Win-Win-Situation für alle Akteure, nur durch eine optimierte Aufgabenverteilung auf die einzelnen Akteure. Deshalb wird ein Energieversorger lokale Landwirte, regionale Aufbereiter des Holzes als Partner in die Wertschöpfungskette mit einbinden müssen.

Setzt man diese Überlegungen praktisch um, so kann man, wie in **Abb. 8 in der Anlage** zu sehen ist, in einem Radius von 70 km, bei einer vorsichtigen Kalkulation, 260 ha Pappeln und Weiden anpflanzen. Bei einer jährlichen Erntefläche von 65 ha werden jährlich 2600 t<sub>tro</sub> Holz (rechnerisch bezogen auf trockenem Zustand) geerntet. Diese Holzmenge reicht bei der Annahme von 7000 Volbenutzungsstunden pro Jahr für vier Holzvergasungsanlagen zu je 120 KW elektrischer Leistung aus. Die Qualitätsansprüche der Holzvergasungsanlage nach einem homogenen Brennstoff wird durch den gleichmäßigen Ascheanteil, das homogene Alter des Holzes, der Nutzung von nur zwei Baumarten und gleichen Holz/Rentenverhältnis gut erfüllt. Die Lufttrocknung am Feldrain über den Sommer und die Resttrocknung mit Niedertemperatur-Abwärme hält die geforderten Wassergehalte der Hackschnitzel unter 15 % sicher ein. Kann man die problematische Schnittstelle zwischen der Brennstoff-Aufbereitung und der Verwertung in thermischen Anlagen in einer Hand legen, so ist es zulässig diese regionale Bündelung durch zu kalkulieren. Die Preise der aus KUP-Hackschnitzel liegen im Ergebnis der Rechnungen dann 15 bis 25 % unterhalb der Preise für Waldhackschnitzel aus Stammholz (**Abb.4**).

Diese neue Vorgehensweise erfüllt die Forderung nach einer deutlichen Senkung der Brennstoffpreise für Holzvergasungsanlagen. Berechnet man nun für die Anlagen mit Holzgas-BHKW die Wärmepreise mit diesen Brennstoffpreisen und setzt sie in das oben schon beschriebene Diagramm ein, kann eine deutliche Senkung der mindest zu erzielenden Wärmepreise gegenüber Holzvergasungsanlagen mit Stammholz-HS mit Stammholz durch den Einsatz von KUP-HS erzielt werden (**Abb. 9**).



**Abb. 9: Vergleich mindest zu erzielende Wärmepreise bei Einbeziehung von KUP-Hackschnitzeln**

Besonders zeigt sich das, wenn die Vollbenutzungsstunden auf Werte größer 5000 Vbh im Jahr steigen. Holzvergasungsanlagen können dadurch, in der Benchmark zu

den anderen Anlagen- Technologien, zumindest in ein Konkurrenzbereich vorstoßen. Gelingt es dann noch weitere Kosten-/Erlös Potenziale im technischen und betrieblichen Bereich zu heben, kann die Konkurrenzfähigkeit, ablesbar am Wärmepreis, weiter verbessert werden.

Zusammenfassend ist damit feststellbar, dass ein Potenzial zur stark verbesserten Wirtschaftlichkeit von Holzvergasungsanlage und damit zu häufigeren und breiteren Einsatzmöglichkeiten vorhanden ist.

### **Zusammenfassung**

- Contracting stellt hohe Anforderungen an die Technik der Holzvergasungsanlagen
- Verfügbarkeit und Preis der Brennstoffe über die Laufzeit von 15 Jahren entscheiden über die Wirtschaftlichkeit der Projekte
- Stromerzeugung aus Biomasse nur in wärmegeführten Anlagen im Umsatzverhältnis Wärme/Strom mindestens 40/60
- Vergasungsanlagen kleiner 0,5 MW mit Stammholz-Hackschnitzel erzeugen im Vergleich die Wärme zu teuer
- Aus unserer Sicht besteht Potential für den Einsatz im Contracting bei
  - Erschließung neuer Brennstoffquellen. z.B.: Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen
  - Anpassung der Vergasungsanlagen an geringer aufbereitete Brennstoffe
  - Regionale Bündelung mit direkter Zugriff auf die Rohstoffquellen sowie direkter Einfluss auf Qualität und Preis der Brennstoffe

### **Anlagen**

Abb. 1: Übersicht Biomasse

Abb. 2: Biomasse-Heiz(kraft)werke mit Holz

Abb. 3: Nawaro-Holz für die thermische Verwertung

Abb. 7: Integrierte Wertschöpfungskette

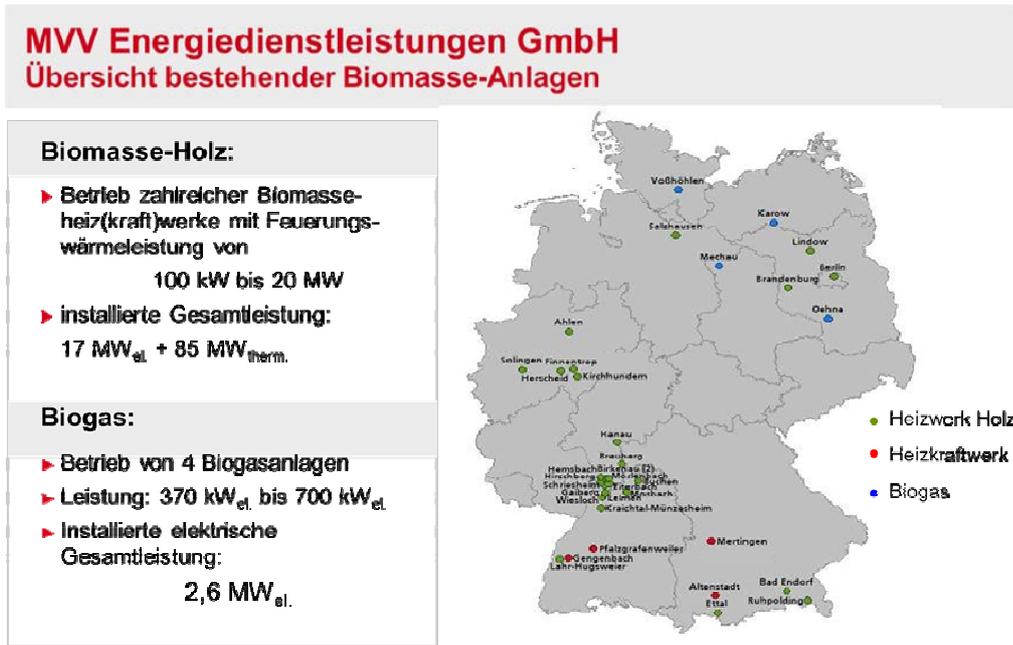


Abb. 1: Übersicht Biomasse



Abb. 2: Biomasse-Heiz(kraft)werke mit Holz



Abb. 3: Nawaro-Holz für die thermische Verwertung



Abb. 7: Integrierte Wertschöpfungskette

## Regionale Bündelung

### Holzvergasungsanlagen mit großmaßstäblichem KUP-Anbau

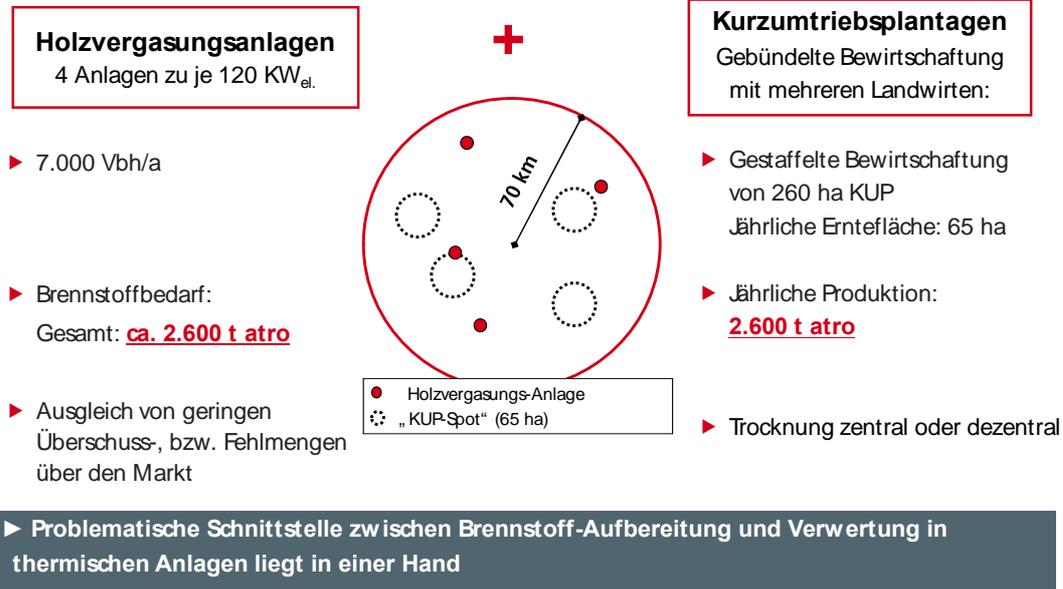


Abb. 8: Regionale Bündelung Kurzumtriebsplantage und thermische Verwertung.

## Zum Stand der energetischen Nutzung wasserarmer Biomasse mit anaerober Vergärung

(Dr. Hagen Hilse, GICON GmbH)

**GICON**

### Energetische Nutzung wasserarmer Biomasse mit anaerober Vergärung



Tiergartenstr. 48, 01219 Dresden  
Tel: 0351/47878-0  
[www.gicon.de](http://www.gicon.de)

© GICON1

Vergärung wasserarmer Biomasse**GICON**

### Was sind „wasserarme“ Substrate in der Vergärung?

Definition im EEG bis 2009 für die „Trockenfermentation“ (Innovationsbonus):  
**Substrate mit mehr als 30% TS**

**Kriterien für die Auswahl des Vergärungsverfahrens (inklusive Vor- und Nachaufbereitung):**

- **Struktur der Substrate - insbesondere der Anteil schwer biologisch abbaubarer Substanzen und Inertstoffe**
- **Verwertung der Gärreste**

© GICON2

**GICON**

### Vergärung wasserarmer Biomasse

Geeignete Substrate für die Trockenvergärung



Haushaltsabfälle:

- Bioabfall
- Organikfraktion Restabfall



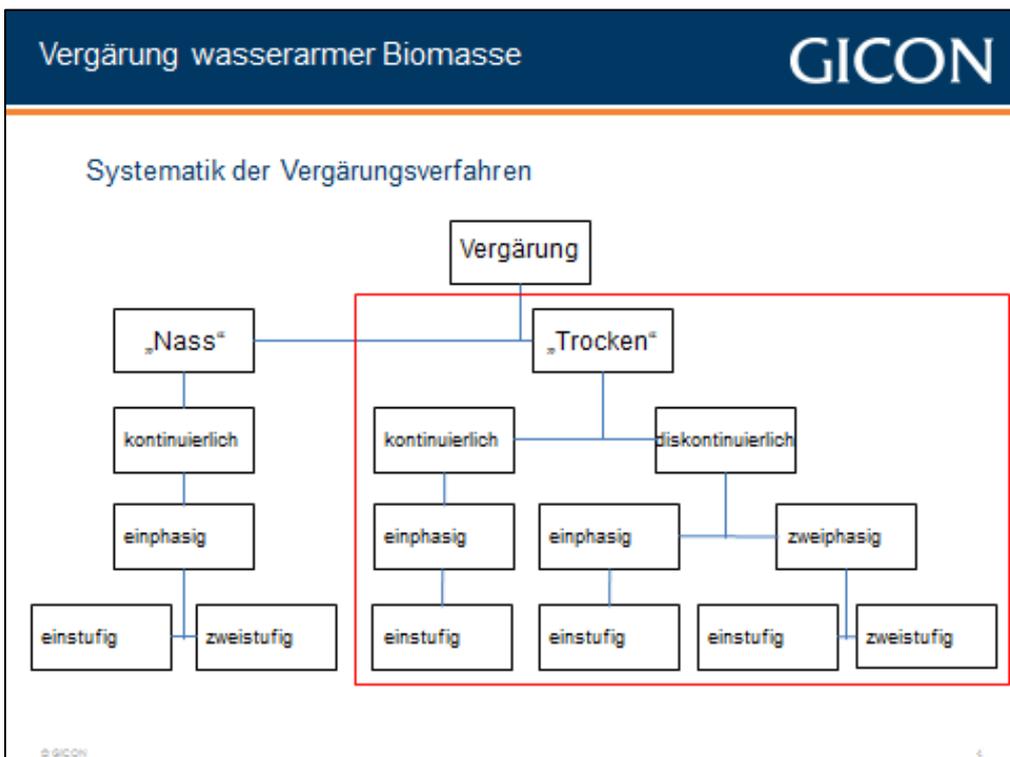
Garten-  
/Landschafts-  
pflagematerial

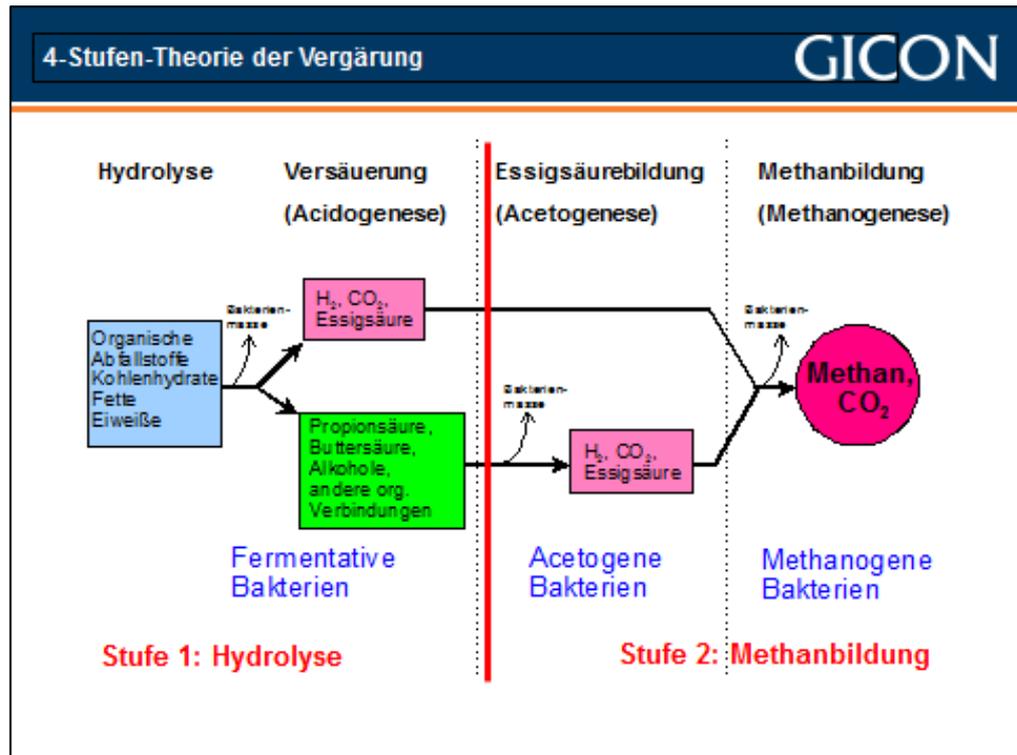


Landwirtschaftliche Stoffe:

- Reststoffe (z.B. Mist, Stroh)
- Nawaros (Silagen)

© GICON 5





**GICON**

---

**Überblick:**

**Hauptmerkmale  
verschiedener  
Trockenfermentationstechnologien**

**GICON**

---

Vergärung wasserarmer Biomasse

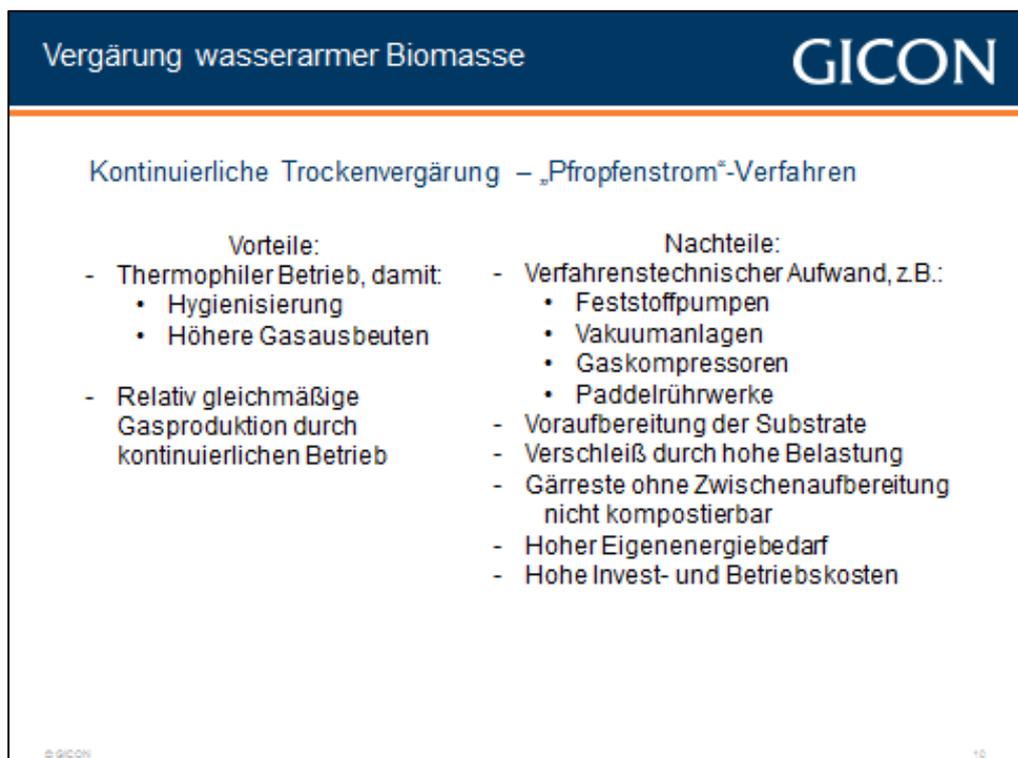
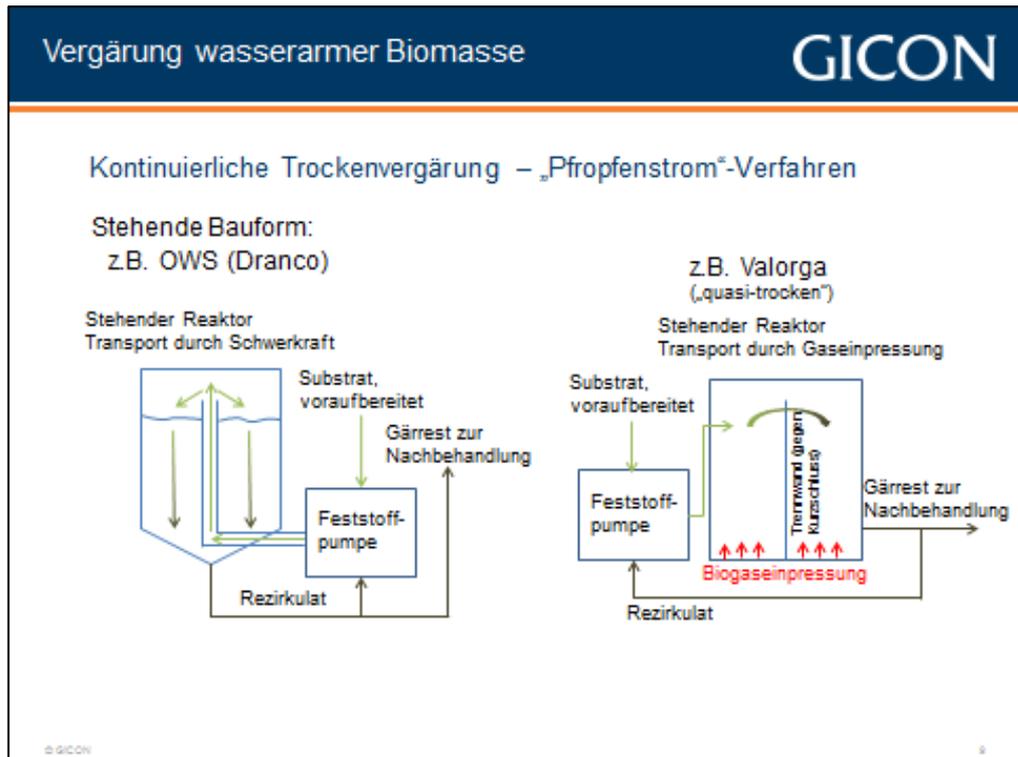
Kontinuierliche Trockenvergärung – „Pfropfenstrom“-Verfahren

Das Substrat wird als „Pfropfen“ (d.h. nicht in Volldurchmischung) von der Eintragsseite zur Austragsseite transportiert, wobei der Grad der biologischen Umsetzung zunimmt.

Liegende Bauform: z.B. Strabag, Kompogas

```
graph LR; A[Substrat, voraufbereitet] --> B[Liegender Reaktor  
(Transport mit Paddelrührwerk)]; B --> C[Separation]; C --> D[Gärrest fest]; C --> E[flüssig]; E -- "Rezirkulat: Einstellung der Konsistenz und Animpfung" --> A;
```

© GICON



Vergärung wasserarmer Biomasse GICON

---

Diskontinuierliche Trockenvergärung – „Batch“-Verfahren

Einphasig und zweistufig : z.B. Eggersmann (Kompoferm), Helector (Loock TNS)

Ansatz:

- Immobilisierung Methanbakterien im Flüssigkeitsfermenter (kontinuierlich)
- Animpfen frischer Substrate durch Prozesswasser
- Großer Wasserdurchsatz durch Trockenfermenter, dadurch:
  - Heizung für Boxen nicht erforderlich
  - Ausspülen der Säuren aus dem Trockenfermenter
- Hydrolyse nur im Trockenfermenter
- Methanbildung simultan im Trocken- und Flüssigkeitsfermenter

© GICON 19

Vergärung wasserarmer Biomasse GICON

---

Diskontinuierliche Trockenvergärung – „Batch“-Verfahren

- **Substrat als unbewegtes Haufwerk (Batches)**
- **garagenartige Behälter / Boxen, dort Perkolation mit wäßriger Phase Gefördert wird nur Flüssigkeit mit relativ geringem TS-Gehalt.**
- **Ziel: Strukturhaltung, noch stapelbare Gärreste, die mit geringem Nachbereitungsaufwand kompostiert werden können.**
- **(quasi-)kontinuierliche Gasproduktion durch zeitversetzte Parallelschaltung mehrerer Feststoff-Behälter**

© GICON 19

**GICON**

## Vergärung wasserarmer Biomasse

Diskontinuierliche Trockenvergärung – „Batch“-Verfahren

Zweiphasig und zweistufig : GICON

Ansatz:

- Getrennte Regelung von Hydrolyse und Methanisierung, dadurch:
  - Optimale Milieubedingungen für unterschiedliche Bakterien
- Nur Hydrolyse im Feststoffreaktor, Animpfung nicht vorgesehen
- Methanisierung im Hochleistungsreaktor, dadurch:
  - Steuerbarkeit der Biogasproduktion
  - Deutlich höherer Methangehalt im Biogas

© GICON 16

**GICON**

## Vergärung wasserarmer Biomasse

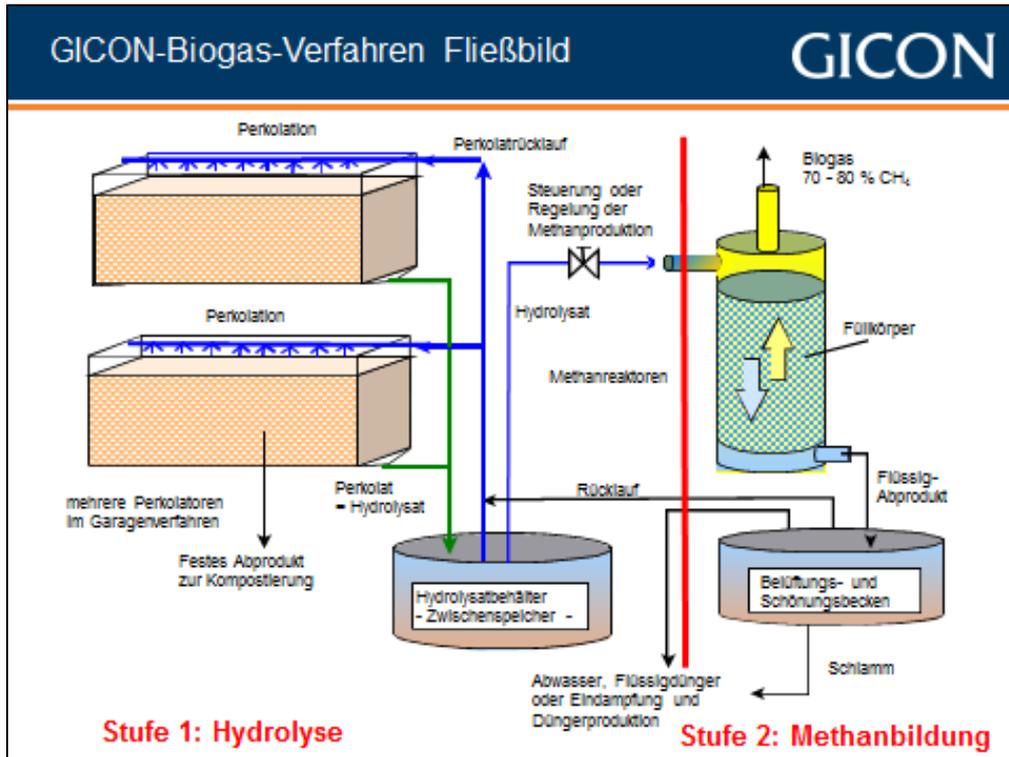
Diskontinuierliche Trockenvergärung – „Batch“-Verfahren

Einphasig und einstufig : z.B. Viessmann (Bioferm), Bekon

Ansatz:

- Kontrollierte Simulation der Vorgänge in einer Deponie
- Prozesswasserzuführung nur zur ausreichenden Durchfeuchtung:
  - Geringe Wassermengen, daher Heizung für Boxen erforderlich
  - Animpfen und Säurepuffer durch große Gärrestmengen erforderlich
- Hydrolyse, Versäuerung, Methanbildung simultan nur im Trockenfermenter

© GICON 17

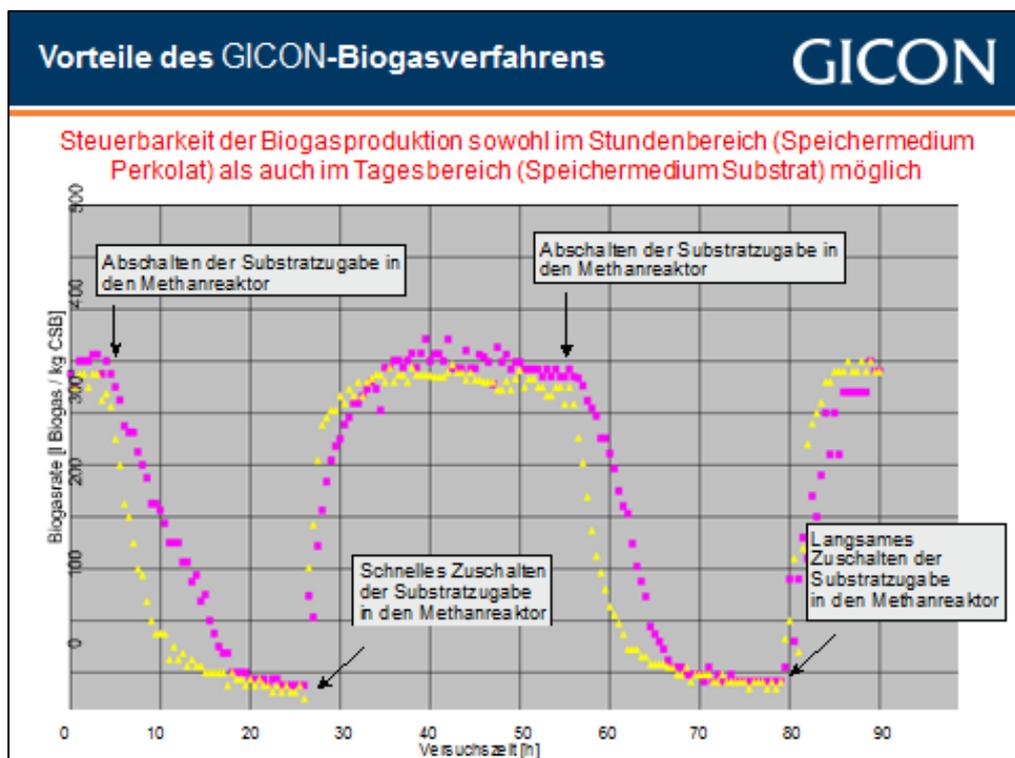
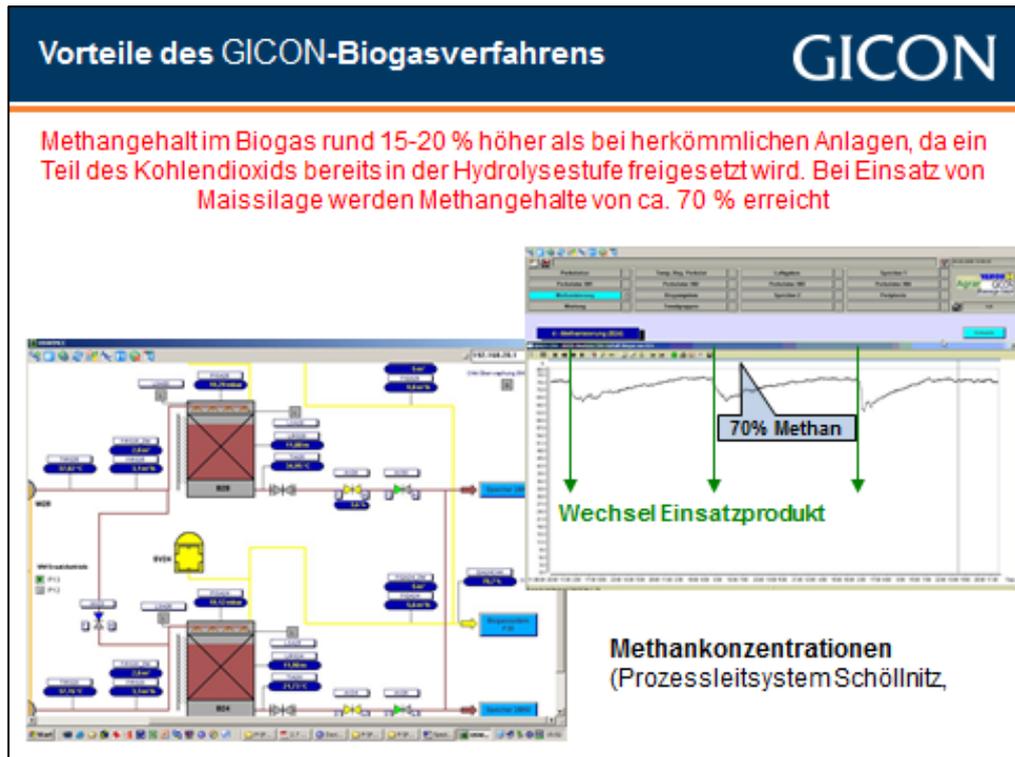


**Vergärung wasserarmer Biomasse** **GICON**

Diskontinuierliche Trockenvergärung – „Batch“-Verfahren

<p><b>Vorteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Wenig und gering belastete Aggregate</li> <li>• Vorbehandlungsaufwand der Substrate gering</li> <li>• Besonders robust bezüglich Störstoffen</li> <li>• Stapelbare Gärreste, geringer Nachbehandlungsaufwand</li> <li>• Investkosten niedriger als für Pflropfenstrom-Verfahren</li> <li>• Geringer Eigenenergiebedarf</li> <li>• Geringer Verschleiß</li> <li>• Niedrige Betriebskosten</li> </ul>	<p><b>Nachteile:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Größere Anzahl Einzelbehälter erforderlich, baulicher Aufwand</li> <li>• Strukturreiche Substrate und Gärreste erforderlich</li> <li>• Geringere Gasausbeuten (begrenzt durch Strukturabbau)</li> </ul>
--	---

© GICON 16

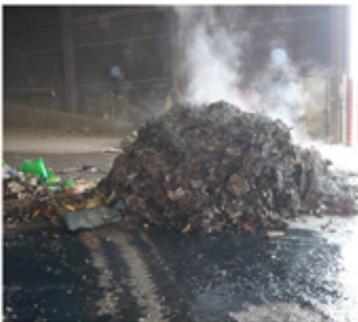


## Vorteile des GICON-Biogasverfahrens GICON

**Hohe Flexibilität gegenüber veränderter Qualität der Einsatzstoffe (saisonbedingte Anpassung an Substratangebot möglich). Störstoffe gut beherrschbar.**



Waste input 1



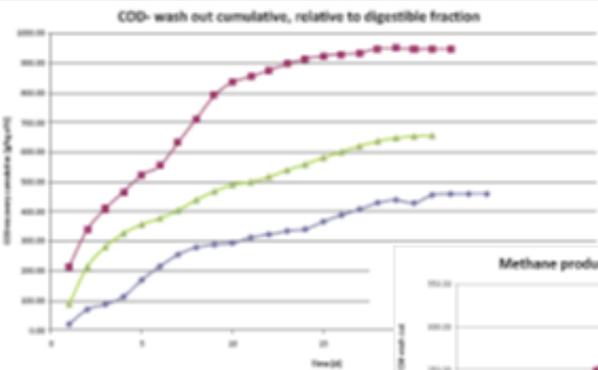
Waste output 2

Material fraction	Sorting analysis		
	Waste input 1	Waste output 2	Waste output 3
Organic digestible	43.8%	55.8%	56.5%
Organic non-digestible	7.0%	4.4%	4.3%
Paper, carton	7.0%	2.4%	2.3%
Plastics	18.8%	23.0%	20.2%
Metals	2.4%	2.0%	1.4%
Textile	2.1%	2.0%	2.0%
Others	19.2%	10.4%	10.3%
<b>Summierung</b>	<b>100.0%</b>	<b>100.0%</b>	<b>100.0%</b>
Organic digestible fraction	55.8%	59.7%	59.8%

**Einsatzmaterial „Waste 1“ (störstoffreicher Bioabfall ohne Vorzerkleinerung) für Testvergärung im Großtechnikum Cottbus**

	Organic digestible fraction		
Total solids (TS)	33.8%	21.8%	30.0%
Organic total solids (OTS)	43.8%	74.4%	60.0%

## Bioabfall/Restmüll (störstoffreich) GICON



**COD- wash out cumulative, relative to digestible fraction**

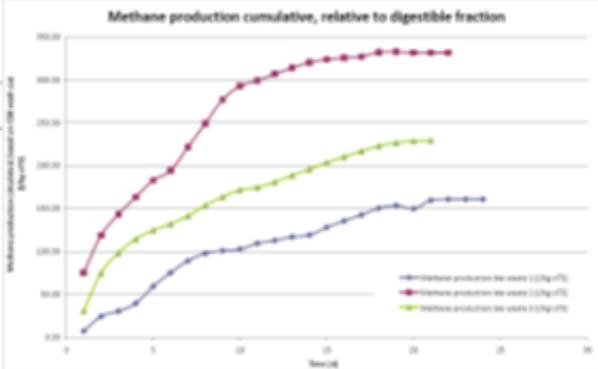
**Waste 2 (rot):** gut zerkleinert, vor Eintrag ca. 2 Tage Transport / Zwischenlagerung

**Waste 3 (grün):** mäßig zerkleinert, vor Eintrag ca. 5 – 7 Tage Transport / Zwischenlagerung

**Waste 1 (blau):** störstoffreich, unzerkleinert, vor Eintrag ca. 2 Tage Transport / Zwischenlagerung

**Einfluss der Bioabfallvorbehandlung auf die Gasausbeuten**

Massereduzierung der organisch abbaubaren Fraktion ca. 70 – 80 % innerhalb von 10 Tagen bei guter Vorbehandlung (z. B. Waste 2)



**Methane production cumulative, relative to digestible fraction**

Vergärung wasserarmer Biomasse **GICON**

Energieproduktion durch Vergärung wasserarmer Biomasse

Am Beispiel Bioabfall:	Am Beispiel Maissilage:
<b>Substratcharakteristik</b>	<b>Substratcharakteristik</b>
Anteil TS an FM: 35%	Anteil TS an FM: 33%
Anteil oTS an TS: 70%	Anteil oTS an TS: 97%
Biogaspotential: 600m <sup>3</sup> /Mg oTS	Biogaspotential: 760m <sup>3</sup> /Mg oTS
Methananteil: 60%	Methananteil: 53%
Methanpotential: 360m <sup>3</sup> /Mg oTS	Methanpotential: 400m <sup>3</sup> /Mg oTS
Energieausbeute Gas: 530 bis 700 kWh/Mg FM	Energieausbeute Gas: 1.000 bis 1.200 kWh/Mg FM
TS-Abbau: 110 bis 145 kg/Mg FM	TS-Abbau: 250 bis 300 kg/Mg FM

© GICON 21

Vergärung wasserarmer Biomasse **GICON**

**Endprodukt Biogas (Methan):**

- exergetisch hochwertig
- passfähig zur vorhandenen Energie-Infrastruktur

**Endprodukt Gärrest:**

- Vorrang stoffliche Verwertbarkeit (Kompost, Dünger)
  - Schließen natürlicher Kreisläufe
- ggf. (notfalls) auch energetische Nutzung

© GICON 22

Vergärung wasserarmer Biomasse **GICON**

Energieproduktion durch Vergärung wasserarmer Biomasse

Am Beispiel Bioabfall:	Am Beispiel Maissilage:
<i>Substratcharakteristik</i>	<i>Substratcharakteristik</i>
Anteil TS an FM: 35%	Anteil TS an FM: 33%
Anteil oTS an TS: 70%	Anteil oTS an TS: 97%
Biogaspotential: 600m <sup>3</sup> /Mg oTS	Biogaspotential: 760m <sup>3</sup> /Mg oTS
Methananteil: 60%	Methananteil: 53%
Methanpotential: 360m <sup>3</sup> /Mg oTS	Methanpotential: 400m <sup>3</sup> /Mg oTS
<i>Anlagencharakteristik</i>	<i>Anlagencharakteristik</i>
Verfahrenseffizienz: 60 bis 80%	Verfahrenseffizienz: 80 bis 95%
Methanerzeugung: 53 bis 70m <sup>3</sup> /Mg FM	Methanerzeugung: 100 bis 120m <sup>3</sup> /Mg FM
Heizwert Biogas: 530 bis 700 kWh/Mg FM	Heizwert Biogas: 1.000 bis 1.200 kWh/Mg FM
Stromerzeugung: 210 bis 280 kWh/Mg FM	Stromerzeugung: 400 bis 480 kWh/Mg FM
Nutzwärmeerzeugung: 220 bis 300 kWh/Mg FM	Nutzwärmeerzeugung: 430 bis 520 kWh/Mg FM
<i>Gärrestcharakteristik</i>	<i>Gärrestcharakteristik</i>
TS-Abbau: 110 bis 145kg/Mg FM	TS-Abbau: 250 bis 300kg/Mg FM
Verbleibende TS: 27 bis 24% an FM	Verbleibende TS: 10 bis 4% an FM
Verbleibende oTS: 57 bis 49% an TS	Verbleibende oTS: 87 bis 63% an TS

© GICON 23

**GICON**

**VERFAHRENSSICHERHEIT DURCH  
SCHRITTWEISE AUSLEGUNG**

**GICON-TECHNIKUM**

Gefördert mit Mitteln des  
Ministeriums für Wirtschaft des  
Landes Brandenburg und der EU.

