

TAGUNGSBAND

Beiträge zum Fachkolloquium
“Biomass to Power and Heat”

01. - 02. Juni 2016 in Zittau

Autorenmanuskripte

Herausgegeben von der Hochschule Zittau/Görlitz

Organisationskomitee:

Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke (Hochschule Zittau/Görlitz)

Kontakt: T.Zschunke@hszg.de

Dipl.-Ing. (FH) Mareike Weidner (Hochschule Zittau/Görlitz)

Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider (Hochschule Zittau/Görlitz)

Angela Gröber (DBFZ)

ISBN 978-3-941521-23-0



Energetische
Biomassenutzung

Kurzreferat

Der sächsische Umwelt- und Landwirtschaftsminister Thomas Schmidt eröffnete am 01. Juni 2016 die bereits zum fünften Mal von der Hochschule Zittau/Görlitz veranstaltete Tagung „Biomass to Power and Heat“. Diese wurde erstmals 2011 unter dem Namen „Elektroenergie aus Biomasse“ veranstaltet und hat sich in den letzten fünf Jahren zu einer festen Größe in der energetischen Biomassenutzungsthematik entwickelt. In diesem Jahr stand mit Unterstützung der IHK-Geschäftsstelle Zittau und des Generalkonsulats der Tschechischen Republik in Dresden vor allem die Kooperationsentwicklung mit den östlichen Nachbarländern im Mittelpunkt.

Im inhaltlichen Zentrum der Tagung steht v.a. die Nutzung von Holz und darüber hinaus möglichst anderer Biomassen für die Bereitstellung von Nutzwärme und Elektroenergie in dezentralen, eher kleinteiligen Anwendungen. Der englischsprachige Name der Tagung nimmt den populären Mainstream der Bezeichnung von Technologieklassen in der Energie- und Prozesstechnik auf. So wie z.B. „Biomass to Liquid, BtL“ eine Kurzbeschreibung für die Erzeugung von flüssigen Kraftstoffen aus Biomasse ist oder „Power to Heat“ die Wandlung von Überschussstrom in Nutzwärme beschreibt, ist es hier die Wandlung von Biomasse in Elektroenergie (power) und Nutzwärme (heat). Wie das Themenspektrum der diesjährigen Tagung zeigt, hilft nur interdisziplinäres Arbeiten weiter. Eine der neuen Fragestellungen, die aktuell in die Diskussion gekommen sind, ist die Wandlung von Biomasse zu Kohle als Koppelprodukt der Wärme- und Strombereitstellung, sei es zur Bodenverbesserung oder zur finalen Einlagerung von Kohlenstoff.

Die Referierenden kamen aus ganz Deutschland, Tschechien, der Schweiz und Österreich sowie Brasilien. Sie vertreten vor allem privat und öffentlich finanzierte Forschungseinrichtungen aber auch fachliche Bundes- und Landeseinrichtungen. Im Rahmen der Beiträge wurden einerseits Möglichkeiten der nachhaltigen Biomassebereitstellung und andererseits die Risiken der Lagerung und die Entwicklungen von Konversionsverfahren vorgestellt. Einen weiteren Schwerpunkt bildete die energetische Biomassenutzung durch Konzepte auf Basis von Stirlingmotoren bis hin zu Regelung- und Überwachungssystemen für die Effizienzsteigerung und Schadstoffminderung. Darüber hinaus stellten Vertreter der Universität Prag die in Tschechien existenten Aktivitäten zur energetischen Biomassenutzung vor. Der abschließende Vortragsblock befasste sich wiederum direkt mit den technischen Lösungen und Fragestellungen zur thermochemischen Konversion von Biomasse.

Parallel zur Plenarveranstaltung präsentierten sich auch in diesem Jahr diverse Unternehmen im Rahmen von kleinen Messeständen, wodurch den Tagungsteilnehmern zusätzlicher Raum für Detailfragen und Anregungen geboten wurde. In diesem Rahmen konnten u.a. die Firmen Burkhardt GmbH, Spanner Re² GmbH, Holzenergie Wegscheid GmbH und Janner Waagen GmbH als Aussteller gewonnen werden.

Im Rahmen der Veranstaltungsvorbereitung, z.B. bei der Themengestaltung, der Bewertung der eingereichten Beiträge und bei der Suche nach Sponsoren, war der Tagungsausschuss beratend tätig. Einige der Ausschussmitglieder haben zudem als Sitzungsleiter aktiv an der Durchführung der Veranstaltung mitgewirkt. Somit möchten die Herausgeber einen besonderen Dank an die nachfolgend aufgeführten Mitglieder des Ausschusses richten:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles (DBFZ), Dr.-Ing. Andreas Ortwein (DBFZ), Dipl.-Ing. Dieter Bräkow (FEE), Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker (RWTH Aachen), Dipl.-Ing. Yves Noël (RWTH Aachen).

Inhaltsverzeichnis

Seite

Kurzreferat	- III -
Inhaltsverzeichnis.....	- V -
Überblick (<i>Prof. Tobias Zschunke, Hochschule Zittau/Görlitz</i>)	- 7 -
The greenGain project - Supporting Sustainable Energy Production from Biomass from Landscape Conservation an Maintenance Work (<i>Aline Clalüna; Landwirtschaftskammer Niedersachsen</i>).....	- 9 -
Ökologischer und ökonomischer Mehrwert durch die Bereitstellung holzartiger Biomasse aus Agroforstsystemen (<i>Dr. Christian Böhm, Michael Kanzler, Jaconette Mirck; alle BTU Cottbus</i>)	- 15 -
CLEANPELLET - Entwicklung eines Verfahrens für die Erzeugung emissionsarm verbrennbarer Gärrestpellets zur Nutzung als Brennstoff für Haus- und Kleinf Feuerungsanlagen (<i>Olaf Scheithauer; Fraunhofer IKTS Dresden</i>)	- 27 -
Spontanreaktionen bei der Lagerung von Biomassen (<i>Prof. Ullrich Krause; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg</i>).....	- 37 -
Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW (<i>Christian Büttner; CUTEC-Institut, TU Clausthal</i>).....	- 51 -
Die stromerzeugende Pelletsheizung (<i>Dr. Andreas Gimsa; STIP - Stirling Technologie Institut Potsdam</i>).....	- 61 -
Mikro-KWK mit einem biomassebetriebenen Stirlingmotor auf Basis einer stationären Wirbelschichtfeuerung (<i>Dominik Müller, Thomas Plankenbühler, Jürgen Karl; alle FAU Erlangen-Nürnberg</i>).....	- 73 -
Innovatives Regelungs- und Überwachungssystem zur Steigerung der Effizienz und Schadstoffminderung in automatischen und handbeschickten Vielbrennstoffsystemen (<i>Dr. Mohammad Aleysa, M. Sc. Niro Akbary, M. Sc. Souha Meriee; alle Fraunhofer Institut für Bauphysik Stuttgart</i>).....	- 83 -
Biogas production from different biomass resources (<i>Pavel Míchal; Czech University of Life Sciences Prague</i>)	- 93 -

- Comparison of biochar derived from contaminated biomass with commercially produced biochar and their ability to increase sorption of risk elements in two fluvisols (*Katerina Brendova; Czech University of Life Sciences Prague*)..... - 103 -**
- Enhancement of combustible properties of syngas, applied in a spark ignition engine in autonomous biomass into electricity conversion systems (*PhD Ass. Prof. Aliaksandr Pilatau; Technological Institute of Aeronautics Brazil*) - 115 -**
- Erfahrungen mit alternativen Brennstoffen im Entrade Biomassevergaser E3 (*Christian Zuber; ENTRADE Energiesysteme AG*)..... - 125 -**
- Frust oder Lust? Erkenntnisse aus dem Betrieb von geförderten bayerischen Holzvergasungsanlagen (*Wolfram Schöberl; C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing*)..... - 135 -**
- Dekarbonisation und Energie-Erzeugung geht gleichzeitig. Die Zukunft ist klimapositiv! (*Martin Schmid; Ökozentrum Langenbruck*)..... - 141 -**
- Auswirkungen regionaler Energiemärkte auf die dezentrale Energieversorgung (*Jens Maiwald, Prof. Tino Schütte; Hochschule Zittau/Görlitz*)..... - 149 -**

Überblick

(Prof. Tobias Zschunke, Hochschule Zittau/Görlitz)

Den Rahmen der Veranstaltung bildeten interessante Vorträge aus Sicht von Forschung, Entwicklung, Planung und Betrieb von Anlagen zur Bereitstellung von Strom und Wärme aus Biomasse. Um einen kurzen Inhaltsüberblick zu generieren, werden mit den folgenden Aufzählungen ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Wertung, die im Rahmen dieser Tagung präsentierten und diskutierten Themen zusammengestellt.

- Hinsichtlich der Brennstoffbereitstellung für die energetische Verwertung aus Landschaftspflegematerial wurde zum einen das EU-Projekt greenGain durch Aline Clalüna (Landwirtschaftskammer Niedersachsen) vorgestellt und zum anderen durch Dr. Christian Böhm (BTU Cottbus) auf die Vorteile von Agroforstsystemen (Kombination von Ackerflächen mit Gehölzstreifen) eingegangen. Die Risiken bei der Lagerung von Biomasse in Bezug auf die Selbstentzündlichkeit wurden durch Prof. Ullrich Krause (Universität Magdeburg) dargestellt.
- Die Bereitstellung von Pellets aus Gärresten und deren energetische Nutzung in Haus- und Kleinfeuerungsanlagen ist Inhalt des Projektes CLEANPELLET, das durch Olaf Scheithauer (Fraunhofer IKTS) vorgestellt wurde.
- Die Nutzung von Stirlingmotoren in Verbindung mit biogenen Brennstoffen wurde im Rahmen der Vorträge von Christian Büttner (CUTEC-Institut), Dr. Andreas Gimsa (STIP) und Dominik Müller (FAU Erlangen-Nürnberg) ausführlich diskutiert und bildete somit einen Schwerpunkt der diesjährigen Veranstaltung.
- Durch Dr. Mohammad Aleysa vom Fraunhofer IBP in Stuttgart wurde die Entwicklung eines Regelungs- und Überwachungssystems für automatische und handbeschickte Vielbrennstoffsysteme dargestellt.
- Zwei Vertreter der Universität Prag (Pavel Michal, Katerina Brendova) stellten Forschungsvorhaben hinsichtlich der biochemischen Vergasung bzw. Biokohle dar und gewährten diesbezüglich einen Einblick in die tschechischen Aktivitäten im Themenbereich der energetischen Biomassenutzung.
- Sowohl einen neu entwickelten Biomassevergaser als auch die gewonnenen Erfahrungen mit alternativen Brennstoffen beschrieb Christian Zuber (ENTRA-DE AG) in seinem Vortrag. In diesem Zusammenhang wurde durch Aliaksandr Pilatau (Technological Institute of Aeronautics Brazil) ein neues mehrstufiges Vergasungsverfahren im Technikumsmaßstab vorgestellt.
- Die gewonnenen Erkenntnisse diverser bayrischer Betreiber von kleintechnischen Holzvergasungsanlagen stellte Wolfram Schöberl (C.A.R.M.E.N.) umfassend vor.
- Martin Schmid vom Schweizer Ökozentrum Langenbruck beschrieb ein Konzept der Pyrolyse mit externer Wärmebereitstellung aus der Pyrolysegasverbrennung im flammenlosen Verfahren und der gleichzeitigen Stromerzeugung mit einem extern befeuerten Luftgasturbinenprozess.

Die Zusammenstellung der Tagungsbeiträge ergibt einen spannenden Einblick in Stand und Potenziale der Bioenergie bei Einsatz fester Biomasse und vor allem zu der großen Fülle von Ansätzen für anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung.

The greenGain project - Supporting Sustainable Energy Production from Biomass from Landscape Conservation and Maintenance Work

(Aline Clalüna; Landwirtschaftskammer Niedersachsen)

Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Geschäftsbereich Forstwirtschaft
Fachbereich 4.2
Johannssenstraße 10
30159 Hannover
Tel.: (0049) 511 3665 1443
Mail: aline.claluena@lwk-niedersachsen.de
www.greengain.eu



1. About greenGain

The EU-project greenGain is looking for solutions to increase the energy production through biomass coming from landscape conservation and maintenance work (LCMW). The main target groups are regional and local players, who are responsible for maintenance and conservation work and for the biomass residue management in their regions. Moreover, the focus will be on service providers - including farmers, forest owners, NGOs, energy providers and consumers.

The three year project which started in January 2015 is supported by the Horizon 2020 European program to foster research and innovative solutions in the EU. Eight partners from Germany, Italy, Spain and Czech Republic¹ co-operate with regional stakeholders from seven model regions (Figure 2) to reach the following goals:

- trigger the exploitation and coordinate as well as support the market uptake of currently underused biomass sources from LCMW for energy purposes (Figure 1)
- mobilize biomass not competing with food and feed production
- assess and develop planning, harvesting, transport, pre-treatment, measuring, energy conversion and financial frameworks
- support local governance processes, develop tools for an active & supportive citizenship and realise a good practices know-how platform

¹ <http://greengain.eu/partners/>

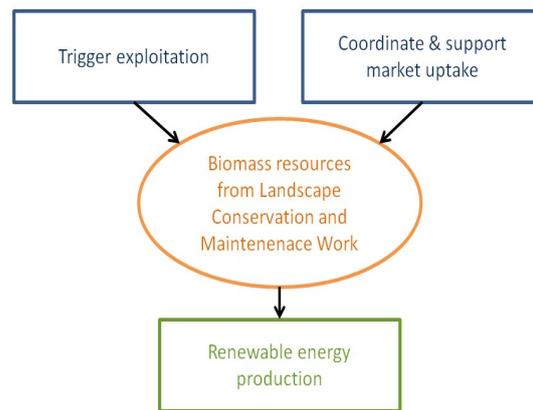


Figure 1: Illustration of how the production of renewable energy is fostered through the work in the greenGain project.

The action will help private and public actors and stakeholders to develop energy projects supporting the commitments of the EU2020 – 2030. The results will be published in reports and good practice databases on categorized supply chains with measurable data like time, energy and financial consumption. Since the resources in question derive from operations done in public interest or even by public order, the project has also the objective to describe the legal and overall societal framework and the predominant goals of each specific landscape or infrastructural element, from which the biomass is obtained.

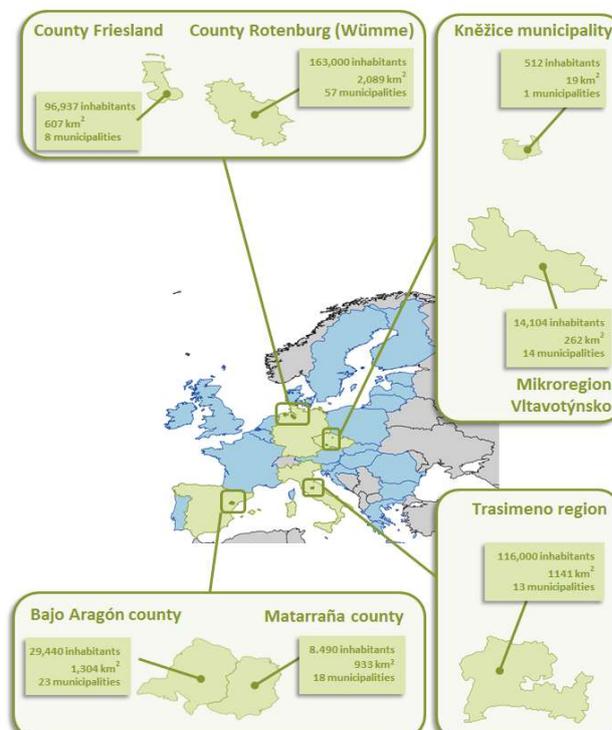


Figure 2: Location and main features of the seven greenGain model regions.

2. The feedstock of interest

The feedstock considered in the greenGain project derives from landscape conservation and maintenance work (LCMW). This work is carried out in public interest, for which the primary objective is nature conservation and landscape management, but also safety and aesthetic aspects. Residues from plantations (unless they belong to the landscape picture and are accordingly protected and treated) and from harvesting an economically viable product are not considered in the project work. The material produced during LCMW can either be woody, herbaceous or a mix. Table 1 shows the different types of maintenance work which were defined in the pilot regions of the single partner countries.

Table 1: Overview of the LCMW types in the project countries analysed during the greenGain project (Pictures: Joaquín Lorenzo, Paolo Burini, Alexander Rosenberg, Miroslav Herout)

Country	LCMW type	
Spain	Cleaning sides of agrarian and cattle tracks	
	Fire protection belts along local paths and tracks	
	Clearing vegetation along rivers and water courses	
	Restoration of abandoned agricultural lands in valleys	
	Cleaning of recreational forests and parks	
Italy	Olive groves	
	Vineyards	
	Parks and gardens	
	Roadside maintenance	
	Water (grass-road)	
Germany	Maintenance of hedge- and treerows on banks	
	Maintenance of hedge- and treerows on roadsides	
	Maintenance of moor areas	
Czech Republic	Trees: urban space maintenance	
	Trees: roadside maintenance	
	Trees and grass: maintenance of riversides	
	Grass: urban space maintenance	
	Grass: roadside maintenance	

When working with LCMW material it has to be considered that the supply is spatially scattered and has seasonal fluctuations. Also is the quality of the feedstock often poor and pre-treatments as sieving or drying are necessary. In many cases the actors involved in the LCMW encounter financial and technical constraints or don't even have clear responsibilities. Adding to all these issues are often unclear legal requirements of waste management and a general lack of information on the biomass (amount, type, location, supply, logistics, etc.).

Still, opposite of these challenges are benefits which make the biomass from LCMW an attractive potential energy source. With the energetic utilisation of this biomass a by-product of regular management of public areas contributes to local energy cycles and renewable energy production. Also does the selling of the feedstock, or the thereof produced energy, presents a possibility for financial compensation for maintenance costs. Finally, regional and local actors can directly profit from the additional gain derived from the LCMW biomass utilisation.

3. Approaches to reach the project goals

To fulfil the objectives in greenGain, the project partners follow a number of approaches. In the first phase information on the already existing knowledge, experiences and good practices from the regional up to the EU level was gathered. To mobilize local biomass, the existing amounts and utilization pathways of the LCMW materials were assessed in co-operation with the regional stakeholders. To describe further limitations and barriers, economic, environmental, social and legal aspects were considered as well (see also following section “Results” for further details).

After having assessed the status-quo of LCMW in the project regions, coordination and support actions are foreseen. With the knowledge and experiences gained in greenGain, recommendations in the form of guidelines and handbooks are going to be provided to the interested public. To foster the exchange of information and good practices, and to connect experts; workshops, conferences and site visits are being planned and organised by the greenGain project partners.

On the regional level the establishment of new value chains by executing pilot experiences is foreseen to help stakeholders implementing actions and measures where sensible. For this, local governance processes and an active and supportive citizenship are fostered through round tables and local workshops as well. Finally, to reach a wide audience with an extensive data- and knowledge base on LCMW biomass, greenGain manages and provides an EU-wide know-how platform (see also INFORMATION PLATFORM in the following section).

4. Results so far

Until this point several results were produced in the different work packages of greenGain. The following list shows the main deliverables, actions and platforms realised until the mid-term of the project period (June 2016).