GICON-Großtechnikum mit 60 kW-  
Pilotanlage in Cottbus

GICON

Teilansicht mit Perkolator, Methanreaktor  
und Speicher



GICON-Großtechnikum mit 60 kW-  
Pilotanlage in Cottbus

GICON

Perkolator in Containerbauweise





**Du siehst Dinge und fragst "Warum?",  
doch ich träume von Dingen und sage "Warum nicht?"**

**George Bernard Shaw (1856-1950), irischer Schriftsteller**





## **Dampfmotoren in KWK-Anlagen zur Verstromung fester Biomasse**

*(Till Augustin, Spilling Energie Systeme GmbH)*

### **Inhalt:**

1. Dampfkraftanlagen  
Erprobte Technik für unterschiedlichste Anwendungen
2. Kraft-Wärme-Kopplung  
Ein Gebot der energetisch und ökonomisch sinnvollen Ressourcennutzung
3. Kondensationsstrom aus Biomasse  
Größerer Stromanteil, geringer Gesamtwirkungsgrad
4. Dampfmotoren und Dampfturbinen  
Welche Technologie für welche Anwendungen?
5. Der Spilling-Dampfmotor (I)  
Merkmale und Kenndaten
6. Der Spilling-Dampfmotor (II)  
Konstruktion und Modularität
7. Der Spilling-Dampfmotor (III)  
Funktion und Eigenschaften der Füllungsregelung
8. Der Spilling-Dampfmotor (VI)  
Ölfreier Dampf!
9. Beispiele ausgeführter Anlagen  
Maschinen für verschiedenste Aufgabenstellungen
10. Zusammenfassung

## 1. Dampfkraftanlagen:

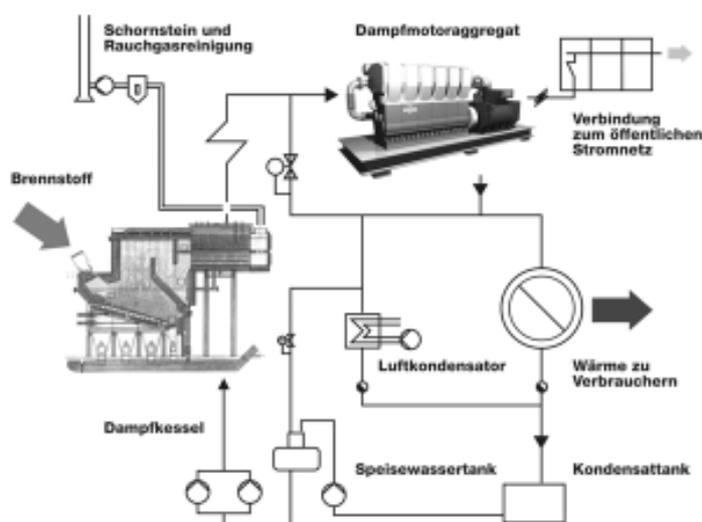
Erprobte Technik für unterschiedlichste Anwendungen

Der Dampfkreisprozess auf Basis von Wasserdampf (Clausius-Rankine-Prozess) ist die erprobteste und weitverbreitetste Technologie zur Verstromung fester Brennstoffe wie Biomasse. Hochdruckdampf wird hierbei mittels Feuerung und Kessel erzeugt und über die nachgeschaltete Kraftmaschine (Dampfturbine oder Dampfmotor) entspannt, wobei mechanische / elektrische Leistung ausgekoppelt wird. Nach der Entspannung ist der Abdampf zu kondensieren, damit er dem Speisewassersystem des Kessels wieder zugeführt werden kann. Ein vereinfachtes Schema der Schaltung der Hauptkomponenten ist in Bild 1 dargestellt.

Über mehr als ein Jahrhundert haben sich die unterschiedlichsten Bauformen / Typen von Feuerungen, Dampferzeugern und Kraftmaschinen herausgebildet und bieten heute für fast jede Aufgabenstellung optimierte zugeschnittene technische Lösungen. Die Auswahl / Auslegung der Hauptkomponenten erfolgt dabei unter Berücksichtigung folgender Aspekte:

- Brennstoffart / -qualität
- Anlagengröße
- Betriebsweise
- Art und Niveau der (Ab-)Wärmenutzung
- betriebliche und regionale Rahmenbedingungen
- verfügbare Investitionsmittel

Die Vielzahl der Einflussfaktoren, die projektspezifisch meist stark variieren, lassen eine Standardisierung und Herstellung gleicher Anlagentypen in größeren Stückzahlen nicht zu. Aufgrund dieses Sachverhalts und dem Umstand, dass Dampfkraftanlagen eine Reihe abgestimmter Komponenten erfordern, hat sich in der Praxis gezeigt, dass diese derzeit in einem Leistungsbereich unterhalb von 100 bis 150 kW elektrischer Leistung kaum technisch und ökonomisch sinnvoll realisierbar sind. Die ökonomischen Leistungsgrenzen nach oben ergeben sich in erster Linie aus der (regionalen) Verfügbarkeit von Biomasse sowie der Verwertbarkeit der Kraftanlagenabwärme.



**Bild 1: Prinzip-Schaltplan einer Biomasse-Dampfkraftanlage**

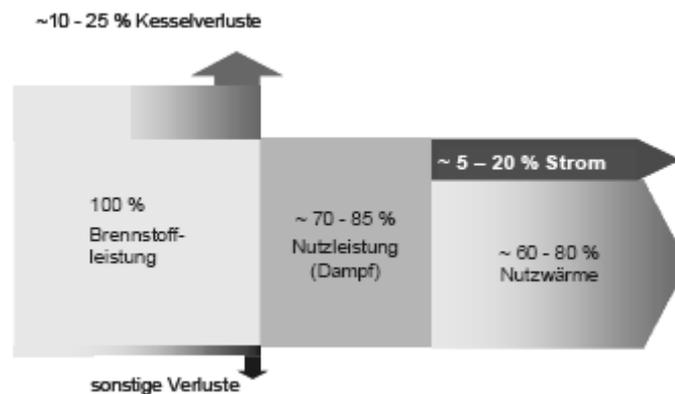
## 2. Kraft-Wärme-Kopplung:

Ein Gebot der energetisch und ökonomisch sinnvollen Ressourcennutzung!

Der Anteil der erzeugbaren elektrischen Leistung bezogen auf den Brennstoffeinsatz - also der elektrische Wirkungsgrad des Gesamtprozesses - hängt bei Dampfkraftanlagen im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab:

- Frischdampfdruck und –temperatur
- Abdampfdruck
- Wirkungsgrad des Dampferzeugers
- Wirkungsgrad der Kraftmaschine

Der Abdampf der Kraftmaschine beinhaltet immer noch einen sehr hohen Anteil der Verdampfungswärme (latente Wärme), die bei der Dampferzeugung zugeführt wird. Daher ist es energetisch und ökonomisch sinnvoll bzw. zumeist auch notwendig, diese Abdampfwärme in nachgeschalteten Verbrauchern zu nutzen. Dabei wird maßgeblich der elektrische Wirkungsgrad durch die verfügbare Enthalpiedifferenz zwischen Frischdampf am Kesselaustritt und Abdampfdruck am Maschinenaustritt vorbestimmt; also durch die Kesselauslegung und die Erfordernisse der nachgeschalteten thermischen Verbraucher. Die typische Bandbreite von elektrischen und Gesamtwirkungsgraden von Biomasse-Kraftwärme-Kopplungsanlagen ist im Sankey-Diagramm in Bild 2 dargestellt.



**Bild 2: Sankey-Diagramm für typische Biomasse-KWK-Anlagen**

Die Auslegung der Dampfkraftanlage richtet sich zumeist im ersten Schritt nach dem Temperatur- bzw. Druckniveau, auf welchem der Maschinenabdampf genutzt werden soll. Die Wärmeabnahme bestimmt bei wärmegeführtem Betrieb der Anlage den Dampfmassenstrom und somit eine der Hauptkenngößen der Gesamtanlage. Die Wahl des Kessels (Bauart, Druck, Temperatur) wird beeinflusst vom zu verwendenden Brennstoff, der Abstimmung auf die Kraftmaschinen und nicht zuletzt von den verfügbaren Investitionsmitteln.

Die zuvor aufgeführten Einflussfaktoren sind Ursache für das breite Spektrum elektrischer Wirkungsgrade.

Bei größeren Anlagen kann mit einer Kombination aus Wasserrohr-Kessel mit hohen Frischdampfparametern (z.B. 60 bar, 450 °C), einer vielstufigen Turbine sowie der Auskoppelung von Heizwärme auf relativ niedrigem Temperaturniveau (~ 80 °C) ein elektrischer Anteil von etwa 20 % erzielt werden. Andererseits kann es für einen Betrieb interessant sein, nur 10 bar Satttdampf in einem „einfachen“ und vergleichsweise günstigen Großwasserraum-Kessel zu erzeugen. Wird der Dampf nach der Entspannung in einem Motor beispielsweise als Heiz- und Prozessdampf bei

2 bar abs. / 120 ° in der Produktion genutzt, so liegt der elektrische Anteil bei derartigen Parametern bei ca. 5 - 6 %; jedoch ist der Strom hier das „edle“ und ökonomisch interessante Nebenprodukt der betrieblichen Dampfversorgung! Vergleichbares gilt auch für Anlagen, in denen der Dampf auf hohem Druckniveau (Beispiel 60 bar / Sattedampf) erzeugt wird und nach der Stromauskoppelung auf hohem Gegendruckniveau (Beispiel 11 bara) thermisch genutzt wird.

Obwohl in den obengenannten Beispielen die elektrischen Wirkungsgrade niedrig erscheinen mögen, führt die Kombination von Stromerzeugung und Wärmenutzung zu Gesamtwirkungsgraden (bezogen auf den Brennstoffeinsatz) von üblicherweise 75 bis 85 %. Damit ist nicht nur die Ressource Biomasse optimal genutzt, sondern die Voraussetzung für einen (langfristig) ökonomisch erfolgreichen Betrieb einer Biomasse-Stromerzeugungsanlage gegeben!

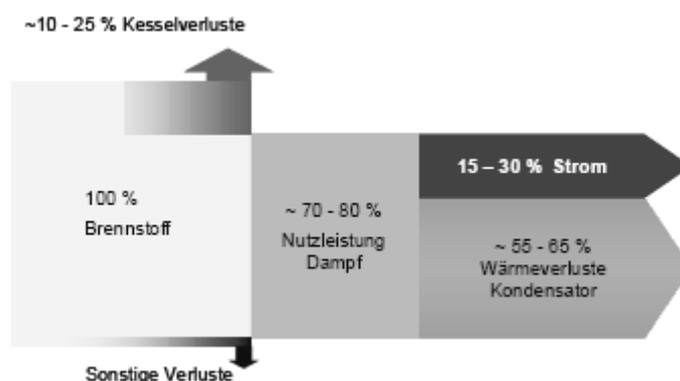
### 3. Kondensationsstrom aus Biomasse

Größerer Stromanteil, geringer Gesamtwirkungsgrad

Der Wunsch, maximale elektrische Wirkungsgrade zu erzielen, gekoppelt oder sogar ausgelöst durch attraktive Einspeisevergütungen für Biomasse-Strom, wird mit Vakuum-Kondensations-Turbinenanlagen erreicht.

Für derartige Anlagen werden auf der Kesselseite – unter Berücksichtigung angemessener Investitionskosten und der Machbarkeit bei den verwendeten Brennstoffen - möglichst hohe Frischdampfparameter angestrebt. Durch die Absenkung des Kondensationsdruckes auf ein möglichst niedriges Niveau wird das Enthalpiegefälle für die Kraftmaschine erhöht. Der realisierbare Kondensationsdruck (das Vakuum) wird durch das Temperaturniveau des Kühlmediums (Wasser oder Luft) und durch die Wärmeübertragungsflächen / Kosten des Kondensators begrenzt. Eine weitere Wärmenutzung erfolgt in diesen Anlagen nicht, da das Temperaturniveau des Abdampfes hierfür zu niedrig ist.

Je nach Anlagengröße, verfügbaren Investitionsmitteln und standortspezifischen Rahmenbedingungen kann feste Biomasse in reinen Verstromungsanlagen mit einem Wirkungsgrad zwischen etwa 15 und 30 % in elektrische Leistung umgewandelt werden. Das bedeutet aber auch, dass dieser Wert dem des Gesamtwirkungsgrades entspricht und zwischen 70 und 85 % der Brennstoffenergie ungenutzt an die Umgebung abgegeben werden! Die Bandbreite der Verhältnisse für reine Biomasse-Verstromungsanlagen mit Kondensationsturbinen ist im Sankey-Diagramm (Bild 3) dargestellt.



**Bild 3: Sankey-Diagramm für typische Biomasse-Verstromungsanlagen mit Vakuum-Kondensation**

Die reine Verstromung von lokal verfügbarer Biomasse macht erfahrungsgemäß nur dann Sinn, wenn eine Nutzung in KWK nicht möglich ist und der Brennstoff langfristig nahezu kostenfrei zur Verfügung steht. Es gibt eine Reihe von Anlagenbeispielen, die primär als Verstromungsanlagen geplant worden waren, und als Folge steigender Biomassepreise und

aufgrund des schlechten Gesamtwirkungsgrades (fehlende Wärmenutzung / fehlender Wärmeverkauf) nicht mehr kostendeckend betrieben werden können.

In der Praxis sind oft Mischformen aus reinen KWK-Anlagen und reiner Verstromung anzutreffen. Dies sind zum einen Vakuum-Kondensationsanlagen, bei denen aus der Turbinen auf einem höheren Druckniveau Teildampfströme (Anzapfung oder Entnahme) ausgekoppelt werden und als Heizwärme oder Prozessdampf verwendet werden. Zum anderen handelt es sich um Gegendruckanlagen mit Dampfmotoren oder Dampfturbinen, bei denen die Dampfmenge, welche nicht thermisch genutzt werden kann, in einem Überschusskondensator niedergeschlagen wird. Bei letzter Variante handelt es sich um relativ einfache Anlagenkonfigurationen mit vergleichsweise niedrigen Investitionskosten für die Kondensationsanlage. Diese Konfiguration ist öfter in industriellen Anlagen zu finden, in denen die Biomasse aus der Produktion anfällt, die Wärme jedoch nicht in gleichem Maße genutzt werden kann, wie der (kostenfreie) Brennstoff zur Verfügung steht. Siehe hierzu auch Bild 1.

#### 4. Dampfmotoren und Dampfturbinen

Welche Technologie für welche Anwendungen?

Spilling-Dampfmotoren haben ein Anwendungsfeld, das im Wesentlichen durch folgende Stichworte umrissen wird:

- Leistungsbereich zwischen 100 und 1.000 kWel
- Einsatz im Gegendruckbetrieb, meist als wärmegeführte KWK-Maschine
- Kombination mit Kesseln, die Sattdampf oder Dampf mit moderater Überhitzung erzeugen

Aufgrund der geometrischen Begrenzungen (Kolbendurchmesser) der Kolbenmaschine eignet sie sich nicht für Vakuum-Kondensationsanwendungen. „Ölfreie“ Dampfmotoren lassen nur moderate Überhitzungen des Frischdampfes zu.

Die Anforderungen an die Frischdampfqualität und damit an Kessel und Wasseraufbereitung sind bei Dampfmotoren geringer als bei Turbinen. So werden Dampfmotoren oftmals bei Kesselanlagen nachgerüstet, die als Sattdampfkessel ursprünglich für die Prozessdampfversorgung ohne Stromerzeugung installiert wurden.

Während im Leistungsbereich unterhalb von etwa 500 - 600 kW der Dampfmotor hinsichtlich Wirkungsgrad, Teillastverhalten und Investitionskosten oft Vorteile gegenüber einer Turbinelösung aufweist (sofern die Einschränkungen hinsichtlich Frischdampfperatur und Abdampfdruck nicht relevant sind), so ist im Bereich darüber für den Einzelfall zu untersuchen, ob eine Turbine oder ein Motor für die spezifische Aufgabenstellung die optimale Lösung darstellt. Ab dem Bereich von etwa 1 MW überwiegen fast immer die Vorteile der Turbomaschine, da mit steigenden Volumenströmen deren Wirkungsgrade immer besser werden und deren spezifischen Kosten sinken.

## 5. Der Spilling-Dampfmotor (I)

### Modularität und Kenndaten

Der Spilling-Dampfmotor ist modular konzipiert. d.h. er kann in Zylinderzahl (1 bis 6) und Zylinderdurchmesser (es stehen 15 verschiedene Durchmesser standardmäßig zur Verfügung) an die unterschiedlichsten Massenströme und Druckdifferenzen individuell anpasst werden. Durch die serielle Anordnung von Zylindern mit größer werdenden Durchmessern kann eine Expansion in mehreren Stufen erfolgen, so dass auch höhere Expansionsdruckverhältnisse resp. Enthalpiegefälle mit guten Wirkungsgraden expandiert werden. In der Praxis werden die Motoren meist mit einstufiger oder zweistufiger Expansion ausgeführt. Im Falle zweistufiger

Maschinen ist es möglich, mit geringen Mehrkosten eine geregelte Entnahme zu realisieren, um zusätzlich zum Abdampf auf Austrittsniveau auch Prozessdampf auf höherem Zwischendruck auszukoppeln.

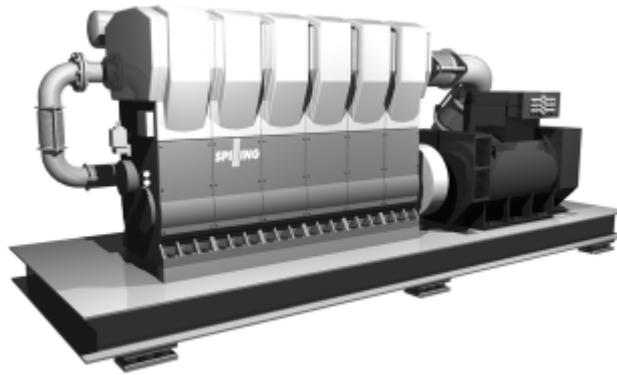
Die Kenndaten für Spilling Dampfmotoren sind in der nachstehenden Tabelle 1 dargestellt. Neben den Grenzen des Motorenprogramms sind auch Bereiche aufgeführt, in denen die Motoren typischerweise meist eingesetzt werden.

	konstruktive Kenndaten	typischer Anwendungsbereich
Leistung, elektrisch	bis 1.200 kW	100 bis 1.000 kW
Dampfdurchsätze	bis 40 t/h	3 bis 20 t/h
Eintrittsdrücke	6 bis 60 barü	10 bis 30 barü
Eintrittstemperaturen	Sattdampf bis 300 °C	Sattdampf bis 280 °C
Abdampfdrücke	0,2 bis 15 barü	0,5 bis 10 barü

**Tabelle 1: Kenndaten und typischer Einsatzbereich von Spilling-Dampfmotoren**

Die oben genannten Daten beziehen sich auf zwei Motorenbaureihen, welche mit 750, 900 und 1.000 min<sup>-1</sup> arbeiten. Dampfmotoren werden in 95 % aller Fälle als Generatorantriebe eingesetzt; gelegentlich aber auch als Direktantriebe für Arbeitsmaschinen wie Verdichter oder Pumpen.

Bild 4 zeigt grafisch einen 6-Zylinder-Motor mit direkt gekuppeltem Synchron-Generator. Das Aggregat ist vormontiert auf einem Grundrahmen, der elastisch mittels Federelementen auf einem normalen Industriefußboden mit ausreichender Tragfähigkeit aufgestellt werden kann. Die freien Massenkräfte und Massenmomente des Kolben- und Kurbeltriebes werden durch Auslegung des Grundrahmens und der Dämpferelemente zu mehr als 95% absorbiert, so dass der Fußboden des Maschinenraums nur für die statische Last des Aggregates auszulegen ist. Die klassische Aufstellung auf einem Blockfundament kommt nur noch selten zur Anwendung.



**Bild 4: Spilling-Dampfmotor-Aggregat auf Grundrahmen mit elastischer Aufstellung**

## 6. Der Spilling-Dampfmotor (II)

### Konstruktionsmerkmale

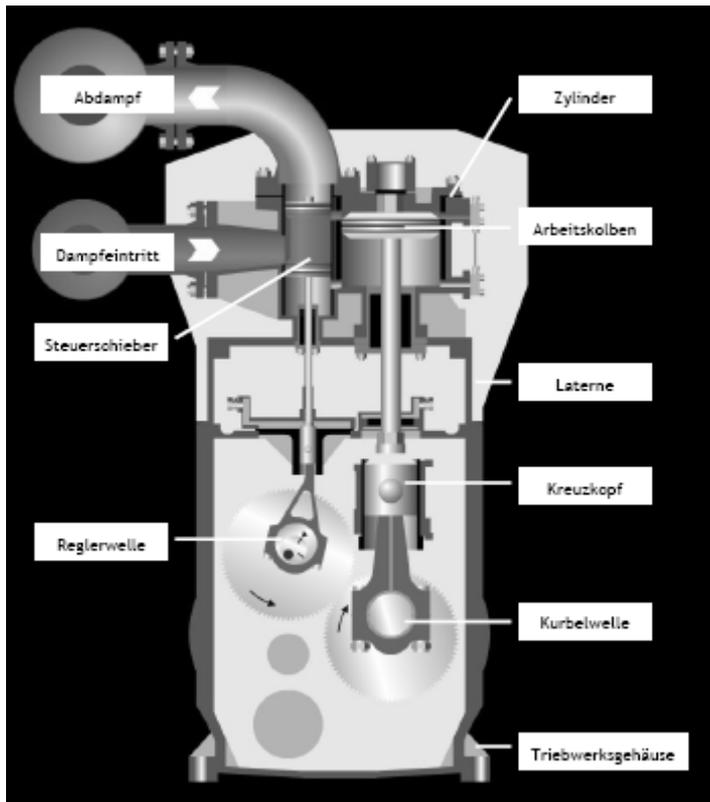
Der Entwicklung und Konstruktion des Motors liegen folgende Prämissen zugrunde:

- Kombination der thermodynamischen Vorteile der klassischen Dampfmaschine mit Konstruktionsmerkmalen moderner Motorentchnik
- kompakte Bauweise und Reduktion des Leistungsgewichts
- niedrige Kolbengeschwindigkeiten
- Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichste Parameter mittels eines durchkonstruierten Baukastensystems
- Realisierung einer modernen und zuverlässigen Füllungsregelung

Im Resultat ist der Spilling-Dampfmotor eine modular konstruierte, kurzhubige, mittelschnelllaufende Maschine. Je nach Typ und Drehzahl liegen die nominellen mittleren Kolbengeschwindigkeiten nur bei 3,5 bis 4,2 m/s.

Die Leistungsabgabe im Zylinder erfolgt doppelwirkend, d.h. der Dampf expandiert sowohl an der Kolbenober- als auch an der Kolbenunterseite. Die vertikal arbeitende Kolbenstange (wie auch die Schieberstange) ist mit einem Teleskop-System kombiniert, das den Eintrag von Kondensat aus dem Arbeitszylinder in das Triebwerk verhindert. Zwischen Arbeitszylinder und Triebwerk befindet sich ein nach der Atmosphäre offener Bereich, die sogenannte Laterne.

Sie trennt den dampfführenden Teil des Motors vom ölgeschmierten Triebwerk. Etwaige Kondensatleckagen werden vom Laternenboden abgeführt. Die Abdichtung des Zylinders gegenüber der Laterne erfolgt mittels Stopfbuchsen.



**Bild 3: Querschnitt Spilling-Dampfmotor**

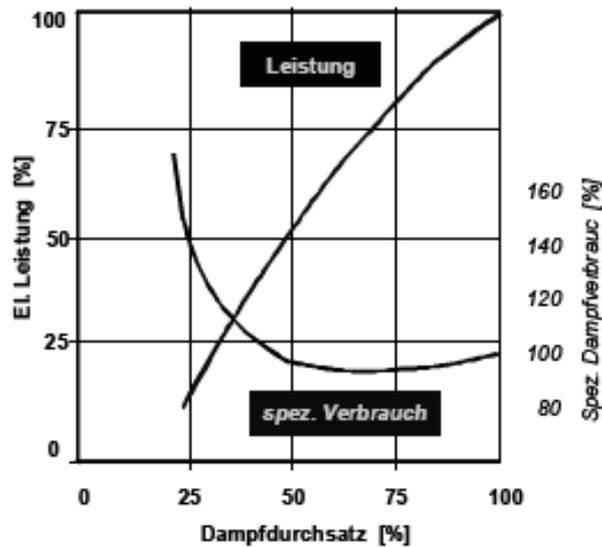
## 7. Der Spilling-Dampfmotor (III)

### Funktion und Eigenschaften der Füllungsregelung

Die Füllungsregelung mit dem von Spilling entwickelten Achsenregler ist ein maßgebliches Element für die Effizienz des Motors.

Die Dampfzu- und Abführung zum bzw. vom Arbeitszylinder wird pro Zylinder durch ein Kolbenschieberventil gesteuert. Dieses wird über Exzenterstange und Schieberstange von der Reglerwelle angetrieben und gibt jeweils Ein- und Auslass frei. Die Reglerwelle ist mit einem internen Verstellmechanismus ausgeführt, der während des Betriebes – betätigt durch eine externe elektronisch-hydraulische Ansteuerung – kontinuierlich seine Exzentrizität verstellen kann. Hierdurch wird der Hub des Steuerschiebers variiert und somit die Zeit für das Ein- und Ausströmen des Dampfes verändert. Durch diese Zeitsteuerung wird der Massenstrom durch den oder die Zylinder variiert, jedoch weitestgehend ohne stärkere Drosseleffekte, so dass über einen großen Betriebsbereich der volle Frischdampfdruck für die Expansion zur Verfügung steht. Die Nutzung des vollen Druck- / Enthalpiegefälles resultiert in einem sehr guten Teillastwirkungsgrad des Motors, was ein wesentlicher Vorteil im wärmegeführten KWK-Betrieb ist.

Im untenstehenden Diagramm (Bild 5.) ist normiert eine typische Durchsatz-/Leistungscharakteristik des Dampfmotors dargestellt. Sie verdeutlicht den großen Regelbereich sowie das gute Teillastverhalten. Der spezifische Dampfverbrauch (Quotient aus Dampfmassenstrom und elektrischer Leistung) ist über einen großen Bereich nahezu konstant, mit leichter Tendenz im oberen Teillastbereich sogar etwas besser als bei Vollast. Erst ab Durchsätzen von 40 % des nominellen Durchsatzes ist eine deutliche Abnahme des Wirkungsgrades (d.h. Zunahme des spezifischen Dampfverbrauches) zu verzeichnen.



**Bild 5: Normiertes Beispiel einer typischen Durchsatz-Leistungskennlinie**

Motoren werden in ihrem Nennpunkt üblicherweise zwischen 50 und 55% Füllung ausgelegt. Tatsächlich hat die Regelung darüber hinaus noch eine erhebliche Füllungsreserve, so dass bei Absinken des Kesseldrucks und Zunahme des Volumenstroms die Maschine bis zu einem gewissen Punkt des Druckabfalls trotzdem noch den nominellen Massenstrom durchsetzen kann. Produziert eine Kesselanlage mehr Dampf als ursprünglich vorgesehen, kann aufgrund der Füllungsreserve auch dieser größere Massenstrom bis zu einem gewissen Grad durchgesetzt und für eine erhöhte Leistungsabgabe genutzt werden.

Der in die hydraulisch-mechanische Reglerwellenverstellung integrierte Fliehkraftregler macht den Motor auch ohne ein externes Schnellschlussventil überdrehzahlsicher.

Die motoreninterne Regelung wird aus der SPS der Motorenüberwachung angesteuert. Beim wärmegeführten Betrieb ist der Abdampfdruck die Regelgröße. Bei Anlagen mit instabilem Kesselbetrieb aufgrund von Schwankungen der Brennstoffqualität und Brennstoffmenge wird häufig eine Zudampfdruckregelung realisiert. Eine Leistungsregelung ist ebenfalls möglich.

Alles in allem macht die Spilling-Füllungsregelung den Motor nicht nur zu einer effizienten, sondern auch zu einer „gutmütigen“ und sicheren Maschine.

## 8. Der Spilling-Dampfmotor (VI)

### Ölfreier Dampf!

Seit ca. 10 Jahren arbeiten neue Spilling Dampfmotoren „ölfrei“. Es wird kein hochviskoses Öl mehr – wie früher üblich und notwendig - zur Schmierung von Kolben und Steuerschiebern in den Frischdampfstrom am Motor eingespritzt. Diese sogenannte Zylinderschmierung führte zu einer Ölbelastung des Abdampfes, welche Einrichtungen zur Ölabscheidung aus Dampf und Kondensat erforderlich machte. Neben den Investitions- und Betriebskosten für diese Aggregate war die mögliche Anwesenheit von geringen Restölmengen im Dampf- und Kondensatsystem oft Anlass für potentielle Betreiber, trotz sonstiger Vorzüge eines Dampfmotors, diesen nicht einzusetzen.

Es war daher essentiell, die Zylinder-Ölschmierung zu eliminieren, um den Dampfmotor für das 21. Jahrhundert fit zu machen!

Realisiert werden konnte dieses technologisch ambitionierte Ziel durch den Einsatz moderner Materialien auf der Kolbenringseite und moderner Beschichtungsverfahren auf der Laufbuchsenseite. Während für die Gegenlaufflächen relativ bald ein Optimum aus Laufbuchsenmaterial und widerstandsfähiger Beschichtungstechnologie entwickelt wurde, bedurfte es einer Reihe von Entwicklungsschritten auf der Seite des Ringmaterials, bis alle Anforderungen des praktischen Betriebes voll erfüllt werden konnten. Obwohl die bei der Markteinführung der TS-Technik (ölfreier Dampf) verwendeten Ringmaterialien auf Basis von Kohlenstoff die geforderten tribologischen Eigenschaften erfüllten und bei Einhaltung von Grenzen hinsichtlich der Frischdampf Temperatur die gewünschten Verschleißraten hatten, stellten Brüche der starren Ringe ein nicht systematisch reproduzierbares und prognostizierbares Phänomen dar.

Seit der Einführung eines elastischen Kohlenstoff-Verbundmaterials im Jahr 2008 werden heute Kolben- und Schieberringe eingesetzt, die sowohl in ihren tribologischen als auch in ihren mechanischen Eigenschaften den gesetzten Anforderungen gerecht werden. Spilling-Dampfmotoren sind somit im Betrieb mit Sattedampf und moderat überhitztem Dampf als effiziente KWK-Maschinen ohne „Nebenwirkungen“ voll einsetzbar.

### **Instandhaltung durch Betriebspersonal**

Die Technologie sowie der Aufbau des Dampfmotors erlauben es, dass die üblichen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten durch Mitarbeiter des Betreibers oder örtliches qualifiziertes Personal vorgenommen werden. So ist es möglich, dass Anlagen auch in abgelegenen Regionen betrieben und gewartet werden können, ohne dass Spezialfirmen oder Spilling diese Aufgaben wahrnehmen müssen.

## 9. Beispiele ausgeführter Anlagen

### Motoren für verschiedenste Aufgabenstellungen

Auf den folgenden Seiten werden beispielhaft vier unterschiedliche Dampfmotoren-Anlagen in Stichworten und mit Kenndaten vorgestellt.

#### Beispiel 1:

Industrie /Kunde: Klärschlammverbrennungsanlage (Niederlande)

Aufgabenstellung / Betriebsweise: Verstromung von Überschusdampf, welcher nicht in zur Klärschlamm-trocknung benötigt wird. Nutzung des Motorenabdampfes teilweise für Speisewasservorwärmung und Heizung. Nicht genutzte Abdampfwärme wird in einem Rückkühlsystem abgeführt.

Biomasse: Klärschlamm

Motorentyp: 3AH12TS

Expansion: einstufig

Regelung: Zudampfdruck

Leistung: 514 kWel

Frischdampf: 8 barü / Sattedampf

Abdampf: 0,5 barü



#### Beispiel 2:

Industrie /Kunde: Spanplattenwerk (Österreich)

Aufgabenstellung / Betriebsweise: Stromauskopplung aus Reduktion von HD-Dampf auf Gegendruck, wärmegeführter KWK-Betrieb, Wärmenutzung in Prozess und Trockenkammern

Biomasse: Holzreststoffe

Motorentyp: 2 x 6HH14TS

Expansion: einstufig

Regelung: Abdampfdruck

Leistung: 2 X 1.000 kWel

Frischdampf: 60 barü / Sattedampf

Abdampf: 10 barü



**Beispiel 3:**

Industrie /Kunde:       Säge- und Furnierwerk (Kongo)  
Aufgabenstellung /   Eigenstromversorgung des Sägewerks in Grund- und  
Betriebsweise:       Mittellast. Dampfversorgung für Trockenkammern und  
                              Dämpfgruben. Leistungsgeführter Betrieb im Inselbetrieb,  
                              teilweise im Parallelbetrieb mit Dieselaggregaten, die bei  
                              Bedarfspitzen zugeschaltet werden. Überschüssiger  
                              Motorenabdampf wird in eine luftgekühlte  
                              Kondensationsanlage abgeführt

Biomasse:               Sägewerksabfälle  
Motorentyp:             2D2KoH12TS  
Expansion:             zweistufig  
Regelung:               Leistung  
Leistung:               700 kWel  
Frischdampf:           25 barü / 250 °C  
Abdampf:               0,5 barü



**Beispiel 4:**

Industrie /Kunde:       Sägewerk (Australien)  
Aufgabenstellung /   Stromauskopplung aus Reduktion von HD-Dampf auf  
Betriebsweise:       Gegendruck, wärmegeführter KWK-Betrieb, Wärmenutzung in  
                              Trockenkammern

Biomasse:               Sägewerksabfälle  
Motorentyp:             1Ef1KoH12TS  
Expansion:             zweistufig  
Regelung:               Abdampfdruck  
Leistung:               425 kWel  
Frischdampf:           34 barü / Sattdampf  
Abdampf:               1 barü



## 10. Zusammenfassung

Spilling-Dampfmotoren sind insbesondere geeignet für kleinere Dampfkraftanlagen mit...

- Leistungen von üblicherweise 100 bis 1.000 kWel
- Kesseln mit Satttdampf oder moderat überhitztem Frischdampf
- variablen Dampfdurchsätzen / Wärmeabnahmen

Dabei zeichnen sich die Motoren durch folgende Merkmale aus:

- guter (Teillast-) Wirkungsgrad
- großer Regelbereich
- „gutmütiges“ Verhalten bei Schwankungen der Frischdampfparameter
- moderate Anforderungen an die Frischdampf- resp. Speisewasserqualität
- ölfreier Dampf
- Wartung und Instandhaltung durch örtliches Betriebspersonal möglich

---

Für weitere Informationen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung. Sie erreichen uns unter folgender Anschrift:

Spilling Energie Systeme GmbH  
Wertstraße 5  
D-20457 Hamburg

Telefon: +49(0)40 789 175-0  
Fax : +49(0)40 789 28 36  
Internet : [www.spilling.de](http://www.spilling.de)  
E-Mail : [info@spilling.de](mailto:info@spilling.de)



## **Der ORC-Prozess auf Biomassebasis – derzeitiger Einsatz und Optimierungsansätze**

*(Markus Preißinger, Universität Bayreuth)*

Markus Preißinger, Florian Heberle, Dieter Brüggemann  
Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT)  
Zentrum für Energietechnik (ZET)  
Universität Bayreuth  
Universitätsstraße 30  
95444 Bayreuth  
Tel.: 0921557285  
Email: [lttt@uni-bayreuth.de](mailto:lttt@uni-bayreuth.de)

### **Einleitung und Motivation**

Historisch gesehen wurde der Organic Rankine Cycle (ORC) erstmalig 1961 bei der United Nations Conference on New Sources of Energy im Vortrag „3 kW Prototyp einer solar-betriebenen ORC-Turbine“ von H.Z. Tabor und L. Bronicki erwähnt. 1962 wurde in den USA ein Patent eingereicht, 1966 veröffentlichten Ray und Moss [1] Analysen über die Verwendung von fluorhaltigen Arbeitsmitteln für den ORC. In Köln und Zürich fanden 1980 und 1984 Tagungen des VDI statt, die auf das Themengebiet ORC spezialisiert waren [2; 3]. Es dauerte jedoch bis in die späten neunziger Jahre, bis sich der ORC auf dem Markt etablieren konnte. Mittlerweile kann der ORC in der Geothermie und in Biomasseheizkraftwerken weitgehend als Stand der Technik bezeichnet werden. Die Nachverstromung von Abwärme aus Biogas-BHKWs und industrieller Abwärme mittels kleinen, dezentralen ORC-Anlagen wird in den nächsten Jahren vor dem Hintergrund der weltweiten Verknappung fossiler Energieträger an Bedeutung gewinnen. Insbesondere bei Biogasanlagen mit unzureichendem Wärmekonzept stellt der ORC eine Möglichkeit dar, die Gesamtanlage zu optimieren.

In diesem Beitrag werden die thermodynamischen Grundlagen, der Stand der Technik und die Wirtschaftlichkeit von ORC-Anlagen dargestellt werden. Zudem werden Möglichkeiten der Effizienzsteigerung und deren Auswirkung auf den wirtschaftlichen Betrieb von ORC-Anlagen auf Biomassebasis erläutert.