- report on the state of the art of occurrence and use of LCMW material for energy consumption in Europe and best examples
- status quo assessment and utilisation pathways of LCMW materials in the project regions
- biomass assessment of the promising LCMW types in the project regions
- outlining and planning of pilot experiences in the project regions
- online literature database on policies, finance tools, legal regulations, public support and good governance

- greenGain INFORMATION PLATFORM² collecting and cataloguing information on LCMW biomass (literature, experts, projects, documents) and providing it in an easy and accessible way
- periodical discussion rounds with external experts in stakeholder working groups (every six months)
- periodical publication of newsletter (every six months)

All results, reports, databases and the newsletter are available on the project homepage and can be downloaded under www.greengain.eu/documents/.

5. Outlook

In the second half of the project the planned pilot experiences will be implemented in close co-operation with the relevant local actors of the project regions. The insights and experiences gained in these actions will be analysed and reported in publicly available documents.

Further, the first international greenGain conference and the second national greenGain workshop took place from 21.-22.10.2016 in Soltau, Germany (Figure 3). During the events the exchange between experts, local stakeholders and the interested public about the role of biomass from LCMW for renewable energy production was enabled and fostered.



Figure 3: In October 2016 the 1st international greenGain conference and 2nd project workshop take place in Germany.

The program included presentations of European experts on renewable energy as well as contributions by local stakeholders involved in LCMW. A site visit at the company Raiffeisen Agil in Leese, one of the largest suppliers for renewable raw materials in Northern-Germany, and the visit of the fair “Heizen mit Holz” near Hannover complemented the agenda. Further information on the guest speakers, site visits, detailed program, results and pictures can be found on the project homepage and the corresponding portal³.

² <http://greengain.eu/platform/>

³ <http://greengain.eu/events/conference2016/>

Ökologischer und ökonomischer Mehrwert durch die Bereitstellung holzartiger Biomasse aus Agroforstsystemen

(Dr. Christian Böhm, Michael Kanzler, Jaconette Mirck; alle BTU Cottbus)

BTU Cottbus-Senftenberg
Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung
Konrad-Wachsmann-Allee 6
03046 Cottbus

e-mail: boehmc@b-tu.de

1. Einleitung

1.1 Agrarholzanbau im Kontext einer modernen Landwirtschaft

Die seitens der Gesellschaft an die Landwirtschaft gestellten Anforderungen beschränken sich längst nicht mehr auf die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln. Neben dieser nach wie vor existenten Hauptaufgabe fungierte die Landwirtschaft in den vergangenen Jahren mehr und mehr auch als Lieferant für primäre Bioenergieträger. Hierbei wurde insbesondere die Produktionsfläche für einjährige Kulturen wie Mais (*Zea mays*) und Raps (*Brassica napus*) maßgeblich ausgebaut. Daneben gewann auch der Anbau von holzartiger Biomasse auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Form von Kurzumtriebsplantagen (KUP) oder Agroforstsystemen an Bedeutung. Die Anbaufläche von Agrarholz beträgt aktuell allerdings nur einen Bruchteil (< 0,5 %, FNR 2015) jener der zur energetischen Verwertung angebauten einjährigen Kulturen und spielt in der Praxis daher nur eine untergeordnete Rolle.

Im Zuge der Industrialisierung der Landwirtschaft kam es zudem mancherorts zu einer Zunahme negativer Umweltwirkungen (z.B. hohes Bodenerosionspotential, Verschlechterung der Grundwasserqualität, Rückgang der Artenvielfalt). Parallel hierzu wurden Anforderungen bezüglich des Natur- und Ressourcenschutzes sowie in Hinblick auf das Landschaftsbild verstärkt an die Agrarwirtschaft herangetragen. Neben den breit gefächerten Ansprüchen, die seitens der verschiedenen Interessengruppen bestehen, sieht sich die Landwirtschaft überdies einem erheblichen Flächendruck bzw. Flächenrückgang ausgesetzt. So erfolgt der Ausbau der Verkehrsinfrastruktur, des Wohnungsbaus oder auch des Windenergienetzes zu einem großen Teil auf landwirtschaftlichen Nutzflächen. Auch für die hiermit einhergehenden Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen werden vorrangig landwirtschaftlich genutzte Flächen herangezogen.

Sowohl die Diversität und Intensität der Anforderungen als auch der anhaltende Flächendruck erfordern bei der Landbewirtschaftung ein höheres Maß an Multifunktionalität. Für die Produktion primärer Energieträger bedeutet dies, dass Ertragsleistung und Umweltwirkungen nicht voneinander losgelöst betrachtet werden sollten, sondern dass versucht wird, den einzelnen Anforderungen bestmöglich Rechnung zu tragen. Der Anbau von Agrarholz besitzt hierfür ein außerordentlich hohes Potential, da er trotz einer hohen Produktionsleistung mit einer Extensivierung der Produktionsweise und in diesem Zusammenhang mit zahlreichen positiven Umweltwirkungen verbunden sein kann.

Im folgenden Beitrag soll der Agrarholzanbau anhand ausgewählter Umweltfaktoren bewertet und die Wirtschaftlichkeit der Bereitstellung von Holzhackschnitzeln zur energetischen Verwertung aufgezeigt werden. Hierbei steht der Anbau im Rahmen von Agroforstsystemen im Vordergrund.

1.2 Agroforstsysteme

Als Agroforstsysteme werden Landbauformen bezeichnet, bei denen Ackerkulturen oder Grünland zusammen mit Gehölzen auf einer Bewirtschaftungsfläche angebaut und genutzt werden. Hierbei gibt es zahlreiche Ausprägungsformen, da Alter, Verteilung und Anordnung der Gehölze stark variieren können. Steht die energetische Verwertung der Gehölze im Vordergrund, so werden zumeist schnellwachsende Baumarten wie Pappel (*Populus spec.*), Weide (*Salix spec.*), Robinie (*Robinia pseudoacacia*) oder Erle (*Alnus spec.*) angebaut und in kurzen Umtriebszeiten (Zeitraum zwischen Etablierung bzw. Neuaustrieb und Ernte) zwischen 3 und 15 Jahren bewirtschaftet. In Ländern mit industrialisierter Landwirtschaft werden die Gehölze zumeist in Form von Streifen angebaut (Abb. 1). Hierdurch können bewährte landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraktiken beibehalten und landwirtschaftliche Großtechnik weiterhin für die Bewirtschaftung der zwischen den Gehölzstreifen befindlichen Ackerstreifen eingesetzt werden. Die Agrarholzstreifen können regelmäßig auf einem Ackerschlag angeordnet sein oder an Schlaggrenzen sowie Gewässerrändern verlaufen. Wesentliches Merkmal aller Agroforstsysteme sind bestehende Wechselwirkungen zwischen Gehölz- und Ackerkultur. Hierin besteht auch ein wesentlicher Unterschied zum flächigen Plantagenanbau.



Abbildung 1: Agroforstsystem mit Gehölzstreifen aus Pappel (*Populus spec.*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) bei Forst (Lausitz) in Brandenburg (Foto: Dirk Freese)

1.3 Vorteile für den Anbau von Agrarholz in Agroforstsystemen

Der Anbau von Agrarholz für die energetische Verwertung besitzt allgemein im Vergleich zum Anbau einjähriger Energiepflanzen zahlreiche ökologische Vorteile. Diese betreffen einerseits die Schutzgüter Boden (z.B. Schutz vor Bodenerosion, geringerer Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln), Wasser (z.B. Reduzierung des Stoffaustrages in Grundwasser und Oberflächengewässer), Landschaftsbild (z.B. Strukturierung der Landschaft) und Biodiversität (z.B. Schaffung höherer Strukturvielfalt in Agrarräumen), wobei Letzteres nicht für alle Arten der Agrarräume gleichermaßen zutrifft, und andererseits die Effizienz der eingesetzten Ressourcen (z.B. weniger Düngemittel, deutlich bessere Energiebilanz) (Böhm et al. 2012, Tsonkova et al, 2012). Bei der klassischen Plantagenwirtschaft beschränken sich diese Vorteilswirkungen allerdings auf die Anbaufläche des Agrarholzes. Die Länge an Übergangs- oder Saumbereichen zu angrenzenden Bewirtschaftungsflächen, die von diesen Vorteilswirkungen profitieren könnten, nimmt mit zunehmender Plantagengröße relativ ab. Folglich gewinnen Interaktionen mit benachbarten Ackerkultur- oder Grünlandbereichen vor allem bei kleinflächigen Bewirtschaftungseinheiten bzw. kleinflächig verteilten Agrarholzplantagen an Bedeutung. Agroforstsysteme bieten die Möglichkeit, kleinräumig verteilte Gehölzareale so anzuordnen, dass diese positiven Effekte bestmöglich auf die angrenzenden bzw. dazwischenliegenden Ackerbereiche übertragen werden können. So können durch die agroforstliche Dezentralisierung der Gehölzareale mit einer vergleichsweise geringen Anbaufläche von Agrarholz größere Bereiche in Agrarräumen stärker extensiviert werden (Abb. 2).

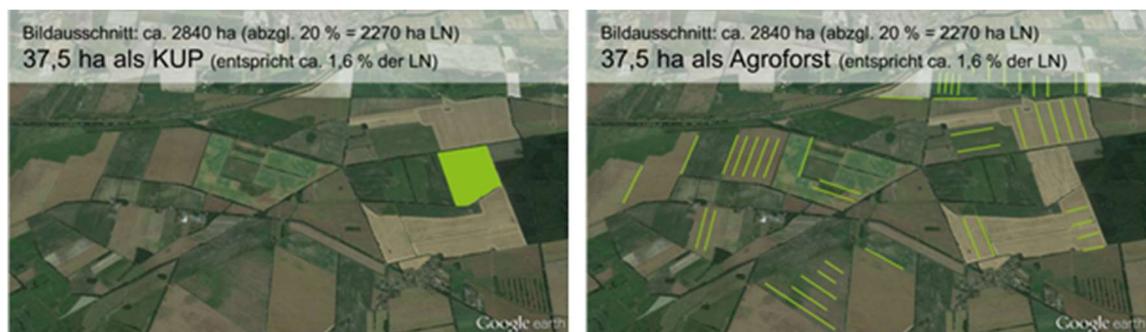


Abbildung 2: Vergleich der räumlichen Anordnung einer 37,5 ha großen Anbaufläche von Agrarholz in einem Agrarraum zur Versorgung eines kommunalen Heizwerkes; links = Kurzumtriebsplantage (KUP), rechts = Agroforstwirtschaft

Neben den genannten Vorteilen gestattet der Agrarholzanbau in Agroforstsystemen zudem eine flexiblere Berücksichtigung kleinräumiger Standortunterschiede und kann so zur Optimierung der landwirtschaftlichen Flächennutzung beitragen. Beispielsweise können vernässte oder logistisch unvorteilhaft zu bewirtschaftende Ackerschlagbereiche gezielt mit Agrarholz bepflanzt werden. Ein weiteres positives Merkmal agroforstlicher Nutzung stellt die Modifikation des Mikroklimas dar. Durch die Gehölzareale können Temperaturextreme gemindert, die Windgeschwindigkeit reduziert und so die Verdunstung verringert werden. Dies kann insbesondere auf ertragsschwächeren Standorten zu Mehrerträgen bei den Ackerkulturen führen (z.B. Tsonkova et al. 2012, Mirck et al. 2016).

2. Ökologische Aspekte

2.1 Untersuchungsfläche

Die vorgestellten Untersuchungen zur Reduktion der Windgeschwindigkeit, zur Grundwasserqualität sowie zum Nährstoffhaushalt wurden auf einer ca. 40 ha großen Agroforstfläche bei Neu Sacro (Landkreis Spree-Neiße, Brandenburg) durchgeführt. Auf dieser landwirtschaftlich genutzten Fläche wurden im Jahr 2010 ca. 10 m breite Gehölzstreifen aus Pappel (*Populus spec.*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) etabliert. Die dazwischen befindlichen Ackerfruchtstreifen weisen eine Breite von 24 m, 48 m oder 96 m auf. Ein in direkter Nachbarschaft befindlicher Ackerschlag ohne agroforstlicher Nutzung wurde als Referenz genutzt. Die Gehölze werden aller 4 bis 5 Jahre geerntet und treiben aufgrund ihres Stockausschlagvermögens erneut aus. Die Gesamtnutzungsdauer der Gehölze beträgt somit etwa 30 Jahre. Bewirtschaftet wird die Untersuchungsfläche durch die Agrargenossenschaft Forst e.G..

2.2 Bodenerosion durch Wind

Auf der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Untersuchungsfläche wurden Windgeschwindigkeitsmessungen durchgeführt. Hierfür wurden jeweils in der Mitte der unterschiedlich breiten Ackerstreifen sowie auf der Referenzfläche in 1 m Höhe Anemometer aufgebaut. Die Windgeschwindigkeiten wurden kontinuierlich mittels Datenlogger erhoben und Mittelwerte im ~~10-10~~ min-Intervall aufgezeichnet.

Wie die Abbildung 3 (links) zeigt, nahm die mittlere Windgeschwindigkeit mit abnehmender Ackerstreifenbreite ab. Auf den 24 m breiten Ackerstreifen betrug diese Reduktion zum Teil deutlich mehr als 50 % im Vergleich zur Freiflächengeschwindigkeit (Referenz). Auch in der Mitte des 96 m breiten Ackerstreifens konnte trotz der vergleichsweise geringen Gehölzhöhe von durchschnittlich 3,8 m eine Verringerung der Windgeschwindigkeit festgestellt werden. Bei Betrachtung der Häufigkeiten einzelner Windgeschwindigkeitsklassen (Abb. 3, rechts), wird deutlich, dass durch die Agrarholzstreifen insbesondere hohe Windgeschwindigkeiten verringert werden. Auf dem genannten Standort ist ab einer Windgeschwindigkeit von $\geq 3,6 \text{ m s}^{-1}$ mit Bewegungen von Bodenpartikeln und folglich theoretisch mit Bodenabtrag durch Wind zu rechnen. Das Auftreten von Windgeschwindigkeiten oberhalb dieses Wertes wurde auf den 96 m, 48 m bzw. 24 m breiten Ackerstreifen um 36 %, 81 % bzw. 95 % reduziert. Dies weist auf eine sehr effiziente Winderosionsschutzwirkung der Gehölzstreifen hin. Die für Agroforstsysteme typische, regelmäßige Anordnung von Gehölzarealen bewirkt, dass die Windgeschwindigkeit und damit das Bodenerosionspotential auf der gesamten Agroforstfläche effektiv gemindert werden kann.

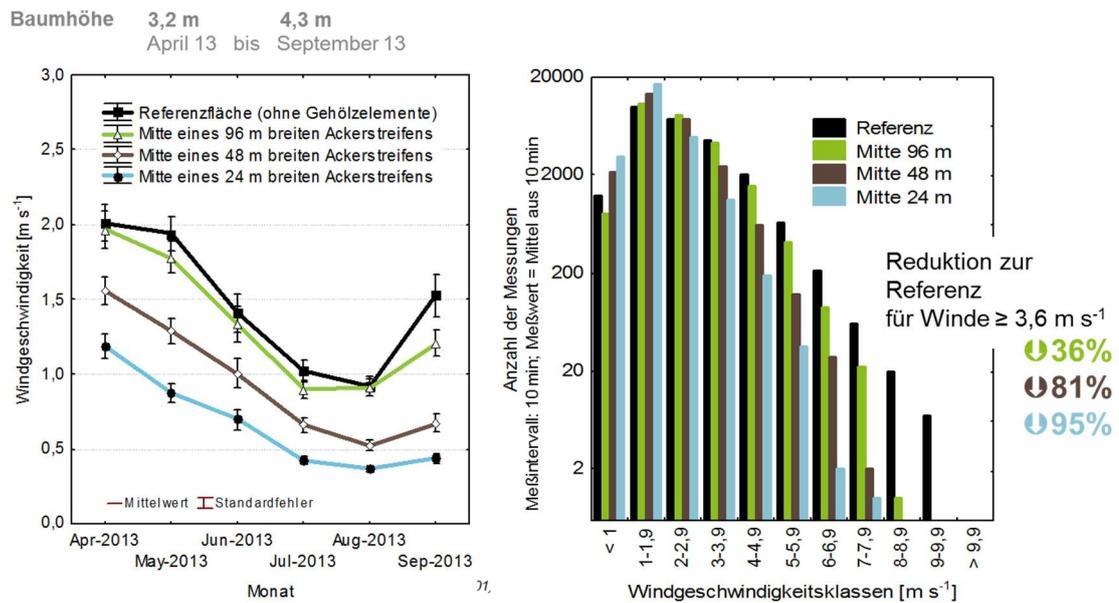


Abbildung 3: Windgeschwindigkeiten (Monatsmittel) (links) und Häufigkeit der Windgeschwindigkeitsereignisse (rechts) zwischen April und September 2013 auf einer Agroforstfläche in Abhängigkeit der Ackerstreifenbreite

2.3 Grund- und Oberflächenwasserqualität

Mittels Grundwasserpegel, die auf der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Fläche installiert wurden, erfolgte im 14-tägigen Rhythmus die Entnahme und Analyse von Grundwasser, sowohl auf dem Agroforstsystem (24 m, 96 m breite Ackerstreifen, Pappel- und Robinienstreifen) als auch auf der Referenzfläche. Der Grundwasserstand variierte während des Messzeitraumes mehrheitlich zwischen 0,8 und 2,0 m unter Geländeoberfläche.

Trotz der vergleichsweise geringen Breite der Gehölzstreifen von ca. 10 m traten enorme Unterschiede bezüglich der Nitrat-N-Konzentration im Grundwasser auf (Abbildung 4, links). Während unterhalb von Pappeln und Robinien die Nitrat-N-Konzentration im Durchschnitt lediglich 0,4 bzw. 0,6 mg l⁻¹ betrug, wurden auf den Ackerfruchtbereichen mittlere Konzentrationen zwischen 30 mg Nitrat-N l⁻¹ und 42 mg Nitrat-N l⁻¹ ermittelt. Ein Vergleich dieser Werte mit dem Nitrat-N-Grenzwert für Trinkwasser von ca. 11 mg l⁻¹ zeigt, dass unter Agrarholz die Gefährdung der Grundwasserkontamination auf landwirtschaftlich genutzten Flächen um ein Vielfaches geringer als bei konventionellem Anbau von einjährigen Ackerfrüchten (in diesem Fall Kartoffeln (*Solanum tuberosum*) und Winterweizen (*Triticum aestivum*)) ist. Auf grundwasserbeeinflussten Standorten ist der Gesamtaustrag an Nitrat-N auf Agroforstflächen somit geringer als auf Ackerschlägen ohne Gehölze. Inwieweit die Agrarholzstreifen auch eine Art Filterfunktion für die Gesamtfläche bei Anpflanzung der Gehölze entgegen der Grundwasserhauptfließrichtung übernehmen können, ist Bestandteil folgender Untersuchungen.