### **Der Organic Rankine Cycle**

#### **a) Thermodynamische Grundlagen**

Thermodynamisch handelt es sich beim ORC um einen Dampfkraftprozess ähnlich dem Rankine Cycle, bei dem statt Wasser organische Arbeitsmittel zum Einsatz kommen. Abbildung 1 zeigt das Anlagenschema eines ORC. Die Speisepumpe verdichtet das Fluid auf den oberen Prozessdruck, der interne Rekuperator dient der Wärmerückgewinnung aus dem überhitzten Dampf nach der Turbomaschine. Im Vorwärmer und Verdampfer wird das Fluid bis zur Siedelinie erwärmt, anschließend entspannt und im Kondensator kondensiert. Abhängig vom Temperatur- und Druckniveau nach der Entspannung kann der Kondensator als reiner Kühlkreislauf aber auch als Heiznetz im KWK-Modus betrieben werden. Die Wärmeeinkopplung in den ORC erfolgt bei hohen Temperaturen der Wärmequelle bisher in der Regel über einen Thermoölkreislauf, um eine Degradation des Arbeitsmittels innerhalb des ORC zu vermeiden. Die Vorteile organischer Fluide können aus Abbildung 2 abgeleitet werden. Im Vergleich zu Wasser liegt das Temperaturniveau bei gleichem Druck für organische Fluide geringer. Dadurch ist es möglich, Niedertemperaturwärmequellen

effizient zu nutzen. Bei Octamethyltrisiloxan (OMTS) und Isopentan verdeutlicht Abbildung 2, dass im Gegensatz zum Wasserdampfprozess im ORC auf eine Überhitzung des Dampfes vor der Expansion verzichtet werden kann. Auf Grund des retrograden Verlaufs der Taulinie tritt kein Tropfenschlag in der Turbine auf. Zudem ist ersichtlich, dass durch die Vielzahl potenzieller Arbeitsmedien für den ORC meist ein speziell auf das Temperaturniveau der Wärmequelle angepasstes Fluid verwendet werden kann. Es ist darauf zu achten, sicherheitstechnische Aspekte (Entzündlichkeit, Giftigkeit), umwelttechnische Aspekte (GWP, ODP, Wassergefährdungsklasse) und wirtschaftliche Aspekte (Wirkungsgrad) gegeneinander abzuwägen, um das für den jeweiligen Prozess und die Rahmenbedingungen geeignetste Arbeitsmittel zu finden.

### **b) Stand der Technik**

Im Bereich Biomasse kommt der ORC hauptsächlich in Biomasseheizkraftwerken und in der Verstromung der Abgaswärme von Biogas-BHKWs zum Einsatz. Laut einer Studie der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe [4] verfügen nur 25 % der Biogasanlagen in Deutschland über eine fremde Verwertung der Abwärme, 10 % der Anlagen besitzen keinerlei Wärmenutzungskonzept. Die restlichen Anlagen weisen meist ein unzureichendes Wärmekonzept auf. Zudem sind die für dezentrale Biomasseheizkraftwerke konzipierten ORC-Module ab 200 kW<sub>el</sub> für den Einsatz an einer Biogasanlage überdimensioniert, weswegen derzeit versucht wird, auch Module unter 50 kW<sub>el</sub> anzubieten. Führende Hersteller von ORC-Anlagen in Europa sind unter anderem Cryostar, Fraunhofer Umsicht, GMK, Maxxtec, Ormat Technologies sowie Turboden. Der Marktführer Turboden aus Italien verfügt über Referenzen von nahezu 2 MW<sub>el</sub> verteilt auf 181 Anlagen in 19 Ländern. Turboden fertigt derzeit sieben Standardmodule von 400 kW<sub>el</sub> bis 2,2 MW<sub>el</sub>, die Entspannung erfolgt über eine Turbine, andere Firmen nutzen einen Dampf-Schraubenmotor für die Entspannung. Die Verfügbarkeit der ORC-Anlage liegt im Regelfall bei über 95 % [5].

### **c) Wirtschaftlichkeit**

Die Wirtschaftlichkeit von ORC-Anlagen ist stark von der gewährten Vergütung abhängig. Diese wird innerhalb Deutschlands durch das 2009 letztmalig novellierte EEG geregelt [6] (der Autor weist darauf hin, dass das zum Zeitpunkt der Tagung laufende Gesetzgebungsverfahren zur erneuten Novellierung des EEG nicht für die hier dargestellten Ergebnisse berücksichtigt wird). Die Gesamtvergütung setzt sich aus einer Grundvergütung und unterschiedlicher Boni zusammen und ist von der Anlagengröße abhängig. Beispielhaft zeigt Tabelle 1 die Aufteilung der Gesamtvergütung von 22,94 Cent pro kWh eines 100 kW<sub>el</sub> Biomasseheizkraftwerk, das mit nachwachsenden Rohstoffen betrieben wird. Der Technologiebonus wird für den ORC gewährt, wenn auch eine Wärmenutzung erfolgt oder ein elektrischer Wirkungsgrad von mindestens 45 % erreicht wird. Letzteres ist insbesondere im Anwendungsfall einer Biogasanlage mit nachgeschaltetem ORC von Bedeutung.

**Tabelle 1: Grundvergütung und Boni eines 100 kW<sub>el</sub> Biomasseheizkraftwerkes gemäß EEG 2009 [6]**

Grundvergütung	11,44 Cent/kWh
Kraft-Wärme-Kopplungs-Bonus	2,94 Cent/kWh
NawaRo-Bonus	6,86 Cent/kWh
Technologie-Bonus	1,96 Cent/kWh

Der Personalbedarf einer ORC-Anlage ist im Vergleich zu einem konventionellen Dampfkraftprozess sehr gering. Für die ORC-Anlage entfällt der Kesselwärter (Dampfkesselverordnung), es ist lediglich die Betriebssicherheitsverordnung einzuhalten. Dies hat zur Folge, dass die Anlage seltener vor Ort kontrolliert werden muss, sofern gewisse Sicherheitsvorkehrungen eingehalten werden. Der Personalbedarf beträgt dann zwischen drei und fünf Stunden pro Woche [5].

Die Ergebnisse einer detaillierten Wirtschaftlichkeitsrechnung eines 1,5 MW<sub>el</sub> Biomasseheizkraftwerkes zeigt Abbildung 3. Hierbei wird von einem thermischen Wirkungsgrad von 66 % und einem elektrischen Wirkungsgrad von 19 % ausgegangen, die Investitionskosten betragen 4300 €/kW<sub>el</sub>, die Instandhaltungskosten 2 % der Investition und der Kapitalzins beträgt 4,5 %. Der mittlere Brennstoffpreis wird mit 10 €/MWh angenommen, die entstehende Wärme wird mit einem Preis von 33 €/MWh bilanziert. Im wärmegeführten Betrieb wird die ORC-Anlage abgeschaltet, sobald kein Wärmebedarf besteht, im stromgeführten Betrieb wird von 7500 Betriebsstunden pro Jahr ausgegangen. In Zeiten ausbleibenden Wärmebedarfs wird die überschüssige Wärme über Tischkühler weggekühlt. Die Stromgestehungskosten errechnen sich aus der Differenz der Jahresgesamtkosten und der Einnahmen durch den Wärmeverkauf, dividiert durch die erzeugte Jahresstrommenge.

Es zeigt sich, dass im wärmegeführten Betrieb erst ab jährlichen Betriebsstunden von über 3000 h Stromgestehungskosten unter 10 Cent/kWh erreicht werden können. Ab ca. 4000 jährlichen Betriebsstunden ist der wärmegeführte Betrieb wirtschaftlich dem stromgeführten Betrieb vorzuziehen. Bei weniger als 3000 Betriebsstunden im Jahr weist der stromgeführte Betrieb deutliche Vorteile gegenüber dem wärmegeführten Betrieb auf.

### Forschungsgebiete

Für die Optimierung von ORC-Anlagen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Grundsätzlich kann über die Wahl des Arbeitsmittels sowie der Anlagenverschaltung die ORC-Anlage an die Randbedingungen der Wärmequelle angepasst werden [7]. Hierbei können exergetische Betrachtungen Optimierungspotenziale des Gesamtsystems aufzeigen [8]. Einige Optimierungsmaßnahmen können auf andere Anwendungsgebiete und Temperaturniveaus übertragen werden. Die Direktverdampfung, die in der Geothermie Stand der Technik ist, erfordert im Biomassebereich jedoch weitreichende Modifikationen. Eine weitere Möglichkeit der Effizienzsteigerung liegt in der Reduzierung von Exergieverlusten bei der Einkopplung der Wärme in den ORC. Durch den Einsatz von Fluidgemischen sollen diese Exergieverluste auf Grund der nicht-isothermen Verdampfung minimiert werden. Gleiches kann durch einen ORC im überkritischen Betrieb erreicht werden. Dies wird in den Abbildungen 3 und 4 verdeutlicht. Ist der Arbeitsdruck oberhalb des kritischen Druckes, so passt sich die Kurve des wärmeaufnehmenden Stromes (ORC-Fluid) besser an die Kurve der sensiblen Wärmequelle (wärmeabgebender Strom) an, die Exergieverluste der Wärmeübertragung werden minimiert. Der Wirkungsgrad steigt, da die mittlere Temperatur der Wärmeeinkopplung steigt. Abhängig vom gewählten Arbeitsfluid können diese Ergebnisse auch auf den Hochtemperaturbereich übertragen werden. Zu beachten ist jedoch die teils gegenläufige Bewegung der Wärmeübertragungseigenschaften. Liegt der Pinch Punkt wie in den Abbildungen 4 und 5 am Beginn der Vorwärmung, so ist aus thermodynamischer Sicht stets der höchstmögliche Arbeitsdruck zu wählen. die Nusseltzahl als Kennzahl für die Wärmeübertragung und somit der Wärmeübergangskoeffizient steigt jedoch zunächst mit zunehmendem Druck an, erreicht beim kritischen Punkt ein Maximum und fällt anschließend wieder ab. Exergoökonomische Betrachtungen zeigen, dass meist ein mittleres Druckniveau zu wählen ist. In einer Fallstudie mit Oktan als Arbeitsmittel lag

bei einem Druck von  $1,3 \cdot p_{\text{crit}}$  die höchste Amortisationszeit vor, bei einem Druck von  $0,8 \cdot p_{\text{crit}}$  verkürzte sich die Amortisationszeit relativ um 10 %, bei einem Druck von  $1,1 \cdot p_{\text{crit}}$  um 19 %.

### Zusammenfassung

Der ORC ist in manchen Bereichen bereits Stand der Technik, jedoch noch immer Gegenstand umfangreicher Forschungsarbeiten und Weiterentwicklungen. Ziel der Arbeiten ist es, Exergieverluste zu minimieren (Direktverdampfung, Fluidgemische) oder Investitionskosten einzusparen (Verzicht auf Thermoölkreislauf). Durch die in Deutschland gewährte Einspeisevergütung für Elektroenergie aus Biomasse können ORC-Anlagen sowohl im wärme- als auch im stromgeführten Betrieb wirtschaftlich betrieben werden. Stromgestehungskosten von unter 10 Cent/kWh sind bei genügend hohem Wärmebedarf zu erreichen. Die Wirtschaftlichkeit kann zukünftig durch eine Massenfertigung in Modulbauweise sowie genannte Optimierungsmaßnahmen weiter gesteigert werden. Insbesondere in der Nachverstromung von Abwärme aus Biogas-BHKWs oder industrieller Abwärme wird der Markt in den nächsten Jahren deutlich wachsen. Somit kann der ORC einen Teil dazu beitragen, Ressourcen zukünftig effizienter zu nutzen.

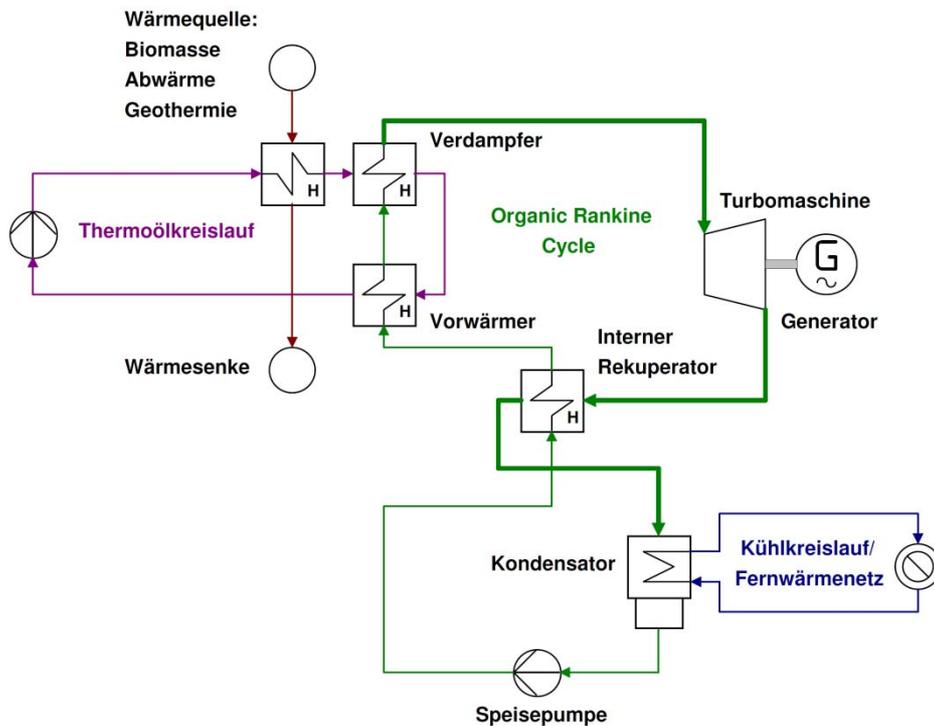


Abbildung 1: Anlagenschema eines Organic Rankine Cycle

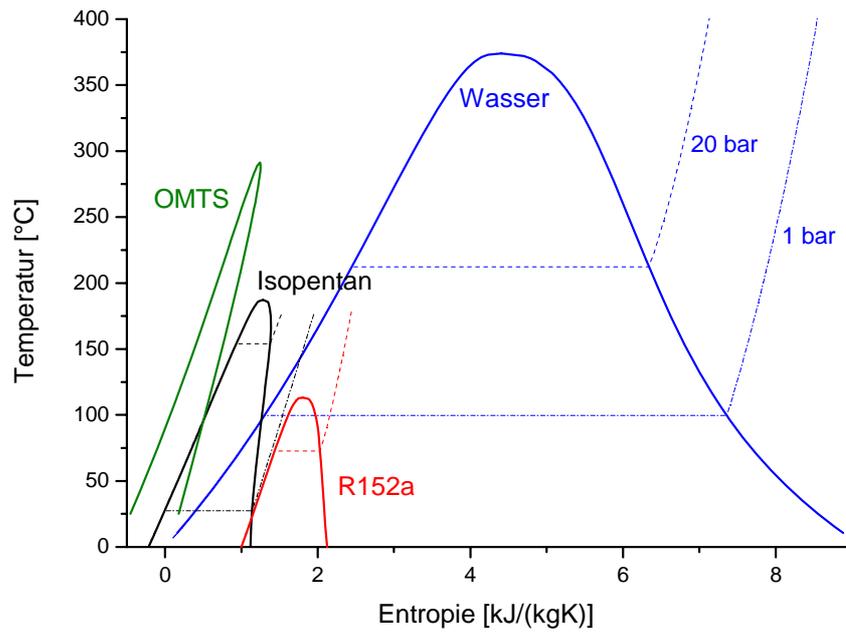


Abbildung 2:  $T,s$ -Diagramm unterschiedlicher Arbeitsmedien eines Dampfkraftprozesses

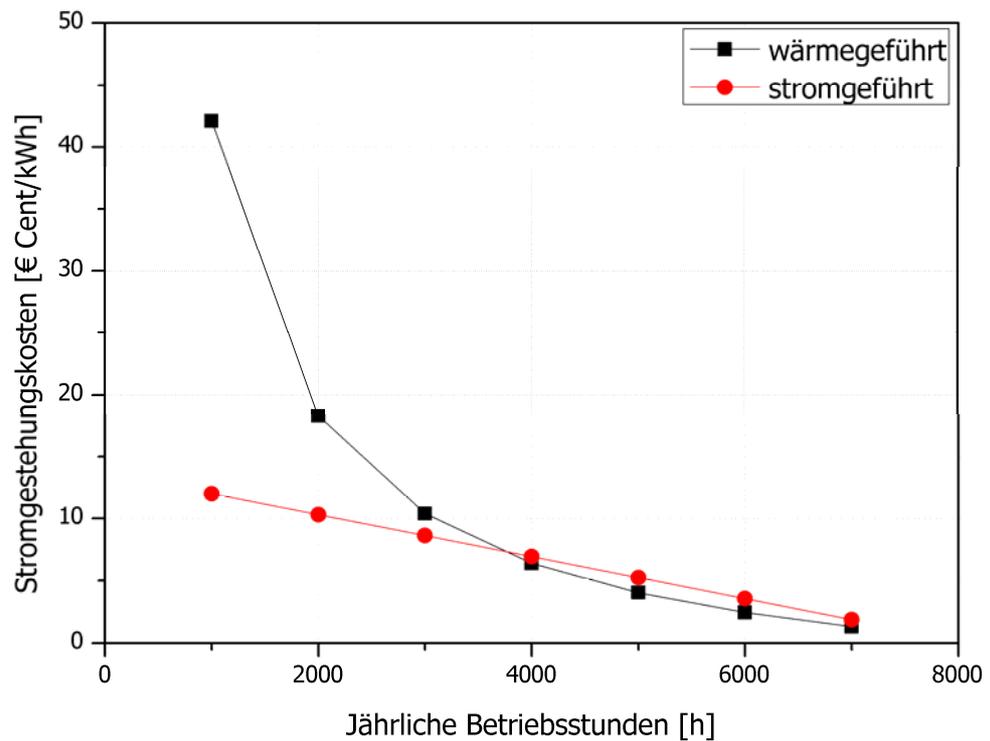


Abbildung 3: Stromgestehungskosten eines  $1,5 \text{ MW}_{el}$  Biomasseheizkraftwerkes im wärmegeführten und im stromgeführten Betrieb

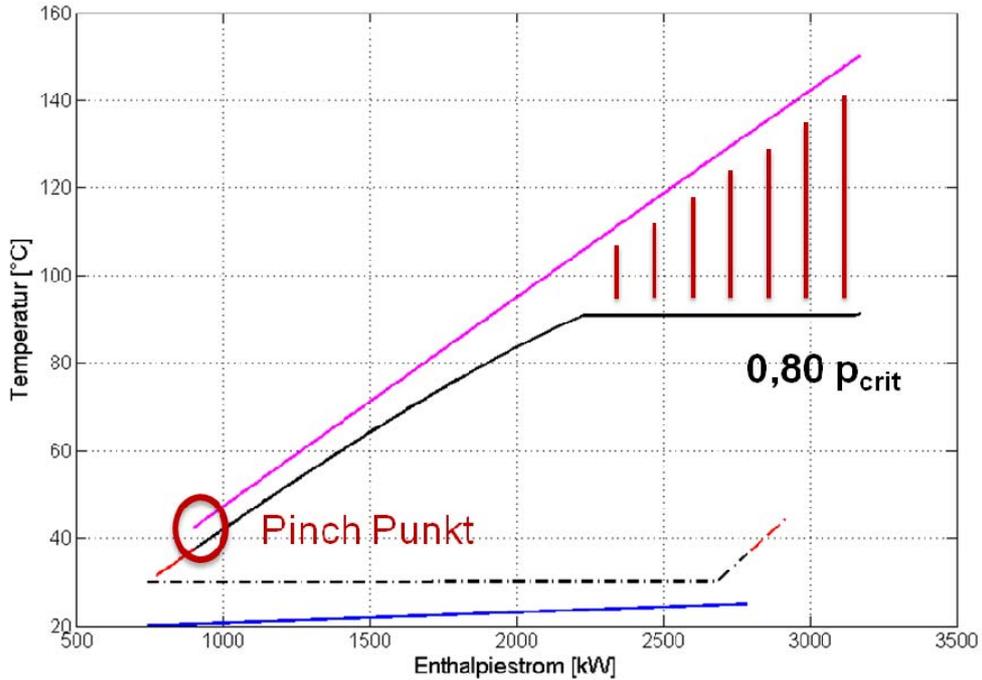


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Exergieverluste eines subkritischen ORC mit R227ea als Arbeitsmittel

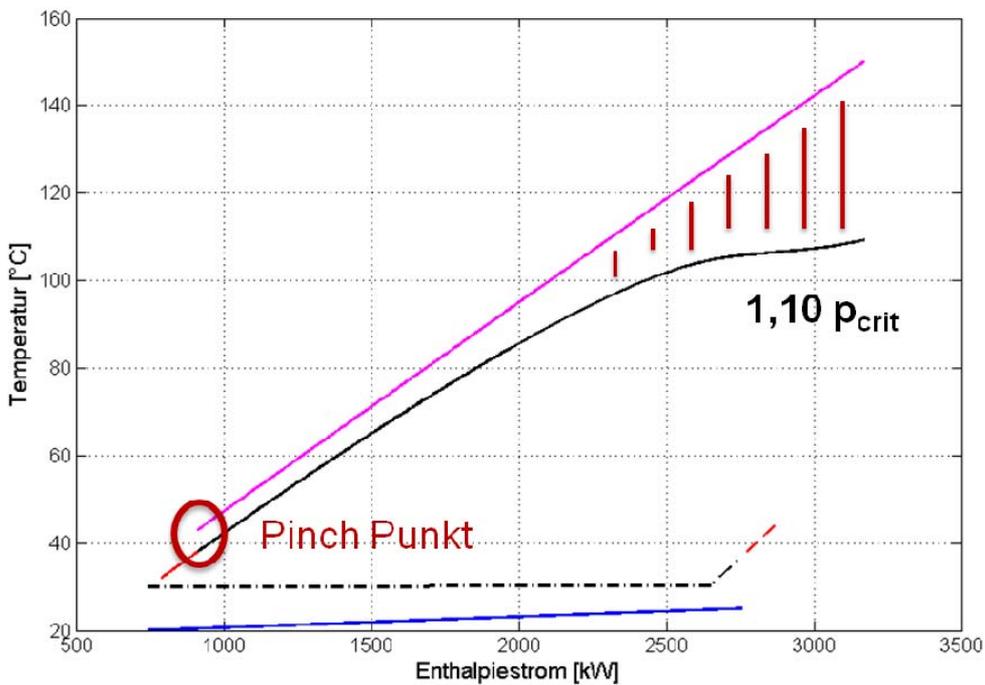


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Exergieverluste eines überkritischen ORC mit R227ea als Arbeitsmittel

## Literaturverzeichnis

- [1] S. K. Ray, G. Moss, Fluorochemicals as working fluids for small rankine cycle power units, *Advanced Energy Conversion* 6 (1966) 89–102.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure, Antriebsenergie aus Abwärme, VDI-Berichte, Band 377, ISBN 3-18-090377-5, Düsseldorf 1980.
- [3] Verein Deutscher Ingenieure, Gesellschaft Energietechnik, ORC-HP-technology, VDI-Berichte, Band 539, ISBN 3-18-090539-5, Düsseldorf 1984.
- [4] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Biogas-Messprogramm II, Gülzow 2009.
- [5] Turboden, Das Unternehmen und die Biomasse-Anwendungen: [http://www.turboden.eu/de/public/downloads/11-COM.P-3-rev.1\\_178914\\_BIOMASSA\\_TED.pdf](http://www.turboden.eu/de/public/downloads/11-COM.P-3-rev.1_178914_BIOMASSA_TED.pdf), eingesehen am 10.05.2011.
- [6] Bundesministerium für Justiz, Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energie-Gesetz), EEG 2009, [http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/eeg\\_2009/gesamt.pdf](http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/eeg_2009/gesamt.pdf).
- [7] U. Drescher, D. Brüggemann, Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 223–228.
- [8] F. Heberle, D. Brüggemann, Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation, *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1326–1332.



## **Direkte Rauchgaswärmenutzung über ORC-Anlagen**

*(Tim Schulzke, Fraunhofer UMSICHT)*

### **Stromerzeugung aus BHKW-Abgaswärme mittels ORC-Technik**

**Wilhelm Althaus, Björn Bülten, Tim Schulzke,**

**Fraunhofer UMSICHT, Osterfelder Strasse 3, 46047 Oberhausen**

### **Zusammenfassung**

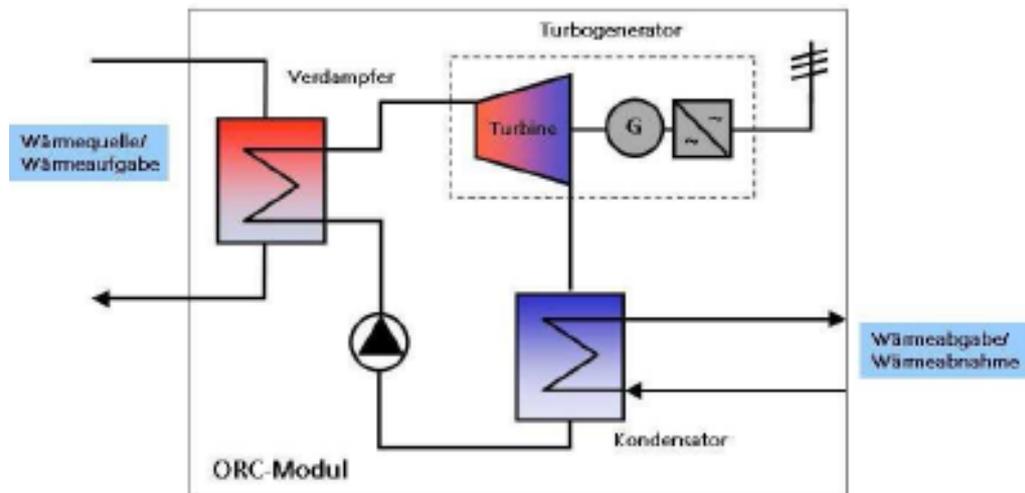
Fraunhofer UMSICHT verfolgt seit 2005 die Entwicklung eines in vielen Aspekten völlig neuen Prozess- und Technologiekonzepts mit gegenüber marktüblichen Lösungen sehr viel kleineren ORC-Prozessen. Es werden neue Arbeitsfluide eingesetzt, und ein neues Prozesssicherheitskonzept macht die Direktverdampfung und den Verzicht auf den bisher bei Hochtemperatur-ORC-Prozessen üblichen externen Wärmeträgerkreislauf für die Abgaswärmenutzung von Motoren möglich. Neue optimierte Bauarten von schnell-drehenden getriebelosen Turbogeneratoren mit Netzeinspeisung über einen Wechselrichter und selbst konstruierte Hochleistungswärmeübertrager kommen zum Einsatz.

Inzwischen wurden aus der Fraunhofer-Entwicklung heraus und u.a. im Rahmen eines vom BMWi geförderten Feldversuches drei vollautomatisch laufende, CE-zertifizierte Hochtemperatur-ORC-Prozesse zur Abgaswärmenutzung an Biogas- und Deponiegasmotoren in Betrieb gesetzt. Die Wirkungsgrade dieser Module erreichen bis 18% netto im Auslegungspunkt. Die Verfügbarkeiten konnten von anfänglich 6500 h/a auf derzeit etwa 7500 h/a gesteigert werden. Weitere ORC-Feldtestanlagen werden im laufenden Jahr 2011 gebaut und in Betrieb gesetzt. Die Entwicklung von ORC-Modulen bei Fraunhofer UMSICHT wird fortgesetzt. Marktreife mit einer verfügbaren insgesamt technisch ausgewogenen Modulkonstruktion und marktgerechten Herstellungspreisen wird in etwa 3 Jahren erwartet.

Auch der Betreiber muss beim funktionsgerechten Anschluss der vorgefertigt angelieferten ORC-Module sowie bei der aufmerksamen Betriebsüberwachung der vollautomatischen Anlagen angemessen mitwirken, um gute Betriebsergebnisse zu erhalten.

### **1 Einordnung des ORC-Prozesses**

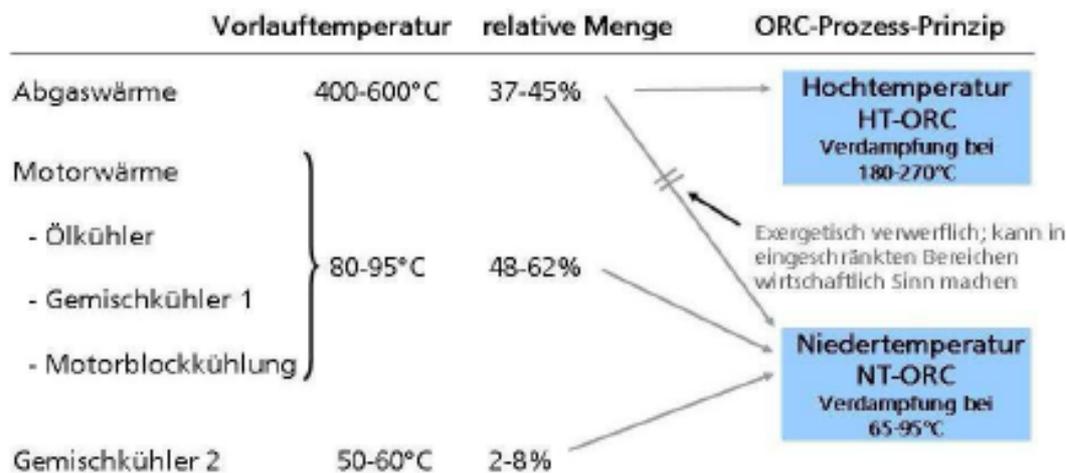
ORC-Prozesse sind Kreisprozesse nach Art des Dampfkraftprozesses, in denen allerdings anstelle von Wasser ein organisches Arbeitsfluid eingesetzt wird. Eine Wärmezufuhr wird zur Verdampfung eines Arbeitsfluides verwendet. Der gespannte Dampf wird auf eine Turbine aufgegeben und dort elektrische Leistung produziert. Der Dampf wird kondensiert und das Kondensat mit einer Speisepumpe unter Druck Richtung Verdampfer gefördert. Um den Kreisprozess auch mit niedrigeren Antriebstemperaturen betreiben zu können, werden statt Wasser organische Arbeitsfluide eingesetzt (Organic Rankine Cycle ORC).



**Abb. 1: Prinzip eines ORC-Prozesses**

Pragmatisch können ORC- Prozesse z.B. nach der Verdampfungstemperatur in Niedertemperatur, Hochtemperatur und Mitteltemperatur-Prozesse eingeteilt werden.

Generell stellt ein Verbrennungsmotor verschiedene Abwärmestufen zur Verfügung.

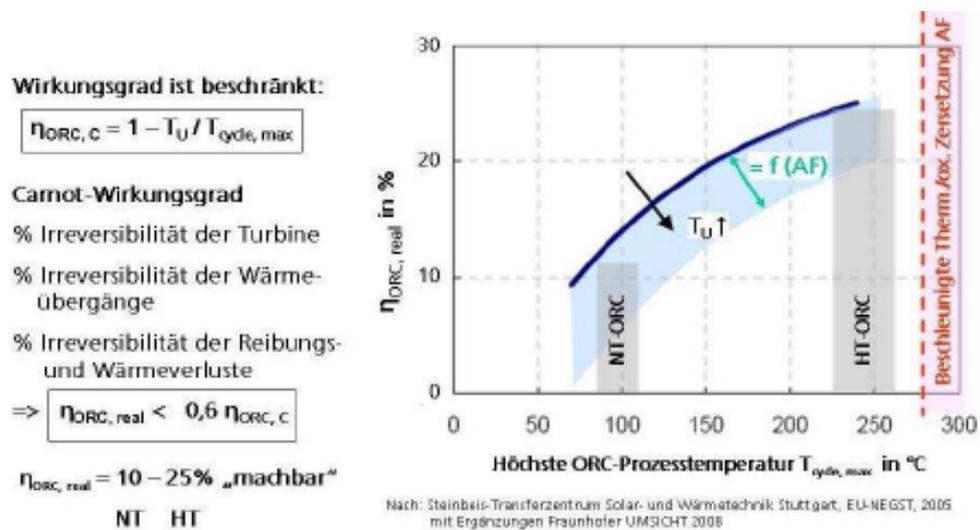


**Abb. 2: Abwärmquellen eines Motoren-BHKW und Hauptprozessvarianten nachgeschalteter ORC-Prozesse**

Die HT-Abwärme (Abgaswärme) des Motors ist natürlich auf Wärmeträgerkreisläufe mit niedrigerer Vorlauftemperatur übertragbar, dies ist jedoch mit einem Exergieverlust und dem Effizienzverlust einer möglichen Verstromung mittels ORC verbunden. Weil aber noch ein erheblicher Teil der Motorenabwärme ohnehin auf einem Temperaturniveau unterhalb von 100°C anfällt und Niedertemperaturwärme an vielen Standorten inzwischen auch anderweitig eingesetzt wird, entwickelt Fraunhofer separate Prozesse für die effiziente Verstromung von Motorenabwärme und Abgaswärme. Zurzeit werden separate Nachschaltlösungen entwickelt, eine starke Integration mit dem Motorenmodul selbst (Schaltanlage, Aufbau, Rückkühlung) erscheint aber bei einem ausreichenden Reifegrad möglich. Rein Wirtschaftlich kann

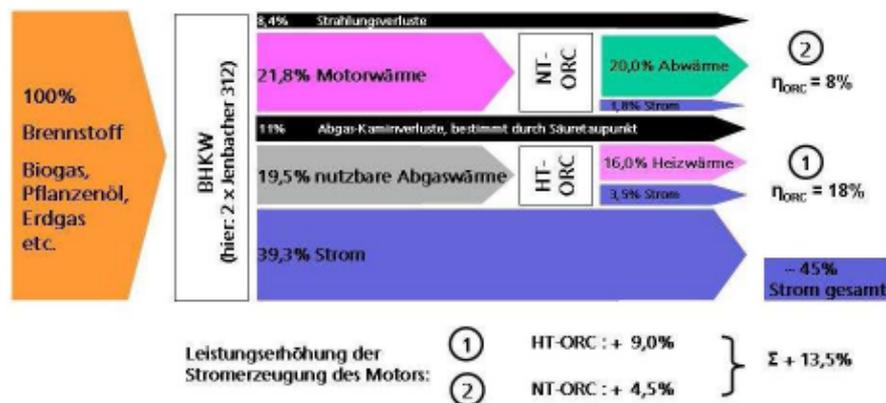
ein NT-ORC-Prozess auch zur Verstromung der Abgaswärme Sinn machen (!), wenn die sonstige Abwärmenutzung (z. B. für Heizungszwecke) schon weitergehend ausgebaut ist, der Motor für verfügbare HT-ORC-Prozesstypen zu klein ist bzw. einen zu geringen Abgaswärmeanfall hat oder wenn die Vergütung des erzeugten Stroms geringer ausfällt. In allen drei Fällen erweisen sich die etwas geringeren spezifischen Investitionskosten der NT-ORC-Prozesse gegenüber dem HT-ORC-Prozess evtl. als wirtschaftlich vorteilhaft.

Der maximal realisierbare Wirkungsgrad von ORC-Prozessen ist thermodynamisch begrenzt und dabei vornehmlich vom Temperaturniveau der Verdampfung und der Kühlung des Kreisprozesses abhängig. Seriöse Entwickler gehen vom Erfahrungswert aus, dass vom Wirkungsgrad eines Idealprozesses (Carnot-Wirkungsgrad), der durch die höchste und niedrigste Prozesstemperatur bestimmt wird, in der Realität nur etwa 50-60 % erzielbar sind. Zusätzlich muss beachtet werden, dass oberhalb von 270°C Prozesstemperatur die Thermostabilität der interessanten ORC-Arbeitsmedien sehr stark abnimmt und daher mit zunehmender thermischer Zersetzung zu rechnen ist.



**Abb. 3: Realistisch maximal erzielbare Wirkungsgrade von ORC-Prozessen in Abhängigkeit von der obersten Prozesstemperatur (Verdampfungstemperatur)**

Die Gesamtenergiebilanz des Packages Motor+ORC wird durch dem Motor nachgeschaltete ORC-Prozesse positiv verändert: Insgesamt wird aus dem Brennstoff mehr Strom und weniger Abwärme erzeugt.



**Abb. 4: Erzielbare Wirkungsgrade bei Kombination von Standard-Biogasmotoren moderner Bauart mit ORC-Prozessen zur Abwärmeverstromung**

## 2 Markt

Mittels ORC-Prozessen kann ungenutzte BHKW-Abwärme zu zusätzlichem Strom gewandelt werden. Dies gilt nicht nur für Biogasmotoren, sondern für andere Sondergase (Deponiegas, Klärgas, Grubengas), Verbrennungsmotoren und Verbrennungsturbinen ganz allgemein. Biogasmotoren und Deponiegasmotoren stellen hier allerdings einen interessanten Einstiegsmarkt für eine derartige Abwärmenachverstromungstechnologie bei relativ kleinen Leistungen dar. Die Abwärme an Biogas- und Deponiegasmotoren wird meist unzureichend genutzt und steht dann unentgeltlich zur Verfügung. Die Regelungen des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) gewährleisten relativ hohe Einspeisevergütungen des erzeugten Stroms (derzeit bei üblichen Anlagen: ~ 9-18 ct/kWh). Hierdurch reduziert sich für Betreiber die Amortisationszeit der zurzeit noch relativ teuren kleineren ORC-Module. für die Nutzung der Abwärme von Verbrennungsmotoren. Biogasmotoren von 400-800 kWel stellen wegen der Stromvergütungsreduzierung des EEG ab 500 kWel jahresmittlerer Einspeiseleistung die meistverkauften Biogasmotoren dar. Marktgängig sind Motoren bis etwa 1.500 kWel. An über 80% der Anlagen steht ungenutzte Abgaswärme der Motoren > 7.500 Volllastbetriebsstunden (VLBh) zur Verfügung. Die Motorwärme wird meist nur zu etwa 2.000 VLBh zur Fermenterheizung und für kleinere Gebäudeheizungen eingesetzt, zunehmend Verbreitung findet allerdings auch der Einsatz der Motorwärme für Trocknungszwecke (z.B. Holzlohtrocknung, Getreidetrocknung, Klärschlamm-trocknung).

Am Markt werden bislang wirklich kommerziell nur ORC-Prozesse mit Leistungen > 300 kWel (ORC) angeboten. Die etablierten ORC-Prozess-Hersteller UTC/Turboden/ITUSA, GMK/DE, Adoratec-Maxxtec/DE sowie ORMAT und Barber-Nichols (beide USA) konzentrieren sich auf Geothermie, Biomassefeuerungen und große industrielle Abwärmeverstromung als Absatzmärkte. Viele Entwicklungen diverser Kleinunternehmen im kleineren Leistungsbereich kommen wegen erheblicher Schwierigkeiten bei der applikationsgerechten Prozessrealisierung nicht voran oder wurden sogar abgebrochen. Wenige Entwickler, z.B. Fraunhofer/Cyplan (DE), UTC (USA), Calnetix/GE Jenbacher (USA) und Tri-O-Gen (NL) betreiben eine fortgeschrittene Entwicklung von ORC-Prozessen zur Nutzung an Motoren. Die technologischen Ansätze bzw. Leistungsbereiche der Prozessentwicklungen differieren. Der tatsächliche Entwicklungsstand bei ORC-Prozessen für Motorenabwärme ist für interessierte Kunden bisher i. d. R. wenig transparent. Deshalb ist die Frage nach Referenzprozessen und die Kontaktaufnahme mit dem örtlichen Betreiber generell empfehlenswert.