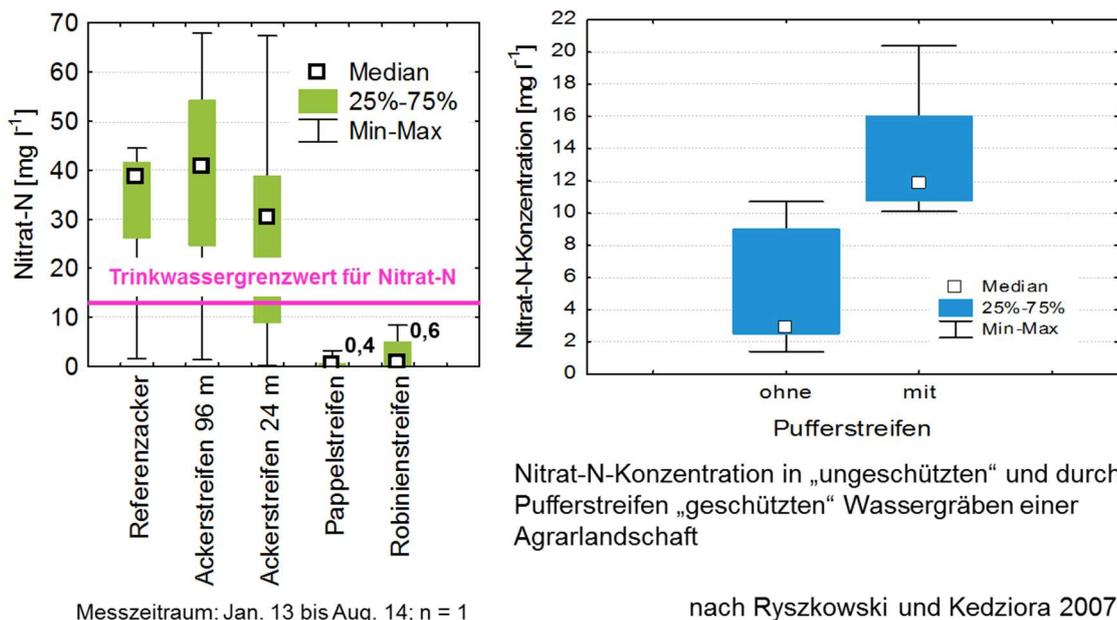


Abbildung 4: Nitrat-N-Konzentration im Grundwasser einer Agroforstfläche in Abhängigkeit der Lage auf dem Schlag (links) und Nitrat-N-Konzentration im Grabenwasser von Gräben mit und ohne Gehölzpufferstreifen in Polen (nach Ryszkowski und Kedziora 2007)

2.4 Nährstoffeintrag und Nährstoffnutzungseffizienz

Da bei Agrarholz lediglich die holzartige Biomasse (Ernte während der Wintermonate) genutzt wird und nicht, wie bei krautigen Energiepflanzen, die gesamte Blattmasse, ist der erntebedingte Nährstoffexport bezogen auf eine Biomasseeinheit deutlich geringer. Die Nährstoffnutzungseffizienz, das heißt, die Menge an Biomasse, die mittels eines Kilogramm eines Nährelementes produziert werden kann, ist beispielsweise bei vierjährigem Robinien-Agrarholz – bezogen auf Phosphor und Magnesium – um ca. das Fünffache höher als bei Mais (Abb. 5, rechts). Folglich sind bei Agrarholzflächen deutlich weniger Düngemittel erforderlich. Auf normalnährstoffversorgten Ackerflächen kann im Bereich der Gehölze aufgrund deren geringeren Ansprüche in den meisten Fällen während der Nutzungsdauer von ca. 30 Jahren vollständig auf eine Düngung verzichtet werden.

In Agroforstsystemen können zudem die angrenzenden Ackerfruchtbereiche von den im Laub enthaltenen Nährstoffen profitieren. Auf der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Untersuchungsfläche wurden die Streumengen in den Randbereichen der Gehölzstreifen ermittelt. Demnach wurde durch die Blattstreu der Robinien in 6 m Entfernung noch ca. 7 kg Stickstoff eingetragen. Bei Pappel war insbesondere der Eintrag von Magnesium vergleichsweise hoch (Abb. 5, links). Auch dieser zusätzliche Nährstoffeintrag kann auf Agroforstflächen zu einer Verringerung des Düngemiteleinsatzes beitragen.

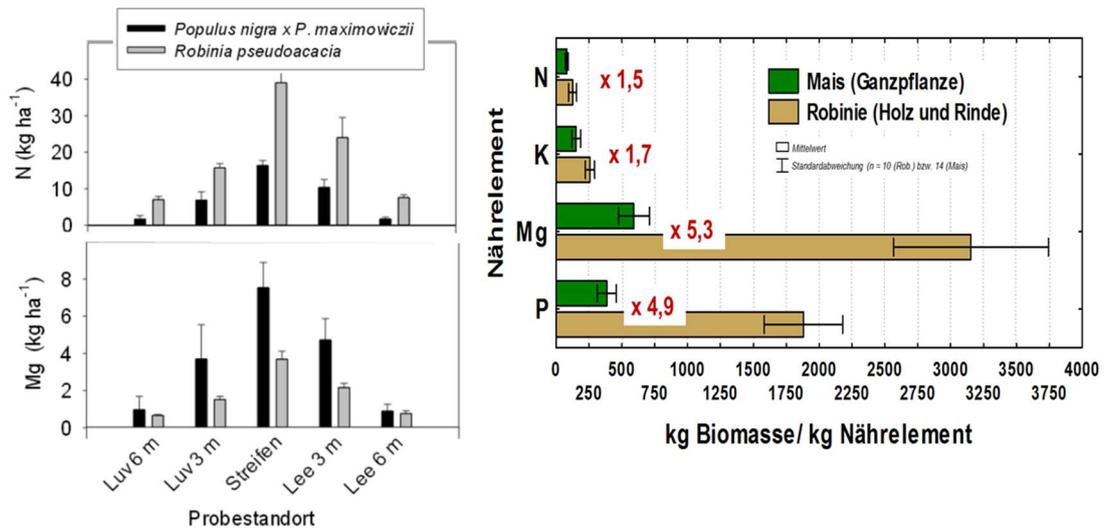


Abbildung 5: Über die Blattstreu der Agroforst-Gehölze in die Randbereiche der Ackerstreifen eingetragene Stickstoff- und Magnesiummengen (links, nach Mirck et al. 2015) und Vergleich der Nährstoffnutzungseffizienz von Robinie (*Robinia pseudoacacia*) und Mais (*Zea mays*) (rechts, nach Böhm et al. 2012)

3. Ökonomische Bewertung

3.1 Annuitäten in Abhängigkeit von Holzpreis, Holzertrag und Umtriebszeit

Die ökonomische Bewertung des Agrarholzanbaus mit Kurzumtriebswirtschaft erfolgte auf der Basis von Bewirtschaftungsdaten des Landwirtschaftsbetriebes Domin (Peickwitz, Brandenburg) mittels der dynamischen Investitionsrechnung. Bei den berechneten Annuitäten (auch als Grund- oder Bodenrente bezeichnet) handelt es sich um den theoretischen Betrag, der theoretisch während des Investitionszeitraumes jährlich konstant unter Erhaltung des eingesetzten Kapitals als Gewinnbeitrag entnommen werden kann. Die Annuität dient als Vergleichsgröße zu den bei einjährigen Kulturen üblichen Deckungsbeiträgen. Der gewählte Zinssatz betrug 5 %, die Umtriebszeit 4 Jahre und die Gesamtnutzungsdauer 24 Jahre. Als eine betriebstypische Ackerfruchtfolge wurde Mais/Futterroggen - Mais/Zwischenfruchtmischung - Hafer - Winterroggen/Futterroggen festgelegt. Transportkosten wurden weder bei den Gehölz- noch bei den Ackerkulturen berücksichtigt. Nicht in die Berechnung einbezogen wurden zudem Pachtkosten und sämtliche Fördermittel. Der betrachtete Standort kann mit einer mittleren Ackerzahl von 22 als ertragsschwach angesehen werden.

Die Abbildung 6 zeigt die Annuitäten in Abhängigkeit des Holzpreises (links) sowie des Holzertrages (rechts). Der Deckungsbeitrag der erwähnten vierjährigen Ackerfruchtfolge betrug auf dem ertragsschwachen Standort etwa 127 €. Im Vergleich hierzu konnte mit dem Anbau von Agrarholz selbst bei Annahme eines sehr niedrigen Holzpreises von 35 € t_{Frischmasse}⁻¹ noch eine um 64 % höhere Annuität ermittelt werden (verwendeter Holzertrag = 7,5 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹). Bei 55 € t_{Frischmasse}⁻¹ war diese sogar um 307 % mehr. Ähnliche Verhältnisse wurden in Abhängigkeit des Holzertrages berechnet (verwendeter Holzpreis = 45 € t_{Frischmasse}⁻¹). Bei der Annahme des niedrigsten Ertrages in Kombination mit dem geringsten Holzpreis wäre die Annuität des Agrarholzanbaus um 64 % niedriger und bei der Kombination von höchstem Preis und Ertrag um 516 % höher als der Deckungsbeitrag der Ackerfruchtfolge. Bei der Bewertung der Annuität ist zu be-

achten, dass diese sich auf die Gesamtnutzungszeit der Agrarholzflächen bezieht. Eine frühzeitigere Umwandlung des Bestandes hätte geringere Annuitätswerte zur Folge. Vor dem Hintergrund des auf 24 Jahre bezogenen Erlöses ist auf der betrachteten Fläche der Anbau von Agrarholz jedoch als wirtschaftlicher einzuschätzen als die konventionelle Ackerfruchtfolge. Allerdings ist hierbei zu beachten, dass der Anbau von Ackerkulturen durch einen deutlich kürzeren Kapitalrückfluss und aufgrund der einjährigen Nutzungsdauer durch ein geringes Anbaurisiko gekennzeichnet ist.

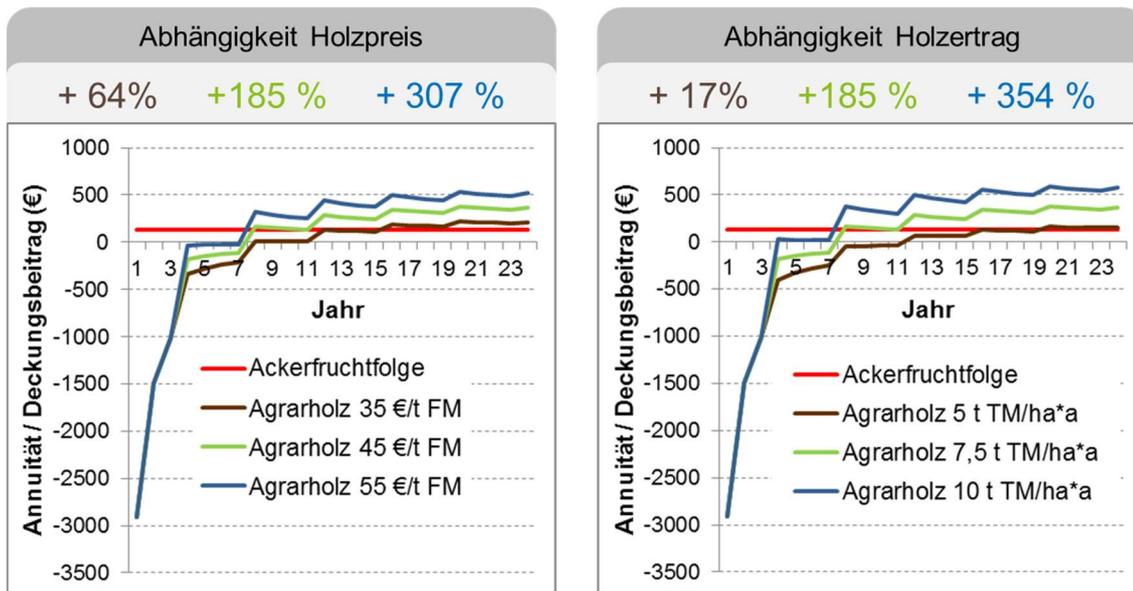


Abbildung 6: Annuität des Agrarholzanbaus am Beispiel eines südbrandenburgischen Agrarbetriebes in Abhängigkeit des Holzpreises (links) und des Holzertrages (rechts); Prozentangaben geben die Differenz zwischen dem Deckungsbeitrag der Ackerfruchtfolge und der Annuität des Agrarholzanbaus nach 24 Jahren Nutzungszeit an

In Agroforstsystemen mit 5 %, 10 % und 30 % Gehölzkulturflächenanteil betrug die errechnete Annuität -10 %, -4 % bzw. + 27 % (Abb. 7), wobei in dem vorgestellten Beispiel – aufgrund des Mehraufwandes bei der Flächenbewirtschaftung höher strukturierter Agroforstflächen – ein Mehrkostenaufwand von 5 % berücksichtigt wurde. Am untersuchten Standort sinkt die Annuität aufgrund der Vorzüglichkeit des Agrarholzanbaus allgemein mit sinkendem Gehölzflächenanteil. In Fällen, bei denen der Agrarholzanbau unwirtschaftlicher als die betriebstypische Ackerfruchtfolge ist, verhält es sich umgekehrt. Insgesamt ersichtlich ist die geringere Differenz zur konventionellen Bewirtschaftung im Vergleich zum flächigen Agrarholzanbau. Agroforstsysteme bieten so die Möglichkeit, das Anbaurisiko des durch lange Nutzungszeiträume gekennzeichneten Agrarholzes zu schmälern und gleichzeitig die Produktvielfalt eines Betriebes zu erhöhen.

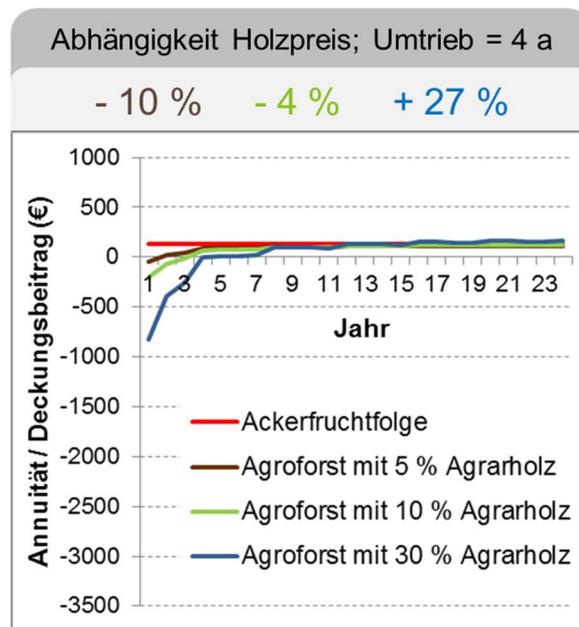


Abbildung 7: Annuität des Agrarholzanbaus in Agroforstsystemen am Beispiel eines südbrandenburgischen Agrarbetriebes in Abhängigkeit des Flächenanteils der Gehölzkulturfäche; Prozentangaben geben die Differenz zwischen dem Deckungsbeitrag der Ackerfruchtfolge und der Annuität des Agrarholzanbaus nach 24 Jahren Nutzungszeit an.

3.2 Einfluss von agroforstlicher Nutzung auf die Ackerfruchterträge

In Agroforstsystemen existieren Wechselwirkungen zwischen Gehölzkulturen und Ackerfrüchten. Aufgrund der Windschutzwirkung (Böhm et al 2014) und der beschattungsbedingten Minderung von Temperaturextremen sind niedrigere Evaporationsraten als auf Ackerschlägen ohne Gehölze zu erwarten. Diese potentiell höhere Wasserverfügbarkeit für die Ackerkulturen ist insbesondere bei ertragsschwächeren Standorten, die durch eine geringe mittlere Niederschlagssumme und/oder eine geringe Wasserhaltefähigkeit gekennzeichnet sind, bedeutsam. Seit vielen Jahrzehnten ist die positive Mikroklimawirkung von Heckenstrukturen bekannt und wurde auch durch aktuelle Studien bestätigt (z.B. Tsonkova et al. 2012).

Auch bei Untersuchungen des Ertrages von Zuckerrüben (*Beta vulgaris*) auf der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Ackerfläche konnten zwischen den Agrarholzstreifen des Agroforstsystems Mehrererträge nachgewiesen werden (Abb. 8, Mirck et al. 2016). Im Vergleich zur Referenzfläche waren die Erträge auf den Ackerstreifen des Agroforstsystems nahe den Gehölzstreifen konkurrenzbedingt zum Teil niedriger, jedoch in einiger Entfernung nennenswert höher. Beim 48 m breiten Ackerstreifen war der Zuckerrübenenertrag um etwa 20 % höher als auf der benachbarten Referenzfläche. Nach Abzug der Gehölzstreifenfläche, die auf einer Agroforstfläche nicht für den Anbau von Ackerkulturen zur Verfügung steht, betrug der Mehrerertrag hier immerhin noch reichlich 18 %.

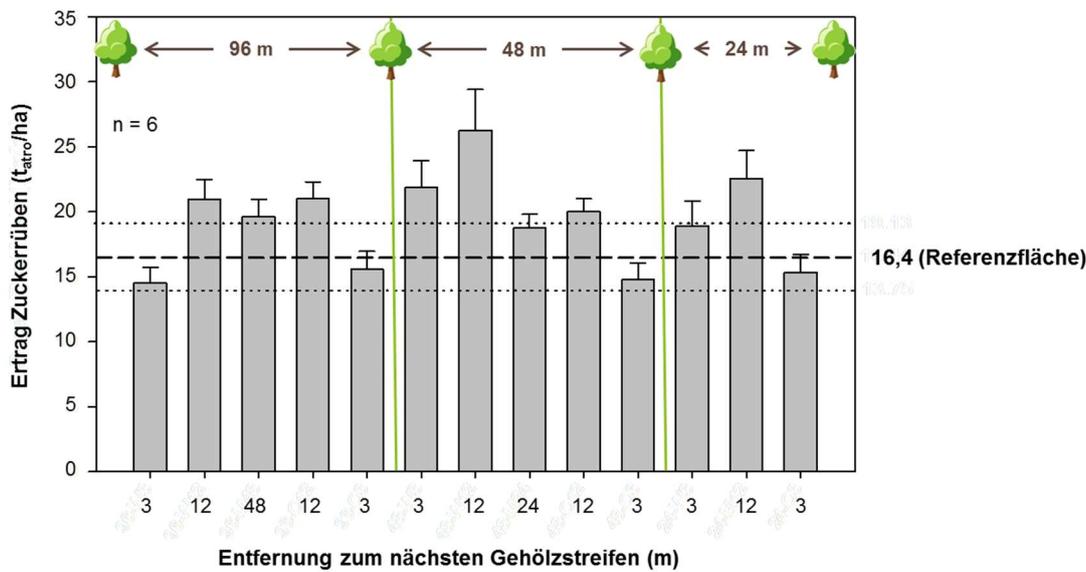


Abbildung 8: Ertrag von Zuckerrüben (*Beta vulgaris*) auf einer Agroforstfläche in Abhängigkeit Ackerstreifenbreite sowie der Entfernung zum Gehölzstreifen im Vergleich zum Ertrag einer benachbarten Ackerfläche ohne Gehölzstrukturen (Referenz) (nach Mirck et al. 2016)

4. Fazit

Die beispielhaft aufgeführten Untersuchungen zeigen, dass der Anbau von im Kurzumtrieb bewirtschaftetem Agrarholz im Vergleich zu einjährigen Energiepflanzen mit zahlreichen ökologischen Vorteilen verbunden sein kann. Der Anbau in Agroforstsystemen ermöglicht es hierbei, die positiven Umweltwirkungen der Gehölze in Agrarräumen gezielt auszunutzen. So können auch Ackerkulturbereiche, die an den Gehölzstrukturen angrenzen, von den positiven Effekten profitieren. Darüber hinaus kann der Agrarholzanbau auch aus wirtschaftlicher Sicht durchaus lohnenswert sein. Wichtig für den wirtschaftlich erfolgreichen Anbau sind regional verfügbare Abnahme- bzw. Verwertungspfade für Agrarholz. Ist dies gegeben, so gestatten im Kurzumtrieb bewirtschaftete Agroforstsysteme es, die Produktpalette eines Betriebes und damit dessen Wertschöpfung durch den Verkauf oder die Eigennutzung von Energieholz zu erhöhen und gleichzeitig einen ökologischen Mehrwert für die landwirtschaftlichen Nutzflächen zu erreichen.

5. Literatur

- Böhm, C., Quinkenstein, A., Freese, D. (2012): Vergleichende Betrachtung des Agrarholz- und Energiemaisanbaus aus Sicht des Bodenschutzes. Bodenschutz 02/12, 36-43.
- Böhm, C., Kanzler, M., Freese, D. (2014): Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. Agroforestry Systems 88, 579-591.
- FNR – Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2015): Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland 2014/2015.

<https://mediathek.fnr.de/catalog/product/gallery/id/4/image/1435/>, abgerufen am 12.07.2016.

Mirck, J., Böhm, C., Kanzler, M., Freese, D. (2015): Blattstreumengen in Gehölzstreifen und angrenzenden Ackerbereichen innerhalb eines Agroforstsystems. In: Kage, H, Sieling, K., Francke-Weltmann, L. (Hrsg.): Multifunktionale Agrarlandschaften – Pflanzenbaulicher anspruch, Biodiversität, Ökosystemdienstleistungen. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften (Tagungsband) 27, 219-220.

Mirck, J., Kanzler, M., Böhm, C., Freese, D. (2016): Sugar beet yields and soil moisture measurements in an alley cropping system. In: Gosme M (Hrsg.) Celebrating 20 years of Agroforestry research in Europe, 3rd European Agroforestry Conference, Book of Abstracts, 282-285.

Ryszkowski, L., Kędziora, A. (2007): Modification of water flows and nitrogen fluxes by shelterbelts. Ecological Engineering 29, 388-400.

Tsonkova, P., Böhm, C., Quinkenstein, A., Freese, D. (2012): Ecological benefits provided by alley cropping systems for production of woody biomass in the temperate region: a review. Agroforestry Systems 85, 133-152.

Danksagung

Die Autoren danken dem BMBF für die über das Forschungsprojekt AUFWERTEN (FKZ: 033L129AN) geleistete finanzielle Unterstützung. Außerdem sei dem BMEL gedankt, dass die Forschungsarbeiten bis 2015 über das Projekt AgroForstEnergie (FKZ: 22000312) finanziell unterstützte. Weiterhin gedankt sei der Vattenfall Europe New Energy GmbH für die finanzielle Unterstützung. Ebenso sei dem Landwirtschaftsbetrieb Domin und der Agrargenossenschaft Forst e.G. für die gute Zusammenarbeit und die Bereitstellung von Bewirtschaftungsdaten gedankt.

CLEANPELLET - Entwicklung eines Verfahrens für die Erzeugung emissionsarm verbrennbarer Gärrestpellets zur Nutzung als Brennstoff für Haus- und Kleinfeuerungsanlagen

(Olaf Scheithauer; Fraunhofer IKTS Dresden)

CLEANPELLET

ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENS FÜR DIE ERZEUGUNG EMISSIONSARM VERBRENNBARER GÄRRESTPELLETS ZUR NUTZUNG ALS BRENNSTOFF FÜR HAUS- UND KLEINFEUERUNGSANLAGEN
(09/14 – 08/17)

Dipl.-Ing. Olaf Scheithauer*, Dr. agr. Jan Hari-Arti Khalsa, Dr. Burkhardt Faßauer



© Fraunhofer

AGENDA

- Motivation
- Ursprünglicher Lösungsansatz
- Ergebnisse
 - Gärrestzusammensetzung
 - Entwässerung
 - Wäsche
- Überarbeitetes Konzept
- Ausblick

© Fraunhofer



Motivation

Problemstellung

- 2010 erstmals über 50% energetische Nutzung der insgesamt genutzten Holzmenge in Deutschland
- Prognostiziertes Holzdefizit von ca. 290 Mio. m³/a für 2030⁽¹⁾
- Versorgungsengpässe und steigende Kosten für (nichtfossile) Brennstoffe
- **Suche nach Alternativen!**



(1) Mantau, U. 2012. Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2015.

(2) C.A.R.M.E.N. e.V. Preisentwicklung bei Holzpellets, Heizöl und Erdgas 2005 bis 2014

© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Motivation

Stand der Forschung

- Untersuchungen zu Biomassefestbrennstoffe behandeln meist Holz, Stroh und Gras
- Zahlreiche Arbeiten zu sekundären Emissionsminderungstechnologien
 - Elektrostat. Staubabscheider
 - Katalysatoren
 - Brennergeometrie und Feuerungsregime
- Kaum Arbeiten zur Nutzung von Gärprodukten als Brennstoff
- Größere Probleme bei der Verbrennung von allen halmgutartigen Biomassen
 - Hohe Gehalte an emissionsrelevanten Inhaltsstoffen (N, S, Cl, Asche)
 - Niedrige Ascheschmelztemperatur durch hohe Kalium- und Natrium-Gehalte
 - Schlechtes Initialzündverhalten
 - Ungünstige physikalisch/mechanische Pelletiereigenschaften

© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Zielstellung

Lösungsansatz

- physikalisch/enzymatische Aufbereitung der Gärrest-Grobstofffraktion zur Abtrennung der Störstoffe, die zu den negativen Verbrennungseigenschaften führen
- Herstellung von Brennstoffpellets aus Gärrest als Alternative zu Holz für Kleinfeuerungsanlagen
- Wertschöpfung und Generierung zusätzlicher Wirtschaftserträge für Biogasanlagen

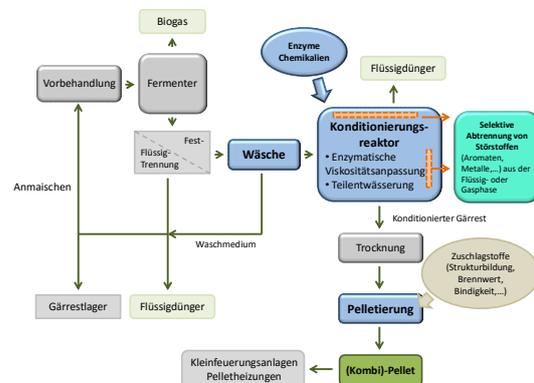


© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Ursprünglicher Lösungsansatz

- Ggf. Vorbehandlung der GR-Grobstoffe
 - Thermisch/enzymatische Behandlung zur Auflösung der Faserbündel
 - Teilentwässerung und Ausschleusen der Störstoffe über Membranen
 - Pelletierung der konditionierten Gärreste
- Untersuchungen an Gärresten von 4 verschiedenen BGAs mit unterschiedlichen Gärsubstraten
- RFA / Elementaranalyse
 - TR/oTR
 - PGV



© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

CLEANPELLET - Entwicklung eines Verfahrens für die Erzeugung emissionsarm verbrennbarer Gärrestpellets zur Nutzung als Brennstoff für Haus- und Kleinfeuerungsanlagen

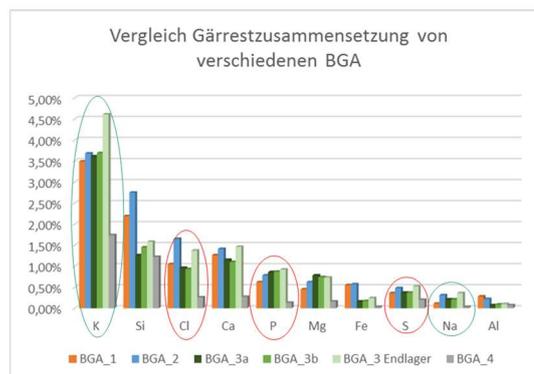
Ursprünglicher Lösungsansatz



Ergebnisse

Gärrestzusammensetzung

- Nur geringe Schwankungen in der GR-Zusammensetzung der Nass-Fermentationsanlagen (BGA 1-3) ungeachtet des Substrats
- Auf Grund der Perkolatation deutlich geringere Störstoffbelastung im GR aus der Trockenfermentation (BGA 4)



Ergebnisse

Entwässerung / Wäsche im Labor

- Entwässerung über Schwingsieb
- Wäsche der Grobstoffe:
 - durch (mehrfaches) Anmaischen mit Wasser und Entwässern
 - durch Besprühen mit Wasser direkt auf dem Schwingsieb



© Fraunhofer

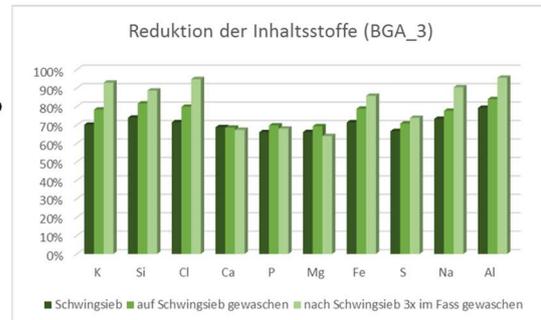
Fraunhofer
IKTS

Ergebnisse

Entwässerung / Wäsche im Labor

- Ca. 70 %ige Reduktion der Inhaltsstoffe durch F/F-Separation mit Schwingsieb
- Wäsche mittels mehrfachem Anmaischen deutlich wirkungsvoller als Besprühen auf Sieb
 - aber deutlich höherer Wasserbedarf

Washwasser / Gärrest	Wäsche auf Sieb	Wäsche „im Fass“
BGA_2	1,3	2,6
BGA_3	1,3	2,4



© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Ergebnisse

Entwässerung mittels Schneckenpresse

- Deutliche Verbesserung gegenüber Schwingsieb
- Durchweg > 97 % Störstoffreduktion durch F/F-Separation mittels Schneckenpresse
- nur 0,5 – 1 %-Punkte zusätzlich durch Wäsche
- Waschwassermenge scheinbar ohne Einfluss



© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Ergebnisse

Waschwasser

- Ziel: Minimaler Frischwassereinsatz
 - Aufbereitung des Waschwassers mittels Membranfiltration
 - $TS_{Feed} = 1,07\%$; $TS_{Konzentrat} = 3,8\%$
 - Konzentrationsgrad: 8,25



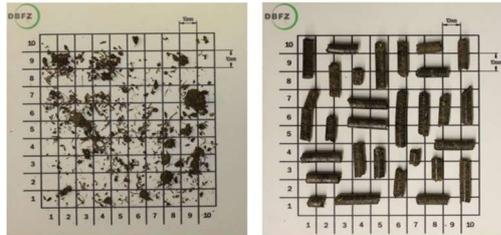
© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Ergebnisse

Pelletierung

- mech. Eigenschaften der Pellets noch mangelhaft
- Bisher nur Pelletierung mit Ringmatrizenpresse
 - Kollergang noch ausstehend
- Noch keine Untersuchungen zu Beimischungen



	GR-Pellet	Richtwert nach DIN EN ISO 17225-6
Mech. Festigkeit	91,7 %	> 97,5 (A) > 96,0 (B)
Schüttdichte	671 kg/m ³	> 600 kg/m ³

© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Ergebnisse

Brennstoffcharakterisierung

- Analysen liegen z.Z. nur für Proben vom Schwingsieb vor
 - Teilweise deutliche Überschreitung der Grenzwerte
- Entsprechende Versuche für Mitte Juni mit GR aus Trockenfermentation geplant
- ☺ Extrapolation der Masseanteile basierend auf den bei der F/F-Separation mittels Schneckenpresse erzielten Reduktionswerten sehr vielversprechend

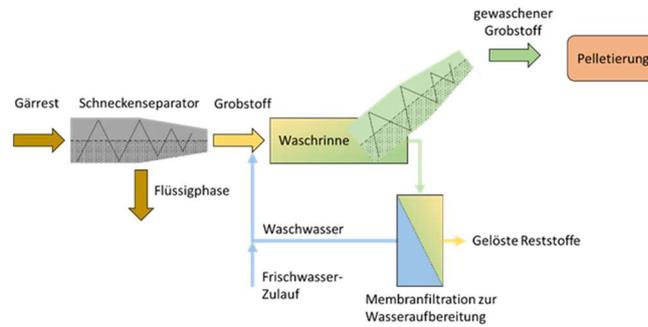
	Einheit	A	B	Ohne Wäsche	Wäsche mit einer Düse	Wäsche mit 2 Düsen	Entwässert über Schneckenpresse	Gewaschen und entwässert (SP)
Aschegehalt	m-% wf	≤ 5	≤ 10	18 %	15,3 %	13,3 %	11,7 %	9,65 %
Schwefel	m-% wf	≤ 0,2	≤ 0,2	0,488	0,475	0,446		
Chlor	m-% wf	≤ 0,2	≤ 0,3	1,14	0,827	0,606		
Kalium	mg/kg wf			46200	35500	26700		

© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Überarbeitetes Konzept

- Effektivierung der F/F-Separation
- Ggf. Wäsche als 2. Stufe
 - Optimierung der MF zur Waschwasseraufbereitung
 - Rezirkulation des Wassers zur Reduzierung des Frischwasserverbrauchs
- Verzicht auf Enzymeinsatz
 - Zusätzliche Wirkung minimal
 - Wirtschaftlichkeit sehr unwahrscheinlich



© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Ausblick

- Untersuchungen hinsichtlich Grenzwerteinhaltung mit GR aus der Trockenfermentation
 - Brennstoffcharakterisierung und Verbrennungsversuch
- Derzeit Aufbau der Versuchsanlagen zur GR-Aufbereitung im halbttech. Maßstab
 - Versuchsbeginn Anfang Juli
 - Vergleich von 2 Entwässerungsaggregaten sowie von 2 Waschstufen
 - Waschwasseraufbereitungs- und -rezirkulationsversuche
- Pelletierversuche mit Ringmatrize und Kollergang
 - Einfluss von Stoffbeimischungen auf Pelletier- und Verbrennungseigenschaften

© Fraunhofer

Fraunhofer
IKTS

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Olaf Scheithauer
Fraunhofer-Institut für Keramische
Technologien und Systeme IKTS
+49 351 2553-7808
olaf.scheithauer@ikts.fraunhofer.de

© Fraunhofer



Spontanreaktionen bei der Lagerung von Biomassen

(Prof. Ullrich Krause; Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg)

Prof. Dr.-Ing. habil. Ullrich Krause
Otto von Guericke Universität Magdeburg
Institut für Apparate- und Umwelttechnik
Lehrstuhl Anlagentechnik und Anlagensicherheit
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg



Spontanreaktionen bei der Lagerung von Biomassen

Ulrich Krause
Institut für Apparate- und Umwelttechnik
Lehrstuhl Anlagentechnik und Anlagensicherheit

- Entstehung von Schwelbränden/Selbstentzündung
- Fallstudie
- Reaktionsverlauf und Reaktionsprodukte
- Laboruntersuchungen
- Feldversuche
- Zusammenfassung

01.06.2016

U. Krause

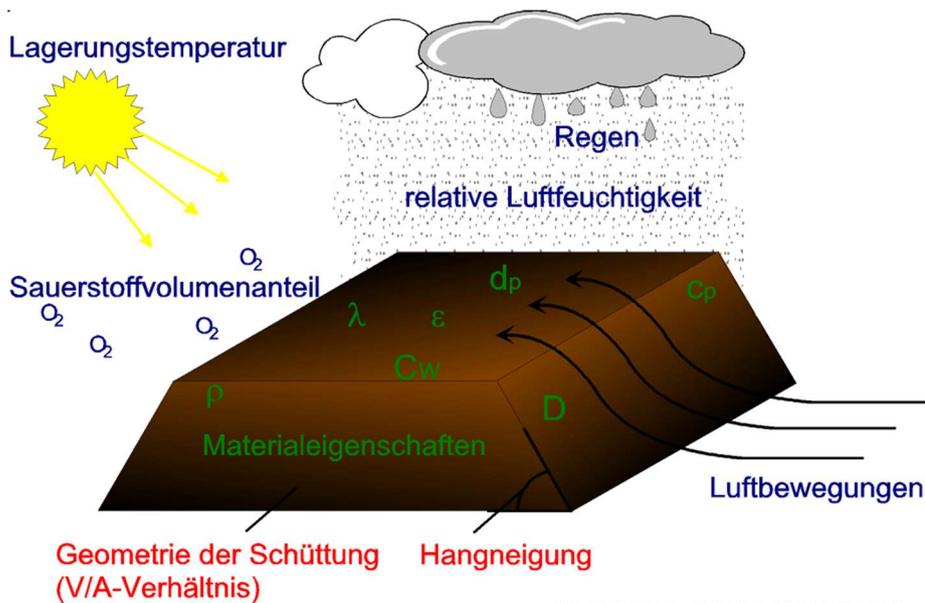


OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-
UND SYSTEMTECHNIK

Einflüsse auf Selbstentzündung und Brandverlauf in porösen Schüttungen



01.06.2016

U. Krause



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-
UND SYSTEMTECHNIK

Selbstentzündung von Schüttgütern und porösen Feststoffen

Vereinfachter Mechanismus:

1. Im Lückenvolumen vorhandener Sauerstoff lagert sich an den an den aktiven Oberflächen an. Die Oxidation verläuft exotherm.
2. Die freigesetzte Wärme wird durch Wärmeleitung durch die Schüttung transportiert und an die Umgebung abgegeben.
3. In Abhängigkeit von Umgebungstemperatur, Größe der Schüttung und Stoffeigenschaften kann dabei die zeitliche Rate der Wärmeproduktion größer sein als der abgeführte Wärmestrom.
4. Der auf diese Weise entstehende Überschuss an Wärmeenergie führt zum sogenannten Wärmestau.
5. In Folge des Wärmestaus **Beschleunigung** der Oxidationsreaktion, bis zur „Selbstentzündung“.