Zusätzliche Stromerzeugung aus ungenutzter Abgaswärme und Motorwärme der Biogasmotoren erhöht den Wirkungsgrad der Biogas- und Deponiegasverstromung erheblich. Die Motoren weisen heute je nach Größe und Alter zwischen 35 und 42% Wirkungsgrad auf. Hochtemperatur-ORC-Prozesse zur Abgaswärmenutzung, wie sie von Fraunhofer bereits realisiert wurden, können schon heute die elektrische Erzeugungsleistung aus dem Brennstoff um bis zu 10% anheben. Perspektivisch sind bei weiterer Optimierung von Gasmotoren und ORC-Prozessen für die Biogas- und Deponiegasverstromung mit kurzfristig verfügbarer zuverlässiger Technik bis 50% Gesamtwirkungsgrad erreichbar. Damit nähert sich der elektrische Wirkungsgrad dieser dezentralen MuD-Anlagen (Motor und Dampf) der Größenordnung moderner Kohlekraftwerke (!).

Das Marktinteresse von Betreiberseite ist deshalb erheblich, wie allein die bei Fraunhofer UMSICHT auch ohne große Marketing-Aktivitäten nahezu täglich auflaufenden Nachfragen nach Motor-ORC-Anlagen belegen – ohne dass in den letzten 5 Jahren tatsächlich eine geeignete Technologie Verbreitung gefunden hat. Die

große Marktnachfrage wird auch durch die immer noch große Anzahl - zum Teil nur vorgeblicher - Entwickler und Technologie- und Geschäftsmodellanbieter aufgezeigt, die versuchen hier einen profitablen Markteinstieg zu finden, ohne tatsächlich funktionierende Technik vorweisen zu können.

### 3 Stand der ORC-Entwicklung bei Fraunhofer UMSICHT

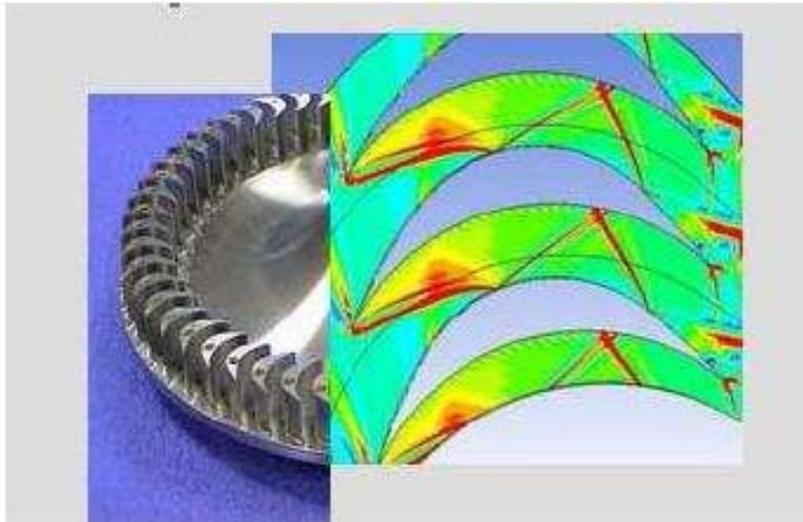
Fraunhofer verfolgt seit 2005 kontinuierlich die Entwicklung einer Produktlinie kleiner ORC-Module.

Die bei abwärmegetriebenen ORC-Prozessen obligatorische Funktionsprüfung bei realen Kunden – sie ist für abwärmegetriebene ORC-Prozesse die einzig finanzier-bare Funktionsprüfung und der einzige aus Betreibersicht akzeptierte Funktionsbeleg – muss für die Entwickler *und* den Endkunden vertretbar bleiben. Fraunhofer UMSICHT konzentriert sich deshalb gemeinsam mit seinem Entwicklungspartner Cyplan Ltd. in den zurzeit laufenden Projekten auf die Realisierung funktionstüchtiger, vollständig automatisch laufender Feldanlagen. Die Konstruktion der ORC-Module wird dabei in relativ kleinen, pragmatisch unter Risikogesichtspunkten tragbaren Schritten verbessert. Bei kleinen Entwicklungsschritten/ Änderungen bleibt das zusätzliche Funktionsrisiko tragbar und dennoch gibt es bei jeder Anlagengeneration Verbesserungen und auch Kostenreduzierungen.

ORC Modul Typ	A-100 (HT)	A-50 (HT)	W-25 (NT)
Ausgangsspannung	50 Hz, 400V, 3Phasen		
Nettoleistung	60-120 kW <sub>el,orc</sub>	30-60 kW <sub>el,orc</sub>	20-40 kW <sub>el,orc</sub>
Modul			
Wirkungsgrad	18% / 14%	18% / 14%	8% / 6%
Vollast / 50% Teillast			
Wärmezufuhr	<b>Abgas aus Motoren</b>		<b>Motorkühlwasser</b>
Temperatur	<b>400-500°C</b>		<b>85-110°C</b>
Zugeführte Wärmeleistung	430-670 kW <sub>th</sub>	215-335 kW <sub>th</sub>	330-500 kW <sub>th</sub>
Maximale Prozesstemperatur	300°C	300°C	75°C
Kühlung max	Trockenkühler 550 kW <sub>th</sub>	Trockenkühler 275 kW <sub>th</sub>	Direktverflüssiger 460 kW <sub>th</sub>
Abmaße ORC-Modul L x B x H	ca. 10 x 2,5 x 3,3 m	ca. 7 x 2,5 x 3,3 m	ca. 5 x 2,5 x 3,3 m
Gewicht	15.000 kg	10.500 kg	6.000 kg

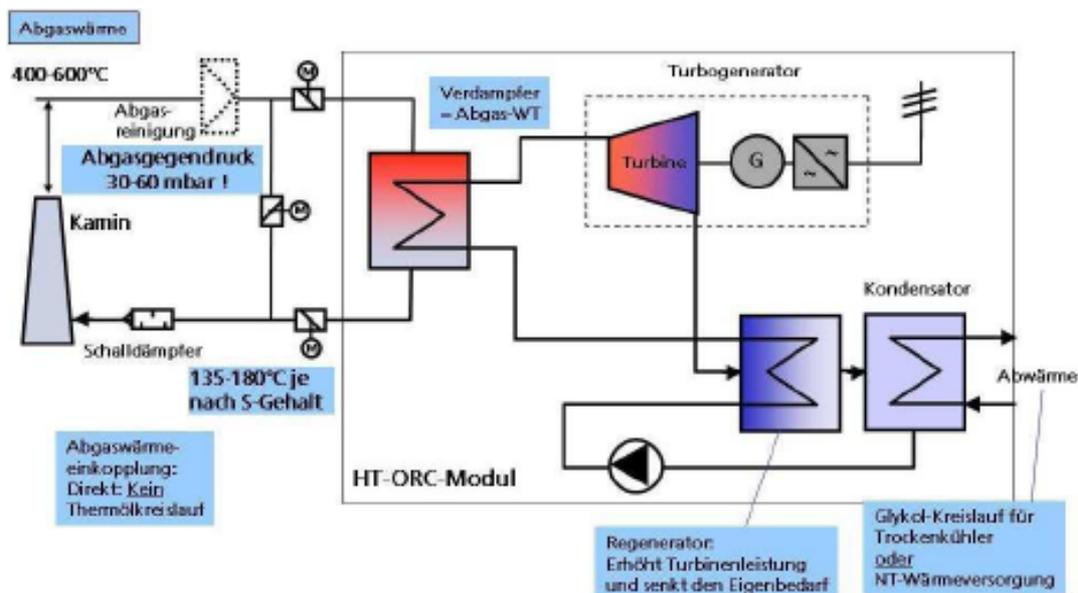
**Abb. 5: Entwicklungsspezifikation Fraunhofer ORC-Module von 2007**

Fraunhofer verwendet für die abgasgetriebenen Hochtemperatur-ORC-Prozesse ein innovatives Gesamtkonzept.



**Abb. 6: Moderner Turbogenerator zum Einsatz in ORC-Prozessen, Geometrieoptimierung**

Als Turbogenerator wird eine fortschrittliche, schnelllaufende Gleichdruckturbine mit Synchrongenerator und Stromeinspeisung über Wechselrichter verwendet. Die Umsetzbarkeit hoher Enthalpiegefälle und großer Expansionsverhältnisse sowie eine fertigungs- und wartungsfreundliche Gesamtkonstruktion mit ausschließlich statischen Dichtflächen zur Umgebung zeichnen diesen Turbogenerator aus. Das Konzept hat sich schon jetzt im ORC-Modul Typ A-100 bewährt und wird gemeinsam mit dem Turbinenhersteller weiter verfeinert. Bedingt durch die Arbeitsfluide liegen Überschallströmungen beim Durchgang durch Düsen und Laufrad der Gleichdruckturbinen vor, so dass eine besonders sorgfältige Optimierung der geometrischen Verhältnisse notwendig ist.



**Abb. 7: Prinzipieller Aufbau des HT-ORC-Prozesses und externe Beschaltung der HT-ORC-Prozess-Schnittstellen bei Motoren**

Ein Thermoölkreislauf als Prozessschnittstelle zum Gasmotor macht bei kleinen ORC-Prozessen allenfalls eingeschränkt Sinn. Der Thermoölkreis bildet zwar eine einfache

Schnittstelle, jedoch verteuert dieser das System insgesamt deutlich. Außerdem werden dadurch Schwierigkeiten vom ORC-Modul in die Peripherie und damit in die Betreiberverantwortlichkeit verlagert. Thermoölkreisläufe sind einem umfangreichen, kosten treibenden dichten Netzwerk technischer Regeln unterworfen, die restriktiv viele Sicherheitseinrichtungen und Redundanzen nötig machen. Zusätzlich werden ein weiterer Wärmetauscher und zwei Umwälzpumpen für heißes Thermoöl notwendig. Ein Thermoölkreislauf zur Abgaswärmezuführung erhöht deshalb die Investitionskosten, Betriebskosten und den Eigenbedarf, verringert die Effizienz und erhöht das Gesamtbetriebsrisiko. Im Gegensatz hierzu sinken die Systemkosten durch eine Direktverdampfung erheblich und der Anlagenaufbau wird insgesamt einfacher. Einem direkten Anschluss der Abgaswärme an den ORC ist daher Präferenz zu geben, wenn die Abgaszuführung nicht zu lang und aufwendig wird. Diese Randbedingung ist bei Stationärmotoren meist einzuhalten.

Ein weiteres Kennzeichen des Prozesses bei Fraunhofer UMSICHT ist deshalb diese Direktverdampfung, d.h. der Verzicht auf den externen Wärmeträgerkreislauf mit Thermoöl und dessen Umwälzung. Das Sicherheitskonzept des Prozesses berücksichtigt die Direktverdampfung und wurde u. a. durch mehrfache CE-Zertifizierung der schon gebauten ORC-Module durch den TÜV anerkannt.

Als Verdampfer, Rekuperator und Kondensator werden besondere Bauarten von Hochleistungswärmeübertragern verwendet. Von diesen Apparaten werden gute Wärmeübergänge, niedrige Druckverluste, sehr gute Dichtigkeit, Preiswürdigkeit und Kompaktheit gefordert. Auch wenn das technische Optimum eigentlich bei besser skalierbaren Plattenwärmeübertragern liegt, werden bei Fraunhofer aus wirtschaftlichen Gründen bevorzugt Rohrbündelwärmeübertrager verwendet. Durch Entwicklung von Detailverbesserungen wurden hier vorrangig Wärmeübertragungseffizienz, Vermeidung von Unterkühlungen, Materialaufwand und Fertigungskosten optimiert. Zu beachten ist, dass bei vielen Motoren bedingt durch relativ hohe Partikelfrachten im Abgas eine Reinigungsmöglichkeit der ORC-Verdampfer/Abgaswärmetauscher auf der Abgasseite möglich sein muss. Als Speisepumpe des ORC-Kreisprozesses kommt jeweils eine mehrstufige Hocheffizienz-Speisepumpe mit Magnetkupplung zur Anwendung. Damit kann beim Prozess insgesamt auf störanfällige rotierende Dichtungen für brennbare und explosive ORC-Arbeitsfluide verzichtet werden.

Für die ORC-Prozesse werden bei Fraunhofer neue, sehr preiswerte Kohlenwasserstoffe als Arbeitsfluide des Kreisprozesses eingesetzt, die aus Labortestreihen und Kreislaufberechnungen als sehr gut geeignet hervorgegangen sind.

Bei Fraunhofer wurde im Rahmen eines laufenden BMWi-Förderprojektes ORC-Module die Konzeption der ORC-Module, Typen A-100 und A-50 zur Abgaswärmenutzung von Biogas-BHKWs fortgeführt. Vom Typ A-100, der sich für Motoren zwischen etwa 800 und 1.700 kW<sub>el</sub> eignet, wurden bereits drei Stück, jeweils in modifizierter Ausführung gebaut. Alle Module wurden CE-zertifiziert, in die Betriebsführung durch die Standortbetreiber übergeben und laufen seit 1 bis 3 Jahren im Vollautomatik-Betrieb. Inzwischen kann auf Erfahrungen aus einer Gesamtbetriebsdauer von rund 40.000 Betriebsstunden aufgebaut werden. In diesem Jahr werden weitere 5 ORC-Module gefertigt. Diese neugebauten Module werden voraussichtlich noch in 2011 in Betrieb genommen, optimiert, CE-zertifiziert und verschiedenen Betreibern übergeben.

Bisher wurden bei den abgaswärmegetriebenen Hochtemperaturprozessen Typ A-100 die Wirkungsgradentwicklungsziele leicht übertroffen. Die Verfügbarkeiten der an den

Endkunden bereits übergebenen Prozesse Typ A-100 belaufen sich auf 6.500 h/a (erste Anlage im ersten Betriebsjahr) und heute etwa 7.500 h/a.

Die erreichten Kostenreduzierungen bei den von Fraunhofer bisher erstellten Feldanlagen vom ORC-Modul Typ A-100, liegen im Bereich der vor Entwicklungsbeginn vorkalkulierten Erwartungen. Die Modulkosten bewegen sich langsam auf den anlegbaren Preis zu.

#### 4 Einbindung der ORC-Module am Standort

Was oft übersehen wird – der Aufbau am Standort und die äußere Beschaltung eines ORC-Prozesses ist bei Motorenanlagen durchaus nicht unbedeutend für das Gesamtsystem und sollte separat Beachtung finden.

Bei der Abgaswärmeeinkopplung des HT-ORC-Prozesses liegt der zulässige Abgasgegendruck (= Enddruck Turbolader - Druck Austritt Kamin) meist zwischen 30 und 60 mbar. Der für den ORC-Direktverdampfer selbst zulässige Abgasdruckverlust wird durch Druckverluste in Schalldämpfer, Abgasweg und ggf. in der Abgasbehandlung weiter verringert. Die Abgaszuführung zum ORC-Modul ist durch drei Abgasklappen umschaltbar, die den Bypass-Betrieb des Motors bei stillstehendem ORC erlauben. Zuletzt muss bei den HAT-ORC-Prozessen das „kalte Ende“ beachtet werden. Die Auslegung für Kondensationsbetrieb mit Trockenkühler oder als KWK-Anlage für Wärme-Auskopplung (Vorlauf ca. 70°C-75°C mit Verlust an Verstromungswirkungsgrad machbar) ergibt eine jeweils eine etwas unterschiedliche Lösung beim Kreisprozess und eine andere Einbindung am Standort.

Deponiegas-/Biogas-  
Container-BHKW mit Jenbacher  
Clean Air Filter



Vorhandene Aufstellfläche  
für ORC-Modul mit Jenbacher  
Clean Air Filter und  
Abgaskamin



Anlieferung des vorgefertigten  
ORC-Moduls  
Typ A-100



Aufgestelltes ORC-Modul



Abgasanschluss des ORC  
Moduls am Jenbacher Clean  
Air Filter



ORC-Modul mit zugehörigem  
Trockenkühler



**Abb. 8: (Bilderserie) Aufstellung eines ORC-Moduls Typ A-100 am Standort Altenberge**

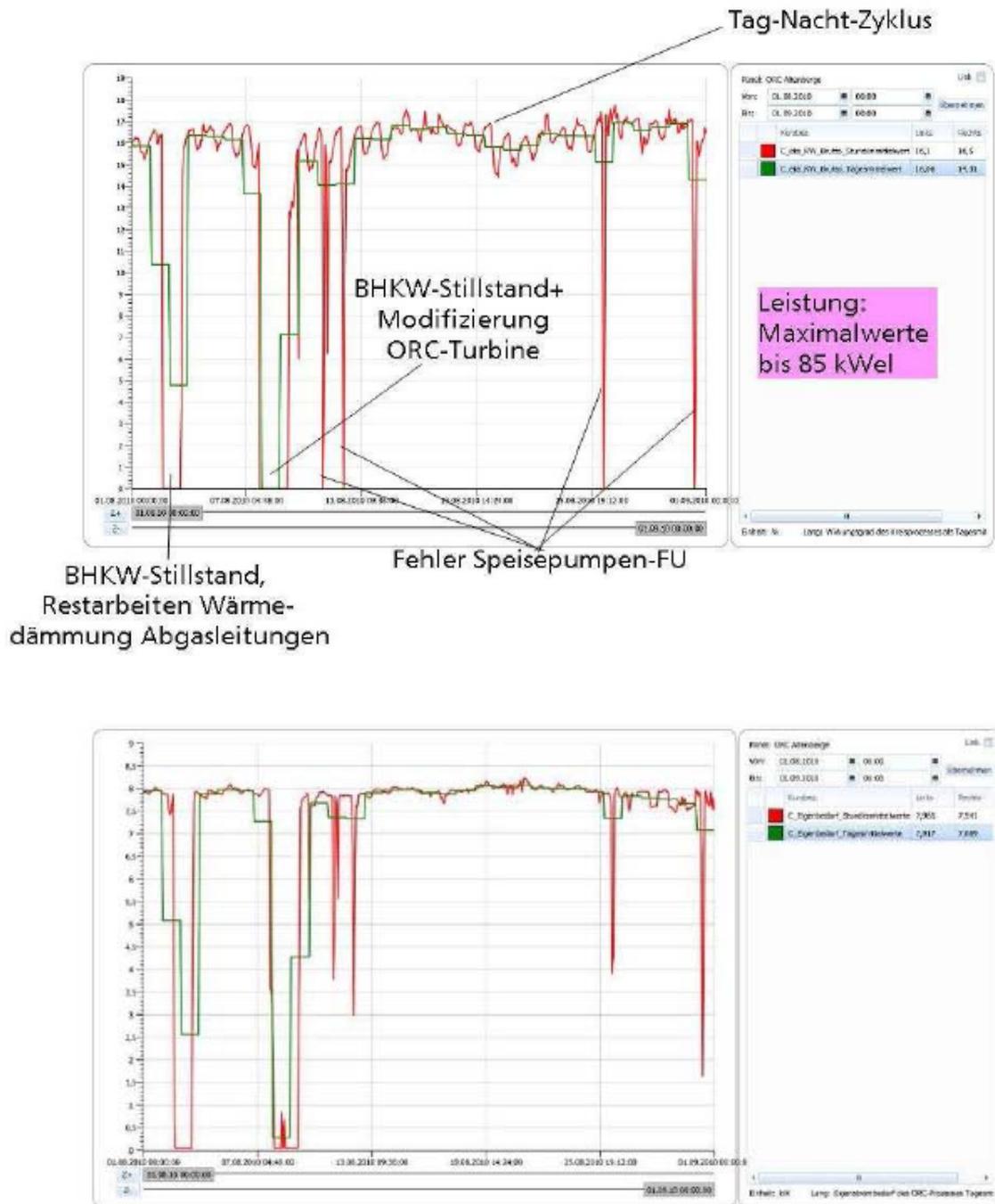
Standortspezifisch zu planen und auch wirtschaftlich zu berücksichtigen sind folgende Einzelpositionen bei Aufstellung und Einbindung von ORC-Prozessen an einem Motorenstandort: Fundamente/Gerüste, abgaskühlseitige Verrohrung und Instrumentierung, Abgasklappen, ggf. Saugzüge, Trockenkühler/Kühlung/Wärmeauskopplung, kühlseitige Verrohrung und Instrumentierung, elektrische Einspeisung, Zählung, Kommunikation, einfache, rundum offene Überdachung des ORC-Moduls.

Genehmigungsseitig erforderte die Errichtung der ORC-Anlagen i. d. R. die Einreichung einer Änderungsmeldung bei der zuständigen BImSch-Behörde sowie die Anmeldung der zusätzlichen Eigenerzeugungsanlage beim Netzbetreiber.

## **5 Technische und betriebliche Erfahrungen an den bisher laufenden ORC Modulen zur Abgaswärmenutzung**

Eigentlich trivial - der Betrieb eines ORC-Prozesses ist nur bei ausreichender Wärmeleistung am laufenden Motor möglich. Desto mehr Abwärme zur Verfügung steht desto mehr Leistung hat ein angeschlossener ORC-Prozess.

Läuft der Motor in der Teillast, läuft auch der ORC-Prozess in Teillast. Es ist eine modul- und auslegungsspezifische zugeführte Wärmemindestleistung notwendig, damit der ORC-Prozess netto zusätzlichen Strom produzieren kann. Verfügbarkeitseinschränkend auch für den ORC-Prozess sind außerdem generell ein unstabiler Motorenbetrieb und Netzschwarzfälle. Reguläres An- und Abfahren des ORC-Moduls erfordert aufgrund der recht großen aufzuheizenden bzw. abzukühlenden Massen jeweils Zeiten im Stundenbereich. Netzschwarzfälle stellen hohe Anforderungen an die Sicherheitskette im ORC-Prozess und machen zum Teil nach erneuter Netzschaltung das Quittieren aufgelaufener Störmeldungen vor dem automatischen Wiederstart notwendig. Bei Verwendung von Trockenkühlern wirkt der Tag-Nacht-Außentemperaturzyklus leistungsbeeinflussend auf den Kreisprozess. Abbildung 8 zeigt Kenngrößen eines abgasgetriebenen Hochtemperaturprozesses Fraunhofer Typ A-100 am Standort Altenberge an einer alten Jenbacher-Maschine J 316 in dem der Inbetriebnahme des ORC folgenden Monat August 2010.



**Abb. 9: Tagesmittlerer und stundenmittlerer Wirkungsgrad sowie Eigenbedarf (in kWel) eines abgasgetriebenen HT-ORC-Prozesses Typ A-100**

Dieses Beispiel zeigt zweierlei:

- Der Betrieb vollautomatisch laufender ORC-Anlagen ist auch für kleine Baugrößen möglich und schon heute ohne viele oder längere ungeplante Ausfälle bei guten Wirkungsgraden realisierbar.
- Auch kleine und prinzipiell undeutende Störungen können zur Abschaltung von ORC-Prozessen führen. Gerade bei Prozessen in Entwicklung und konservativer Sicherheitsphilosophie ist sicher ein aufmerksamer Betreiber gefordert, der dann eine Kontrolle der gestörten Baugruppe vornehmen muss und danach den ORC-Prozess i. d. R. zügig wieder starten kann.

Auch ORC-Prozesse kleinerer Leistung erfordern kleinere Wartungshandgriffe durch den Betreiber:

- mindestens ein täglicher Kontrollgang mit Kontrolle der wichtigsten Betriebsdaten
- Kontrolle und ggf. Wiederinbetriebsetzung durch Quittierung von Störmeldungen
- Reinigung eines kleineren Filters im Abstand einiger Wochen bis Monate
- Nachfüllen von Betriebsmitteln (Kühlsole, Arbeitsfluid, Schmierfluid) im Abstand einiger Monate
- je nach Abgasqualität ggf. abgasseitige Abreinigung des Direktverdampfers in angemessenen Zeitabständen.
- je nach Luftqualität luftseitige Abreinigung des Trockenkühlers und Austausch der Schaltanlagenzulufffilter in angemessenen Zeitabständen

Ein aufmerksamer Betreiber kann sich abzeichnende Probleme bereits im Vorfeld durch aufmerksame Beobachtung der Prozessdaten anhand anlagenintegrierter Visualisierung oder externe Auswertung an der Datenschnittstelle ausgewiesener Daten, bei Bedarf auch in Kooperation mit Fraunhofer UMSICHT erkennen und präventiv dagegen angehen. Eine allein reagierende Betriebsführung des ORC-Moduls führt zu schlechterer Verfügbarkeit und schlechteren Betriebsergebnissen.

Das Hauptproblem bei den auftretenden echten Störungen und ihrer Beseitigung bei kleinen ORC-Modulen ist ein oft unübersichtliches Fehlerbild und eine (noch) geringe Betriebserfahrung des Trouble-Shooting-Teams bei Fraunhofer UMSICHT. Zwar erleichtern Monitoring und Fernüberwachung die Fehleranalyse und die Wartung vor Ort, aber das Team befasst sich heute zum Teil immer noch relativ lange mit prinzipiell kleineren Problemen durch

- Montagefehler,
- Versagen oder nicht spezifikationsgerechte Funktion eingesetzter Komponenten infolge rauer Betriebsbedingungen bei Außenbetrieb
- kleinen Fehler in der Steuerung bzw. bei Einstellparametern der Steuerung.

Auch relativ lange Reaktionszeiten der ORC-Module und damit lange Verzugszeiten bis zum Auftreten von Fehlern bzw. bis zur Erreichung eines wieder eingelaufenen Betriebszustandes nach Vornehmen von Änderungen erschweren zum Teil eine zügige Problemlokalisierung.

Dennoch haben die ORC-Module schon heute einen Entwicklungsstand erreicht, in dem an den meisten Standorten der Motor häufiger Störungen aufweist als das ORC-Modul - nur erfordert die Behebung einiger Störungen am ORC-Modul zum Teil infolge eines nicht professionell aufgebauten Servicenetzwerkes noch längere Zeit als bei den Motoren.

## **Stromerzeugung mit Holz-Mikro-KWK(K) Stirlingmotoren für Wohngebäude und Kleingewerbe**

(Dr. Bodo Gross, IZES)

### **Stromerzeugung mittels Holz**

Eine attraktive Lösung zur Stromherstellung aus Holz bietet die Stirlingtechnologie. Grundsätzlich sind Stirlingmotoren in der Lage jede Abwärmequelle zu nutzen, bzw. die Verbrennung findet extern statt. Dabei unterscheidet man zwei verschiedene Prinzipien der Kombination von Wärmequelle und Stirlingmotor. Zum einen spricht man von integrierten, zum anderen von add-on Konzepten. Beide Konzepte haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile, wobei letztendlich die geplante Anwendung entscheidend für die Auswahl der geeigneten Lösungsvariante ist. Bei integrierten Konzepten (z.B. SunMachine oder OTAG) ist der Brennstoff meist monovalent vorgegeben und die daraus resultierende Wärmequelle im Komplettgerät integriert, d. h. Wärmequelle und Stirlingmotor sind eine Einheit und nicht voneinander getrennt zu betreiben. Bei Add-On Konzepten (z.B. Biokompakt oder Hoval) sind die Wärmequelle und damit der Brennstoff zum Antrieb des Stirlingmotors prinzipiell frei wählbar, d. h. die Wärmequelle kann auch unabhängig vom Stirlingmotor betrieben werden. Der Stirlingmotor selbst kann bei Bedarf mit jeder beliebigen Wärmequelle kombiniert werden. Beide Konzepte sind nicht immer klar voneinander zu trennen. So ist beispielsweise der Stirling DK Motor prinzipiell für jede Abwärme geeignet, wird derzeit aber nur im Komplettpaket in Kombination mit einem Holzvergaser und einem auf die Bedürfnisse des Stirlings optimierten Abhitzekeessels angeboten. In Deutschland sind derzeit zahlreiche Hersteller bzw. nachgeordnete Vertriebsorganisationen mit ersten Kleinserien am Markt aktiv.

Das dänische Unternehmen Stirling DK wurde im Jahr 2004 gegründet. In den 90iger Jahren wurde an der Technischen Universität von Dänemark ein Ein-Zylinder Stirlingmotor (Beta Konfiguration) für Biogas entwickelt. Der Motor hatte etwa 9 kW elektrische Leistung; bei einem elektrischen Wirkungsgrad von etwa 20 %. Vom gleichen Entwicklungsteam wurde ein Stirlingmotor, (Vier-Zylinder-Variante in Siemensenanordnung) mit einer elektrischen Leistung von 35 kW entwickelt. Seit 2006 befinden sich die Anlagen in Deutschland und Österreich im Feldtest bzw. der Markteinführung. Anfangs wurde der Motor als Add-On Variante für große HHS Kessel (Mavera) entwickelt und vertrieben. Derzeit wird die Anlage als Konzeptlösung in Kombination mit einem Holzvergaser angeboten. In Deutschland werden derzeit bei den Stadtwerken Flensburg zwei solcher Komplettanlagen im Heizkraftwerk Langbollig betrieben.

Das Unternehmen Hoval mit Hauptsitz in Liechtenstein entwickelt Biomasseheizkessel in Kombination mit Stirlingmotoren. Zwei verschiedene Projektansätze werden von Hoval untersucht. Zum einen wird ein Stückholzkessel (AgroLyt) mit einem Stirlingmotor kombiniert und zum anderen wird ein Pelletkessel (BioLyt) zur Bereitstellung der Antriebswärme des Stirlingmotors getestet. Bei beiden derzeitigen Projektansätzen wird ein Stirlingmotor mit 1kW elektrischer Leistung eingesetzt. Parallel zu den derzeitigen Feldtests wird ein 3 kW Motor entwickelt. Dieser soll dann in Kombination mit einem 50 – 70 kW Pelletkessel betrieben, bzw. nach erreichter Serienreife am Markt angeboten werden.

In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche weitere Konzepte entwickelt, welche in erster Linie aus technischen Gründen und zusätzlich auch aus wirtschaftlichen Gründen am Markt nicht erfolgreich eingeführt werden konnten. Prominent in dieser Hinsicht ist das seit April 2010 insolvente Unternehmen SunMachine. Bis zu diesem

Zeitpunkt wurden etwa 400 Maschinen an Kunden ausgeliefert. Derzeit ist die Zukunft des mit Holzpellets befeuerten Stirlingmotors noch ungeklärt. Im Oktober 2010 wurde SunMachine vom sächsischen Unternehmen Sachsen Stirling GmbH aus Eppendorf übernommen. Weitere Aktivitäten bzw. Stand der weiteren Planung, Zeitplan der Markteinführung oder Revision des Konzepts sind nicht bekannt. Dementsprechend ist die Zukunft der für Holzpellets entwickelten Maschine noch nicht abschließend geklärt. Weitere Informationen liegen nicht vor.

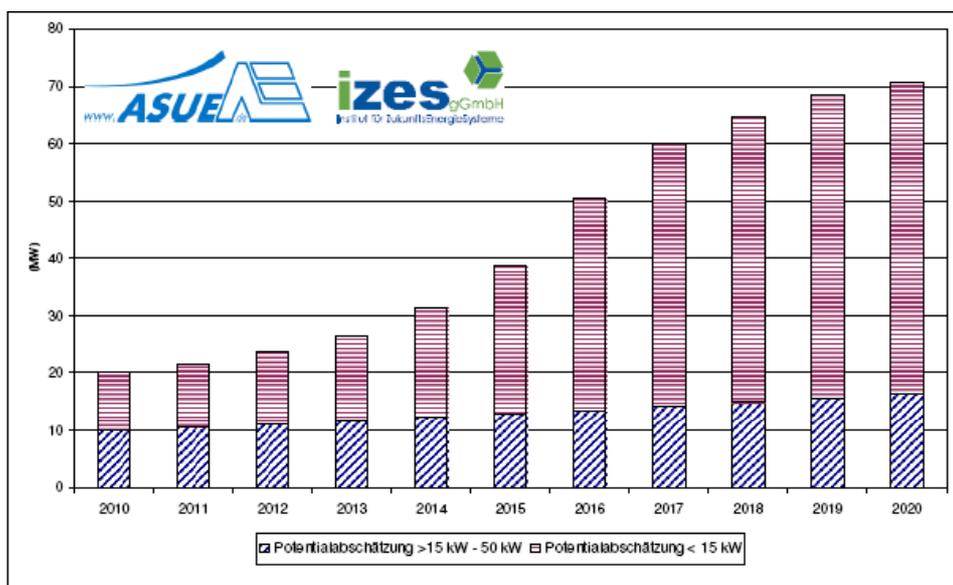
Die Forschungsgesellschaft Joanneum Research mit Sitz in Graz ist ein unternehmerisch orientierter Innovations- und Technologieanbieter, welcher auch im Bereich von Stirlingmotoren aktiv ist. In der Vergangenheit wurden bei Joanneum Research zwei Add-On Geräte mit elektrischen Leistungen von 30 kW bzw. 3 kW entwickelt. Der Prototyp des 30 kW Motors nutzt die Abwärme eines HHS Kessels im Ökopark Hartberg in der Nähe von Graz. Der 3 kW Motor wurde im Rahmen des EU Projekts Polysmart entwickelt und eingesetzt. Als „Brennstoff“ diente auch hier die Abwärme aus der Holzverbrennung.

Weitere derzeit aktive Akteure sind beispielsweise die Firmen Quasar Engineering, Frauscher Energietechnik, ve Ingenieure und Stirling Power Module.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zum gegenwärtigen Zeitpunkt am Markt keine (wirtschaftlich zu betreibenden) biomassebefeuerten Stirling-KWK- Anlagen zur Verfügung stehen. Es gibt einige technisch vielversprechende Ansätze, z. B. die Stückholzkessel-Stirling Kombination (mittelfristig auch eine Pelletkessel-Stirling Kombination) der Firma Hoval oder die Holzvergaser-Stirling Kombination von Stirling DK. Die Pelletversion des dampfbetriebenen Lineargenerators der Firma OTAG / Button Energy hat ebenfalls einen vergleichsweise hohen Entwicklungsstand erreicht. Mit insgesamt etwa 30 im Feld getesteten Geräten steht jetzt die Markteinführung laut OTAG noch im Jahr 2011 bevor.

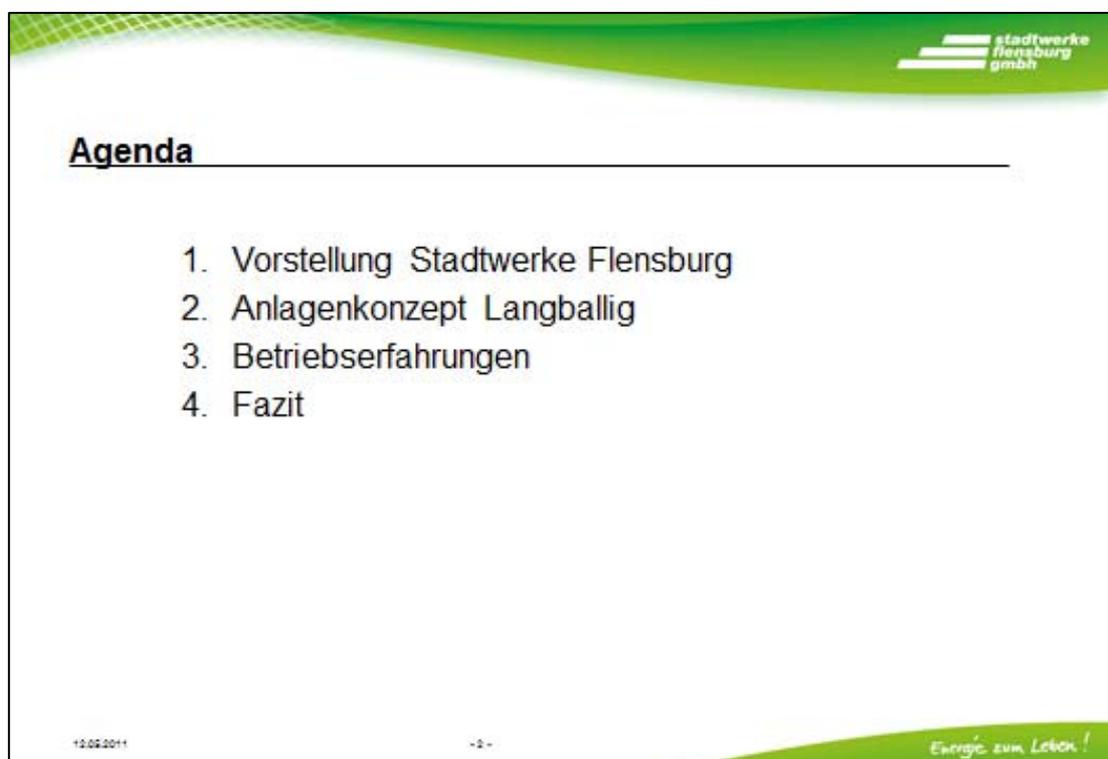
Potentialanalyse für KWK-Anlagen mit elektrischen Leistungen bis 50 kW<sub>el</sub>

Die Potentialanalyse für KWK-Anlagen im Leistungsbereich bis 50 kW<sub>el</sub> für die Jahre 2011 bis 2020 wurde im Auftrag der ASUE durchgeführt. Die Potentiale wurden anhand historischer Zulassungszahlen (Zeitraum 2000 – 2010) auf Grundlage der vom BAFA zur Verfügung gestellten Daten sowie durch Auswertung mehrerer einschlägiger Studien abgeschätzt. In Summe wird für die Jahre 2011 – 2020 ein Zubau von insgesamt etwa 450 MW erwartet. Siehe dazu folgende Abbildung.



## Stirlingtechnologie in Kombination mit Holzvergasung im Holzheizkraftwerk Langballig – Konzept und Betriebserfahrungen

(Karsten Müller-Jannßen, Stadtwerke Flensburg)



 stadwerke  
flensburg  
gmbh

## Agenda

1. Vorstellung Stadtwerke Flensburg
2. Anlagenkonzept Langballig
3. Betriebserfahrungen
4. Fazit

12.02.2011 -2- Energie zum Leben!

 stadwerke  
flensburg  
gmbh

## 1. Historie Stadtwerke Flensburg

- 1854 Versorgung mit Stadtgas
- 1881 Beginn der Wasserversorgung
- 1894 Elektrizitätsversorgung
- ab 1969 kontinuierlicher Ausbau des Fernwärmenetzes
- 1985 Anschluss Glücksburg
- heute u.a.:
  - Versorgungsnetzabdeckung (Fernwärme) von ca. 98%
  - Wärmeexport nach Padborg
  - Bundesweiter Stromvertrieb



12.02.2011 -4- Energie zum Leben!

**stadtwerke  
flensburg  
gmbh**

## 1. Vorstellung Stadtwerke Flensburg

- Bilanzsumme
- Gezeichnetes Kapital
- Umsatzerlöse 2010 (vorläufige Hochrechnung)

231 Mio Euro
56 Mio Euro
311 Mio Euro



- Erzeugungsanlagen am Standort Flensburg
 

elektrische brutto Kraftwerksleistung	170 MW
Fernwärmeleistung im Kraftwerk	393 MW
	(zuzügl. 333 MW dezentrale Reserve)

- Kenndaten Fernwärme
 

Leitungslänge	609 km
Wärmeabsatz	ca. 1.000 GWh/a
Anschlussdichte	98%

12.02.2011
- 5 -
Energie zum Leben!

**stadtwerke  
flensburg  
gmbh**

## 1. Biomasseaktivitäten Stadtwerke Flensburg



1. **HKW Flensburg:** Mitverbrennung von HHS in Wirbelschichtkesseln
2. **Langballig:** Fernwärmenetz und Erzeugungsanlage auf Basis HHS
3. **Tarp:** Fernwärmenetz und Erzeugungsanlage auf Basis biogener Brennstoffe
4. **Süderbrarup:** Fernwärmenetz auf Basis Biogasanlage
5. **Schuby:** Biogasanlage zur Erzeugung von Biomethan aus Zuckerrüben
6. **Brunsbüttel:** Biomasseheizkraftwerk 5 MWel

12.02.2011
- 6 -
Energie zum Leben!

 stadwerke  
flensburg  
gmbh

## Agenda

1. Vorstellung Stadtwerke Flensburg
2. Anlagenkonzept Langballig
3. Betriebserfahrungen
4. Fazit

12.02.2011 -T- Energie zum Leben!

 stadwerke  
flensburg  
gmbh

## 2. Anlagenkonzept Langballig

➔ Grunddaten:

Errichtung Heizzentrale:	1997
1. Erweiterung Heizzentrale	2005
Netzlänge:	5.070 m
Versorgte Einheiten	165
Wärmeabgabe 2010:	ca. 3.000 MWh
Leistung Holzkessel:	900 kW <sub>therm</sub>
Leistung Ölkessel:	645 kW <sub>therm</sub>



➔ Brennstoffnutzung im Holzkessel exergetisch nicht optimal  
Teillastverhalten des Holzkessel im Sommerbetrieb  
z. T. problematisch

12.02.2011 -R- Energie zum Leben!



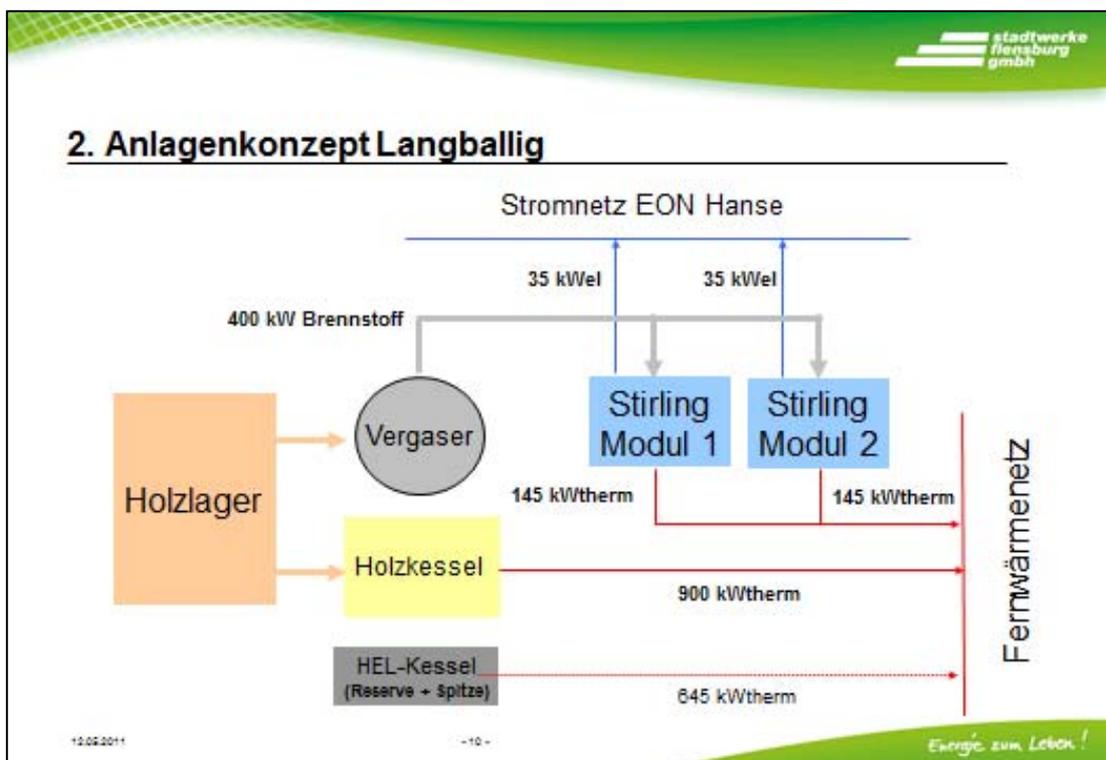
## 2. Anlagenerweiterung Langballig 2010

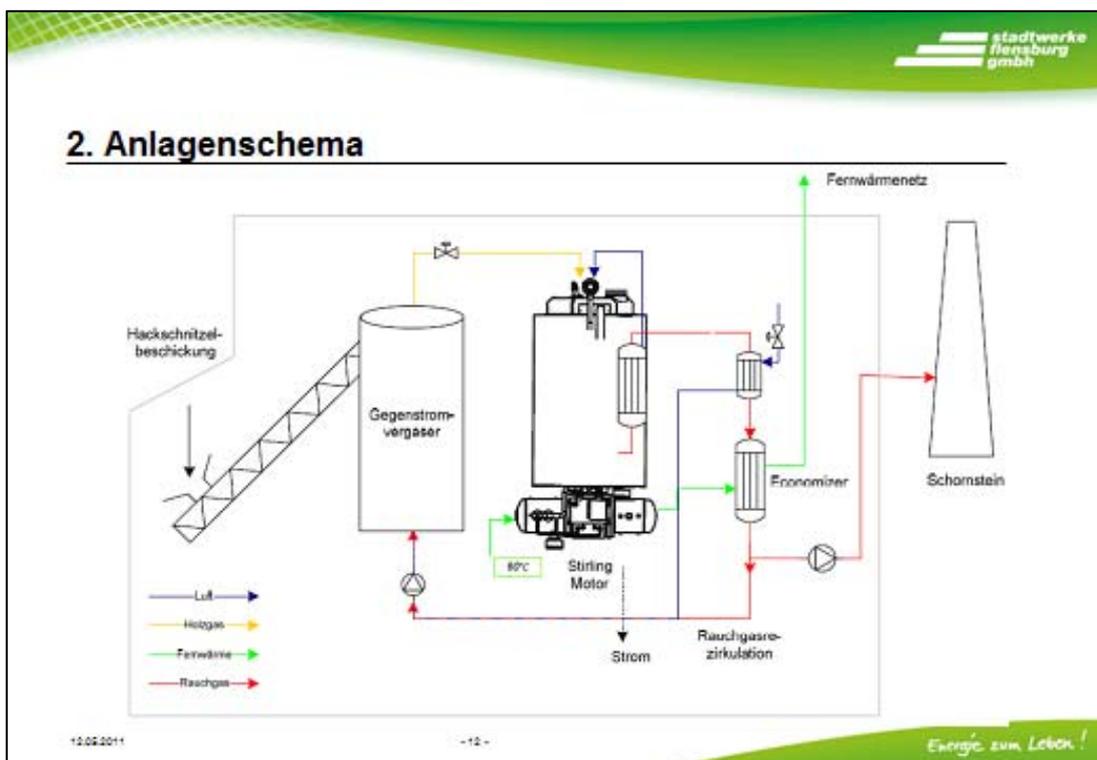
**Erweiterung des Gebäudes und Installation von:**

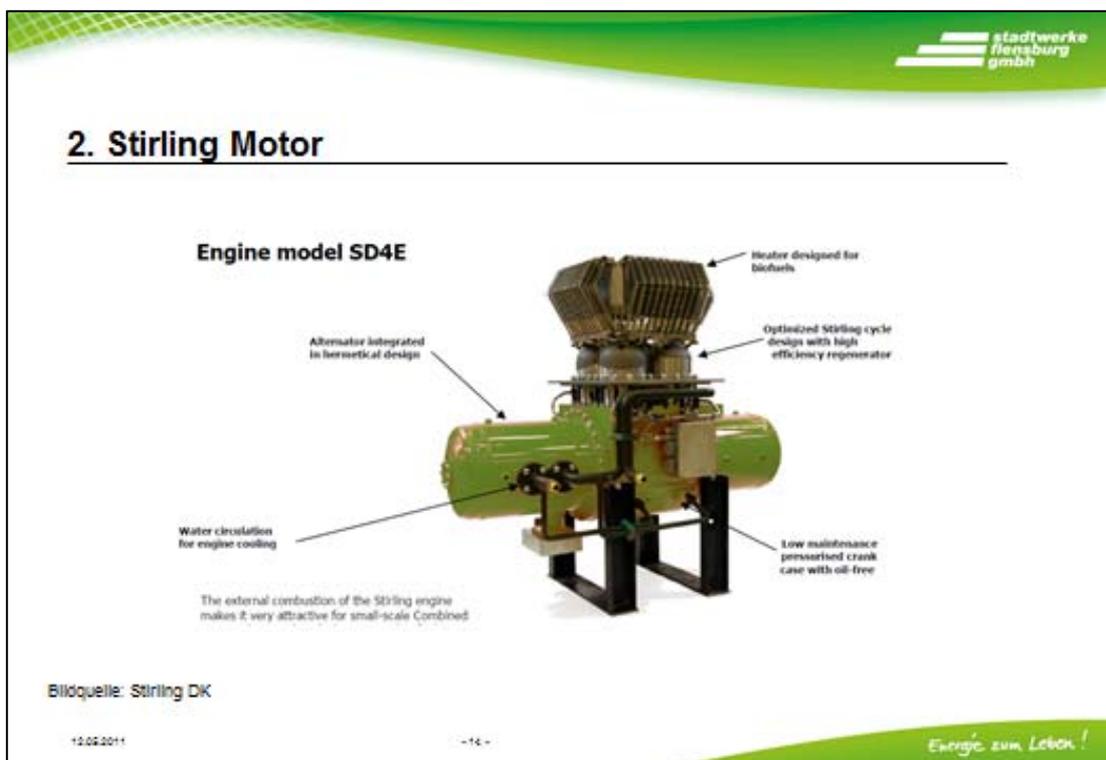
- ➔ 1 Stück Festbettvergaser zur Erzeugung von Holzsynthesegas
- ➔ 2 Stück Stirling Motore zum Betrieb mit Holzsynthesegas

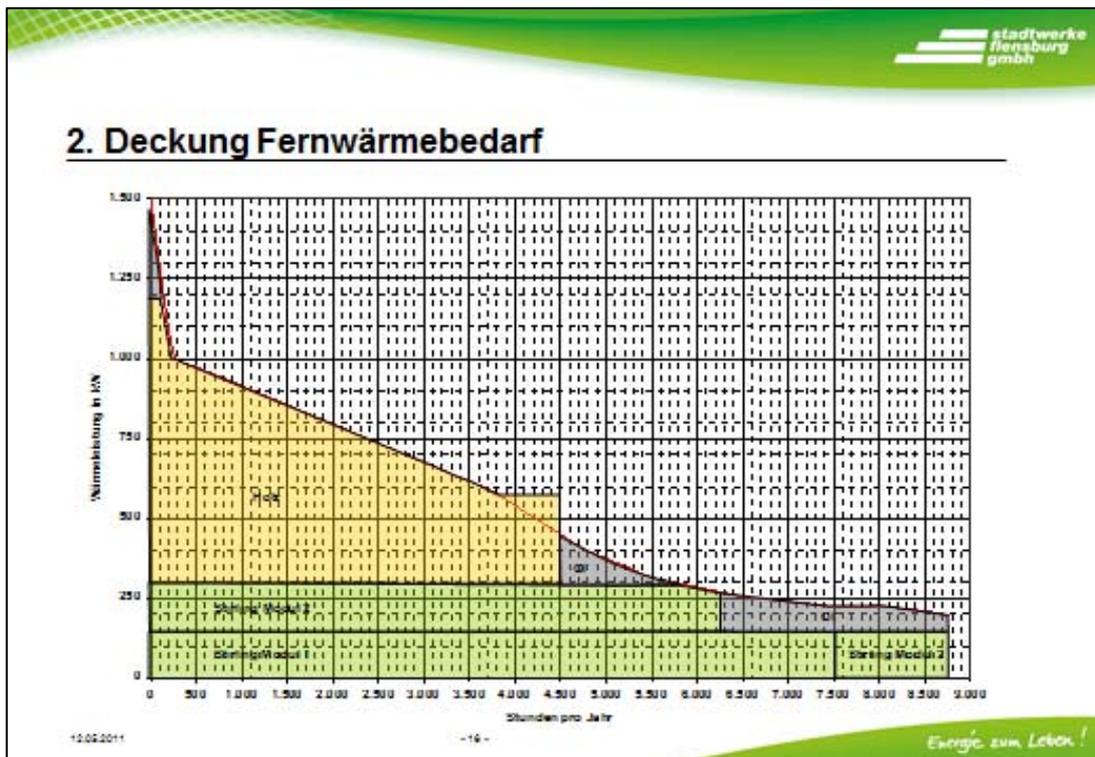
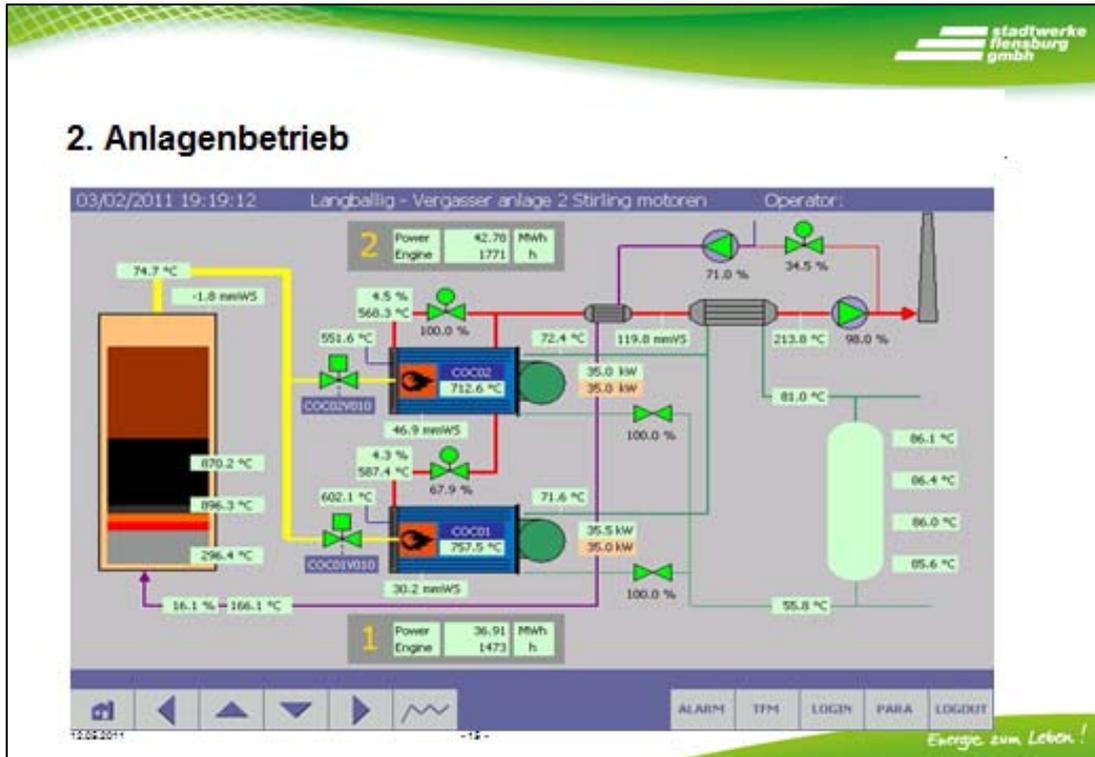
Elektrische Leistung:	35 kW je Modul
Elektrischer Wirkungsgrad:	17,5 %
Thermische Leistung:	145 kW je Modul
Thermischer Wirkungsgrad:	72,5 %

12.06.2011 - 9 - Energie zum Leben!











**Agenda**

1. Vorstellung Stadtwerke Flensburg
2. Anlagenkonzept Langballig
- 3. Betriebserfahrungen**
4. Fazit

12.02.2011 -17- Energie zum Leben!



**3. Betriebserfahrungen**

**Brennstoff- und Aschesystem:**

- Anforderung an Wassergehalt Holz (mind. 35%)  
je nach Jahreszeit ggf. schwierig zu erfüllen
- Unterschiedliche Anforderungen von Kessel und Vergaser an Holzfeuchte  
bei gemeinsamer Brennstoffzuführung betrieblich nicht unproblematisch
- Einhaltung der Brennstoffspezifikation (G 50 nach ÖNORM)  
dringend erforderlich (gehacktes Stammholz)
- Eintrag feiner Vergaserasche aus gemeinsamen Aschecontainer  
durch Kesselsaugzuggebläse in den Holzkessel

12.02.2011 -18- Energie zum Leben!



### 3. Betriebserfahrungen

#### Vergaser und Holzgassystem

- Bildung von Teerskondensat durch Undichtigkeiten (Optimierung läuft)
- Wasserkondensatanfall im Schornstein  
Vermutliche Ursache: häufiges An- und Abfahren der Anlage während IBN und Undichtigkeiten  
→ Optimierung Kondensatabführung und Beseitigung Undichtigkeiten

#### Stirling Motor

- zuverlässiger Betrieb auch in Teillast
- Vorgesehene Vorlauftemperatur für Fernwärme wird noch nicht erreicht  
→ Änderung der hydraulischen Einbindung
- Prognostizierte Lebensdauer Kolbenringe (4.000 h) konnte nicht erreicht werden  
→ Neue Version Kolbenringe ist von SD in Vorbereitung

12.02.2011 -19- Energie zum Leben!



### 3. Betriebserfahrungen

#### Emissionen

- CO < 100 mg/Nm<sup>3\*</sup>
- NOx < 150 mg/Nm<sup>3\*</sup>
- Staub < 10 mg/Nm<sup>3\*</sup>

} Werte unter Grenzwerten TA Luft

- Schall  
gemessen: in 1 m Abstand von beiden Motoren 86 dB(A)\*\*  
→ Schallschutzhauben für Motore und Schalldämmmaßnahmen im Gebäude

\* Messung Stirling DK    \*\*eigene Messung

12.02.2011 -20- Energie zum Leben!



**Agenda**

1. Vorstellung Stadtwerke Flensburg
2. Anlagenkonzept Langballig
3. Betriebserfahrungen
4. Fazit

12.02.2011 -21- Energie zum Leben!



**4. Fazit**

- ➔ Holzvergasung mit Stirling Motor ist adäquate Möglichkeit zur Stromerzeugung aus Biomasse für kleine Anlagengrößen
- ➔ Bei Kombination mit Biomassekessel sind unterschiedliche Anforderungen an Brennstofffeuchte zu beachten (getrennte Brennstoffwege)
- ➔ Nach Behebung „Kinderkrankheiten“ ist wirtschaftlicher Betrieb bei ca. 7.000 Betriebsstunden/a unter Rahmenbedingungen EEG zu erwarten

12.02.2011 -22- Energie zum Leben!



**Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Stadtwerke Flensburg GmbH  
Batteriestraße 48

24939 Flensburg

Karsten Müller-Janßen  
Geschäftsbereichsleiter  
Anlagenbau und Projekte

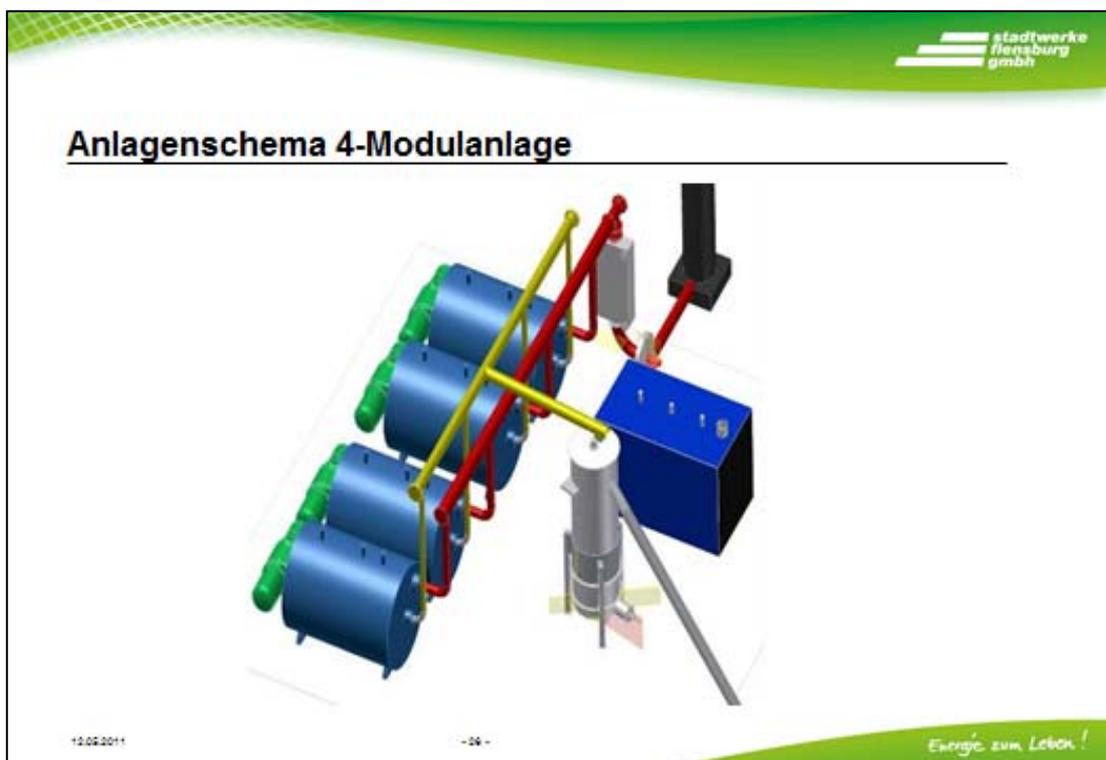
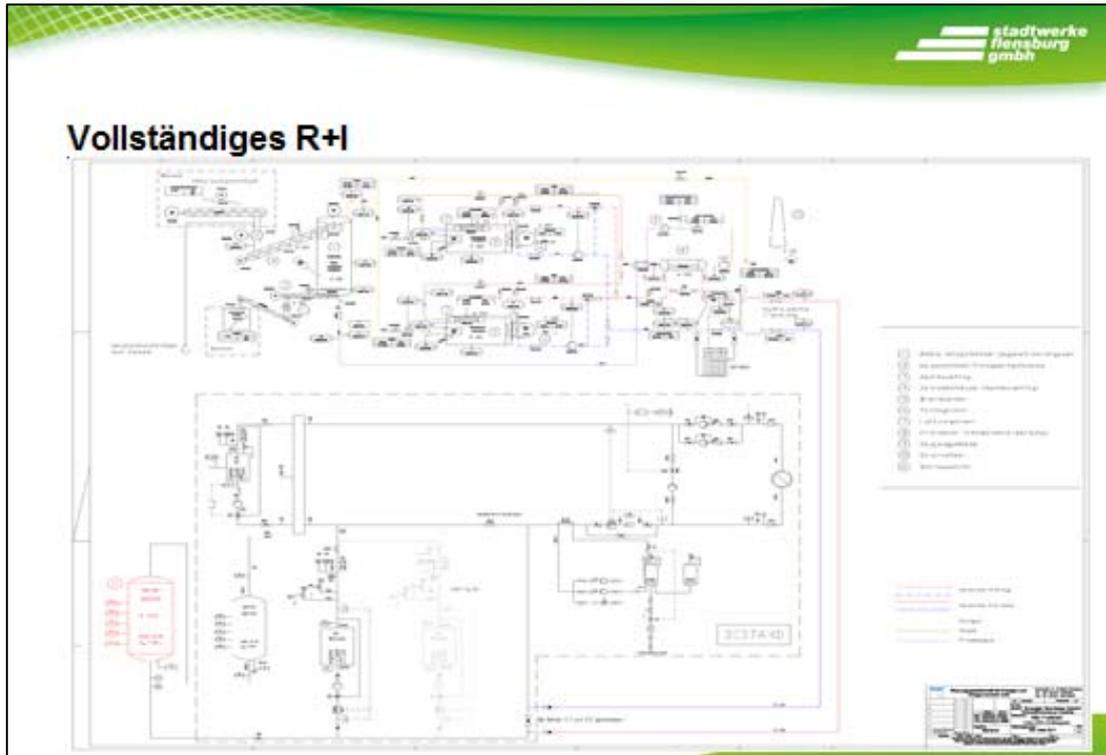
Tel: 0461 / 487 -3119  
karsten.mueller-janssen@stadtwerke-flensburg.de

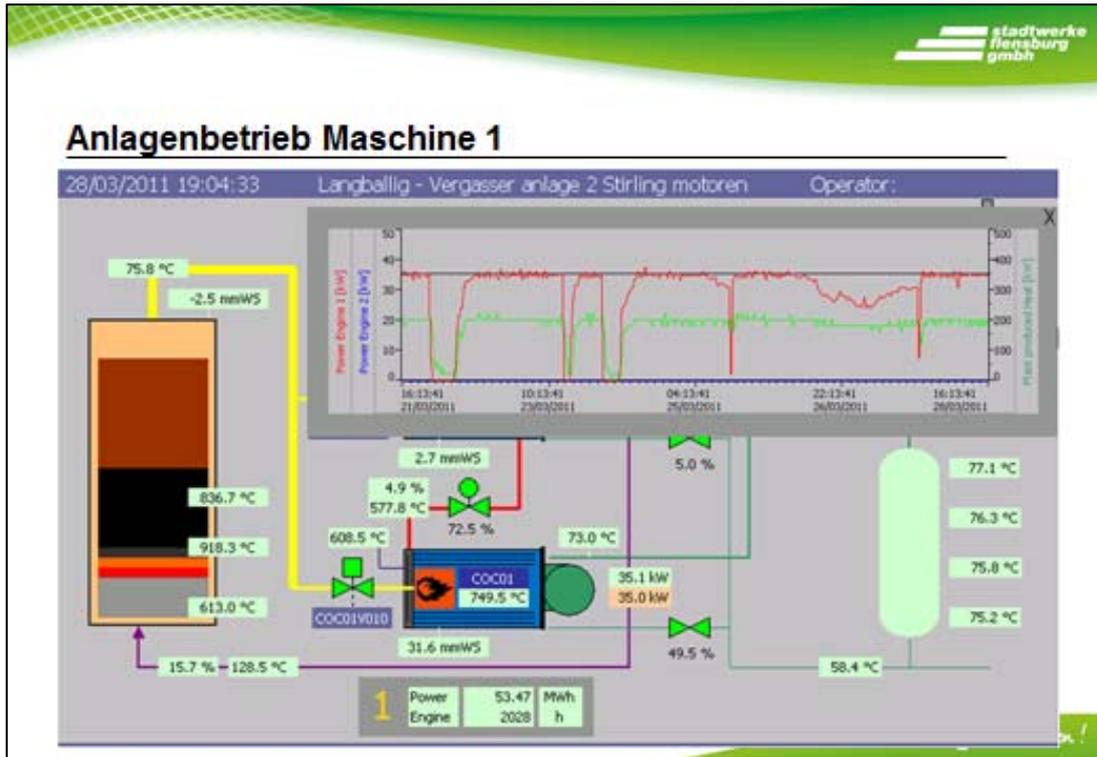
12.02.2011 -22- Energie zum Leben!



**Back Up**

12.02.2011 -24- Energie zum Leben!





## **Anwendungschancen und –grenzen für Dampfturbinen**

(Cornelia Liebmann, Siemens Turbomachinery Equipment GmbH)

**Siemens Turbomachinery Equipment GmbH**

**67227 Frankenthal**

**Referentin: Frau Dipl.-Ing. Cornelia Liebmann**

### **Innovative Technik – Pre-designed STEAM TURBINES**

**Anwendung:**

**Dezentrale Stromerzeugung – Leistungsbereich zwischen 75 und 300 kW**

Investitionen müssen sich rechnen lassen. Dazu können moderne Energierückgewinnungsanlagen beitragen, die gleichzeitig eine hohe Systemsicherheit gewährleisten. Bei der Umsetzung dieser Forderungen kann Siemens gemeinsam mit seinen Partnern durch innovative Technologien zur optimalen Qualitätssicherung und Prozessführung beitragen. Durch maßgeschneiderte Lösungen wird eine hohe Energieeffizienz erreicht und somit der Energieverbrauch reduziert. Dazu bietet die Siemens Turbomachinery Equipment GmbH, Frankenthal/Pfalz, ausgezeichnete und bewährte Lösungen durch den Einsatz von Dampfturbinen an.



**Bild 1: MINI-Turbogenerator Typ SST-040**

#### **Technische Merkmale:**

Innovation MINI-Turbogenerator:

- Leistungsbereich: 75 – 300 kW<sub>el</sub>
- Frischdampfdruck: bis max 40 bar(a)
- Frischdampftemperatur: trocken satt bis max. 400°C
- Abdampfdruck: Kondensationsdruck bis max. 7 bar(a)
- Variabel: Düsenring und Ventilsitz
- Vorteile: kompakte Bauweise, wartungsarm, einfache Bedienung

Konstruktionsmerkmale MINI-Turbogenerator:

- Einfache Ausführung
- Gleichdruckbauweise
- Radial clearance 1,0 mm
- Unempfindlich durch robuste Konstruktion
- Fliegende Lagerung

Eigenschaften MINI-Turbogenerator:

- Betrieb mit Sattedampf möglich
- Vollautomatischer Betrieb möglich
- Schnellstartfähig ohne Vorwärmung
- Keine Anstreifgefahr des Rotors
- Keine Drehvorrichtung erforderlich
- Installation und Inbetriebnahme in kurzer Zeit möglich, da alle Komponenten auf einem gemeinsamen Grundrahmen montiert sind.

**Anwendung:**

- Abwärmenutzung
- Kleine KWK-Anlagen
- Kleine Biomassekraftwerke mit nachfolgenden Trocknungsprozessen
- Dezentrale solarthermische Anlagen
- Parallel to existing pressure reduction station

**Einsatzmöglichkeiten in der Industrie:**

- Steigerung der Effizienz von Biogasanlagen mit BHKW durch zusätzliche Verstromung der Abwärme
- Stromerzeugung über KWK in Brauereien, in Molkereien, in der Papierindustrie oder bei Trocknungsprozessen
  - Stabilisierung der Energiebereitstellung durch Bereitstellung von Spitzenstrom
  - Nutzung der KWK-Vorteile für den eingesetzten Brennstoff und den erzeugten Strom
- Nutzung kleiner Abhitzenmengen (1000 bis 3000 kW thermisch) mit geringen Abgastemperaturen (ab 150°C) zur Verstromung

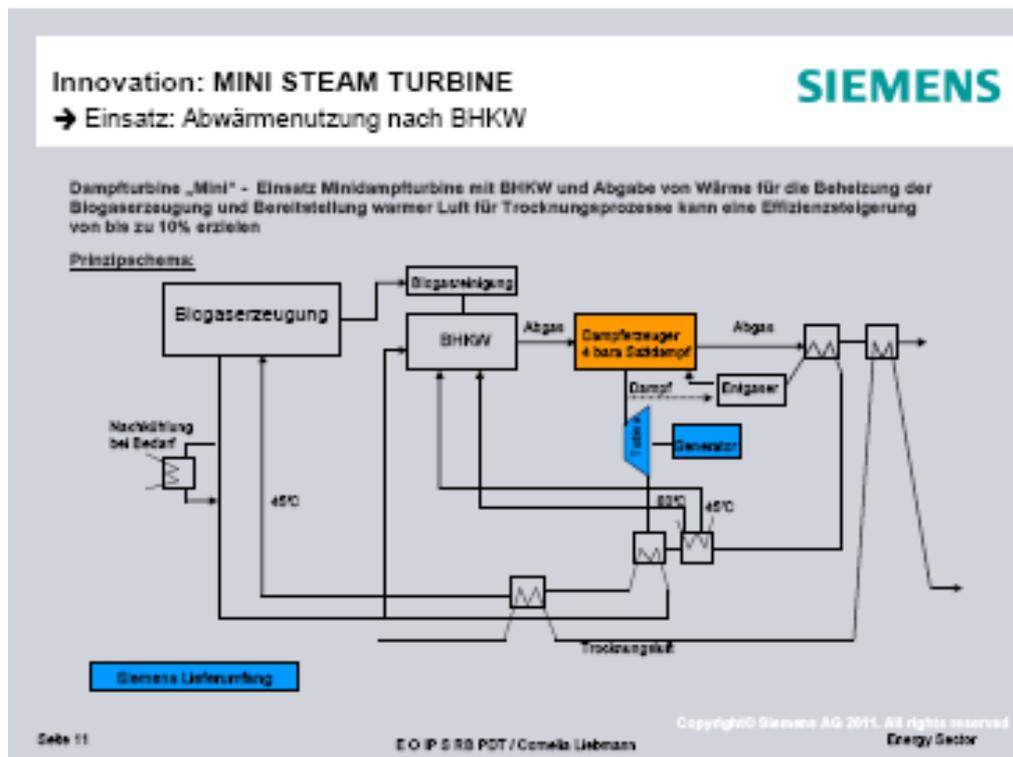


Bild 2: Prinzipsdarstellung Dampfturbine SST-040 nach BHKW

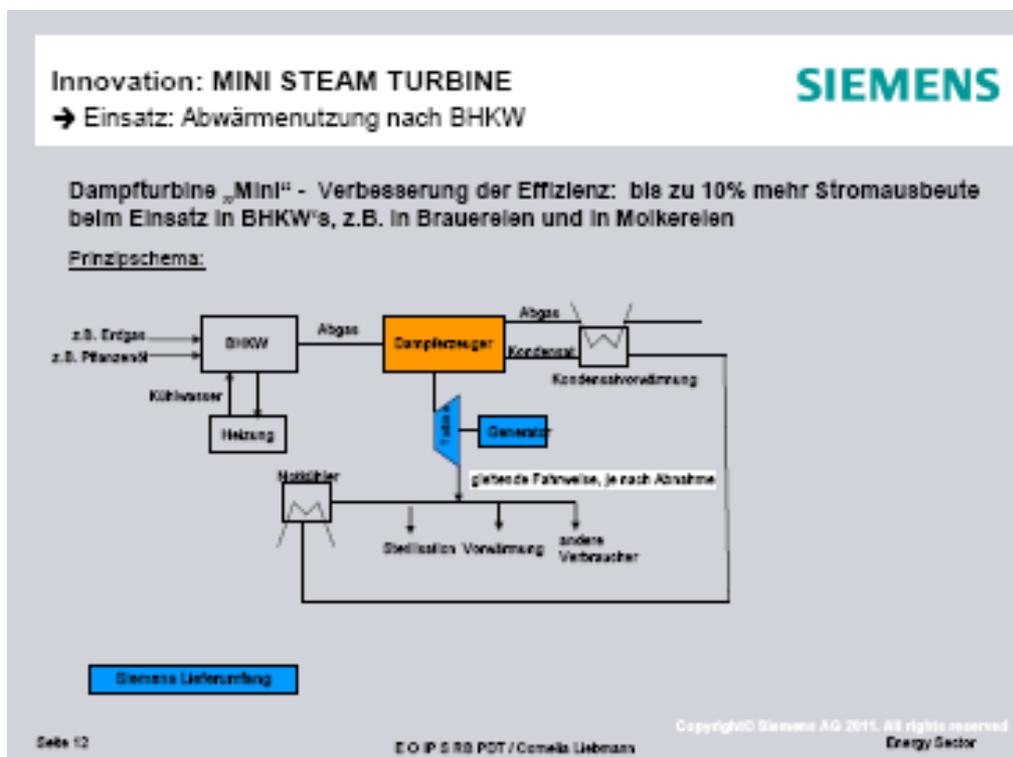
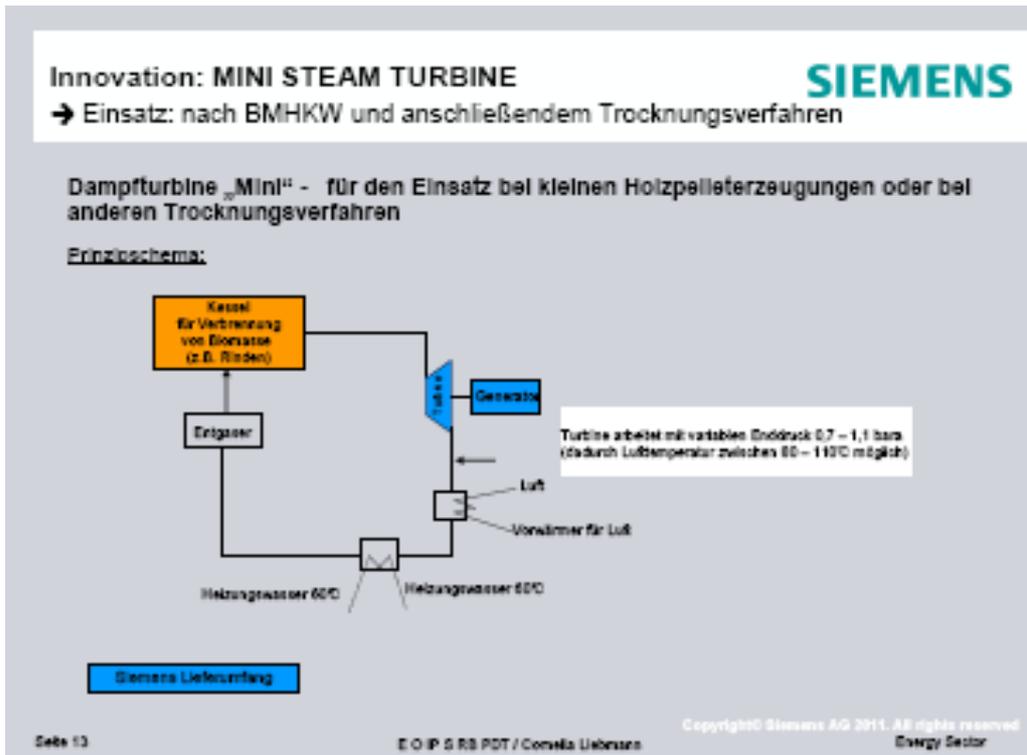
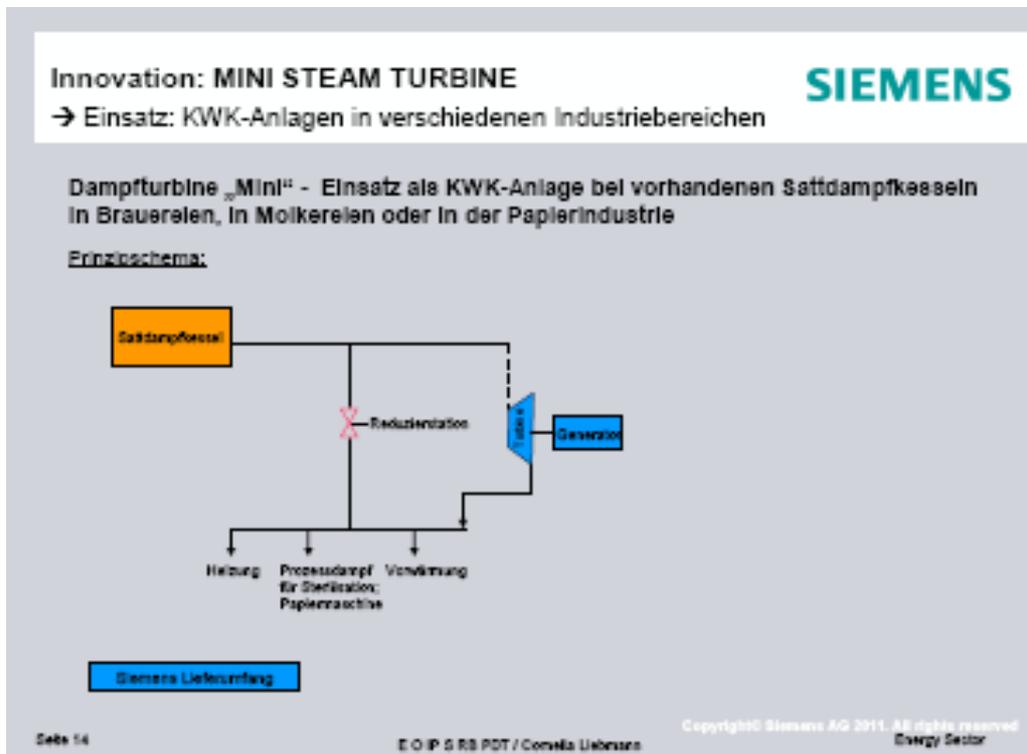