01.06.2016

U. Krause

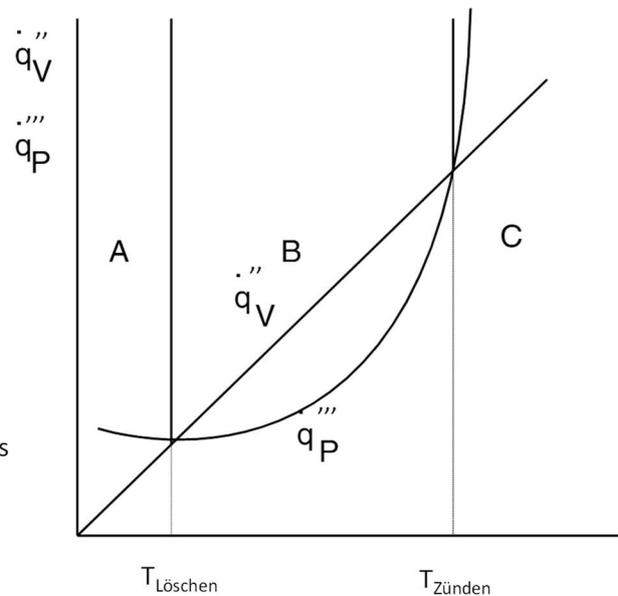


Mögliche Zustände der Reaktionsentwicklung

$$\int_V \dot{q}_P''' dV = - \int_A \dot{q}_V'' dA$$

Inhärente Skalenabhängigkeit:

Charakteristische Abmessung eines nicht-adiabaten Reaktionssystems
Volumen-Oberflächen-Verhältnis
V/A



01.06.2016

U. Krause



Neigung zur Selbstentzündung bestimmt durch physiko-chemischen Zustand des Schüttgutes (Porosität, Form der chemischen Bindungen, Feuchtegehalt, Korngröße)

Beispiele für Stoffe, die stark zur Selbstentzündung neigen sind

- ölgetränkte Textilien (Putzlappen mit Leinölfirnis, verschmutzte Arbeitskleidung),
- Kohlen,
- feste Bio-Brennstoffe (Holzspäne, Holzpellets)
- Heu, Futtermittel, ölhaltige Pflanzenreste
- weißer Phosphor,
- Müll, Recyclingstoffe

01.06.2016

U. Krause



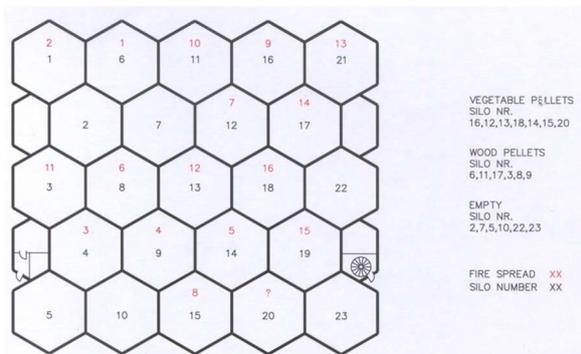
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-
UND SYSTEMTECHNIK

Brand in einem Silo für Holzpellets in Esbjerg (Dänemark) 1998/1999

- Höhe 85 m, 23 Silozellen, je 2 300 m³
- Stahlbeton mit hexagonalem Grundriss,
- 17 Zellen in Benutzung
- 40 Temperaturmess-Stellen pro Zelle



Quelle: Krause, U. (ed.): Fires in Silos, Wiley VCH Verlag, 2009



Foto: Peter Christoffersen

01.06.2016

U. Krause



UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-
UND SYSTEMTECHNIK

Brand in einem Silo für Holzpellets in Esbjerg (Dänemark) 1998/1999 - Ereignisverlauf

- am Morgen des 5. 11.1998 Alarmierung der örtlichen Feuerwehr
- unangenehmer Geruch
- hohe Konzentrationen von brennbaren Gasen auf dem Siloboden
- tausende tote Mäuse am Silofuß
- Betreten der Siloanlage nur unter Atemschutz möglich
- umliegende Straßen um das Silogebäude abgesperrt

01.06.2016

U. Krause



VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Brand in einem Silo für Holzpellets in Esbjerg (Dänemark) 1998/1999 - Ereignisverlauf

- ab 6.11.98 vorsichtige Entleerung des Silos über die Austragsöffnung
- Pellets waren erhitzt und klebten zusammen
- am dritten Tag Sprengen einer seitlichen Öffnung (etwa 1 m²) oberhalb des Silotrichters zur zügigeren Entleerung
- am vierten Tag zweite, etwa gleich große Öffnung
- zusätzliche Öffnungen Fehlschlag, da Bewehrungsstahl standhielt
- kein Materialfluss aber zusätzlicher Lufteintrag

Fotos: D. Westerman, DBI



01.06.2016

U. Krause



VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Brand in einem Silo für Holzpellets in Esbjerg (Dänemark) 1998/1999 - Ereignisverlauf

- Staub-/Schwefelgas-Explosion mit 150 m hoher Stichflamme
- Verlust eines Einsatzfahrzeuges
- Im weiteren Verlauf zyklische Kühlung mit Trockeneis,
- Kühlung der benachbarten Silozellen,
- trotzdem Brandausbreitung in die benachbarten Zellen,
- Löscharbeiten an bis zu 6 Silozellen gleichzeitig
- Unterbrechung der Brandausbreitung nach 30 Tagen
- drei weitere Staubexplosionen,
- Entleerung der Silozellen unter ständiger Aufgabe von Löschschaum und teilweise von Trockeneis bis zum **287. Tag**



Foto: D. Westerman, DBI

01.06.2016

U. Krause



VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Brand in einem Silo für Holzpellets in Esbjerg (Dänemark) 1998/1999 - Fazit

Versicherungsschäden

- 1,7 Mio. € für unbrauchbar gewordenes Lagergut,
- 1,4 Mio. € für Gebäudeschäden,
- 2,4 Mio. € Schäden an Maschinen und Ausrüstung
- 2 Mio. € Kosten für die Beräumung des Brandortes
- 0,5 Mio. € für Schäden an der Feuerwehrausrüstung



Foto: D. Westerman, DBI

01.06.2016

U. Krause



VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Untersuchungsmethodik

- Probengewinnung und –charakterisierung (Partikelanalyse, Elementaranalyse, Bestimmung von Feuchte, Brennwert)
- Bestimmung der Formalkinetik (isoperibole oder adiabate Warmlagerung)
- Herstellung der Übertragbarkeit durch
 - semi-empirische Näherungsansätze
 - numerische Simulation



Holzspäne

Proben-
materialien



Recyclingmaterial

01.06.2016

U. Krause



VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-
UND SYSTEMTECHNIK

Untersuchungen im Labormaßstab – isoperibole Warmlagerung zur Ermittlung des Selbstentzündungsverhaltens



Warmlagerungs-ofen (1)
Thermowaage (2)
FTIR-Spektrometer (3)



01.06.2016

U. Krause



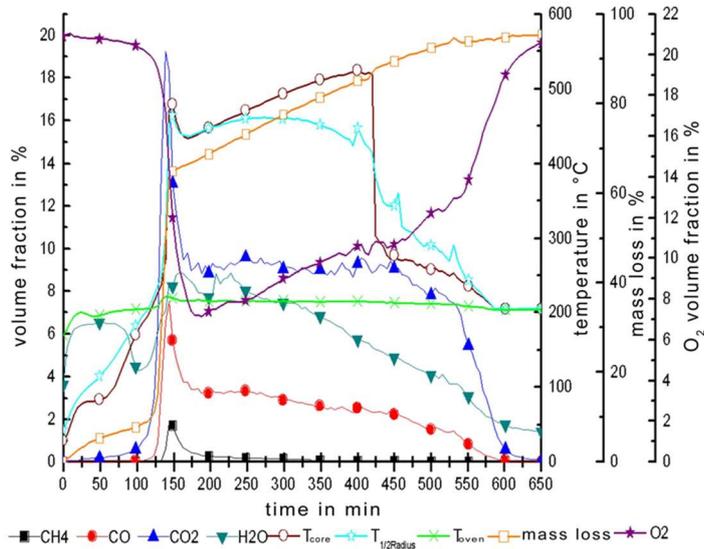
VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS-
UND SYSTEMTECHNIK

Untersuchungen im Labormaßstab – isoperibole Warmlagerung zur Ermittlung des Selbstentzündungsverhaltens

Versuchsergebnisse (400 ml-
Probe Holzschnitzel)

- zeitliche Temperaturentwicklung
- zeitliche Änderung der Feststoffmasse (korreliert mit Proben-temperatur)
- zeitliche Konzentrationsverläufe gasförmiger Reaktionsprodukte
- Ableitung formalkinetischer Reaktionsgrößen (scheinbar Aktivierungsenergie, Frequenzfaktor)



01.06.2016

U. Krause

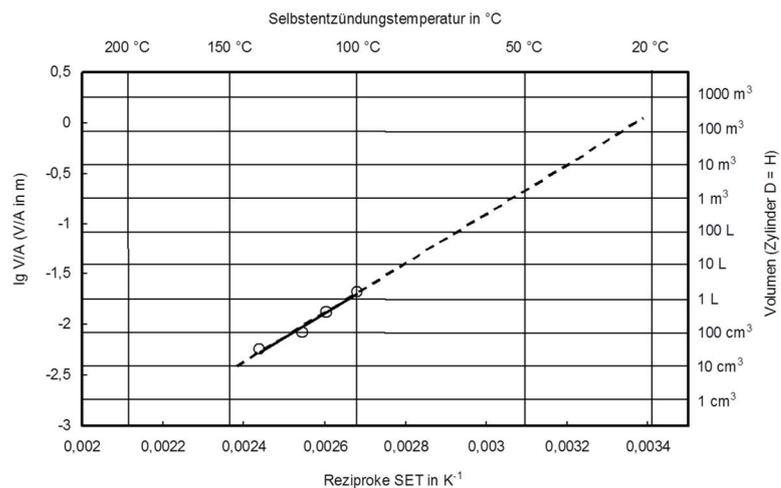


VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Ergebnis von isoperibolen Warmlagerungsversuchen

Extrapolation der SET in den technischen Maßstab



(linearer Zusammenhang theoretisch nicht korrekt, aber in guter Näherung anwendbar)

01.06.2016

U. Krause

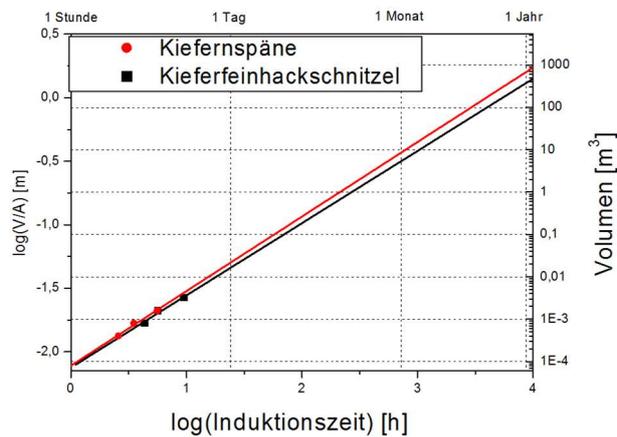


VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Ergebnis von isoperibolen Warmlagerungsversuchen

Ermittlung der Induktionszeit → Ableitung der sicheren Lagerungsdauer



Material: Kiefer

Hackschnitzel: $\varnothing_{\text{median}} = 10 \text{ mm}$

Späne: $\varnothing_{\text{median}} = 0,25 \text{ mm}$

$$t_{\text{Hackschnitzel}} > t_{\text{Späne}}$$

Zerkleinern des Materials führt zur höheren Neigung zur SE

01.06.2016

U. Krause

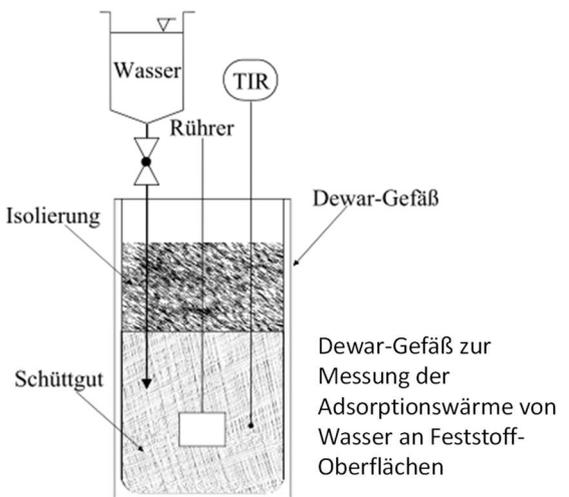
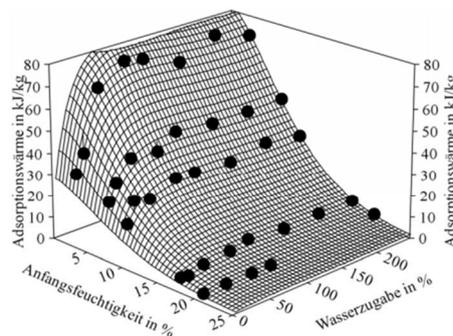


VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Einfluss von Feuchte auf die Selbstentzündung

- Begünstigung biologischer Vorgänge (exotherm)
- Adsorption am Feststoff (exotherm)
- Verdunstung (endotherm)



C. Lohrer, Diss. TU Berlin 2005

01.06.2016

U. Krause

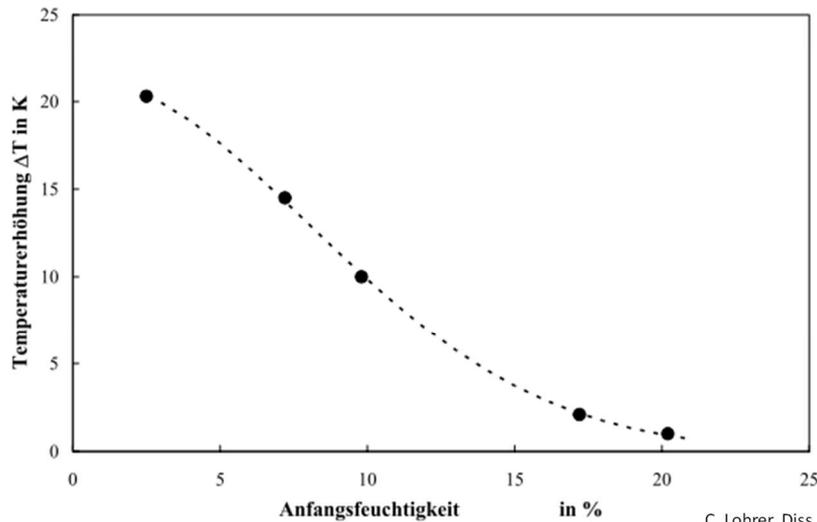


VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Einfluss von Feuchte auf die Selbstentzündung

Temperaturerhöhung in 100 g Feststoffschüttung (Braunkohle) durch Adsorptionswärme (Zugabe von 10 g H_2O_{fl})



C. Lohrer, Diss. TU Berlin 2005

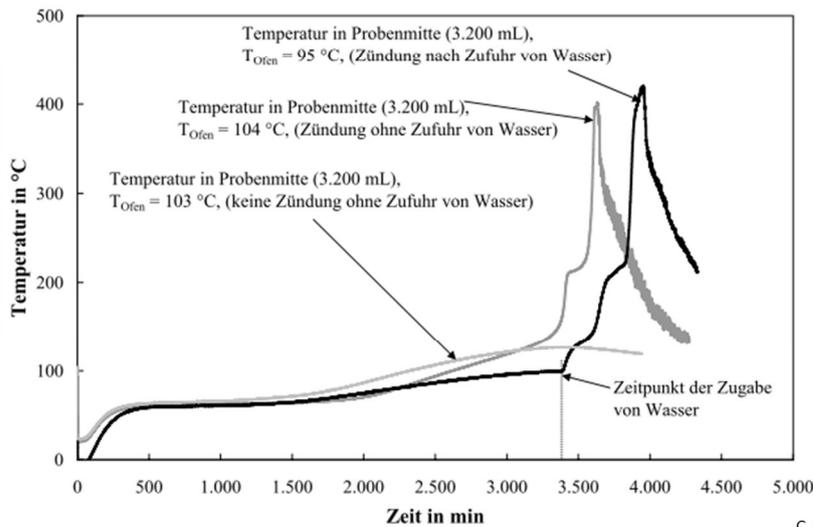
01.06.2016

U. Krause



Einfluss von Feuchte auf die Selbstentzündung

„Zündung durch Wasser“ – Absenken der kritischen Temperatur durch Freisetzen von Adsorptionswärme



Warmlagerung von 3,2 l Braunkohle

C. Lohrer, Diss. TU Berlin 2005

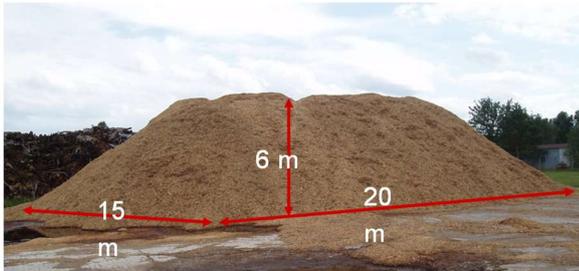
01.06.2016

U. Krause



Untersuchungen im Großmaßstab

Kieferhackschnitzel (~400 Tonnen); $d_{\text{median}} = 10 \text{ mm}$



Kiefernspäne (~350 Tonnen);
 $d < 4 \text{ mm}$



Messungen:

- Temperatur (Thermoelemente + Datenlogger)
- Gaskonzentrationen (FTIR Spektrometer)

Ferrero F, Malow M, Schmidt M, Krause U., Leitfaden zur Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen, BAM-FB 284, 2008

01.06.2016

U. Krause

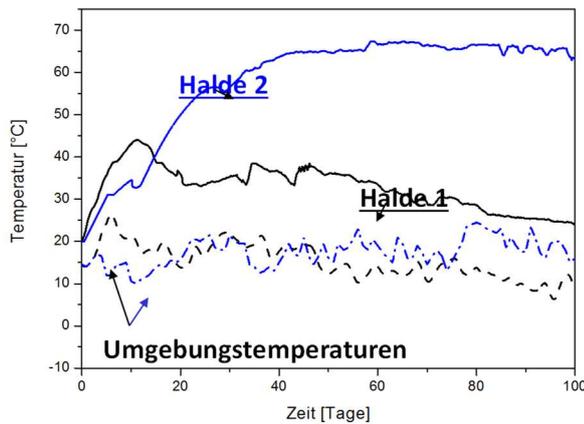


VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Untersuchungen im Großmaßstab

Temperatur (im Kern)



	<u>Halde 1</u>	<u>Halde 2</u>
	Hackschnitzel	Späne
T_{max}	45 °C	66 °C
$\Delta T_{\text{Umgebung-Kern}}$	~25 °C	~50 °C

Diese Erwärmung ist nicht nur durch Chemie/Physik begründbar.

Ferrero F, Malow M, Schmidt M, Krause U., Leitfaden zur Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen, BAM-FB 284, 2008

01.06.2016

U. Krause



VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Kategorisierung von Bränden in Recyclinglagern, auf Deponien, Halden etc.