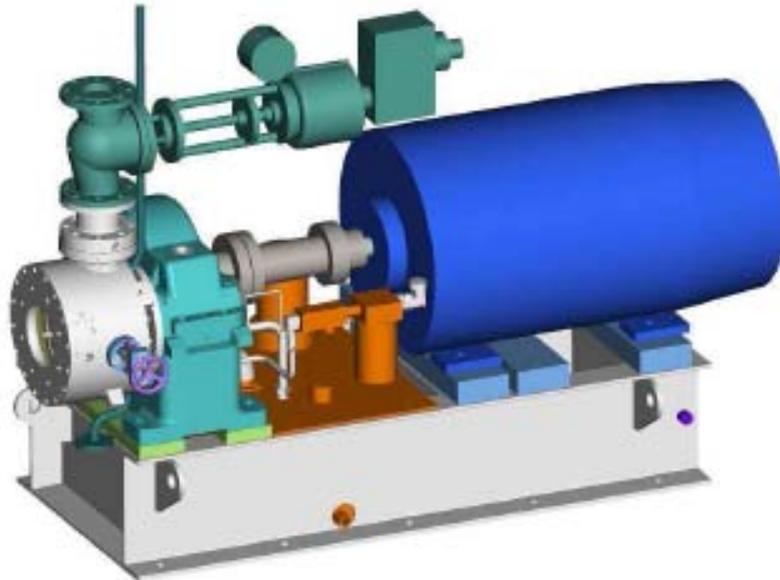
Bild 3: Prinzipsdarstellung Dampfturbine SST-040 nach BHKW



**Bild 4: Prinzipdarstellung Dampfturbine SST-040 nach BHKW und anschließenden Trocknungsverfahren**



**Bild 5: Prinzipdarstellung Dampfturbine SST-040 – Einsatz: KWK-Anlagen in verschiedenen Industriebereichen**



**Bild 6: Schematische Darstellung Aufbau Dampfturbine SST-040**

**Service:**

Für die Beantwortung von Fragen

- für den Einsatz
- zu deren Modifizierungsmöglichkeiten
- zu Wartung und Instandhaltung

unserer PRE-DESIGNED STEAM TURBINES

stehen wir Ihnen gern zur Verfügung:

**Siemens Turbomachinery Equipment GmbH**  
**Hessheimer Straße 2, D-67227 Frankenthal/Phalz**  
**Tel.: +49 (0)6233-85-0, Fax: +49 (0)6233-85-2660**  
**E-Mail: [turbines.frt.energy@siemens.com](mailto:turbines.frt.energy@siemens.com)**

Siemens Turbomachinery Equipment GmbH  
E O IP S RB PDT - Vertriebsbüro Ost  
Klingenstraße 15, 04229 Leipzig  
Tel.: +49 (0)341-928170, Fax: +49(0)341-92817-22  
E-Mail: [cornelia.liebmann@siemens.com](mailto:cornelia.liebmann@siemens.com)



## Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW

(Ingmar Schüßler, SP Technical Research Institute of Sweden)

### Vor-Ort-Messungen an Holzvergaser-BHKW

Ingmar Schüßler, SP Energy Technology  
Zittau 13. Mai 2011



SP Technical Research Institute of Sweden

#### Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW

Inhalt  
Folie 2

#### Inhalt

1. Grundlage
2. Planung der Messungen
3. Ergebnisse
4. Zusammenfassung und Ausblick



SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

## Messtechnische Untersuchungen an Vergaseranlagen

- Evaluation und messtechnische Begleitung zweier Vergaser in Sachsen während der Inbetriebnahmephase (im Auftrag des LfUG)
- Schwachstellenanalyse an BHKW-Vergaseranlagen (gefördert durch die FNR)
- Untersuchungen zur Vergasung verschiedener Brennstoffe in einer Praxis-Vergasungsanlage (BHKW) kleiner Leistung (im Auftrag des LfLUG)
- Bundesmessprogramm zur Weiterentwicklung der kleintechnischen Biomassevergasung (gefördert durch das BMU)



SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

## Zustand der kleintechnischen thermochemischen Vergasung im Jahre 2004ff

- Fördergelder für die weitere Entwicklung der Vergasung bewilligt (wissenschaftliche Forschung sowie einige Projekte)
- EEG Novelle schafft wirtschaftlichen Anreiz, das Interesse seitens der potentieller Anwender vorhanden (vor allem für Kleinanlagen)
- Hersteller am Markt, teilw. auch mit Nachweis der Funktionstüchtigkeit
- Trotzdem: Anlagen laufen eher suboptimal
  - Geringe Ansatzpunkte für Lösungsfindung aufgrund dürftiger Datenlage

**Fazit:** Notwendigkeit zur messtechnischen Untersuchung der Anlagen

→ Planung der Messung steht am Anfang



SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW
Planung der Messung  
Folie 5

1. Was soll untersucht / ermittelt werden?
  - Anlagen- oder Teilkomponentenkennwerte
  - Optimierungspotentiale
  - Emissionen

↳ Bestimmt die erforderlichen Messpunkte
  
2. Wie ist die Anlage aufgebaut?
  - Leistungsgröße und Vergaserart (Fest-/Wirbelbett, ein-/mehrstufig)
  - Vergasungsmittel (Luft, Wasserdampf)
  - Brennstoffkonditionierung und Reinigungsstrecke (nass/trocken)

↳ Bestimmt die Auswahl geeigneter Messtechnik



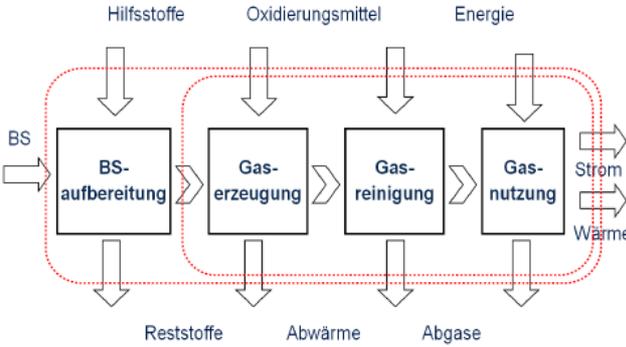
SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW
Planung der Messung  
Folie 6

### Anliegen: Ermittlung des Anlagenwirkungsgrades

**Benötigte Daten:** Einspeisung, Brennstoffverbrauch und -zustand



**Herausforderungen**

- Bestimmung BS-Verbrauch (Volumen oder Masse)
- Bestimmung BS-Zustand (Methode TS-Anteil)
- Definition Kennwerte (Heiz- oder Brennwert, Brutto oder Netto)
- Definition Bezugsgrenzen

**Fazit:** Angabe Kennwerte zwingend mit Erläuterung der Basis



SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

*Planung der Messung*  
Folie 7

## Anliegen: Prozessverständnis und Optimierung

**Benötigte Daten:** Zustände innerhalb Anlage an best. Schnittstellen

**Schnittstellendefinition**

1. Brennstoffkonditionierung
2. Vergaser
3. Reinigung
4. BHKW

**Messpunktfestlegung**  
(Entscheidung für minimalen Aufwand oder höhere Akkurarität und Aufwand)

SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

*Planung der Messung*  
Folie 8

## Bsp.: Minimaler Aufwand vs. höhere Akkurarität

1. Kontinuierliche PG-Messung vs. Gasproben
  - Fehlerquellen:
    - Zeitliche Instabilität der PG-Zusammensetzung
    - Undichtheit im Probenbehältnis
2. Bestimmung PG-Volumen über Luftzufuhr und PG-Stickstoffanteil
  - Fehlerquellen:
    - Bestimmung N2-Anteil im Produktgas
    - Falschlufzugang
3. Ermittlung Holzerbrauch oder Reststoffmenge über Laboranalyse
  - Fehlerquellen:
    - Geringer Ascheanteil im Holz
    - Unsicherheit ob absolute Aschemenge in Reststoff übergeht

SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW
Planung der Messung
Folie 9

## Aufgenommene Messgrößen und Equipment

Ziel: Kontinuierliche Erfassung aller Stoff- und Energieströme mit mobiler, robuster und preiswerter Messtechnik über einen längeren Zeitraum

Nutzenergie	Ablesung Zähler
Holz	Wägung und Laboranalyse (TS, H <sub>u</sub> , Elementaranalyse)
Reststoff	Wägung und Laboranalyse
Produktgas	Volumen über Drosselgeräte und Inhalt mit Visit03H [CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> ] unterstützt durch Laboranalyse Gasproben
Luft (V,M)	Volumen über Drosselgeräte
Abgas	Emissionen über Visit01LR [CO, NO <sub>x</sub> , HC]


SP Technical Research Institute of Sweden
Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW
Planung der Messung
Folie 10

## Auswertung und Bilanzierung

Einpflegung der Messdaten in eine Bilanzmatrix  
 → Datenverifizierung & Sensibilitätsanalyse, Ermittlung nichterfasster Ströme

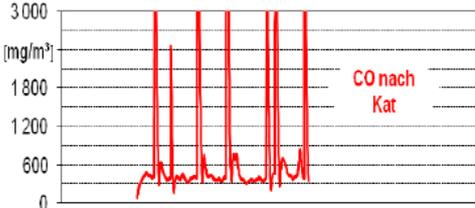
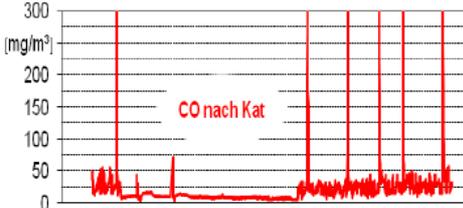
Gasifier Balance	Flow 1 Wood	Flow 2 Gasification Agent	Flow 3 Product Gas	Flow 4 Residues (s)	Flow 5 Residues (fl.)	Flow 6 Heat Loss	Difference In/Out	Difference (relative)
	A	B	C	D	E	F	G=ΣA...F	H=G/(A+B)
Energy [kW]	152,72	0,01	-123,54	-17,79	0,00	0,00	<b>11,40</b>	<b>7,5%</b>
m <sub>C</sub> [kg/h]	13,50	0,01	-11,20	-1,82	0,00	0,00	<b>0,48</b>	<b>3,6%</b>
m <sub>H</sub> [kg/h]	1,83	0,02	-1,66	-0,02	0,00	0,00	<b>0,18</b>	<b>9,5%</b>
m <sub>O</sub> [kg/h]	13,41	11,43	-21,39	-0,07	0,00	0,00	<b>3,38</b>	<b>13,6%</b>
m <sub>N</sub> [kg/h]	0,14	36,72	-36,55	-0,01	0,00	0,00	<b>0,30</b>	<b>0,8%</b>
m <sub>Ash</sub> [kg/h]	0,25	0,00	0,00	-0,33	0,00	0,00	<b>-0,08</b>	<b>-32,4%</b>
m <sub>overall</sub> [kg/h]	29,14	48,81	-71,43	-2,27	0,00	0,00	<b>4,26</b>	<b>5,5%</b>


SP Technical Research Institute of Sweden
Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW
Ergebnisse  
Folie 11

## Allgemeine Aussagen aus den Messkampagnen

- Kennwerte **nicht** zwischen einzelnen Anlagen übertragbar
  - Größen Verbrauch/Wirkungsgrad, Emissionen, Wartungsintervalle ...
  - Aussage ebenso gültig für Anlagen gleichen Typs
  - **Ursache:** Einfluss Fahrweise und Randbedingungen, z.B. Brennstoffzustand, Motoreinstellung, etc.



SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW
Ergebnisse  
Folie 12

## Allgemeine Aussagen aus den Messkampagnen

- Erkenntnisse zum Vergasungsverhalten **jedoch** übergreifend anwendbar und ebenso vereinbar mit Literaturangaben
  - Aussagen möglich bei Vervollständigung von Bilanzierungen, Abschätzungen, Optimierungsmöglichkeiten

Was beeinflusst das Vergasungsverhalten?

Temperatur

Sauerstoffangebot

Zeit



SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

**Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW**
**Ergebnisse**  
Folie 13

### Anlagenwirkungsgrade

Hilfsstoffe    Oxidierungsmittel    Energie

**Randbedingungen**

- Brutto-Wirkungsgrade auf BS bei Beschickung bezogen
- Keine gleichwertige Effektivität der BS bei Zweistoffmotoren

**KWK Wirkungsgrad**

- Übergangszeit
- Fehlende Wärmezähler
- Ausbaufähig
- Diskussionspunkt Trocknung

**Fragestellung: Ursache der hohen Breite bei  $\eta_{el}$**

$$\eta_{el,Br} = \frac{W_{el,Br}}{\sum m_{BS} \cdot H_{u,BS}} \quad \eta_{KWK,Br} = \frac{W_{el,Br} + Q_H}{\sum m_{BS} \cdot H_{u,BS}}$$

$\eta_{el,Br}$  14...32%       $\eta_{KWK,Br}$  ...48...62.5%...

SP Technical Research Institute of Sweden
Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

**Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW**
**Ergebnisse**  
Folie 14

### Fester Reststoff

Keine vollst. BS-Konvertierung bei einstufiger Vergasung

- C-Gehalte (üblich)                      50..80 %
- Heizwerte                                      15...30 MJ/kg
- BS-Umsetzung trotzdem höher 90%

- Vollst. BS-Konvertierung über „Verbrennungsstufe“ (integriert oder nachgeschaltet)
- Direkte / indirekte Nutzung der Reststoffenergie im Prozess oder Einbindung in Nutzkonzept (Wärme/ Produkt/ Speicher unter Beachtung der RS- Belastung)

SP Technical Research Institute of Sweden
Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

Ergebnisse  
Folie 15

### Maximierung Kaltgaswirkungsgrad

$$\eta_{V,KG} = \frac{\dot{V}_{PG} \cdot \bar{H}_{u,PG}}{\dot{m}_{Holz} \cdot H_{u,Holz}}$$

$\dot{V}_{PG} \uparrow$  *oder*  $\bar{H}_{u,PG} \uparrow$

Möglichkeit begrenzt, z.B. über erhöhte BS-Konvertierung

Erhöhung KWS-Anteil im PG

$H_{u,CH_4} - H_{u,CO+H_2} \geq 35,6 MJ/kmol_{CH_4}$

SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

Ergebnisse  
Folie 16

### Maximierung Kaltgaswirkungsgrad

$$\eta_{V,KG} = \frac{\dot{V}_{PG} \cdot \bar{H}_{u,PG}}{\dot{m}_{Holz} \cdot H_{u,Holz}}$$

$\dot{V}_{PG} \uparrow$  *oder*  $\bar{H}_{u,PG} \uparrow$

Möglichkeit begrenzt, z.B. über erhöhte BS-Konvertierung

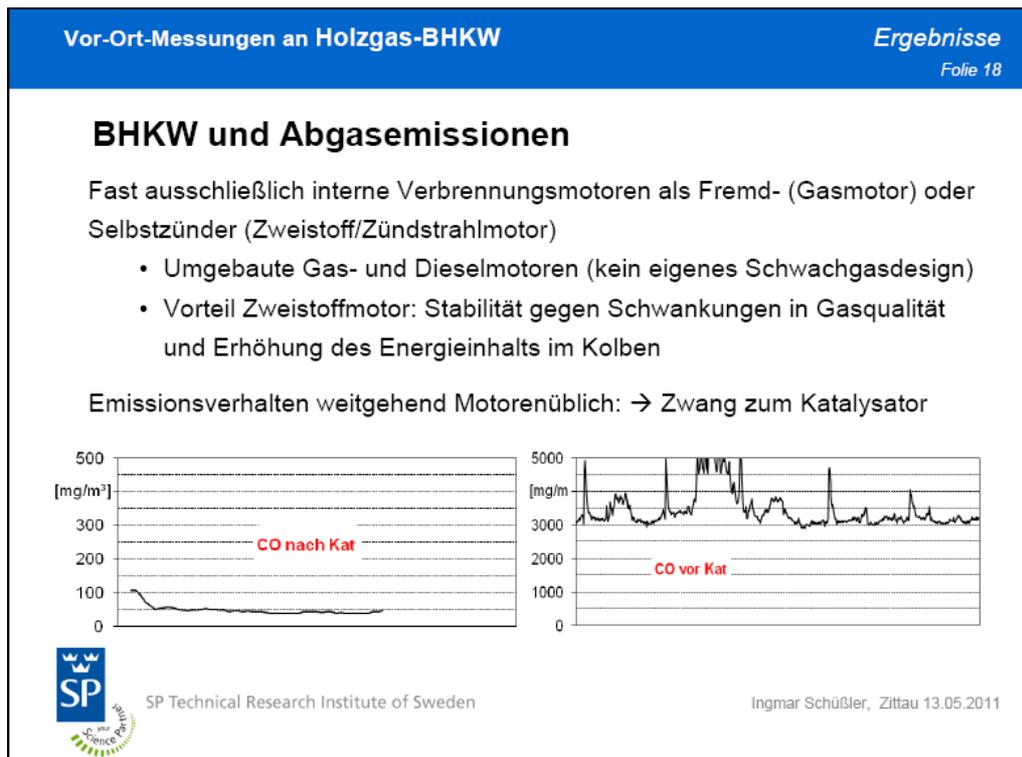
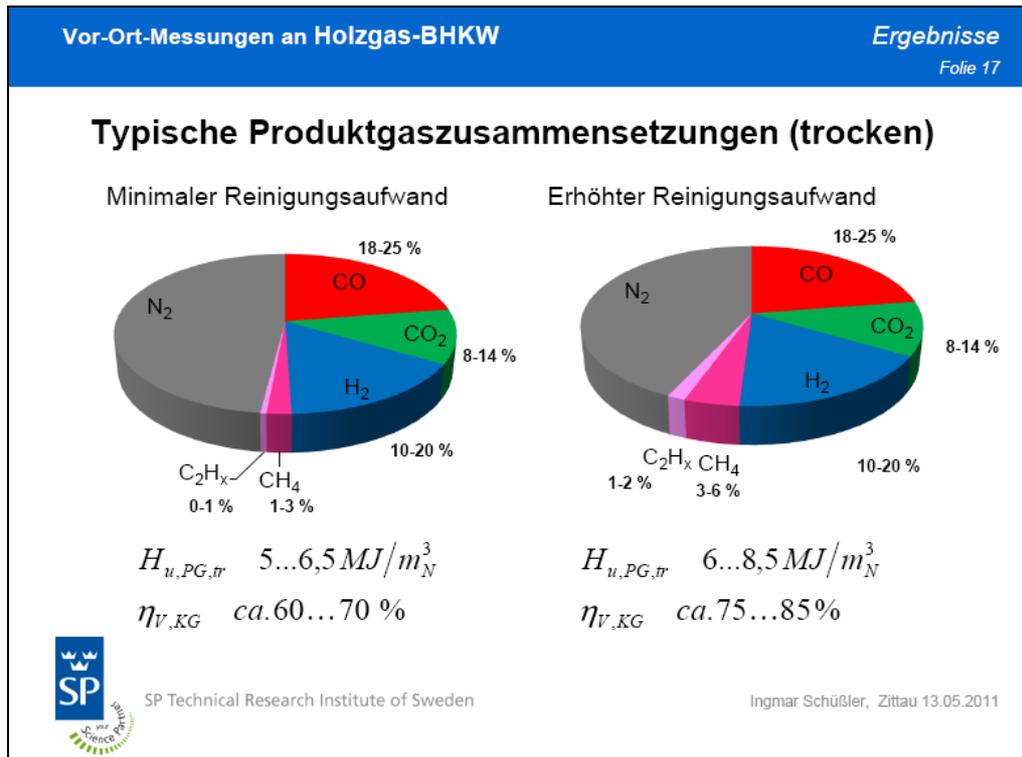
Erhöhung KWS-Anteil im PG

$H_{u,C_2H_4} - H_{u,CO+H_2} \geq 273,5 MJ/kmol_{C_2H_4}$

- Senkung Reaktionstemperatur
- Erhöhung Teeranteil
- Abhilfe: Prozessmaßnahmen (Katalyse) oder erhöhter Reinigungsbedarf

SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011



**Ergebnisse**  
Folie 19

## Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW

### Verfügbarkeiten und Aufwand

Positive Entwicklung bei Verfügbarkeiten in den zurückliegenden Jahren

- Kontinuierlich zu beobachten in Quantität und Qualität
- Einzelne Anlagen wiesen bereits Laufzeiten > 7000 h/a auf
- Immer noch stark abhängig von Qualität des Betreibers

Aufwand im störungsfreien Betrieb

- Wartungsintervalle (Ölwechsel, Filterreinigung/-austausch etc.)
- Brennstoffzuführung
- Überwachung



 SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

**Ergebnisse**  
Folie 20

## Vor-Ort-Messungen an Holzgas-BHKW

### Typische Schwachstellen und Optimierungspotential

- Brennstoffkonditionierung und -zufuhr → Hauptstörungsursache
- Gasreinigung → Bereitstellung motortaugliches Gas
- Sensorausstattung und automatisierter Betrieb
- Emissionen von Abgas, Rest- und Hilfsstoffen
- Sicherheitskonzept und Betreiberunterweisung
- Optimierung von Anlagenbetrieb und Nutzungskonzept
  - Reststoffkonvertierung bzw. -nutzung (fest und flüssig), Abgas-, Motor- und PG-Wärme, Trockneroptimierung, sensorgestützte Betriebsweise

 SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

## Zusammenfassung und Ausblick

- Thermochemische Vergasung ist eine Möglichkeit der Stromerzeugung aus fester Biomasse, auch im kleintechnischen Bereich
- Kontinuierliche und positive Entwicklung in den letzten Jahren
- Elektrischen Wirkungsgrade im Bereich 20-25% (bezogen auf Heizwert und Zustand Holz am Vergasereintritt) nachweisbar möglich
- Trotzdem ist ein reibungsfreier Betrieb noch immer zu stark an die Qualität des Betreibers gebunden
- Nachweis der Langzeitstabilität noch ausstehend (Standzeiten Material)
- Optimierungsbedarf in Bereichen Steuerung, Emissionen, Sicherheit, Reststoffverwertung, Wärmenutzungskonzepte



SP Technical Research Institute of Sweden

Ingmar Schüßler, Zittau 13.05.2011

## Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Ingmar Schüßler, SP Energy Technology  
ingmar.schussler@sp.se



SP Technical Research Institute of Sweden



## Felderfahrungen mit Holzgas-BHKW

(Georg Kuffer, Spanner Re<sup>2</sup> GmbH)

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH**      **Dipl. Ing. (FH) Thomas Bleul**

---



**BAYERN'S  
BEST 50**  
PREISTRÄGER 2007



**SPANNER**  
partnerschaftlich in die Zukunft

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

---

### Überblick

- Firmenüberblick - Warum Holzvergaser ?
- Anlagenbeschreibung
- Wirtschaftlichkeit
- Anlagenbeispiele
- Felderfahrungen

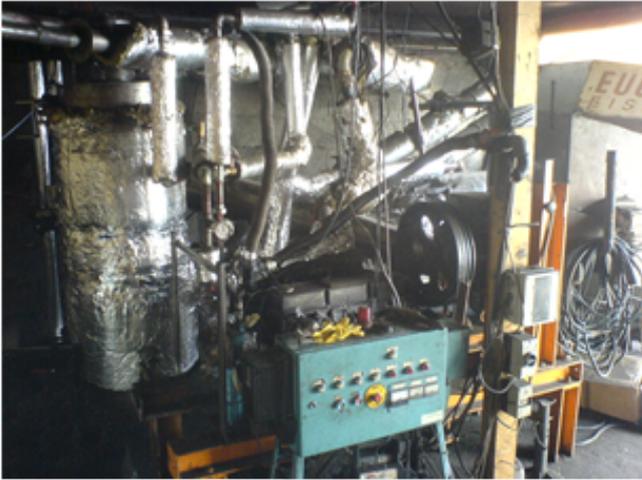
Spanner Re<sup>2</sup> GmbH 

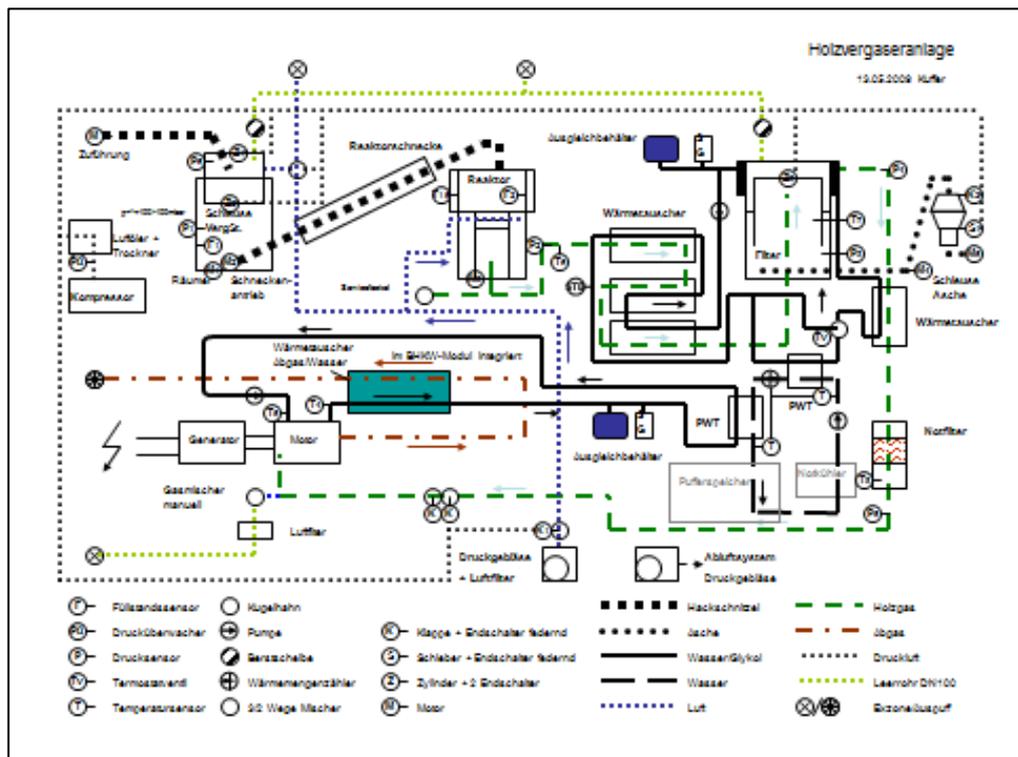
## Joosvergaser

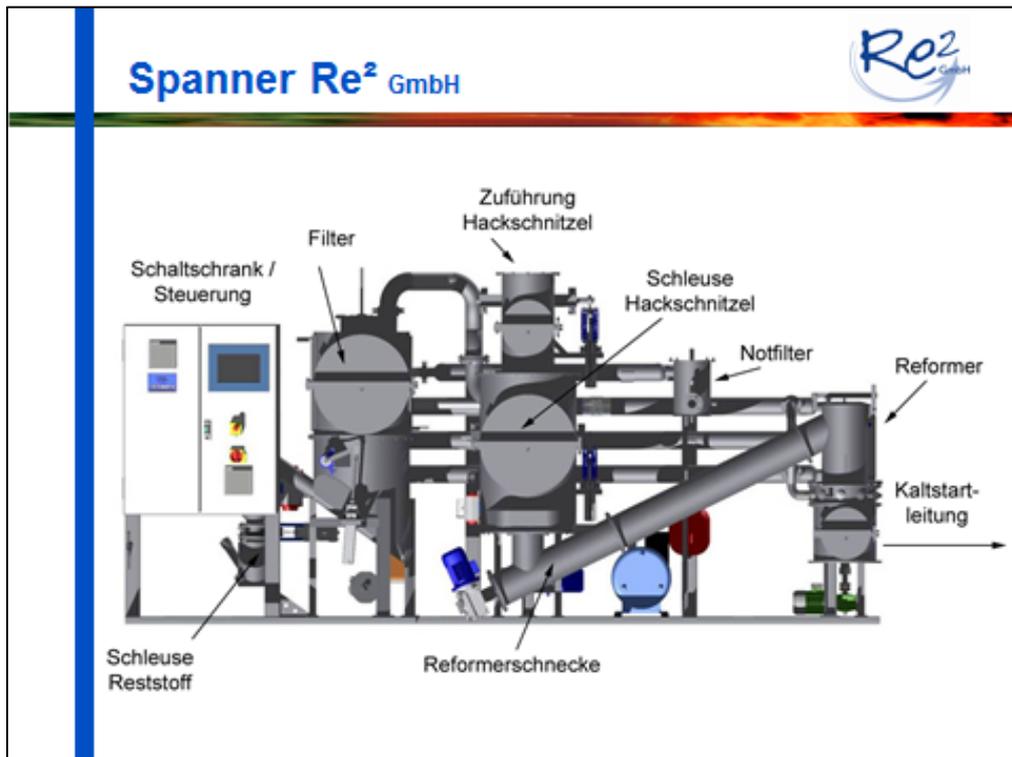


Spanner Re<sup>2</sup> GmbH 

## Joosvergaser







**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH**

## Eigenschaften

- Kleine, dezentrale Anlagen zwischen 30 - 45 kW elektrischer Leistung
- Platzbedarf 36 m<sup>2</sup> bei einer Raumhöhe von 2,60 Metern
- Serienbauweise auf Grundrahmen
- Gas aus dem Reaktor mit nahezu teerfreiem Holzgas
- Einfache Gasreinigung (Gewebefilter)
- Mit herkömmlichen Waldhackschnitzeln zu betreiben
- An der Anlage entsteht kein Kondensat oder Teer als Abfallprodukt

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

---

## Anlagen und Laufzeit

- seit Ende 2010 32 Anlagen am Netz
- insgesamt über **150.000** Stunden Laufzeit

Alkofer Ludwig	4.000 Stunden
Baumgartner Josef	7.500 Stunden
Braun Josef	5.500 Stunden
Büchner Wolfgang	7.700 Stunden
Fritz Johann	11.400 Stunden
Fröhling	2.000 Stunden
Hofer Georg	10.000 Stunden
Huber Thomas	11.000 Stunden
Labek Richard	8.500 Stunden
Müller Ulrich	5.200 Stunden
Pflügler	4.500 Stunden
Schlecht Josef	3.800 Stunden
Schmid Thomas	8.500 Stunden
Steber Georg	1.000 Stunden

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

---

## Vergütungen

**Vergütungssätze pro Kilowattstunde:**

Grundvergütung :	11,44 Cent / kWh
Technologiebonus :	1,96 Cent / kWh
NaWaRo Bonus :	5,88 Cent / kWh
KWK Bonus :	2,94 Cent / kWh
<b>SUMME :</b>	<b>22,22 Cent / kWh</b>

Spanner Re<sup>2</sup> GmbH 

## Wirtschaftlichkeit

1 SRM Fichte / 15 % Feuchtegehalt / 770 kWh  
Wirkungsgrad<sub>elektrisch</sub> = 23 %

Mit Wärmekonzept

Ohne Wärmekonzept

40 € für Strom pro SRM  
+  
27 € Heizöl

31 € für Strom pro SRM  
+  
?

Spanner Re<sup>2</sup> GmbH 

## Anlagenbeispiel 1: Hofer



### 30 kW Anlage

Verwendung der Wärme:

- Heizen der anliegenden Gebäude
- Ganzjährige Holz Trocknung im eigenen Sägewerk
- Trocknung von eigenen Hackschnitzeln

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 



- Kunde betreibt Anlage selbst
- Kunde kauft Hackschnitzel teilweise zu
- Jährliche Laufzeit bei ca. 6000 Stunden

**Einnahmen:**  
Die ersten 10 Jahre: **ca. 1.050 € pro Monat**  
Nach 10 Jahren: **ca. 2.380 € pro Monat**



**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 



- Kunde betreibt Anlage selbst
- Kunde muss keine Hackschnitzel zukaufen
- Jährliche Laufzeit bei ca. 8000 Stunden

**Einnahmen:**  
Die ersten 10 Jahre: **ca. 3.070 € pro Monat**  
Nach 10 Jahren: **ca. 4.390 € pro Monat**



**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

---

## Anlagenbeispiel 2: Braun





**30 kW Anlage**

Verwendung der Wärme:

- Heizen der anliegenden Gebäude
- Heutrocknung
- Trocknung von eigenen Hackschnitzeln
- Wärme für anliegende Käserei

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

---

## Anlagenbeispiel 3: Labek





**30 kW Anlage**

Verwendung der Wärme:

- Hackschnitzeltrocknung
- Trocknung selber produzierter Pellets
- Heizen der anliegenden Gebäude

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

## Anlagenbeispiel 4: kein Kunde



**30 kW Anlage**

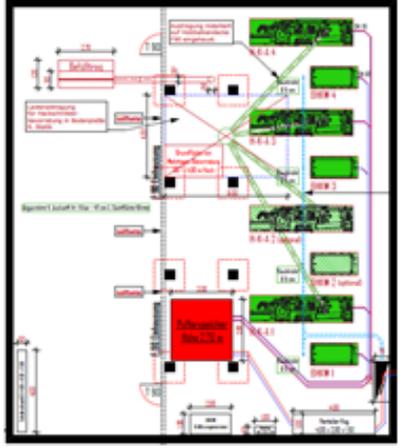
Verwendung der Wärme:

- Heizen der anliegenden Gebäude
- Geplante jährliche Laufzeit von 4000 Stunden
- Hackschnitzel werden trocken zugekauft
- Externer Mitarbeiter zum Betreiben der Anlage

**Einnahmen:**  
Die ersten 10 Jahre: **ca. - 410 € pro Monat**  
Nach 10 Jahren: **ca. 940 € pro Monat**

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

## Anlagenbeispiel 5: Schmid

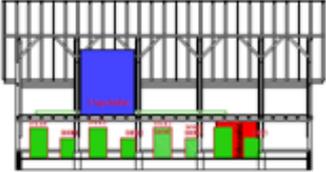


**3 mal 45 kW Anlage**

Verwendung der Wärme:

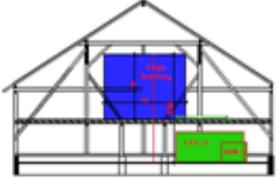
- Heizen der anliegenden Gebäude
- Heizen eines Gewächshauses
- Trocknung von eigenen Hackschnitzeln

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 



- Kunde hat Vollwartungsvertrag
- Kunde kauft Hackschnitzel teilweise zu
- Jährliche Laufzeit bei ca. 7000 Stunden

**Einnahmen:**  
Die ersten 10 Jahre: **ca. 4.200 € pro Monat**  
Nach 10 Jahren: **ca. 9.200 € pro Monat**



**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

## Felderfahrungen

- Guter Betreiber = Laufzeit
- Einfluss Einsatzstoff
- Umgang mit Störungen

**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** 

## Aktuelle Aufgaben

- Genehmigungsverfahren europaweit (besonders Österreich)
- Erkenntnisse aus dem Feld in Anlagentechnik einfließen lassen ⇒ Langzeiterfahrung
- Pelletvergaser für Industriekunden



**Spanner Re<sup>2</sup> GmbH** **Dipl. Ing. (FH) Thomas Bleul**

[www.holz-kraft.de](http://www.holz-kraft.de)



**Danke für Ihre Aufmerksamkeit!**



## Effiziente Biomassenutzung in einem HTCR-BHKW

(Reinhold Altensen, TH Mittelhessen)

*Altensen, Reinhold; Herzog, Klaus; Konradi, Simon; Richter, Hellgard; Schlüter, Marten*

### 1. Einleitung

Die Holz- und Kohlenstoffvergasung wird schon seit fast einem Jahrhundert zur Erzeugung von Synthesegas genutzt. Das aus dem Energieträger Holz oder Kohle hergestellte Gas wird zur Erzeugung von thermischer und elektrischer Energie verwendet. In der heutigen Zeit stellt die Energiebereitstellung aus regenerativen Rohstoffen mit neutraler CO<sub>2</sub>-Bilanz einen entscheidenden Beitrag für die Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen dar. Kraftwerke auf Basis der Holz- bzw. Biomassevergasung werden bisher nur im großen Maßstab ( $P_{el} > 5\text{MW}$ ) realisiert. Diese Kraftwerke arbeiten heute ausschließlich monovalent sind also nicht für den Einsatz wechselnder oder veränderter Edukte geeignet.

Bei der Verstromung in kleinen und mittleren BHKW mit Holzvergasung werden überwiegend modifizierte Hubkolbenmotoren verwendet. Im Vergleich zu konventionellen Brennstoffen, wie Diesel oder Benzin, haben die erzeugten Brenngase einen deutlich negativen Einfluss auf Lebensdauer und Wartungsintervalle. So führen beispielsweise höhere Verbrennungstemperaturen zu einer Verkokung des Schmieröls und einem höheren Verschleiß der beweglichen Teile.