Oberflächenbrände

- tritt sofort nach Einwirkung der Zündquelle ein
- kann sofort erkannt werden
- Brandbekämpfung in frühem Stadium möglich
- gute Verfügbarkeit von (Luft-) Sauerstoff → verhältnismäßig vollständige („saubere“) Verbrennung

verdeckte Brände

- entwickeln sich über längere Zeit (Monate, Jahre)
- schwierig zu detektieren, da Brandmerkmale spät nach außen dringen
- Brandbekämpfung setzt erst in fortgeschrittenem Stadium ein
- unvollständige Verbrennung (höherer Anteil gefährlicher Reaktionsprodukte)

01.06.2016

U. Krause



VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Zusammenfassung

Biologische Prozesse agieren als Vorläufer für chemische Umwandlung

$$T_{biol.} \approx 70 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Konditionierung des Feststoffs → durch gute Wärmeisolation Beschleunigung thermischer Zersetzung und oxidativer Vorgänge
- im Anfangsstadium exponentielles Wachstum der Reaktionsrate mit der Temperatur (Arrhenius-Ansatz)

$$\frac{dn}{dt} = -n \cdot k_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

- Zutritt von Feuchtigkeit auf „trockene“ Substanz erhöht Selbstentzündungsgefahr
- Sichere Lagerung kann gewährleistet werden durch:
 - Begrenzung des V/A (bei gegebener Lagerungstemperatur)
 - Begrenzung der Lagerungsdauer ($t_L < t_i$)
 - Temperaturüberwachung im thermischen Schwerpunkt der Lageranordnung

01.06.2016

U. Krause



VST

FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Erschienen 2008

Frei verfügbar unter:

<https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/167>



Leitfaden
zur Brandvermeidung bei der Lagerung von biogenen Brennstoffen

Mitglieder:
Dr.-Ing. **Fabio Ferrero**
Dr. rer. nat. **Marcus Malow**
Dr.-Ing. **Martin Schmidt**
Dr.-Ing. habil. **Ulrich Krause**

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Fachgruppe II.2 „Reaktionsfähige Stoffe und Stoffsysteme“
AG „Brennbare Schüttgüter und Stäube, feste Brennstoffe“
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

01.06.2016

U. Krause



VST

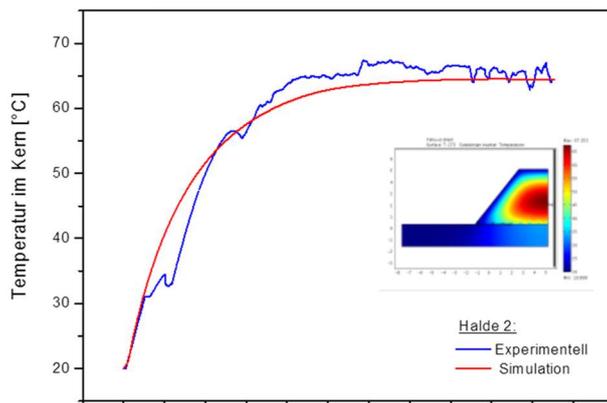
FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Simulationen

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \text{div grad } T + S_T$$

$$S_{O_2} = \frac{(1-Y)}{Y} \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) + b(1-f)X(t)$$

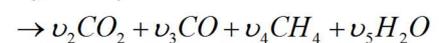
$$S_w = -EV \cdot C_w \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right) + CD \cdot C_v$$



$$S_T = -\frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot \Delta H_R \cdot S_{c,f}$$

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = D_k \cdot \text{div grad } C_k + S_{c,k}$$

$$S_{c,k} = \frac{v_k}{v_f} \cdot \frac{M_k}{M_f} \cdot S_{c,f}$$



$$S_{c,f} = -C_f k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

01.06.2016

U. Krause



VST

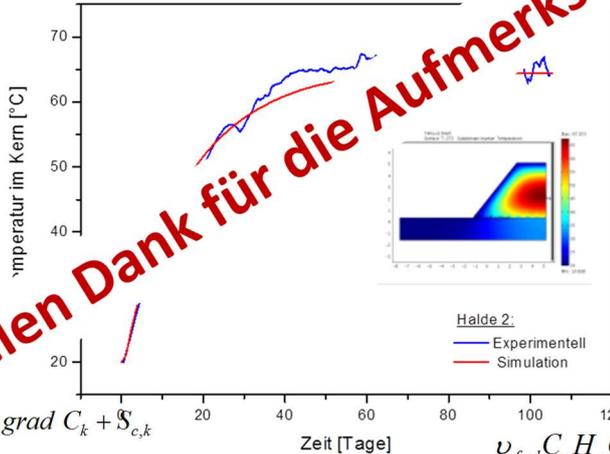
FAKULTÄT FÜR VERFAHRENS- UND SYSTEMTECHNIK

Simulationen

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \text{div grad } T + S_T$$

$$S_{O_2} = \frac{(1-Y)}{Y} \mu_m \frac{MB(t)}{K_B + MB(t)} X(t) + b(1-f) \cdot$$

$$-v \cdot C_w \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right) + CD \cdot C_v$$



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

$$S_T = -\frac{1}{\rho \cdot c_p} \cdot \Delta H_R \cdot S_{c,f}$$

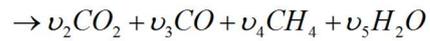
$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = L_k \cdot \text{div grad } C_k + S_{c,k}$$

Zeit [Tage]



$$S_{c,f} = -C_f k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

$$S_{c,k} = \frac{\nu_k}{\nu_f} \cdot \frac{M_k}{M_f} \cdot S_{c,f}$$



Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

(Christian Büttner; CUTEK-Institut, TU Clausthal)

CUTEK Informationen Ressourcen Energie	Biomass to Power and Heat Hochschule Zittau / Görlitz
	<i>Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW</i>
	Christian Büttner CUTEK-Institut 1. Juni 2016

CUTEK
Informationen
Ressourcen
Energie

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW



Gliederung

- Projekt HTBioStir
- Stirlingkonzepte
- Solo Stirling-BHKW
- Hackschnitzelkessel
- ip-tubes
- Wärmeübertrager
- Kopplung mittels Heißluftkreislauf
- Versuchsaufbau
- Energieflüsse
- Technische Fragestellungen
- Fazit

Christian Büttner - CUTEC-Institut

2

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW



Projekt HTBioStir

- Ziel: Energiesystemtechnische Kopplung eines Stirling-BHKW mit einem Hackschnitzelkessel.
- Indirekte Kopplung über einen Heißluftkreislauf.
- Entwicklung eines Hochtemperaturwärmeübertrages (HTWT)
- Berliner Partnerunternehmen: La Mont und Eckrohrkessel
- Herausforderung: hohe Systemtemperatur.
- Nutzung fester Biomasse zur dezentralen Energieerzeugung mit Kraft-Wärme-Kopplung.

Gefördert vom:



Koordiniert vom:



Wissenschaftlich begleitet vom:



Christian Büttner - CUTEC-Institut

3

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

CUTEC

Informationen
Ressourcen
Energie

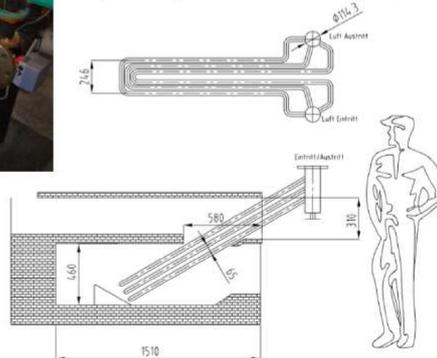
Hackschnitzelkessel



Technische Daten KÖB Unterschubkessel

- Thermische Leistung: 150kW
- Wirkungsgrad: 85%
- Brennstoff: Holzhackschnitzel

Hochtemperaturwärmeübertrager (HTWT)



Feuerungstechnische Daten

- $\dot{H}_{BS} = 195 \text{ kW}$
- $\lambda = 1,3$
- $T_{ad} = 1524^\circ\text{C}$
- $T_{max} = 1300^\circ\text{C}$

Christian Büttner - CUTEC-Institut

6

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

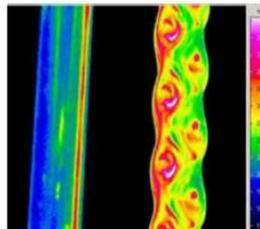
CUTEC

Informationen
Ressourcen
Energie

ip-tubes® - Wirkmechanismen



- Störung der thermischen Grenz- und Unterschicht sowie Teile der Kernströmung
- Periodische Erhöhung der lokalen Strömungsgeschwindigkeiten durch sequenzielle Verengung des Rohrquerschnittes
- Vergrößerung der dem Fluid ausgesetzten Anströmfläche
- Reduzierte Foulingneigung und größere Reinigungsintervalle
- Höhere Bauteil und Dauerfestigkeit



Christian Büttner - CUTEC-Institut

7

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

CUTEC

Informationen
Ressourcen
Energie

Wärmeübertrager



Heizflächendimensionierung HT-WT

- Effektive Heizfläche: 2,8 m²
- ges. Rohrlänge: 33 m
- Übertragungsleistung: ca. 21 kW
- Luftmenge: 290 kg/h bzw. 230 m³.N./h
- Luft-Ein-/Austritt: 800 & 1.020 °C
- Abgas-Ein-/Austritt: 1.250 & 1.070 °C
- Werkstoff: 1.4841

Heizflächendimensionierung Luft-Luft-WT

- Effektive Heizfläche: 22,5 m²
- ges. Rohrlänge: 720 m
- Übertragungsleistung: ca. 67 kW
- Luftmenge: 290 kg/h bzw. 230 m³.N./h
- Ein-/Austritt heiße Luft: 860 & 95 °C
- Ein-/Austritt Umgebungsluft: 25 & 800 °C
- Werkstoff: 1.4841



Christian Büttner - CUTEC-Institut

8

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

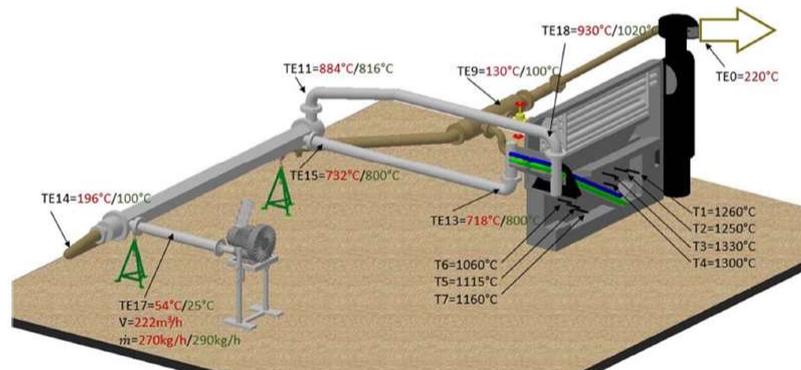
CUTEC

Informationen
Ressourcen
Energie

Heißluftkreislauf ohne Stirling

$$\dot{H}_{\text{Verlust}} = 11,2 \text{ kW}$$

Wärmeverlust	TEj - TEi	ΔT [K]	c _p [J/kg K]	H _{Verlust} [kW]
nach Wärmeübertrager	TE18 - TE11	46	1171	4,0
vor Wärmeübertrager	TE15 - TE13	14	1137	1,2
Verbrennungsluftstrecke	TE14 - TE9	66	1020	5,0
Luft-Luft-Rekuperator	(TE11-TE14), (TE15 - TE17)	10	1055	0,8
Gesamt		136		11,1



Christian Büttner - CUTEC-Institut

9

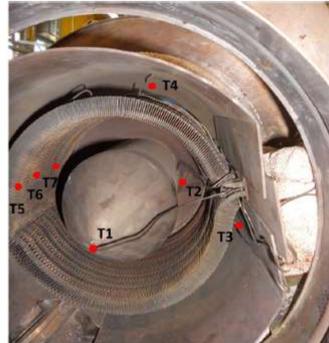
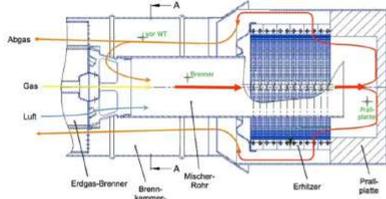
Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

CUTEC

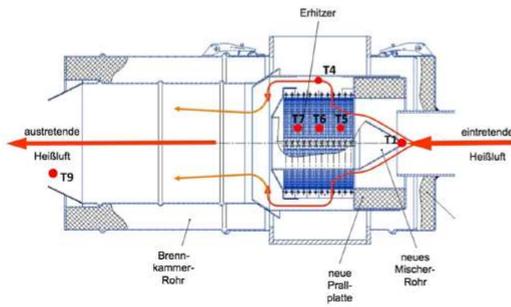
Informationen
Ressourcen
Energie

SOLO-Stirling Umbau

Erhitzerkopf mit FLOX-Brenner



Erhitzerkopf umgebaut auf Heißluftbetrieb



Christian Büttner - CUTEC-Institut

10

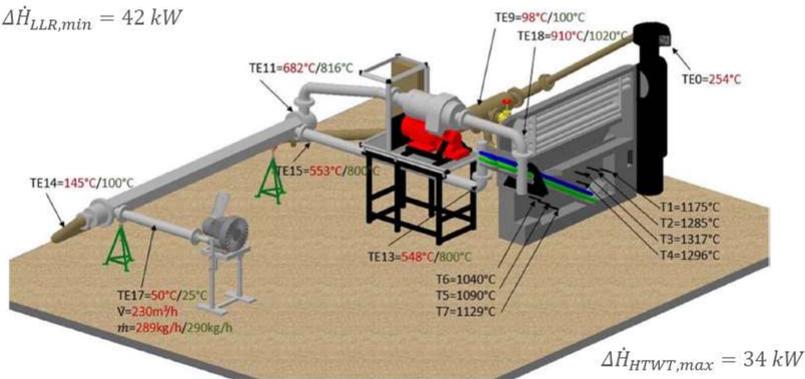
Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

CUTEC

Informationen
Ressourcen
Energie

Heißluftkreislauf mit Stirling

$$\Delta \dot{H}_{LLR, \min} = 42 \text{ kW}$$



Christian Büttner - CUTEC-Institut

11

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

Versuchsaufbau

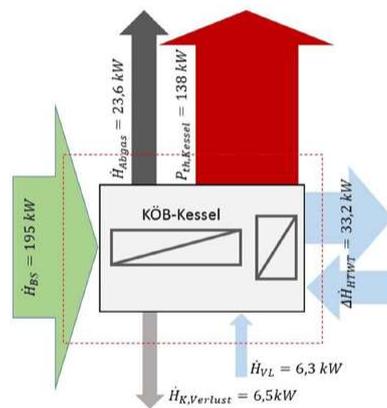


Christian Bütner - CUTEC-Institut

12

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

Energiefluss Hackschnitzelkessel



$$\eta_{Kessel} = \frac{P_{th,Kessel} + \Delta\dot{H}_{HTWT} - \dot{H}_{Luft}}{\dot{H}_{BS} + \dot{H}_{Luft}}$$

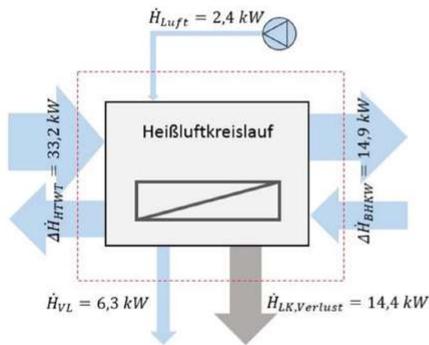
$$\eta_{Kessel} = 0,82$$

Christian Bütner - CUTEC-Institut

13

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

Energiefluss Heißluftkreislauf



$$\eta_{\text{Wärmetransport}} = \frac{\Delta\dot{H}_{HTWT} + \dot{H}_{Luft}}{\Delta\dot{H}_{HTWT} + \dot{H}_{Luft} + \dot{H}_{LK,Verlust}}$$

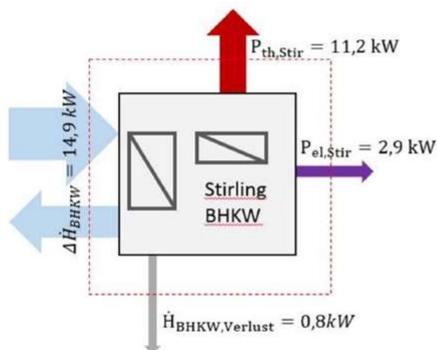
$$\eta_{\text{Wärmetransport}} = 0,71$$

Christian Büttner - CUTEC-Institut

14

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

Energiefluss Stirling-BHKW



$$\eta_{BHKW} = \frac{P_{el,Stir} + P_{th,Stir}}{\Delta\dot{H}_{BHKW}}$$

$$\eta_{BHKW} = 0,94$$

$$\eta_{el,BHKW} = \frac{P_{el,Stir}}{\Delta\dot{H}_{BHKW}}$$

$$\eta_{el,BHKW} = 0,19$$

Christian Büttner - CUTEC-Institut

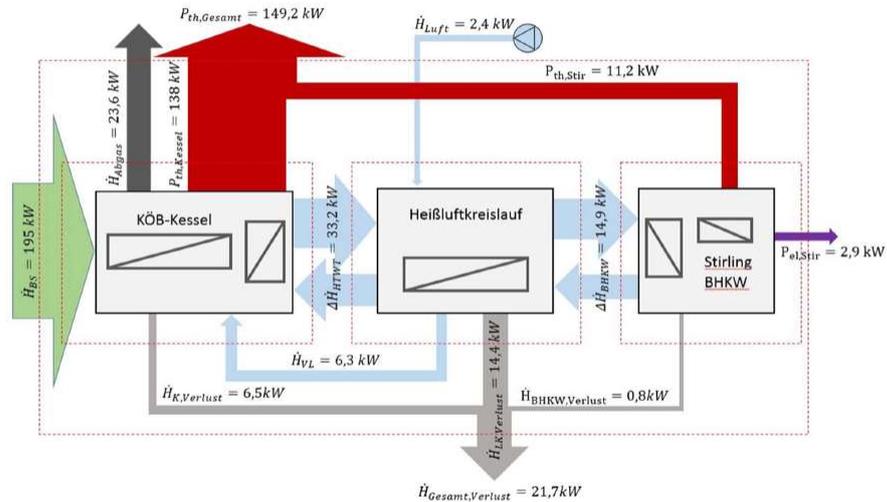
15

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

Energiefluss im Versuchsaufbau

CUTEC

Informationen
Ressourcen
Energie



Christian Büttner - CUTEC-Institut

16

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW

Technische Fragestellungen

CUTEC

Informationen
Ressourcen
Energie

- Wie sollte ein Erhitzerkopf für den Betrieb mit Heißluft gestaltet werden? Könnte dazu eine Art Bypass entwickelt werden, um die Leistung zu regulieren, zu stoppen oder zu schalten?
- Welche Anforderungen gibt es an den verwendeten Brennstoff bezüglich Wassergehalt und Heizwert? Ist eine weitere Steigerung der Verbrennungsluftvorwärmung sinnvoll?
- Ist die erhöhte Schlackebildung problematisch für Wärmeübertrager und Brennraum?
- Entsteht bei den hohen Feuerraumtemperaturen thermisches NOx?
- Ist ein Dauerbetrieb möglich?
- Wie können die vom Stirling erzeugten Schwingungen vom Kessel entkoppelt werden?
- Welche Kesselkonzepte sind denkbar

Christian Büttner - CUTEC-Institut

17

Biomasseverstromung mittels Stirling-BHKW



Fazit

- Die Leistungsfähigkeit des Hochtemperaturwärmeübertragers ist weitaus größer als im Vorfeld angenommen. Die ausgekoppelte Leistung ist vielmehr vom einströmenden Temperaturniveau abhängig als von der maximalen Austrittstemperatur.
- Der Erhitzerkopf am Stirling ist der Engpass im System. Hier müssten Veränderungen vorgenommen werden, um die Übertragungsleistung auf das Arbeitsgas zu steigern. Vermutlich erzeugt der innenliegende Zylinder ein Temperaturgefälle quer zum Wärmeübertrager.
- Die Wärmeverluste am Heißluftkreislauf sowie am Gehäuse des Erhitzerkopfes sind in diesem Anlagenaufbau das zentrale Problem. Würden diese reduziert werden, ließe sich auch der Wärmeübergang am Erhitzerkopf noch etwas steigern.

Christian Büttner - CUTEC-Institut

18

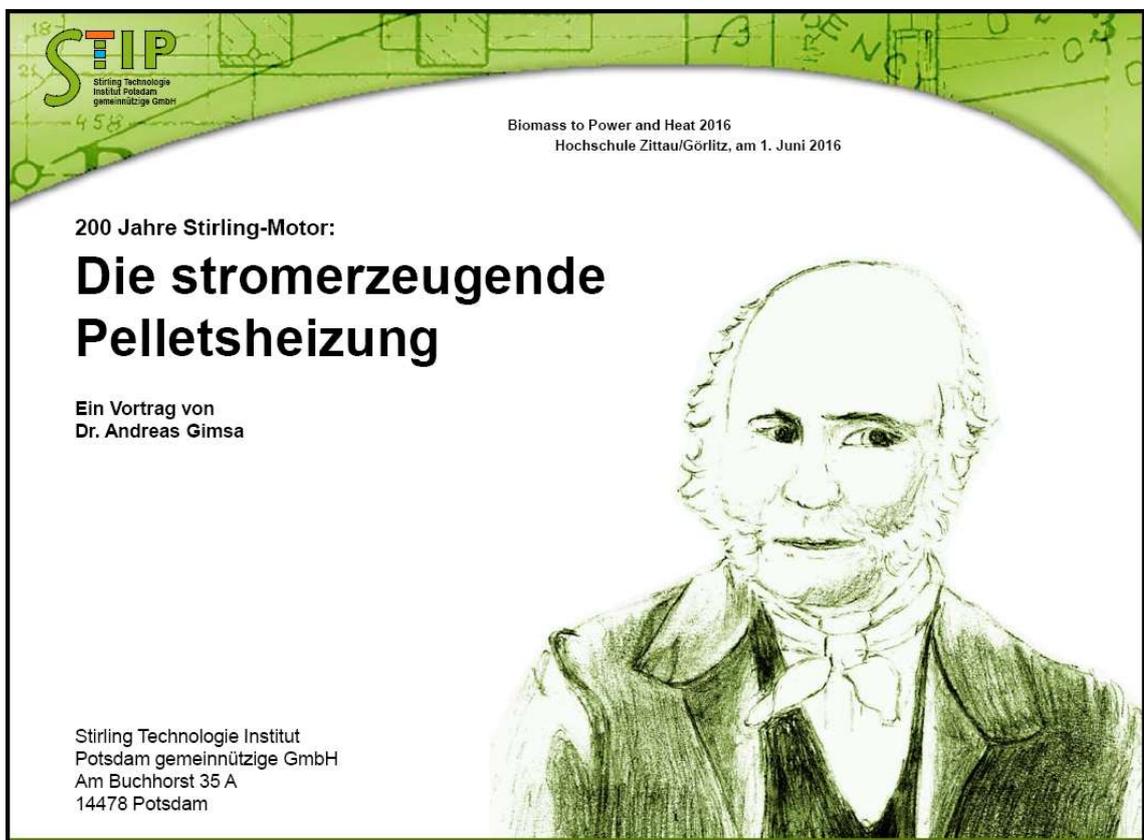


***Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit!***

Die stromerzeugende Pelletsheizung

(Dr. Andreas Gimsa; STIP - Stirling Technologie Institut Potsdam)

Dr.-Ing. Andreas Gimsa
STIP - Stirling Technologie Institut Potsdam gemeinnützige GmbH
Am Buchhorst 35A
14478 Potsdam



STIP Stirling Technologie Institut Potsdam gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Technologien im Vergleich

Erzeugungsanlagen	Brennstoff	elek./mech. Energie	Wärme	Verlust
Heizkessel 	●●●		●●●	
Kraftwerk 	●●●	●		●●
Stromerzeugende Heizung (BHKW) bsp. STIRLING mit Biomasse 	●●●	●	●●	
PKW 	●●●	●		●●

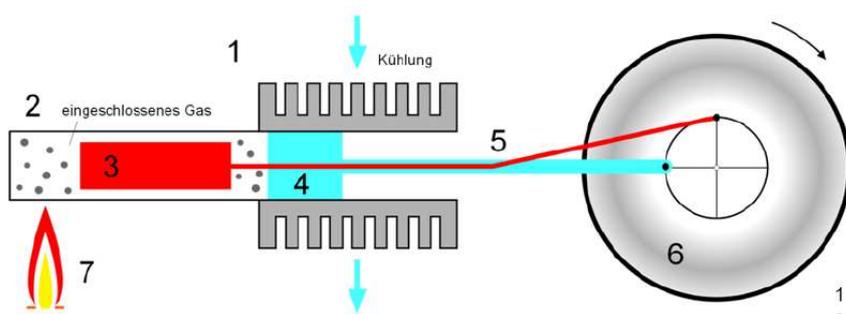
Bild (Heizkessel): www.hottenrott.de; Bild (Kraftwerk): www.fotag.de; Bild (Auto): elektroauto.blog.de

STIP Stirling Technologie Institut Potsdam gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Stirling-Motoren

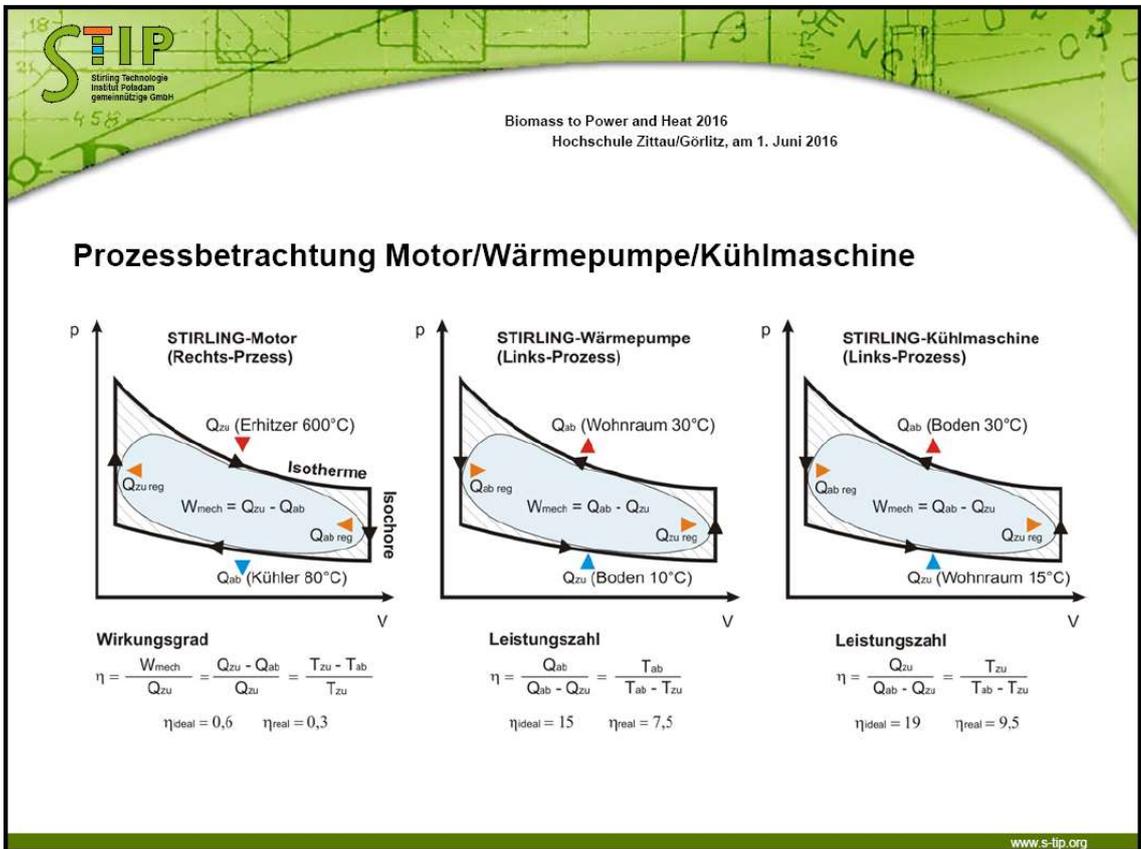
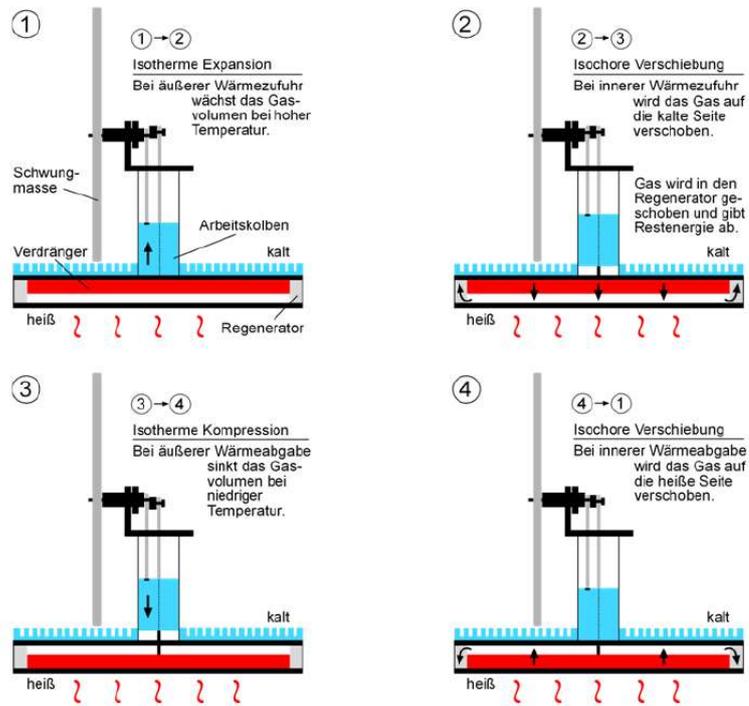
► Aufbau eines Stirling-Motors:



- 1 Kühlzylinder
- 2 Heizzylinder
- 3 Verdrängerkolben
- 4 Arbeitskolben
- 5 Pleuelstangen
- 6 Schwungrad
- 7 Wärmequelle

www.s-tip.org

Das Funktionsprinzip am Beispiel eines Beta-Stirling-Motors



STIP
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Eigenschaften

► **Diesel- und Otto-Motorentechnologie:**

- > Ölwechsel
- > Filter- und Zündkerzenwechsel
- > Ventileinstellungen
- > kurze Wartungsintervalle
- > geräuschbelastet
- > mittlere Lebensdauer
- > viele Verschleißteile



Bild: www.gifs.de

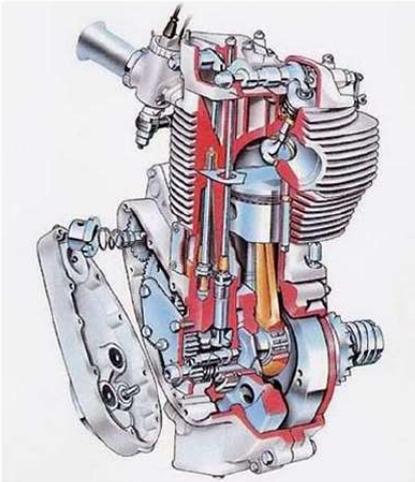


Bild: <http://media.photobucket.com/image/ottomotor/dancortez/bsa.jpg>

www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Eigenschaften

► **Stirling-Motoren sind wartungsarm und langlebig**

- > da nur wenig bewegte Teile vorhanden sind
- > keine Verbrennungsrückstände im Zylinderraum sind
- > keine explosionsartige Verbrennung erfolgt

► **Stirling-Motoren sind umweltfreundlich und leise**

- > keine Umweltbelastung aus laufendem Betrieb
(kein Altöl und keine Öl- oder Luftfilter)
- > Einsatz CO₂-neutraler Brennstoffe
(kein Treibhauseffekt)
- > Kraft-Wärme-Kopplung (weitere CO₂-Reduktion)
- > geringe Geräuschkulisse
(insbesondere bei Mehrzyklenmotoren)
- > geringe Emissionen durch kontinuierliche Verbrennung
- > hoher Gesamtwirkungsgrad

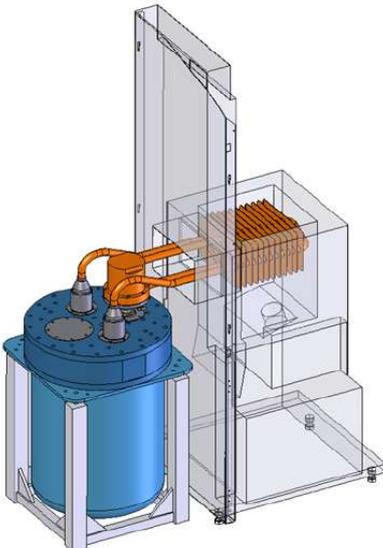


Bild: <http://free.pages.at/sinne/bilder/hoeren03.gif>

www.s-tip.org

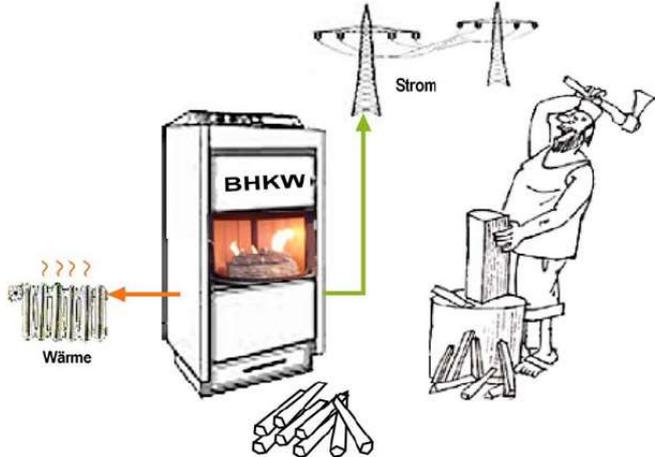
STIP
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Stirling-Motoren

► **Brennstoffvielfalt**

- > Erdgas
- > Biogas
- > Heizöl
- > Pflanzenöl
- > Holzpellets
- > Holzhackschnitzel
- > Bioethanol
- > Solare-Systeme



The diagram illustrates a BHKW (Combined Heat and Power) unit. On the left, a radiator is labeled 'Wärme' (Heat) with wavy arrows pointing to it. The BHKW unit itself is labeled 'BHKW' and has a fire visible inside. On the right, a power line tower is labeled 'Strom' (Electricity) with an arrow pointing to it. A woodcutter is shown cutting logs, with several logs stacked in front of the BHKW unit, indicating the use of wood as fuel.

www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Stirling-Motoren

► **Anwendungsvielfalt**

- > BHKW
- > Kühlmaschinen
- > Wärmepumpen
- > Antriebssysteme
- > Notstromaggregate
- > Hybridfahrzeuge
- > Boatsantriebe
- > Meerwasserentsalzung



The illustrations show three applications of Stirling engines: a small car with a driver, a refrigerator, and a boat. The car is labeled 'ROARRR' and has a URL below it: <http://www.ejwherrenberg.de/cs/material/images/auto.gif>. The refrigerator is labeled with a URL: <http://members.chello.at/franz.schnatter/image/kuhlschrank.gif>. The boat is labeled with a URL: http://www.freiburg.de/servlet/PB/show/1181927_11/10_anglebig.gif.

www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Stirling-Motoren

► **Zukunftsperspektive:**

Stirling-Motoren-Technik ist die Energie-Technologie mit der höchsten Zukunftsperspektive bei Nutzbarkeit nachwachsender und konventioneller Brennstoffe.

Eine diesbezügliche Forschungs- & Entwicklungsförderung hat eine hohe Erfolgsquote und einen hohen Umweltschutzeffekt.



Bild: <http://www.steamcommunity.com>

www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Autarke und dezentrale Biomasseverstromung

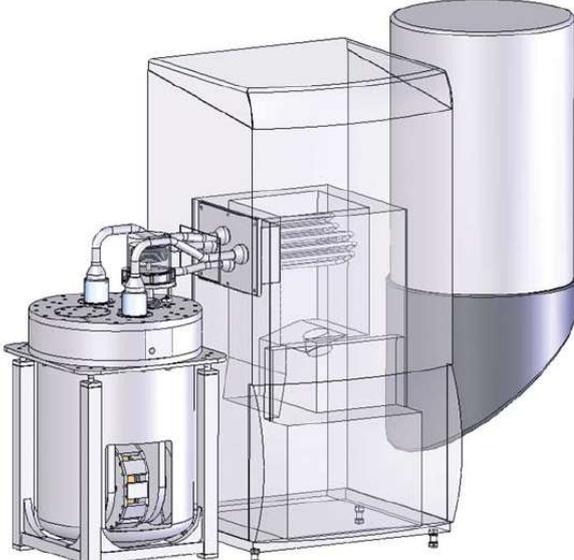
Mikro-BHKW mit Stirling-Motor und Holzpelletsfeuerung

► Das Stirlingprinzip gilt als ideale Technologie für die Kraft-Wärme-Kopplung

► Hier wird der Einsatz eines 2-Zyklus-Stirling-Motors gezeigt in Kombination mit einem Holzpelletskessel von GUNTAMATIC

Leistung el: 1 kW
Leistung th: 3 kW Wärme mit niedriger Temperatur
12 kW Wärme mit hoher Temperatur

Ideal für den **Einsatz im Wohnbereich** für Beheizung, Warmwasserbereitung und Stromerzeugung!

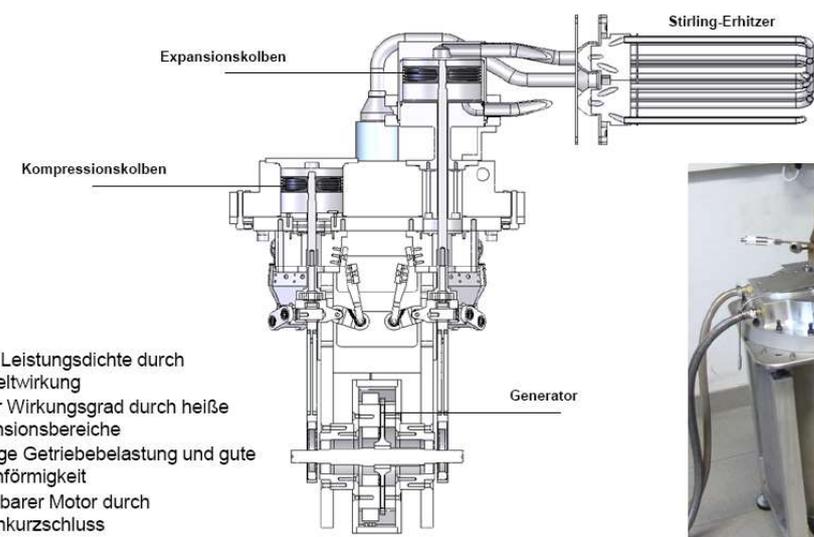


www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Polidam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

ENERLYT-2-Zyklen Stirling-Motor nach Patent DE 10 2014 01 241



- ▶ Hohe Leistungsdichte durch Doppeltwirkung
- ▶ Hoher Wirkungsgrad durch heiße Expansionsbereiche
- ▶ Geringe Getriebebelastung und gute Gleichförmigkeit
- ▶ Regelbarer Motor durch Zykluskurzschluss

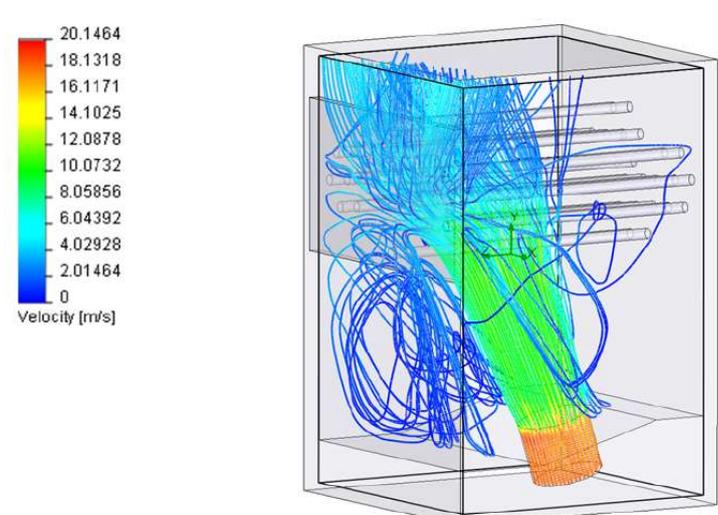


www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Polidam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