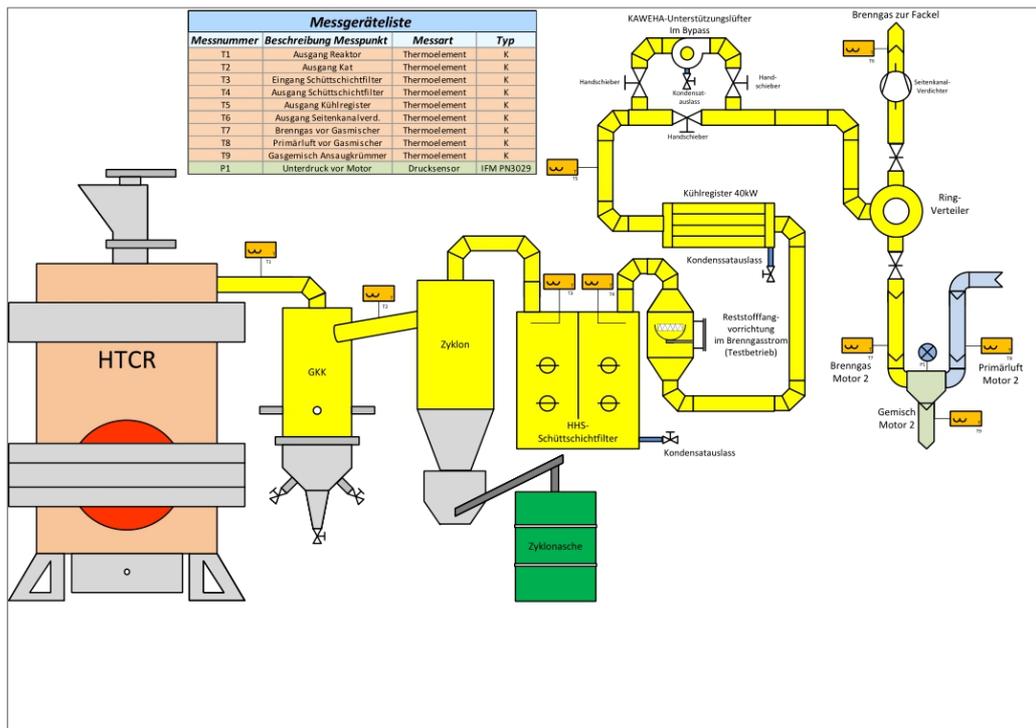
Beim Studium bestehender Anlagen und Techniken zur thermochemischen Vergasung von Biomasse stellt meist die Teerbelastung des entstehenden Gases und die damit verbundene Aufbereitung das Hauptproblem dar.

Gerade im kleinen Leistungsbereich sprengt hier eine nachfolgende Reinigung die Wirtschaftlichkeit einer solchen Anlage.

Die gestellten Anforderungen an den in diesem Projekt weiter zu entwickelnden HTCR (High-Temperature-Carbon-Reactor) sind:

- die Erzeugung eines möglichst teerfreien Brenngases.
- eine Prozessführung die hohe Schwankungen in der Eduktqualität und -geometrie sowie den damit verbundenen geringeren Aufwand bei der Aufbereitung des Brenngases erlaubt.
- lange Wartungsintervalle und hohe Lebensdauer an die BHKW-Motoren

## 2. Das HTCR-BHKW

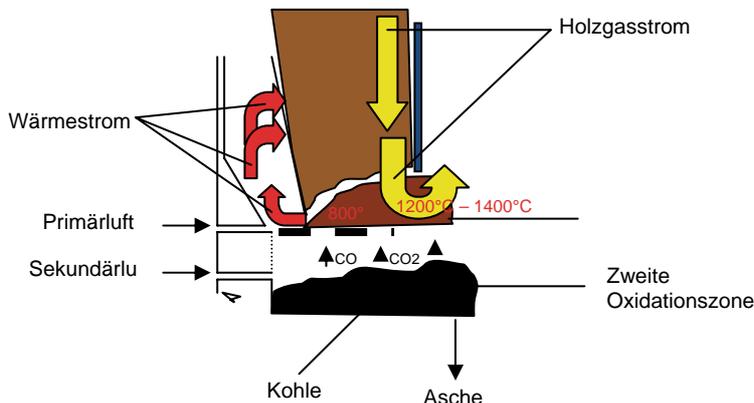


### Anlagenschema (Quelle:Ettenberger)

Die Anlage besteht aus dem HTCR (High-Temperature-Carbon-Reactor), einer nachgeschalteten Gasaufbereitung, bestehend aus einem Katalysator (GKK), einem Zyklonabscheider (Zyklon), einem Schüttfilter (Versuchsgerät) und der Möglichkeit weitere Filtertechnologien versuchsweise zu installieren. Das gereinigte und heiße Brenngas gelangt dann über einen Rohrbündelwärmeübertrager zu einem Rundverteiler. Aus dem Rundverteiler werden die Belarus Motoren (BHKW) mit Brenngas versorgt (Normalbetrieb). Um die Anlage auf Betriebstemperatur zu bringen, ist für den Anfahrbetrieb eine Fackel mit einer elektronischen Zündvorrichtung installiert, über die das Brenngas mit Hilfe eines Seitenkanalverdichters verbrannt werden kann.

### 2.1. Der HTCR (High-Temperature-Carbon-Reactor)

Im HTCR wird die Teerproblematik mit entsprechenden primären Maßnahmen versucht zu minimieren. Dies geschieht durch eine entsprechende Reaktionsführung und der damit verbundenen hohen Temperaturen im Reaktorkern. Hierzu ist eine



ausgeklügelte Reaktor-geometrie erforderlich, bei der der Brennstoff von oben zugeführt und dabei von der darunter liegenden Reaktionszone vorgewärmt wird. Die bei der unterstöchiometrischen Verbrennung von Biomasse entstehende

Kohle fällt durch einen Rost in die darunter liegende zweite Oxidations-zone, wo die Sekundärluft zur Verbrennung in den Reaktor geleitet wird. Das führt dazu, dass sowohl Kohlenstoffmonooxid als auch Kohlenstoffdioxid durch die mit bis zu 1400°C sehr heiße obere Oxidationszone geleitet wird und somit als zusätzliches Vergasungsmittel zur Verfügung steht.

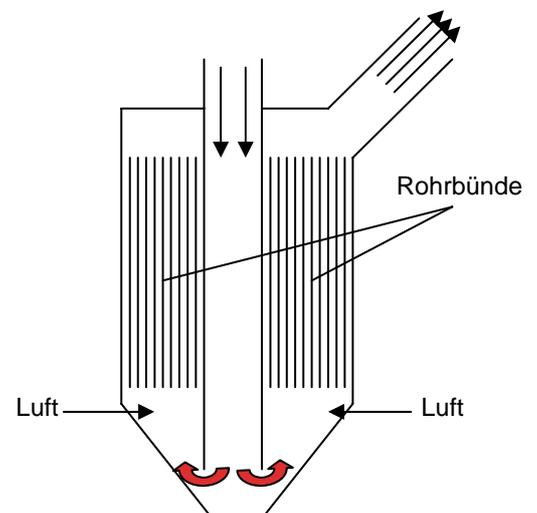
Damit wird eine Minimierung des in der Zyklonasche enthaltenen Kohlestaubs erreicht. Diese Vorgehensweise macht z.B. eine Gaswäsche mit Rapsölmethylester überflüssig.

## 2.2. Die Gasaufbereitung



Der Kern der Gasaufbereitung ist der Zyklonabscheider, der für sich alleine als Reinigungsstufe die anfallenden Feststoffpartikel nicht bewältigen kann. Obiges Bild zeigt das Zuwachsen des Zyklonabscheiders mit Feststoffpartikel nach nur geringer Betriebszeit.

Um hier Entlastung zu schaffen wird zwischen HTCR und Zyklon ein Gas-Kohlenstoff-Katalysator eingebaut. Hierbei handelt es sich um ein zylindrisches Bauteil, in dessen Mitte der noch sehr heiße Gasstrom aus dem Reaktor bis nach an die Unterseite geleitet wird. Hier wird eine geringe Menge Luft zugegeben, welche als Vergasungsmittel für im Gasstrom enthaltenen Kohlenstoffstaub dient. Um die Oberfläche, an denen die feinen Kohlenstoffpartikel hängen bleiben können, zu vergrößern, muss der Gasstrom von der Unterseite des Zylinders



durch ein um das mittig gelegene Einlassrohr gepacktes Rohrbündel. Der Gasstrom wird dann von der oben gelegenen Auslassöffnung in den Zyklonabscheider geleitet.

### 2.3. Lagerung und Zuführung des Edukts

Die Lagerung und die Zuführung des Edukts erfolgt über einen Kratzboden-Kettenförderer in dem am oberen Drittel im Gegenstrom Heißgas zur Trocknung eingeblasen wird.



Das Edukt wird über ein Förderband durch ein Schleusensystem, bestehend aus einem Behälter an dem im Eingang und Ausgang jeweils ein Flachschieberventil installiert ist, in den Reaktor eingebracht.

Hierdurch ist gewährleistet, dass Edukte in unterschiedlicher Qualität und Geometrie eingebracht werden können.



### 2.4. Die BHKW-Motoren

Um den verbleibenden Aufwand minimal zu halten, werden zu der anschließenden Umwandlung des Brenngases in Strom und Wärme drei robuste Belarus Motoren verwendet, die bezogen auf ihren Hubraum eine relativ geringe spezifische Leistung

aufweisen, was wiederum bei der relativ hohen thermischen Grundlast, der hier zu versorgenden Gebäude kein Nachteil darstellt.



Motordaten: Belarus

Typ D - 243

Hubraum 4750 cm<sup>3</sup>

Nennleistung 60 kW,

Bei Holzgasbetrieb ca. 30kW

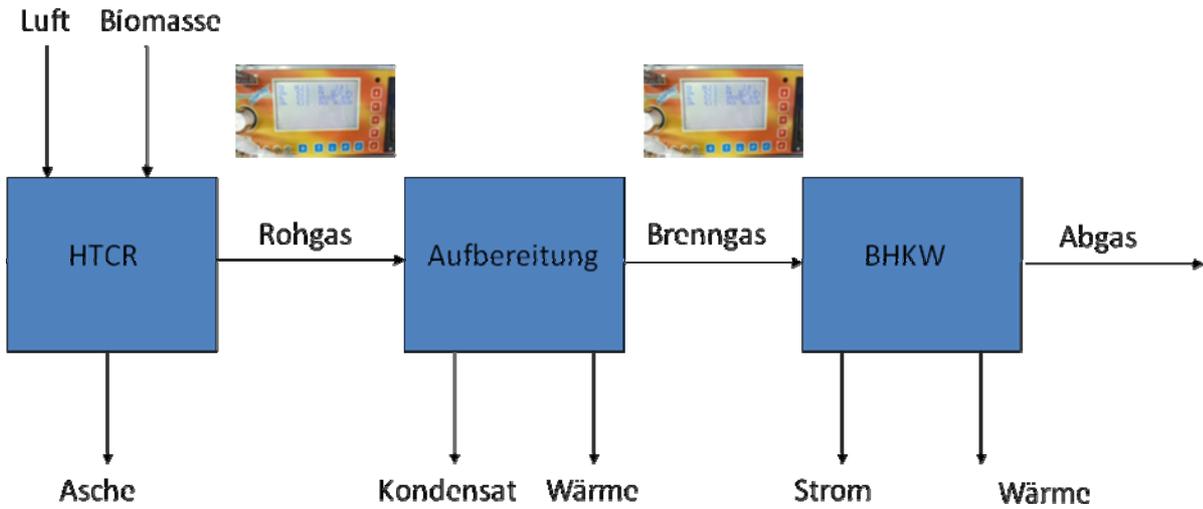


Die Motoren verfügen jeweils über einen Hubraum von 4750 cm<sup>3</sup> und eine Nennleistung von 60 kW. Im Betrieb mit dem vom Reaktor gelieferten Schwachgas wird eine Leistung von ca. 30 kW erreicht. Die vom Hersteller als Diesel-Motoren gelieferten Aggregate wurden über Bohrungen im Zylinderkopf für Zündkerzen und eine Motortech Zündsteuerung vom Typ MIC500 zu Otto-Gasmotoren umgerüstet. Da der Treibstoff mit hohen Anteilen von Kohlenstoffmonoxid und Stickstoff eine Methanzahl von über 100 besitzt neigt er auch bei hoher Kompression nicht zur Selbstzündung und kann entsprechend hoch verdichtet werden.

### 3. Mess- und Analysetechnik

Um den Prozess abzubilden werden 3 große Bilanzräume gebildet die für sich jeweils als Arbeitspaket dienen um parallele Entwicklungsarbeiten durchführen zu können. Die Messtechnik besteht aus einem PC in dem eine Meilhaus-Messkarte verbaut ist. Die Karte besitzt von der PC-Masse galvanisch isolierte Eingänge, welche mit 500 kHz und einer Auflösung von 16 bit eingelesen werden können. Es stehen außerdem 4 analoge 16 bit Ausgänge und 32 digitale I/O-Kanäle für Steuerung und Regelung zur Verfügung. Des Weiteren sind 9 Messumformer für den Anschluss von Typ K Thermoelementen vorhanden.

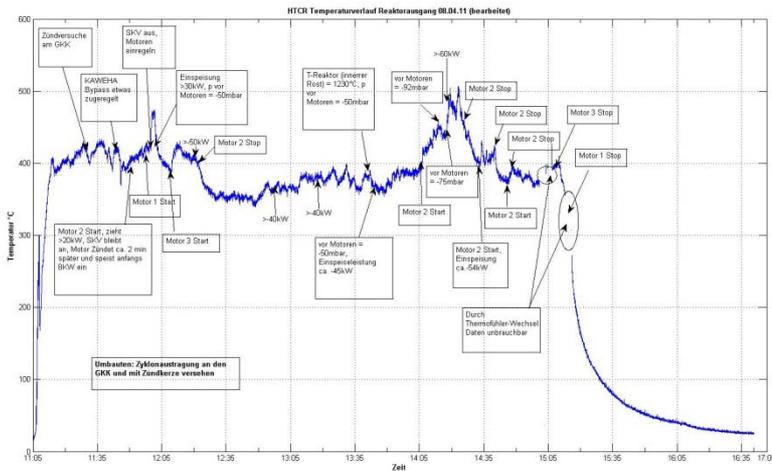
### Bilanzräume



Es ist ein umfangreiches Mess- und Analysenprogramm angedacht. Die Aufstellung in der unteren Tabelle erfolgt nach den Aggregatzuständen der Stoffe.

Gas	Parameter	Methode	Flüssigkeit	Parameter	Methode	Feststoff	Parameter	Methode
Gas-Luft-Gemisch Prozess- bzw. Synthesegas Abgas	CO O2 CO2 H2 CH4 C2H4 C2H6 u. a. NO NO2 Nges H2S SO2 H2O AOX	VISIT 03H VISIT 03H VISIT 03H VISIT 03H VISIT 02S VISIT 02S VISIT 02S VISIT 02S VISIT 02S VISIT 02S VISIT 02S VISIT 02S	Kondensate Emulsionen Motorenöl Abwasser Waschwasser (Absorptionsmittel)	C,H,N,S,O P Ölgehalt CSB BSB (TOC) gelöste Stoffe pH Feststoffgehalt (TS) Heizwert	Trockenschrank Bombenkalor.	Einsatzstoffe Koks/Holzkohle Rückstände Ablagerungen in Rohren/Ventilen Asche Sedimente	C,H,N,S,O P Wassergehalt Aschegehalt Teer flüchtige Stoffe (Glühverlust)	Trockenschrank ASBG VT-Labor Bombenkalorimeter
	Staubgehalt Rußzahl Teer	Handpumpe GC-MS						
	Heizwert	Kalorimeter bzw. berechnen						
<b>spezielle Analysen:</b> von besonders toxischen Stoffen wie z.B. Naphthalin								

#### 4. Erste Ergebnisse



Während der Testläufe werden Beobachtungen und Veränderungen im Anlagenbetrieb von Mitarbeitern vor Ort notiert und können somit direkt mit den erfassten Messergebnissen in Verbindung gebracht werden.

Erste Messungen mit einem Eheim VISIT 03H Holzgas-Analysegerät ergaben erste Erkenntnisse. Das Messgerät ist in der Lage online die verschiedenen Bestandteile des Gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) zu erfassen und für eine spätere Auswertung und Abgleich mit anderen Anlagengrößen abzuspeichern. Die Onlineerfassung der elektrischen und thermischen Leistung befindet sich noch in Planung.



#### 5. Aufgaben und Ausblick

Der Vergasungsprozess benötigt niedrige Feuchtegehalte und hohe Lufttemperaturen um die in dem Edukt (Biomasse) gespeicherte Energie effektiv nutzbar zu machen. Die hierfür benötigte Wärme muss durch interne Verschaltungen der Energie- und Stoffströme bereitgestellt werden.

Hohe Lufttemperaturen und niedrige Feuchtegehalte sind thermodynamisch günstig. Der Teergehalt des produzierten Gases wird geringer und der theoretisch notwendige Reaktionsraum kann kleiner bemessen werden.

Die Gastemperatur unmittelbar nach dem Kontakt mit dem Glutbett (Zone mit der höchsten Temperatur) ist eine einfache Leitgröße zur Prozessregelung. Ein hoher Ausbrand senkt die Kosten für die Ascheentsorgung und bereitet den Weg in die Kreislaufwirtschaft.

#### Quellen

Kaltschmitt, M.; Hartmann, H. (2001) Energie aus Biomasse Springer-Verlag ISBN 3-540-64853-4

Schlöpfer, P.; Tobler, J. (1937) Theoretische und praktische Untersuchungen über den Betrieb von Motorfahrzeugen mit Holzgas. Schweizerische Gesellschaft für das Studium der Motorbrennstoffe, Bern Schweiz

*Ising, M.* (2002) Zur katalytischen Spaltung teerartiger Kohlenwasserstoffe bei der Wirbelschichtvergasung von Biomasse. Dissertation UNI-Dortmund

*Unger, Ch; Schulzke, T.:*(2011) Thermodynamische Herausforderung der Biomassevergasung; 5. Internationale Anwenderkonferenz für Biomassevergasung, Stuttgart

*Friedemann, Zacharias:* (2001) Gasmotoren, Vogel, Würzburg

*Basu, Prabir* (2010) Biomass Gasification and Pyrolysis, Elsevier, Oxford, GB

*A V Brigwater* (2003), Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, CPL Press, Newbury, GB

## **Chancen und Grenzen des Einsatzes der Wirbelschichtvergasung für die energetische Biomassenutzung im kleinen Leistungsbereich**

*(Tim Schulzke, Fraunhofer UMSICHT)*

Tim Schulzke

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT

Osterfelder Straße 3

46047 Oberhausen

Tel.: 0208 / 8598 - 1155

Fax: 0208 / 8598 - 1423

E-Mail: [tim.schulzke@umsicht.fraunhofer.de](mailto:tim.schulzke@umsicht.fraunhofer.de)

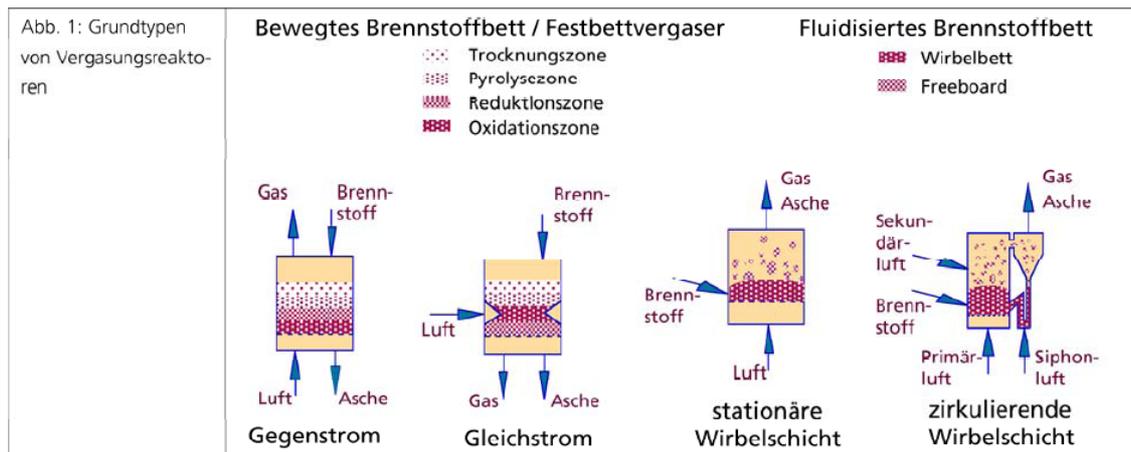
### **1 Einleitung**

Biomassevergasungsanlagen auf der Basis holzstämmiger Einsatzstoffe zeichnen sich mit einer spezifischen Treibhausgasreduzierung von mindestens 0,55 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/kWh<sub>el</sub>, durch ein hohes Klimaschutzpotenzial aus [RAMESOHL et al. 2006]. Eine Erhöhung ihres Beitrags an der Gesamtenergiebereitstellung in Deutschland trägt somit zur Erreichung der von der Bundesregierung angestrebten 40%igen Reduzierung von Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 bis zum Jahr 2020 bei, denn eine Anlage mit einer elektrischen Leistung von z. Bsp. 1 MW reduziert die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei 7500 Betriebsstunden pro Jahr um jährlich 4125 t. Hinzu kommen noch die vermiedenen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch gleichzeitige Wärmenutzung im KWK-Betrieb von Ca. 0,23 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent/kWh<sub>el</sub> bei einer 1 MW-Anlage also 1725 t CO<sub>2</sub> pro Jahr.

Die Verfahrensabläufe bauen sich dabei im Wesentlichen aus den Einzelprozessen Brennstoffannahme, Brennstoffbehandlung, Brennstoffdosierung, Vergasungsreaktor, Gasreinigung, Gaskühlung, Gasverstromung und schließlich Restwärmenutzung auf. Wesentlich bestimmt werden Art und Umfang der Brennstoffbehandlung und der Gasreinigung vom verwendeten Vergasungsreaktor und vom benutzten Vergasungsmittel. Für die nachfolgenden Thesen wird stets die Verwendung von Luft als Vergasungsmittel unterstellt, da sowohl Vergasungsanlagen mit Reinsauerstoff als auch solche mit Wasserdampf als Vergasungsmittel komplexere Verfahrenstechnik erfordern und daher spezifisch teurer sind. Für die gekoppelte Strom- und Wärmezeugung sind die Synthesegase aus einer Luftvergasung ausreichend, während für die Synthese von Grundchemikalien und Treibstoffen heizwertreichere und vor allem stickstofffreie Synthesegase erforderlich sind.

Abbildung 1 zeigt die für kleinere und mittlere Feuerungswärmeleistungen prinzipiell geeigneten Grundtypen von Vergasungsreaktoren. Zunächst lassen sich die Vergasertypen in zwei Gruppen unterteilen: die sogenannten Festbettvergaser, in denen der Brennstoff als „Festbett“ vorliegt und von oben nach unten mit zunehmender Umsetzung rutscht, und die Reaktoren mit fluidisiertem Brennstoffbett, in denen die (Brennstoff-)Partikel durch einen Gasstrom getragen schweben und sich relativ frei bewegen.

## Chancen und Grenzen des Einsatzes der Wirbelschichtvergasung für die energetische Biomassenutzung im kleinen Leistungsbereich



Die Festbettvergaser lassen sich in Abhängigkeit von der Strömungsrichtung des Vergasungsmittels weiter unterteilen in die Gegenstrom- und Gleichstromvergaser. Im Gegenstromvergaser strömt die Luft entgegen der Brennstoffbewegung von unten nach oben. Entlang der Brennstoffbewegung bilden sich 4 Zonen aus: in der obersten Zone mit der niedrigsten Temperatur entweicht die Feuchtigkeit aus dem holzartigen Brennstoff, er wird getrocknet. In der anschließenden Pyrolysezone werden die flüchtigen Bestandteile aus dem Brennstoff mit zunehmender Temperatur ausgetrieben. Unter der Pyrolysezone schließt sich die Reduktionszone an, in der das Kohlendioxid aus dem Gasstrom am festen Kohlenstoff des Brennstoffs zu Kohlenmonoxid reduziert wird. In der letzten Zone wird der verbliebene Kohlenstoff des Brennstoffs mit dem eintretenden Sauerstoff der Luft bei der höchsten Temperatur im Reaktor oxidiert zu Kohlendioxid. Vorteil dieses Konzepts ist die vollständige Brennstoffumsetzung. Der wesentliche Nachteil des Gegenstromvergaser ist sein extrem hoher Teergehalt im Rohgas, der Werte bis über  $20 \text{ g/Nm}^3$  erreichen kann. Diese hohe Teerbelastung erfordert eine aufwändige Gasreinigung, die den Prozess stark verteuert. Trotzdem gibt es dafür technisch praktikable Lösungen. Ein Beispiel dafür ist die seit mehreren Jahren laufende Anlage von Babcock Wilcox Völund in Harbore, Dänemark.

Beim Gleichstromvergaser befinden sich von oben nach unten wieder zuerst die Trocknungszone und dann die Pyrolysezone, jedoch strömen hier die austretenden Gase und Dämpfe nach unten. In den meisten Konstruktionen wird unterhalb der Pyrolysezone die Luft am Umfang über Eintrittsdüsen verteilt, so dass in der Oxidationszone die Pyrolysegase und Kohlenstoffteile verbrannt werden. Da wird ein großer Teil des Teers umgesetzt, der dann in der Nachreinigung nicht mehr entfernt werden muss. In der anschließenden Reduktionszone werden Wasserdampf und Kohlendioxid am verbliebenen Kohlenstoff zu Wasserstoff und Kohlenmonoxid reduziert. Vorteil dieses Konzepts ist die Tatsache, dass die in der Pyrolysezone gebildeten Primärteere durch die Oxidationszone strömen müssen und dort gecrackt werden können. Nachteil ist der schlechte Ausbrand in der Grundform dieses Vergaserkonzepts und die schlechte Skalierbarkeit des Vergasers. Bei Feuerungswärmeleistungen über  $1 \text{ MW}$  lässt sich im Allg. keine gute Verteilung der Luft in der Oxidationszone erreichen. Eine weitere Kapazitätserweiterung solcher Anlagen geht dann nur durch Parallelschaltung mehrerer Vergaser, so dass keine Reduktion der spezifischen Anlagenkosten erreicht werden kann.

Ein weiterer, gemeinsamer Nachteil der Festbettvergaser ist die Tatsache, dass die Luft, die Gase und die freigesetzten Dämpfe durch das Festbett strömen müssen. Das Bett muss daher eine hohe Porosität aufweisen. Daher sollten die Brennstoffe für Festbettvergaser in der Regel gleichmäßig große Abmessungen haben und wenig

Feinanteil besitzen. Das erfordert in der Brennstoffbehandlung entsprechenden Aufwand.

Während bei den Festbettvergasern das gesamte Feststoffinventar aus Brennstoff bzw. dessen Umsetzungsrückständen besteht setzt sich das das Feststoffinventar der Wirbelbettreaktoren im Wesentlichen aus einem sogenannten Bettmaterial (über 90 % des Inventars) und dem dosierten Brennstoff zusammen. Das Bettmaterial hat die Aufgabe, die bei der Teilverbrennung des Brennstoffs anfallende Wärme aufzunehmen, zu speichern und an die Brennstoffpartikel wieder abzugeben. Innerhalb des Reaktors bilden sich daher keine separaten Zonen aus. Obwohl am einzelnen Brennstoffpartikel die Prozesse Trocknung, Pyrolyse, Oxidation und Reduktion weiterhin nacheinander ablaufen, laufen sie aufgrund der unregelmäßigen Partikelbewegung innerhalb des Reaktorvolumens überall gleichzeitig ab. Aufgrund des großen Wärmespeichervermögens des eingesetzten Bettmaterials gibt es in Wirbelbettvergasern auch kaum Temperaturunterschiede innerhalb des Reaktors. Durch die gleichzeitige, kontinuierliche Dosierung von Luft und Brennstoff lassen sich Wirbelbett-Reaktoren sehr gut regeln. Dadurch wird die Betriebstemperatur über einen weiten Bereich „frei“ einstellbar, durch Änderungen im Verhältnis der dosierten Luft zur Brennstoffmenge und durch mögliche Luftvorwärmung. So kann die Vergasertemperatur „hoch“ (um 900 °C) gewählt werden, wenn ein hoher Ausbrand erreicht werden soll oder eine hohe Eintrittstemperatur in die nachfolgende Gasreinigung erwünscht ist. Andererseits kann die Vergasungstemperatur auch „niedrig“ (um 700 °C) eingestellt werden, wenn problematische Brennstoffe wie z. Bsp. Stroh mit einem niedrigen Ascheerweichungspunkt vergast werden sollen.

Die Wirbelbett-Reaktoren werden noch unterteilt in stationäre und zirkulierende Wirbelschichten. Bei der stationären Wirbelschicht ist der Gasstrom groß genug, um das Feststoffinventar vollständig in der Schwebe zu halten, ein Austrag von Bettmaterial findet jedoch nur in sehr begrenztem Umfang statt (im Wesentlichen beschränkt auf Abrieb und Flugkoks). Dagegen ist bei der zirkulierenden Wirbelschicht der Gasstrom so groß, dass ständig der gesamte Feststoff aus dem Reaktor ausgetragen wird. Anschließend wird in einem Zyklon der Feststoff vom austretenden getrennt und wieder in den Reaktor zurückgeführt. Nachteil dieser Wirbelbetten im kleinen Leistungsbereich ist ihr spezifisch hoher Preis. Mit zunehmender Leistungsgröße sinkt dieser jedoch, so dass im mittleren Leistungsbereich die stationären Wirbelbetten wirtschaftliche Vorteile gegenüber den nur schlecht skalierbaren Festbett-Gleichstromvergasern erlangen.

## **2 Entwicklung des Kraftwerkskonzepts mit trockener Gasreinigung**

Seit 1994 arbeitet Fraunhofer UMSICHT an der Entwicklung eines in Kraft-Wärme-Kopplung betriebenen Holzkraftwerks für den mittleren Leistungsbereich. Dabei stand zunächst die Entwicklung einer geeigneten Gasreinigung im Vordergrund, denn die mittlere Gaszusammensetzung enthielt zu viel teerförmige Verunreinigung für eine motorische Nutzung ohne Reinigungsschritt [ISING, 2002].

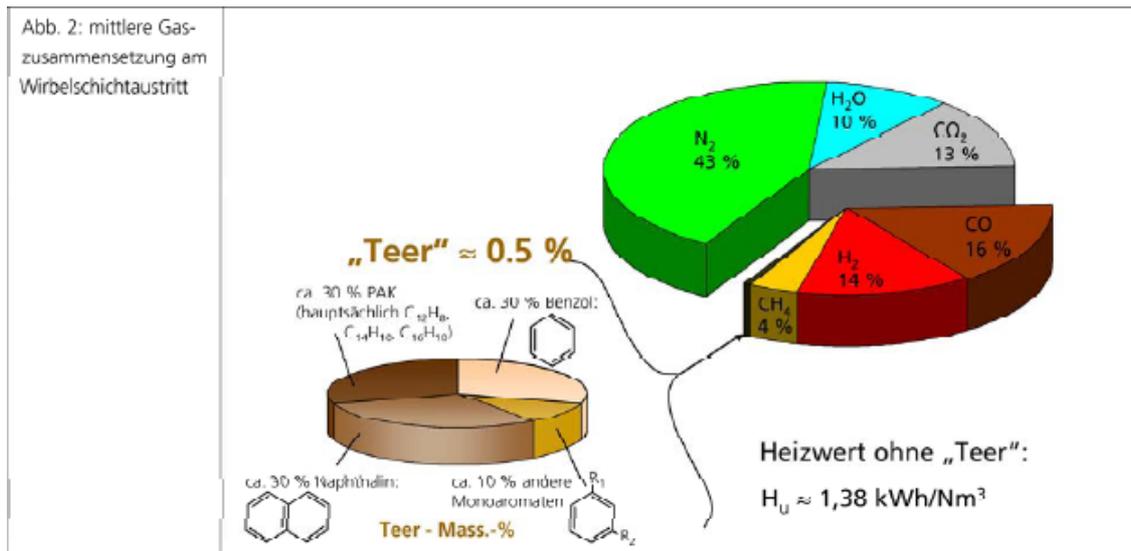


Abbildung 2 zeigt die mittlere Zusammensetzung des Synthesegases aus der zirkulierenden Wirbelschicht mit ca. 34 % brennbaren Bestandteilen und einem Gehalt an Teerverbindungen von etwa 0,5 Massen-%. Diese Teere bestehen zu etwa 113 aus einkernigen Aromaten (überwiegend Benzol) und zu 213 aus mehrkernigen aromatischen Kohlenwasserstoffen, diese zur Hälfte aus Naphthalin und zur Hälfte aus noch höher kondensierten aromatischen Kohlenwasserstoffen.

Nachdem erste Versuche mit Quarzsand als Bettmaterial zu einem mittleren Teergehalt von 4250 mg/Nm<sup>3</sup> und Spitzenbeladungen bis zu 10000 mg/Nm<sup>3</sup> erbrachten, war die erste Idee, durch Verwendung eines anderen, bezüglich Teerreformierung katalytisch aktiven Bettmaterials gänzlich auf eine Gasreinigung verzichten zu können. Mit der Verwendung von Dolomit, einem natürlichen Mineral, konnten Teergehalte um 300 mg/Nm<sup>3</sup> erreicht werden, bei anderen Mischungen aus natürlichen und künstlichen Mineralen sogar Gehalte um 120 mg/Nm<sup>3</sup>. Der von den Motorherstellern geforderte Grenzwert für die Nutzung der Synthesegase liegt jedoch bei 50 mg/Nm<sup>3</sup>, so dass auf jeden Fall eine zusätzliche Gasreinigung zur Reduzierung der Teerbeladung im Gas hinter dem Vergaser zu installieren ist. Da der Verbrauch an Bettmaterial durch Abrieb sowohl bei Dolomit als auch bei den anderen getesteten Mischungen sehr hoch ist und sich dadurch unverträglich hohe Betriebskosten ergeben, wurde als Kompromiss Olivin als Bettmaterial ausgewählt. Dieses natürliche Mineral ist sehr hart und hat dadurch sogar einen geringeren Abrieb als Quarzsand und besitzt außerdem eine gewisse Aktivität zur Teerreformierung. Das Synthesegas aus einer Wirbelschicht mit Olivin hatte eine mittlere Teerbeladung von 2500 mg/Nm<sup>3</sup>.

Versuche mit verschiedenen Schüttgutkatalysatoren zur Reformierung der Teere (Reaktion der Teerbestandteile mit Wasserdampf zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff) zeigten schnell, dass für eine gute Umsetzung hohe Eintrittstemperaturen erforderlich sind, andererseits Schüttgutkatalysatoren keine Beladung des Gases mit Staub vertragen (die Schüttgutkatalysatoren wirken wie Tiefenfilter, der Druckverlust durch die Schüttung nimmt unzulässig hohe Werte an). Da Staubfilter bei über 800 °C nur schwer zu betreiben sind, kamen Wabenkatalysatoren (siehe Abbildung 3, links) zum Einsatz, die in einem Gasstrom mit hoher Staubbelastung eingesetzt werden können. Wie Abbildung 4 für die Schlüsselkomponente Naphthalin zeigt (hoher Naphthalingehalt im Rohgas, höchste Molekülstabilität der mehrkernigen Aromaten und somit niedrigste Reaktivität) ist eine mittlere Reaktionstemperatur von etwa 900 °C erforderlich, um mindestens 90 % des Naphthalins umzusetzen (andere höhere

Aromaten sind dann nahezu vollständig umgesetzt). Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde ein Teerreformer entwickelt, der zur Erzielung der erforderlichen Umsätze mit 2 Lagen von Wabenkatalysatoren ausgestattet wurde. Zwischen den beiden Lagen wird zur Kompensation der endothermen Reaktionen etwas Luft zugemischt, so dass durch eine Teilverbrennung die Temperatur vor dem Eintritt in die zweite Lage wieder auf den ursprünglichen Wert angehoben wird.

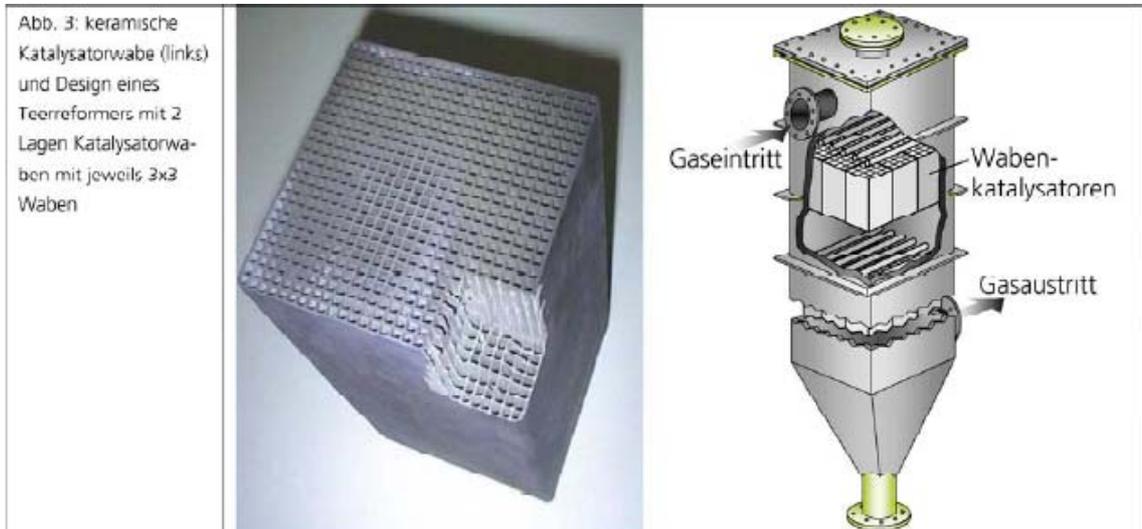
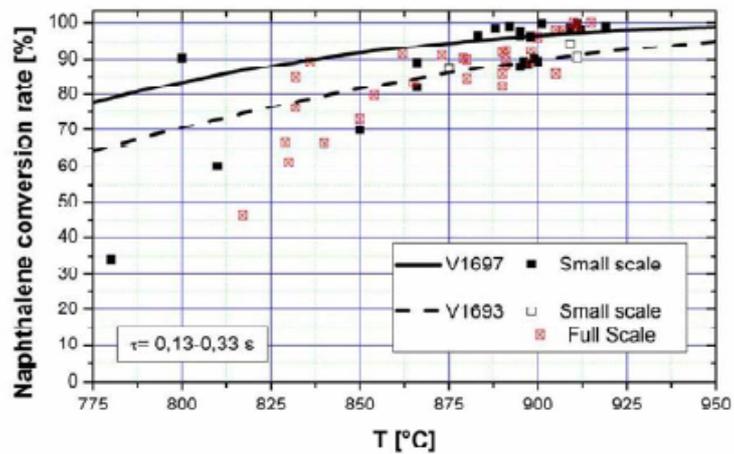
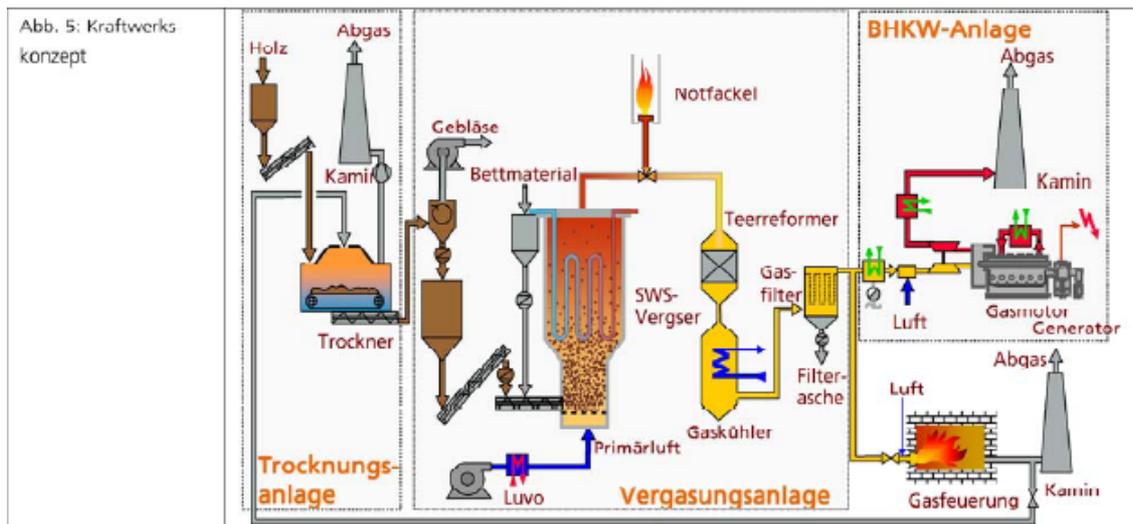


Abb. 4: Umsatz von Naphthalin als Schlüsselkomponente in Abhängigkeit von der Katalysatortemperatur



Auf der Basis dieser Ergebnisse, die zusammenfassend in [ISING, 2002] veröffentlicht sind, wird das in Abbildung 5 dargestellte Gesamtkonzept für ein auf holzartiger Biomasse basierendes (Heiz-)Kraftwerk entwickelt. Der Brennstoff wird bereits in gehäckselter Form angenommen, wobei allerdings keine Einschränkungen für den Gehalt an Feinmaterial gelten. Lediglich der Gehalt an Holzstaub (unter 1 mm Partikeldurchmesser) sollte ein gewisses Maß nicht überschreiten. Das Holz wird mit Abwärme aus dem Prozess auf einen Wassergehalt unter 25 Massen-% getrocknet und einem Dosierbunker zugeführt. Von dort wird es in den Vergaser, der aus einer

stationären Wirbelschicht besteht, gefördert zusammen mit dem Bettmaterial, das als Ersatz für den ausgetragenen Abrieb nachgefüllt werden muss. Das Gas verlässt den Vergaser mit einer Temperatur von Ca. 91,0 °C und durchströmt einen katalytischen Teerreformer mit Wabenkatalysatoren wie oben beschrieben. Anschließend wird das Gas in einem Gaskühler abgekühlt auf etwa 130 °C und danach in einem klassischen Schlauchfilter entstaubt. Ein zweiter Gaskühler reduziert die Temperatur des Gases auf die Motoreintrittstemperatur von ca. 40 °C, wobei Wasser als Kondensat anfällt, das abgetrennt wird. Als Verstromungsaggregat wird ein Verbrennungsmotor nach dem Otto-Prinzip gewählt wie er z. Bsp. von GE Jenbacher oder MWM Deutz angeboten wird. Die Wärme aus dem ersten Gaskühler wird zur Vorwärmung der Vergasungsluft genutzt, die Wärme aus dem 2. Gaskühler z. Bsp. zur Brennstofftrocknung. Die Abwärme aus dem Gasmotor wird zu Heizwecken in ein Fernwärmenetz eingespeist. Zur Sicherstellung der Wärmelieferung im Fernwärmenetz in Zeiten der Abregelung der Stromerzeugung durch den Netzbetreiber (basierend auf §6 EEG) kann ein gasgefeuerter Heizkessel installiert werden. Für dieses Konzept wurde vom deutschen Patent und Markenamt ein Verfahrenspatent erteilt [DE 100 37 762 B4]



### 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach VDI-Richtlinie 6025

Um die Skaleneffekte bei der Vergrößerung der Anlagenkapazität bewerten zu können, wurden für 4 verschiedene Leistungsgrößen die Investitions- und Betriebskosten sowie die Erlöse geschätzt bzw. berechnet. Die untersuchten Anlagengrößen belaufen sich auf eine Feuerungswärmeleistung (Brennstoffeintrag) von 100 kW, 1 MW, 5 MW und 10 MW. Mit einem Kaltgaswirkungsgrad von 79 % im Vergaser und einem elektrischen Wirkungsgrad des Motors von 38 % ergibt sich eine installierte, elektrische Leistung von 29,23 kW, 292,3 kW, 1.462 kW bzw. 2.923 kW. Zur Berechnung der Investitionen wurden für die Hauptaggregate wie Brennstofflagerung und -dosierung, Wirbelschichtreaktor inkl. Ausmauerung, Teerreformer, Gaskühler, Staubfilter, Primärluftgebläse, Kühlluftgebläse, Gasmotor und Wärmeübergabestation soweit möglich für alle 4 Leistungsgrößen konkrete Angebote eingeholt. Wo dies nicht möglich war wurde der jeweilige Preis über die relevanten Leistungsdaten mit der 7/10-Regel hochgerechnet. Kostenanteile für Gebäude, Montage, Rohrleitungen, MSR-Technik, Elektrik und Engineering/Genehmigung wurden nach der Zuschlagsfaktormethode mit allgemein für Kraftwerke üblichen Faktoren abgeschätzt.

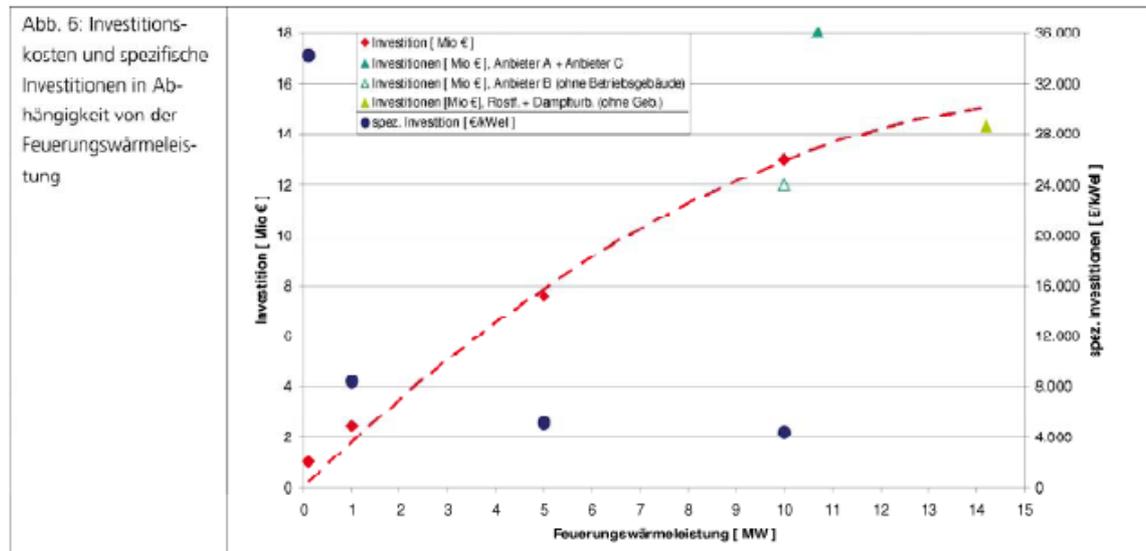


Abbildung 6 zeigt die sich auf diesen Daten ergebenden Investitionskosten (rote Rauten) in Abhängigkeit von der Feuerungswärmeleistung. Die spezifischen Investitionskosten fallen dabei von knapp 35.000 €/kW<sub>el</sub> für die kleine Anlage mit einer Feuerungswärmeleistung von 100 kW auf unter 4.500 €/kW<sub>el</sub> für das größte betrachtete Kraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 10 MW.

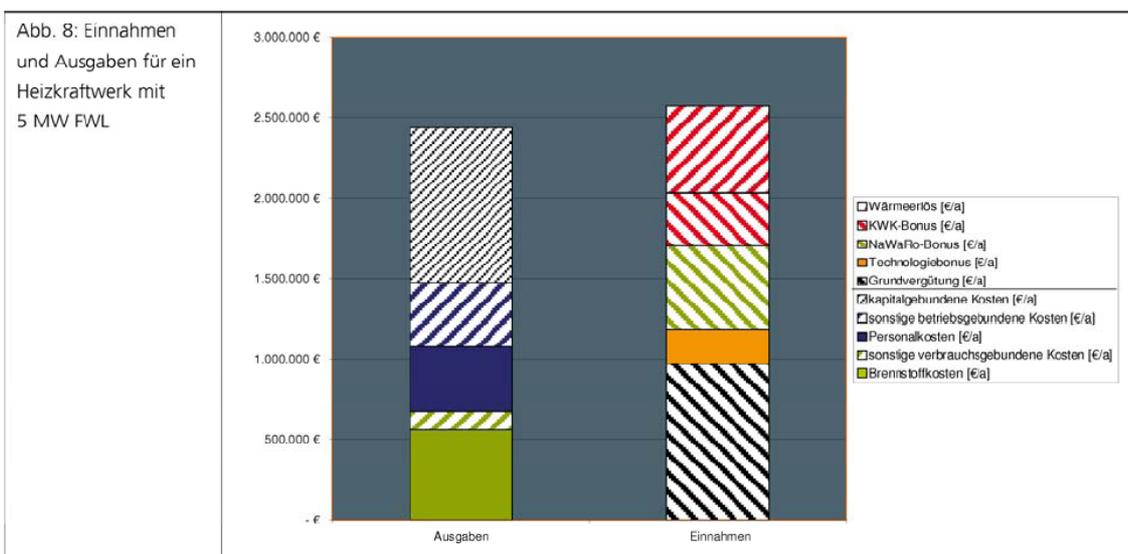
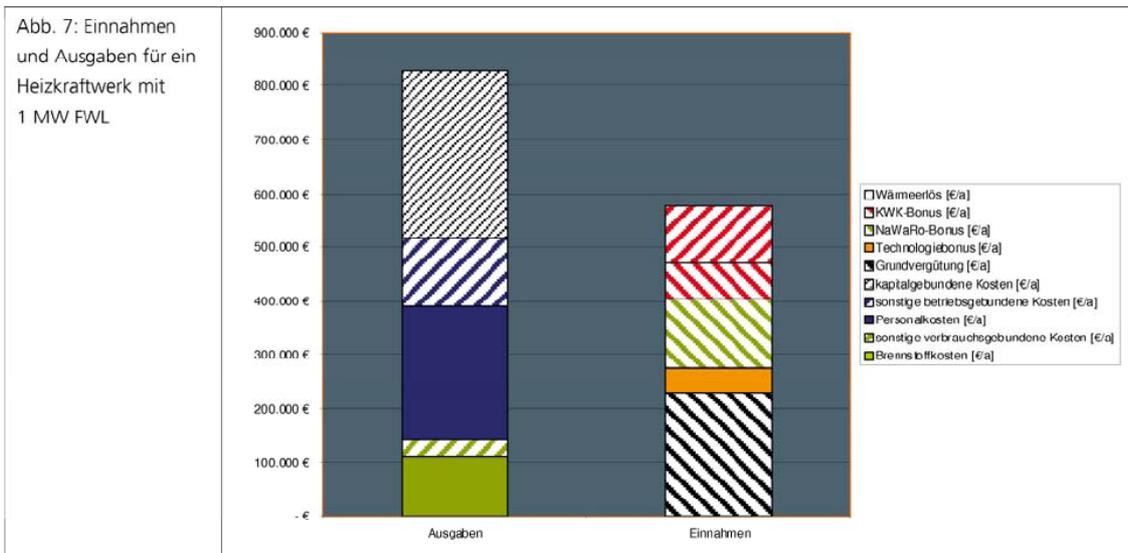
Zum Vergleich sind die Investitionskosten anderer Anbieter, ebenfalls auf Basis der Feuerungswärmeleistung, eingetragen, die alle mit der installierten elektrischen Leistungen um 3 MW<sub>el</sub> liegen. Dabei handelt es sich um unterschiedliche Technologien: mehrere, parallel betriebene Festbettvergaser (Gleichstromprinzip), gekoppelte Wirbelschichten mit Wasserdampfvergasung und Koksverbrennung und einer klassischen Rostfeuerung mit Wasserdampfkessel und Turbine. Der Vergleich zeigt, dass die Schätzung der Investitionskosten für diesen Leistungsbereich durchaus Marktpotenzial bietet.

Zur Überprüfung, ob sich (Heiz-)Kraftwerke dieser Art auch wirtschaftlich betreiben lassen, wurde eine Annuitätenrechnung nach der VDI-Richtlinie 6025 durchgeführt. Dazu sind alle im Laufe des Betrachtungszeitraums anfallenden Zahlungen und Erlöse in eine jährliche Summe umzurechnen. Für die Annahmen der Randbedingungen wurden im Wesentlichen die Angaben aus dem Methodenhandbuch des DBFZ im Rahmen des Förderprogramms „Optimierung der energetischen Biomassenutzung“ [THRÄN ET AL., 2010] übernommen. Als Betrachtungszeitraum wurde die Zeit der nach EEG gesicherten Stromerlöse von 20 Jahren gewählt. Der interne Zinsfuß wird zu 8 % angenommen. Für Instandsetzung werden 2,5 %/a der Investitionskosten angesetzt. Für den Betrieb werden 7.500 Vollastbetriebsstunden sowohl für die Stromerzeugung als auch den Wärmeabsatz ins Fernwärmenetz berücksichtigt. Als Brennstoff werden Waldholzhackschnitzel mit einem Wassergehalt von 40 Gew.-% und einem Preis von 75 €/t<sub>atro</sub> angenommen. Lediglich bei der für den Betrieb notwendigen Mitarbeiteranzahl wurde von den Empfehlungen des DBFZ abgewichen. Anstelle eines pauschalen Ansatzes von 0,5 Mitarbeiter pro MW Feuerungswärmeleistung wurden für die beiden kleinen Anlagen jeweils 5 Mitarbeiter unterstellt, für die Anlage mit 5 MW Feuerungswärmeleistung 8 Mitarbeiter und für die große Kraftwerksanlage 10 Mitarbeiter.

Abbildung 7 zeigt die Zusammensetzung der jährlichen Ausgaben und Erlöse für eine Kraftwerksanlage mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW. Auf der Ausgabenseite addieren sich 111.200 € Brennstoffkosten, 29.000 € sonstige

## Chancen und Grenzen des Einsatzes der Wirbelschichtvergasung für die energetische Biomassenutzung im kleinen Leistungsbereich

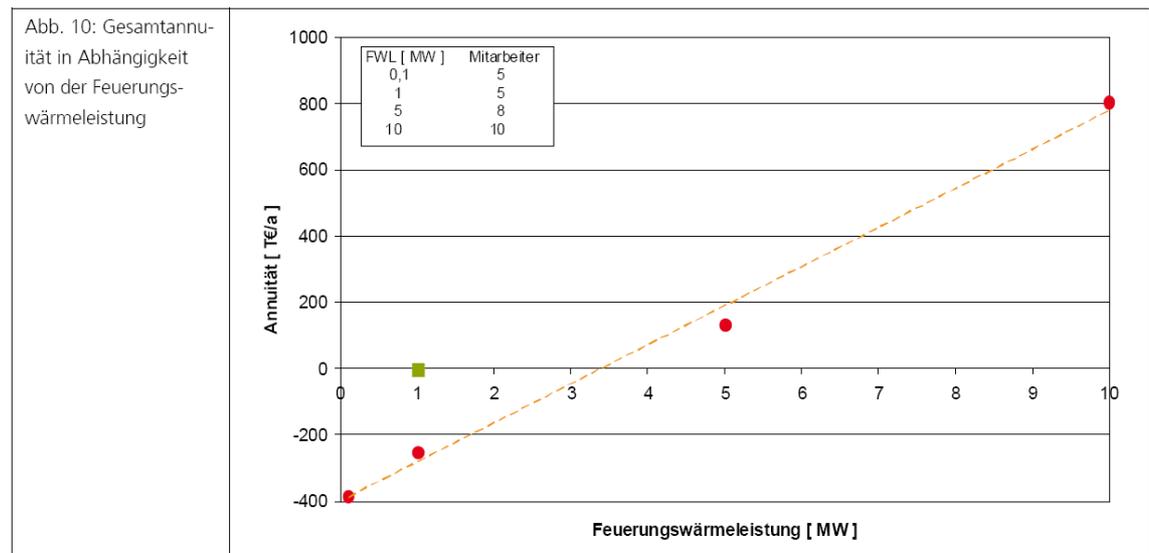
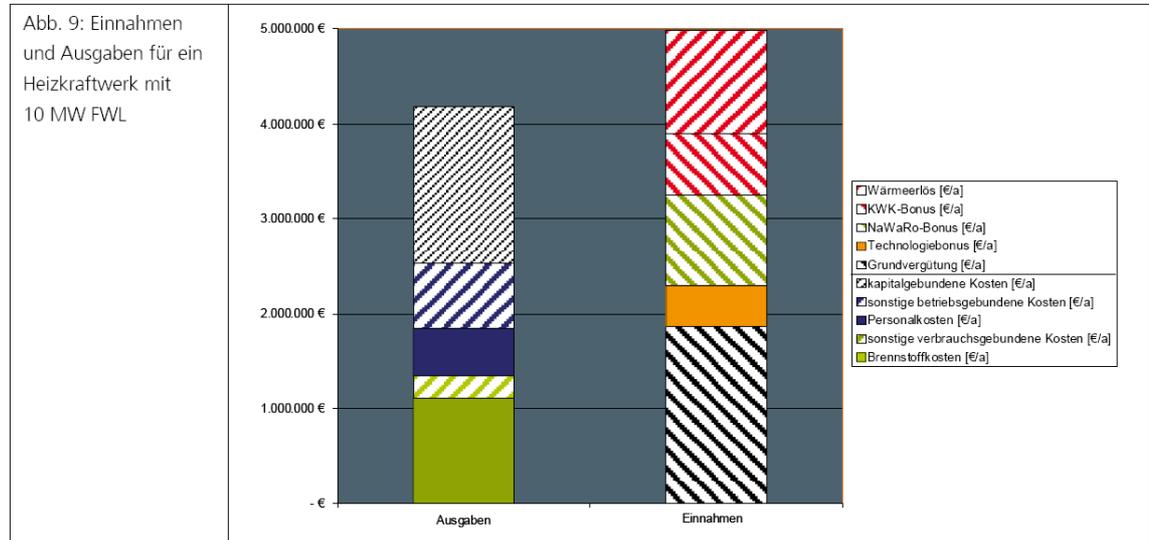
verbrauchsgebundene Kosten (Katalysatoren, Bettmaterial, Entsorgung von Rückständen,...), 250.000 € Personalkosten, 128.600 € sonstige betriebsgebundene Kosten (Wartung, Versicherung, Verwaltung,...) und 310.800 € kapitalgebundene Kosten (Abschreibung, Instandhaltung) zu jährlichen Gesamtausgaben knapp 830.000 € Dagegen stehen auf der Einnahmeseite Erlöse aus der Stromvergütung gem. EEG (231.600 € Grundvergütung, 43.400 € Technologiebonus, 130.200 € NaWaRo-Bonus und 65.100 € KWK-Bonus) und dem Verkauf der Wärme im Fernwärmenetz von 108.100 €. Zusammen ergeben sich Erlöse von 578.400 €. Die Gesamtannuität errechnet sich aus der Summe der jährlichen Ausgaben (negativ!) und Einnahmen. Für eine Kraftwerksanlage mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW ergibt sich somit eine jährliche Unterdeckung von 251.600 € und damit kein wirtschaftlicher Betrieb.



Die Abbildungen 8 und 9 stellen dieselben Kosten- und Einnahmepositionen für Kraftwerksanlagen mit Feuerungswärmeleistungen von 5 bzw. 10 MW dar. Auf Basis der getroffenen Annahmen übersteigen hier die Einnahmen die Ausgaben, so dass beide Anlagengrößen grundsätzlich wirtschaftlich betreibbar sind. Allerdings ist durch

## Chancen und Grenzen des Einsatzes der Wirbelschichtvergasung für die energetische Biomassenutzung im kleinen Leistungsbereich

die Anordnung der Einnahmepositionen auch klar erkennbar, dass beide Anlagen allein aus Erlösen aus der Stromerzeugung nach EEG nicht wirtschaftlich betreibbar sind. Erst zusammen mit den direkten Einnahmen aus dem Wärmeabsatz ins Fernwärmenetz kommt die Gesamtannuität in den positiven Bereich.



In Abbildung 10 ist die Gesamtannuität für alle Leistungsgrößen aufgetragen. Werden die Datenpunkte durch eine Ausgleichsgerade verbunden, so kann als Wirtschaftlichkeitsschwelle eine Feuerungswärmeleistung von etwa 3,3 MW abgelesen werden, was einer installierten elektrischen Leistung von 1 MW<sub>el</sub> entspricht.

Zusätzlich ist in Abbildung 10 als grünes Quadrat die Gesamtannuität für eine Kraftwerksanlage mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW eingetragen, wenn der auf die Abschreibung der Investition entfallende Anteil der kapitalgebundenen Kosten unberücksichtigt bleibt. Da dieser Punkt bei etwa 0 €/a liegt bedeutet das, dass der Betrieb einer Demonstrationsanlage zum Nachweis der prinzipiellen Dauerbetriebseignung eines Kraftwerks nach dem UMSICHT-Konzept aus den laufenden Einnahmen aus Strom- und Wärmeerlös gedeckt werden kann, wenn die Investition nicht zurückgezahlt werden muss.

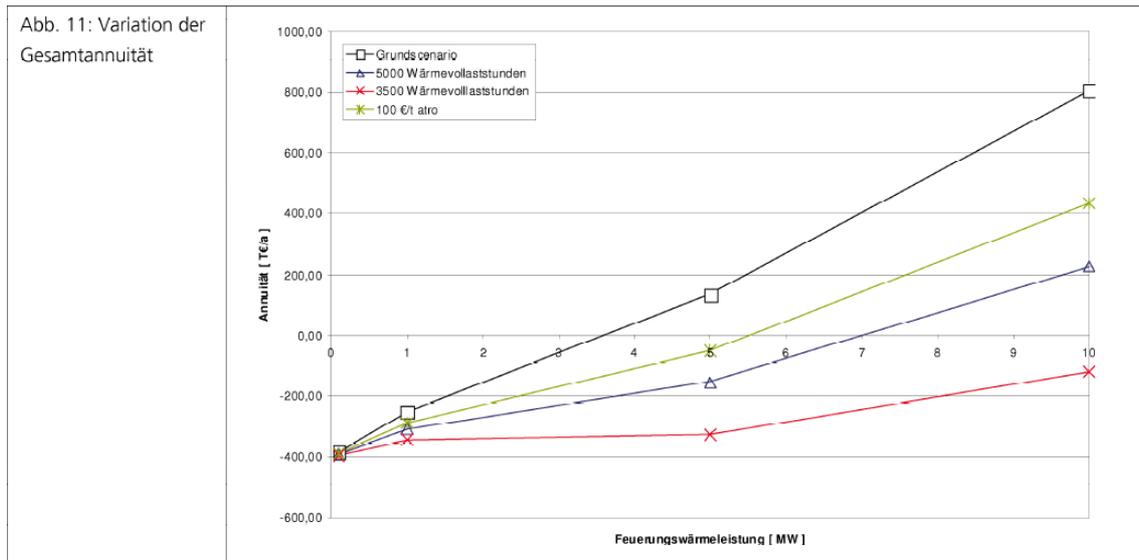


Abbildung 11 zeigt die Veränderung der Wirtschaftlichkeitsschwelle bei einer Änderung der Annahmen aus dem Grundscenario. Bei einem Brennstoffpreis von 100 €/t<sub>atro</sub> und sonst unveränderten Annahmen liegt die Wirtschaftlichkeitsschwelle bei etwas über 5 MW Feuerungswärmeleistung. Sinkt dagegen der Wärmeabsatz auf 5000 Vollastbenutzungsstunden (bei weiterhin 7500 Betriebsstunden Stromerzeugung), so steigt die Wirtschaftlichkeitsschwelle auf 7 MW; und bei nur 3500 Wärmevolllastbenutzungsstunden wäre selbst ein Kraftwerk mit 10 MW Feuerungswärmeleistung nicht mehr wirtschaftlich.

#### 4 Zusammenfassung

Die durchgeführten Investitionsrechnungen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für ein Biomasse-(heiz-)kraftwerk nach dem durch Fraunhofer UMSICHT patentierten Konzept der stationären Wirbelschicht mit katalytischer Teerreformierung und trockener Gasreinigung zeigen, dass derartige Kraftwerke auf Basis der Investitionen konkurrenzfähig sein können im Vergleich zu am Markt verfügbaren Alternativen und dass ab einer Feuerungswärmeleistung von 3,3 MW entsprechend einer elektrischen Leistung von 1 MW unter bestimmten Annahmen ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Die Wirtschaftlichkeitsberechnungen zeigen aber auch deutlich, dass unter den getroffenen Annahmen ein wirtschaftlicher Betrieb ohne Erlöse aus dem Wärmeabsatz in ein Fernwärmenetz für keine Leistungsklasse möglich ist.

Um dieses Konzept am Markt verkaufen zu können muss als nächster Schritt ein Demonstrationskraftwerk errichtet werden, dass die Dauerbetriebseignung demonstriert. Ein derartiges Kraftwerk mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW entsprechend einer elektrischen Leistung von knapp 300 kW erfordert eine Investition von 2,5 bis 3 Mio. € die durch den Betrieb dieses Kraftwerks nicht wieder erwirtschaftet werden können. Die laufenden Einnahmen dieser Anlagengröße wären allerdings ausreichend, um die laufenden Ausgaben zu decken, ein Betriebskostenzuschuss daher voraussichtlich nicht erforderlich.

#### 5 Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden gefördert durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit aufgrund eines Beschlusses des deutschen

Bundestages im Programm „Optimierung der energetischen Biomassenutzung“ im Rahmen der Klimaschutzinitiative der Bundesregierung.

Ein Förderprogramm der



Gefördert vom



Koordiniert vom



## Literatur

ISING, M.: Zur katalytischen Spaltung teerartiger Kohlenwasserstoffe bei der Wirbelschichtvergasung von Biomasse. Dissertation Universität Dortmund; Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart; 2002

RAMESOHL, S.; ARNOLD, K.; KALTSCHMITT, M.; SCHOLWIN, F.; HOFMANN, F.; PLÄTTNER, A.; KALIES, M.; LULIES, S.; SCHRÖDER, G.; ALTHAUS, W.; URBAN, W.; BURMEISTER, F.: Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse, Band 1 : Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen Untersuchung im Auftrag von BGW und DVGW 2006

THRÄN, D.; FISCHER, E.; HENNENBERG, K.; OEHMICHEN, K.; PFEFFER, D.; SCHMERSAHL, R.; SCHRÖDER, T.; ZELLER, V.; ZEYMER, M.: Methoden zur stoffstromorientierten Beurteilung für Vorhaben im Rahmen des BMUFörderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ - Teil 1: Technologiekennwerte, Gesteuerungskosten, Treibhausgasbilanzen DBFZ, Leipzig, 2010

Patent DE 100 37 762 B4: Vorrichtung zur Stromerzeugung aus Biomasse durch Vergasung mit anschließender katalytischer Beseitigung von Teerverbindungen aus dem Brenngas



## **Ergebnisse der Diskussion und Versuch einer Zusammenfassung**

*(Prof. Tobias Zschunke, Hochschule Zittau/Görlitz)*

### **Thesen zu gekoppelten Elektroenergie- und Wärmebereitstellung aus Biomasse in dezentraler Anwendung – ein Zwischenstand**

Der Bereitstellung von Strom und Wärme aus Biomasse wird eine gewisse Bedeutung bei der Ablösung nuklearer und fossiler Primärenergieträger zugesprochen. Das Thema ist sehr komplex und bedarf noch einer intensiven Durcharbeitung in den nächsten Monaten und Jahren unter Berücksichtigung der aktuellen technologischen Entwicklungen und Veränderungen in den politisch-wirtschaftlichen Randbedingungen.

Mit der folgenden Zusammenstellung von Thesen wird versucht, interessante Punkte der gegenwärtigen Entwicklung zu markieren, wie sie während der hier dokumentierten Tagung bzw. während der Diskussionen in deren Umfeld und Nachgang zum Ausdruck gekommen sind. Ein Anspruch auf Vollständigkeit bzw. vollständig ausgewogene Wiedergabe wird nicht erhoben. Vielmehr geht es darum, die Dynamik in der Diskussion zu belassen und weitere Wortmeldungen zu Details oder generellen Aspekten zu provozieren. Der Diskussions- und Gestaltungsprozess und vor allem das Bestreben zur wissenschaftlichen Durchdringung und Generalisierung muss fortgesetzt werden.

Thesen:

1. Biomasse für die energetische Nutzung kann primärer oder sekundärer Herkunft sein.
  - a. Primäre biogene Energierohstoffe (Primärenergie) sind Anbaubiomasse oder Produkte aus deren Aufbereitung. Diese sind unmittelbar mit einer landwirtschaftlichen Flächennutzung gekoppelt.
  - b. Sekundäre biogene Energierohstoffe sind solche, die aus der stofflichen Biomassenutzung (Ernährung, Bekleidung, Möbel, Gebäude, Landschaft) entstehen als
    - i. Nebenprodukte der Bereitstellungskette
    - ii. Abfallprodukt nach Ablauf der Nutzungsdauer
2. Die wesentlichen Eigenschaften für die energetische Nutzung ergeben sich aus Brennwert, Wassergehalt und Elementarzusammensetzung der energetische bedeutsamen (Brennbares) und der energetisch unbedeutenden (Inertstoffe) Bestandteile.
3. Wesentlicher Gestaltungsspielraum im Sinne einer Erhöhung des Aufkommens an biogenen Energierohstoffen besteht aus gesellschaftlicher Sicht in der Erhöhung des Aufkommens an primäreren biogenen Energierohstoffen /Anbaubiomasse). Der Effizienz der Energiebereitstellung bezogen auf die genutzte Fläche kommt deshalb eine hohe Bedeutung zu. Daraus folgt, dass komplette Prozessketten betrachtet werden müssen, dass also zur Ermittlung regionalwirtschaftlich sinnvoller Konzepte z.B. auch die Effizienz des Umwandlungsschrittes von Biomasse zu Brenngas betrachtet werden muss.
4. Weiterer wesentlicher Gestaltungsspielraum besteht darin, Neben- und Abfallstoffe einer Kaskadennutzung zuzuführen und damit zu sekundären Rohstoffen zu machen. Dies schließt das Bestreben ein, im Falle der nicht mehr

gegebenen stofflichen Nutzbarkeit eine Nutzung als sekundäre Energierohstoffe anzuschließen, die wiederum eine exergetische Kaskadennutzung einschließt.

5. Um für energetische Analysen eine methodisch durchgehend konsistente Berechnung zu erhalten, ist die Arbeit mit Brennwerten anzustreben. Dies ermöglicht, auch der biochemischen Gaserzeugung einen Effizienzparameter zuzuordnen, da der Brennwert von Gärsubstraten positive Werte annimmt.
6. Die biochemische Umwandlung vergleichsweise wasserarmer Biomasse auf dem Wege der Trockenfermentation kann so gestaltet werden, dass 50 % (+/-5...10 %) des Brennwertes in chemische Energie des Produktgases umgewandelt werden.
7. Die energetische Nutzung von inhomogenen Abfällen erscheint momentan nur auf dem Wege der Trockenfermentation möglich.
8. In eine komplexe Prüfung möglicher Verwertungswege sollte eine Verbrennung der Abfälle einbezogen werden. Technologisches Hindernis sind die niedrigen Trockensubstanz-Gehalte. Ausweg könnte ein Verschneiden mit Biomasse höheren Trockensubstanz -Gehaltes sein.
9. Bei der Bewertung der Verwertungswege von Abfall kann offenbar die energetische Effizienz nicht das einzige Kriterium sein.
10. Wichtiger Punkt für den Erfolg der dezentralen Energiebereitstellung aus Biomasse ist neben den Kapitalkosten und den Brennstoffkosten der Produkterlös. Weil Wärme bei allen Technologien einen wichtigen Teil des energetischen Outputs ausmacht, ist es bedeutsam, diese Wärme kommerziell zu nutzen und damit betriebswirtschaftlich wirksam zu machen. Stromerzeugung wird demgegenüber zum kommerziell verwertbaren Nebenprodukt.
11. Für die Klimawirksamkeit sind niedrige spezifische Kosten bezogen auf die elektrische Leistung wichtiger als ein hoher Wirkungsgrad an sich. Es kommt also neben einer hohen Wärmenutzung auf eine hohe Kosteneffizienz wirkungsgradsteigernder Maßnahmen an.
12. Aktuelle Schlussfolgerungen für Dampfkraftprozesse (Rankine-Prozesse) mit organischen Substanzen statt Wasser als Arbeitsmittel, sogenannten ORC-Anlagen (Organic Rankine Cycle):
  - a. starker Marktzuwachs
  - b. stark im Temperaturbereich um 300...400 °C
  - c. Vorteil gegenüber Wasserdampf: geringere Personalkosten (5...6 Stunden pro Woche) wegen der Drucksicherheitsproblematik
  - d. Wirkungsgrade immerhin 20...25 %
  - e. kommerzieller Wärmeverbrauch erforderlich für eine wirtschaftliche Arbeitsweise
  - f. bei Anwendung für Nachverstromung von Abwärme aus BHKW muss das Gesamtsystem bilanziert werden, um die Wärmenutzung nicht doppelt zu rechnen
  - g. Technologische Entwicklung im Gange in Richtung überkritischer Arbeitsweise, Direktverdampfer, und Anwendung von Arbeitsfluidgemischen

- h. Herausforderung: Optimierung zwischen Temperaturdifferenzen (Exergieverlusten) und Wärmeübergangsverhalten
  - i. unter 100 kW noch viel Bedarf
  - j. sicherheitstechnische Aspekte (Entzündlichkeit, Giftigkeit), umwelttechnische Aspekte (GWP, ODP, Wassergefährdungsklasse) und wirtschaftliche Aspekte (Wirkungsgrad) sind gegeneinander abzuwägen, um das für den jeweiligen Prozess und die Rahmenbedingungen geeignetste Arbeitsmittel zu finden
  - k. Abwärmenachverstromung von BHKW ist ein künftiges Geschäftsmodell, verlässliche Technologie ist aber noch nicht verfügbar
  - l. Stromgestehungskosten von unter 10 Cent/kWh sind bei genügend hohem kommerziell abgesichertem Wärmebedarf zu erreichen
  - m. auch bei ORC-Anlagen geht der Trend zu kleineren Anlagen (unter 50 kWel) weil die Anlagen über 200 kWel für das Abwärmeangebot der meisten Biogasanlagen zu groß dimensioniert sind
13. Schlussfolgerungen Stirling-Anlagen in Kombination mit zweistufiger Biomasseverbrennung:
- a. Investition oberhalb von 6.000 EUR/kWel
  - b. technisch relativ chancenreich
  - c. Der Vorteil: zweistufige Verbrennung ist gerade bei schwierigeren Brennstoffen technisch besser beherrschbar als eine einstufige Feststoffverbrennung
  - d. elektrische Wirkungsgrad 17 %
  - e. Stirling-Motoren-Konzepte sind für Lastwechselfahrweise nicht geeignet
14. Schlussfolgerungen zu Vergasung:
- a. Erfolge der Technologie als Festbettvergasung mit Verbrennung im Hubkolbenmotor zeichnen sich im Leistungsbereich unter 50 kWel deutlich ab
  - b. Elektrische Wirkungsgrade bezogen auf den Brennstoffinput zwischen 20 und 25 % sind nachgewiesen
  - c. Das Wirkungsgradpotenzial liegt bei ca. 30 bis 40 %
15. Von den untersuchten Möglichkeiten kommen momentan als erfolgversprechende Konzeptionen in Betracht:
- a. Raumwärme-Versorgung
    - i. gasgefeuerter Stirling-Motor auf der Basis des von Stirling DK verfolgten Konzeptes, mit vorgeschalteter Festbett-Gegenstromvergasung wird eine möglichst hohe energetische Umwandlungseffizienz angestrebt
    - ii. gasgefeuerter Verbrennungsmotor, vorgeschaltete Festbett-Gleichstromvergasung wegen niedriger Teerbelastung des Gases, dabei wird ein C-Anteil im Reststoff in Kauf genommen
  - b. Industrie-Wärme-Versorgung, als vorgeschaltete Prozesse im Sinne einer exergetischen Kaskadennutzung bieten sich hier an:
    - i. Dampfmotor

ii. Kleindampfturbine

iii. ORC-Prozess

16. Bei extern gefeuerten Konzepten kann theoretisch auf eine zusätzliche Wärmeversorgung verzichtet werden.
17. Elektrische Wirkungsgrade von 15...25 % für die Stromerzeugung aus biogenen Energierohstoffen in kleinen Anlagen sehr realistisch.
18. Spezifische Investitionskosten bis auf 3.500 EUR/kWel absenkbar, was für das Erreichen wirtschaftlicher Gesamtkonzepte unbedingt erforderlich ist.
19. Anlagenauslegung im Einzelfall in Anpassung an die in großer kombinatorischer Vielfalt auftretenden örtlichen Randbedingungen erforderlich.
20. Es gibt offenbar keine generell überragende KWK-Technologie für die Nutzung biogener Energierohstoffe.
21. Biomasse-Energie ist eine interessante Chance, setzt aber hohes organisatorisches und technisches Geschick vor Ort voraus.
22. Biomasse-Energie-Anlagen sind besonders im thermochemischen Bereich auf Grund der individuellen Brennstoffeigenschaften von einem servicearmen Betrieb wie z.B. erdgasbetriebene Anlagen noch weit entfernt.
23. Die Anpassung an wechselnde elektrische Lasten ist vor allem mit folgenden beiden Konzepten möglich: zweistufige Biogas-Fermentation und Holzgas-BHKW.
24. Je kleiner die Anlage, umso wirtschaftlicher sind Brennstoffbeschaffung (besonders im Holzbereich) und Wärmenutzung möglich.
25. Ein volkswirtschaftlich interessantes Leistungsfenster liegt zwischen 20 und 100 kWel.
26. Technische Herausforderung ist es, das Brennstoffband zu erweitern.