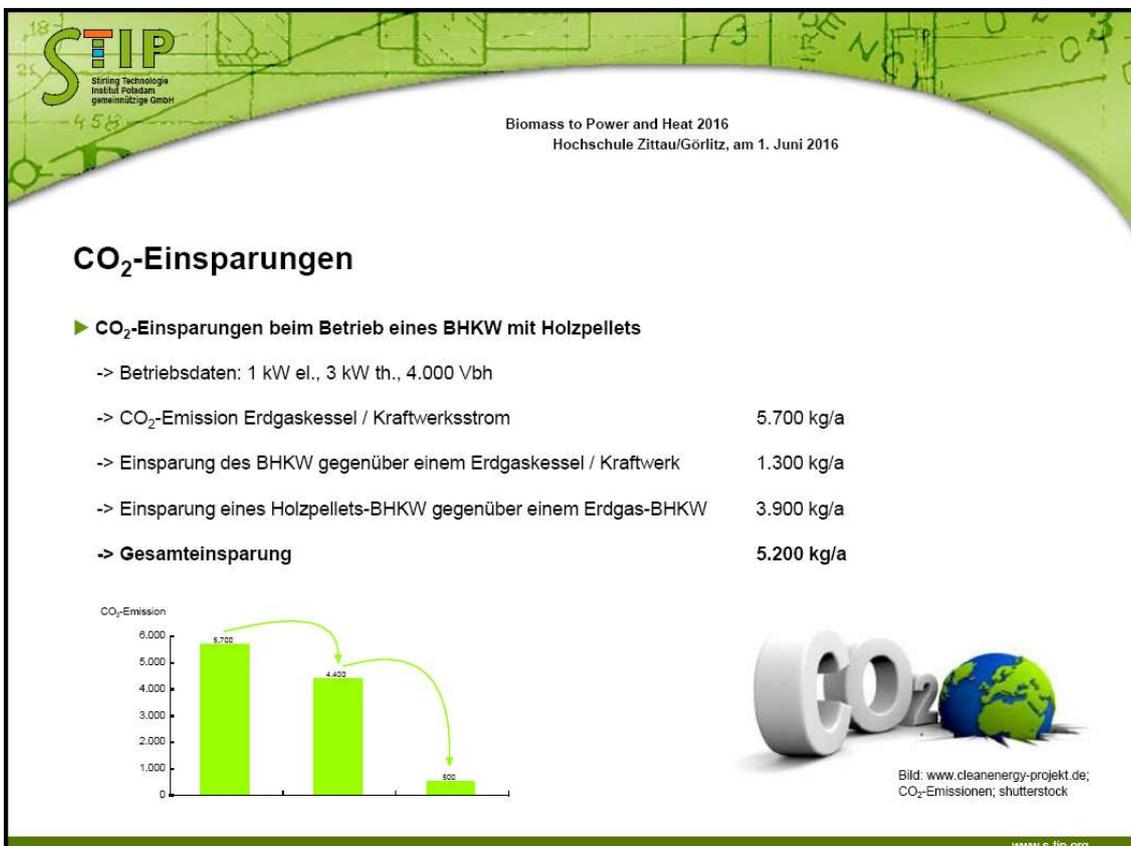
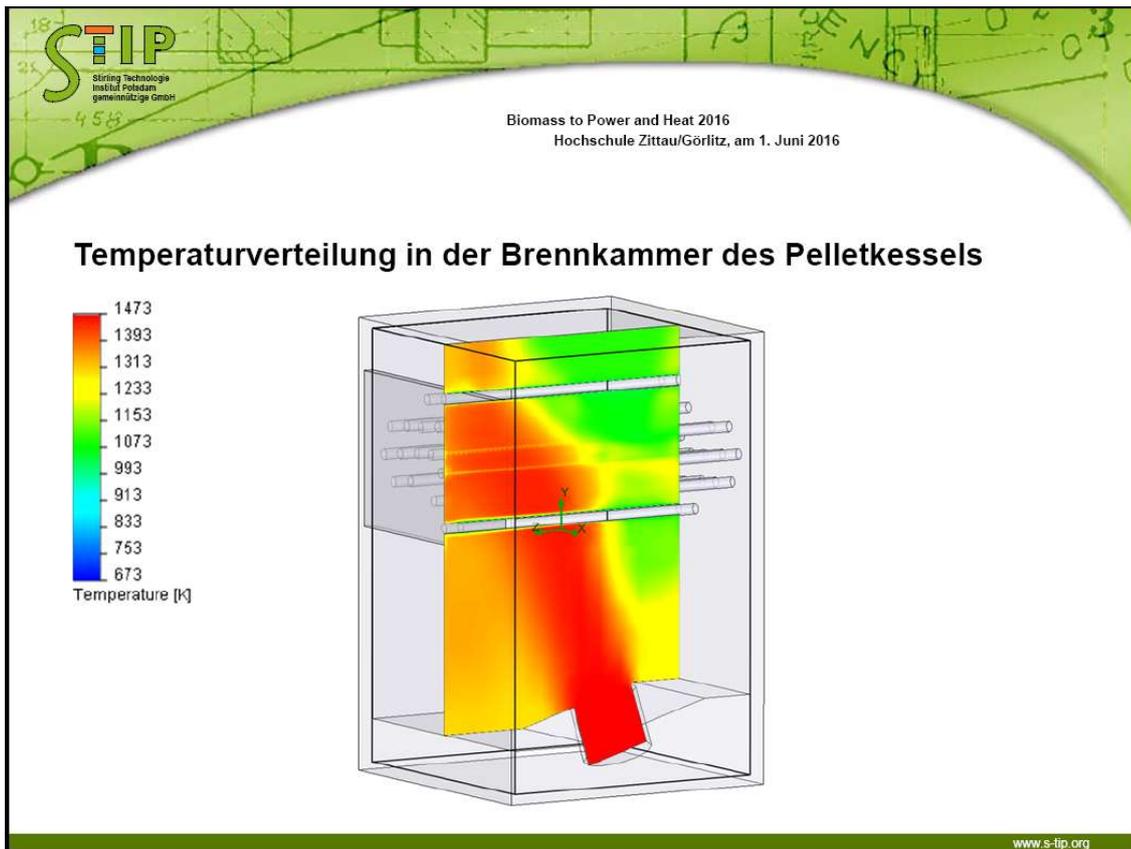
Strömungsverteilung in der Brennkammer des Pelletkessels



Velocity [m/s]

20.1464
18.1318
16.1171
14.1025
12.0878
10.0732
8.05856
6.04392
4.02928
2.01464
0

www.s-tip.org



STIP
Stirling Technologie
Institut Poladum
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

3. Bundeswaldinventur liefert erfreuliche Nachrichten

- ▶ Deutschland ist zu einem Drittel mit Wald bedeckt
- ▶ Hoher Holzvorrat
 - > Deutschland verfügt über einen Holzvorrat von 3,7 Milliarden Kubikmetern.
 - > Mit diesem Holzvorrat steht Deutschland an der Spitze der europäischen Ländern, sogar vor den klassischen Waldländern Skandinaviens.
- ▶ Es wächst mehr Holz nach als wir nutzen
 - > Trotz reger Nachfrage ist der Holzvorrat in Deutschland in den vergangenen zehn Jahren um 7 % gestiegen.
- ▶ Mehr Mischwald
 - > Die Zusammensetzung des Waldes hat sich positiv entwickelt. Der Mischwaldanteil ist auf drei Viertel der Gesamtfläche gestiegen.

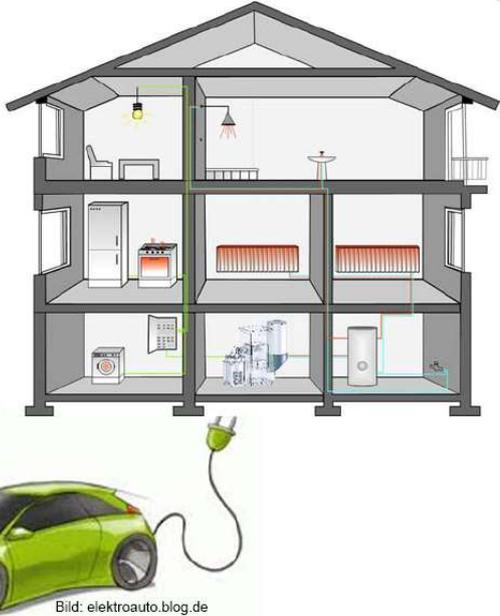
www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Poladum
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Ausblick: Das Auto der Zukunft

- ▶ BHKW im Keller: Elektroantrieb bei Nutzung von KWK-Strom aus Biomasse
- ▶ Signifikante Verbesserung der BHKW-Auslastung durch Ladung außerhalb der Spitzenlastzeiten (nachts)
- ▶ Verbesserung der Energieautarkie
- ▶ Erweiterung des Tankstellennetzes



CO₂-Emission ↓

Bild: elektroauto.blog.de

www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Fördermöglichkeiten für das Holzpellets-BHKW

- ▶ BAFA-Förderung des Pelletkessels mit Pufferspeicher 3.500 €
- ▶ BAFA-Förderung Mini-BHKW für el. Wirkungsgrad > 15 % von 1.900 € (bei 1 kW)
- ▶ EEG-Umlage für Eigenstromerzeugung muss nicht gezahlt werden (< 10 kW und < 10 MWh)
- ▶ Stromvergütung 13,66 ct/kWh bis 150 kW Leistung, EEG 2014



Bild: www.ariva.de www.s-tip.org

STIP
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

Menschen und Tiere – die besten „KWK-Anlagen“!

- ▶ Energieverwertung bei Menschen und Tieren . . .

. . . aus Biomasse wird Bewegung (mech. Energie) und Körperwärme (Wärmeenergie).



Bild Vogel: www.youtube.de, infraTec GmbH; Bild Frau: www.de.papertlog.com

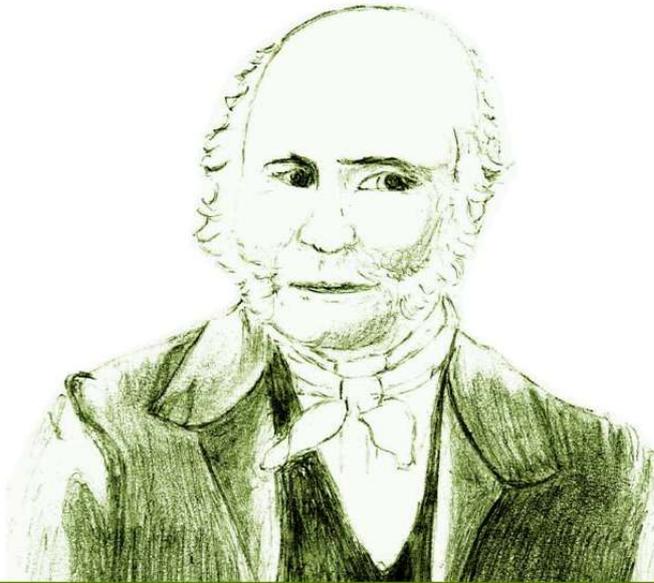
www.s-tip.org

 **STIP**
Stirling Technologie
Institut Potsdam
gemeinnützige GmbH

Biomass to Power and Heat 2016
Hochschule Zittau/Görlitz, am 1. Juni 2016

200 Jahre Stirling-Motor:
**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**

Ein Vortrag von
Dr. Andreas Gimsa



Stirling Technologie Institut
Potsdam gemeinnützige GmbH
Am Buchhorst 35 A
14478 Potsdam

www.s-tip.org

Mikro-KWK mit einem biomassebetriebenen Stirlingmotor auf Basis einer stationären Wirbelschichtfeuerung

(Dominik Müller, Thomas Plankenbühler, Jürgen Karl; alle FAU Erlangen-Nürnberg)

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,
Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik,
Fürther Str. 244f,
90429 Nürnberg,
Germany

1. Problemstellung

Biomassegefeuerte KWK-Anlagen können einen erheblichen Beitrag zu einer nachhaltigen und dezentralen Energieversorgung leisten. Im Leistungsbereich mehrerer Megawatt sind verschiedene Konzepte und deren technische Umsetzungen seit einigen Jahren bereits kommerziell verfügbar. Die Arbeiten hierzu müssen sich im Weiteren auf die Senkung der Kosten fokussieren [1], vor allem hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit für den Weiterbetrieb von Altanlagen nach dem Auslaufen der EEG-Vergütung oder aber auch für Neuanlagen mit deutlich reduzierten Fördermöglichkeiten. Ein Beispiel hierfür könnte der vermehrte Einsatz günstiger Brennstofffraktionen in Heizkraftwerken sein, wobei dafür die Vorhersage der Verschlackungsneigung elementar ist [2].

Im Gegensatz dazu gibt es auch eine große Nachfrage an Lösungen für Mikro- und Mini-KWK-Anlagen bis 100 kW_{el}. Allerdings sind durch die feste Form von Biomasse oder biogenen Reststoffen die einsetzbaren Technologien limitiert. Die üblichen Verbrennungsmotoren erfordern beispielsweise einen vorgeschalteten Vergasungsprozess. Klassische Dampfkraftprozesse hingegen können in dem kleinen Leistungsbereich aufgrund deren hoher spezifischer Investitionskosten und dem geringen Wirkungsgrad von Kleinstturbinen nicht kostendeckend eingesetzt werden. Aus diesem Grund muss für die Stromerzeugung bei Mikro-KWK-Anlagen auf Stirlingmotoren oder Organic-Rankine-Cycles zurückgegriffen werden.

Vielversprechende Konzepte scheiterten allerdings an der Bereitstellung von Hochtemperaturwärme mit üblichen Verbrennungsprozessen für die Wärmekraftmaschinen. Inhomogene Verbrennungstemperaturen und lokale Temperaturspitzen führten bei bisherigen Konzepten vielfach zu Problemen, die sich aus der Zusammensetzung der Asche biogener Brennstoffe ergeben. Diese weisen hohe Anteile an Alkalien – vor allem Kaliumchloride – auf, die auch mit den Hauptproblemen vieler Biomassefeuerungen – Verschlackungen, Korrosion und Agglomerationen – in Zusammenhang stehen. Die Ursachen dafür und Beispiele für das Auftreten dieser Phänomene sind vielfach in der Literatur beschrieben [3, 4].

Bisherige und mittlerweile eingestellte Entwicklungen wie zum Beispiel der Firmen Sunmachine (Stirlingmotor) [5] oder Button Energy (Dampfmotor) [6] fokussierten zudem stets nur den Brennstoff Holzpellets. Aktuell stellt der ebenfalls auf Holzpellets ausgelegte Ökofen_e (0,6 kW_{el}, 9 kW_{th}, $\eta_{el}=7\%$) [7] das einzige auf dem Markt verfügbare Mikro-BHKW auf Basis fester Biomasse dar. Mit den bisher eingesetzten Feuerungen ist auf mittelfristige Sicht das Erreichen einer breiten Brennstoffflexibilität unwahrscheinlich. Im Leistungsbereich ab etwa 10 kW_{el} müssen solche Anlagen zudem

mit Holzvergasungsanlagen konkurrieren, welche typischerweise elektrische Wirkungsgrade über 20 % erreichen können.

2. Brennstoffcharakteristik und thermodynamische Betrachtung der KWK

Biogene Brennstoffe zeichnen sich, je nach Herkunft, durch unterschiedlichste Brennstoffzusammensetzungen und Wassergehalte aus. Aus diesem Grund werden sie typischerweise in holzartige, halmgutartige Biomassen und Reststoffe eingeteilt. Holzartige Brennstoffe haben typischerweise hohe Heizwerte und geringe Aschegehalte. Sie weisen somit gute Verbrennungseigenschaften auf, im Gegensatz zu den halmgutartigen Biomassen oder den Reststoffen mit höheren Asche- oder Wassergehalten.

Dies geht einher mit den teils geringen Ascheschmelztemperaturen von Biobrennstoffen. Vor allem halmgutartige Einsatzstoffe wie Stroh haben Ascheschmelztemperaturen von teils deutlich unter 1000 °C, was zu großen Problemen mit Verschlackungen in konventionellen Biomassekesseln führt [2]. Gerade in Verbindung mit hohen Chlorgehalten ergeben sich oft auch immense Korrosionsprobleme durch die sogenannte Hochtemperaturchlorkorrosion [4].

Zur Senkung der Verbrennungstemperaturen werden Feuerungen daher üblicherweise mit einer erhöhten Luftzahl λ betrieben, was jedoch eine Senkung des Kesselwirkungsgrades zur Folge hat. In Abbildung 1 ist dies exemplarisch in zwei T-Q-Diagrammen für die Kopplung von Biomassefeuerungen in Stirlingmotoren dargestellt. Geringe Luftüberschüsse führen zu hohen Verbrennungstemperaturen und einem Überschreiten von Ascheschmelztemperaturen. Die Konsequenz ist ein nicht unerhebliches Verschlackungsrisiko für derartige Anlagen. Demgegenüber steht der Betrieb mit hohem Luftüberschuss, was zu einer deutlich verringerten Wärmeauskopplung führt und damit auch den elektrischen Wirkungsgrad einer solchen KWK-Anlage deutlich herabsetzt.

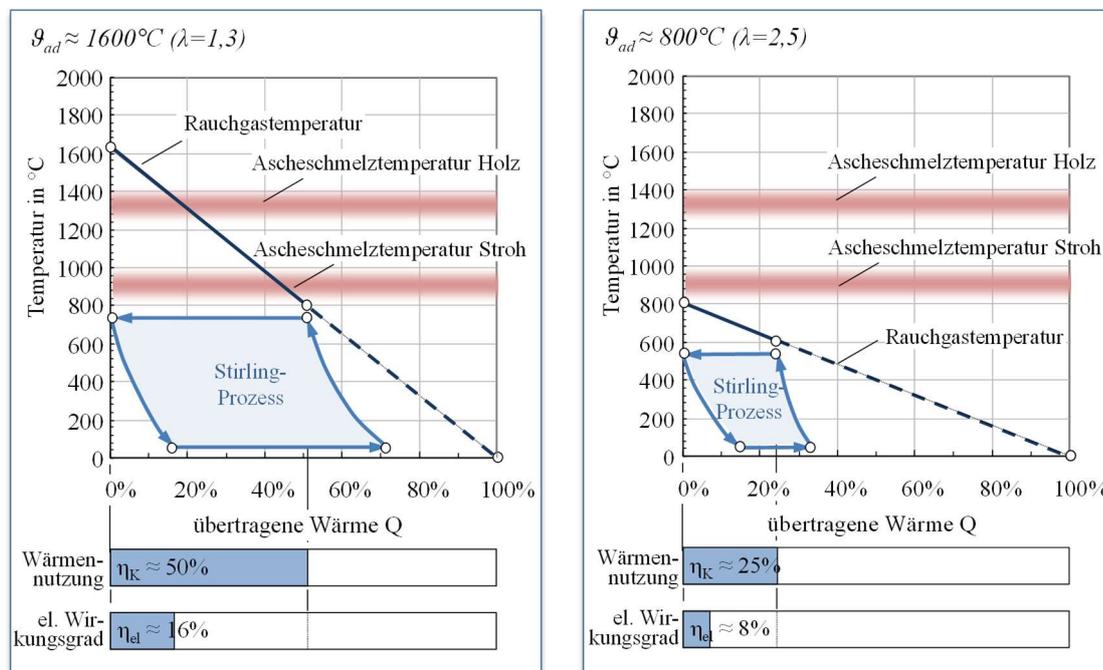


Abbildung 1: Limitierung der theoretischen Effizienz von biomassegefeuerten KWK-Anlagen mit Stirlingmotoren in Abhängigkeit der Luftzahl λ

3. Konzeptpräsentation

Im Jahr 2011 begann der Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik mit der Entwicklung einer brennstoffflexiblen Feuerung für die Kopplung mit Stirlingmotoren. Der innovative Ansatz ist die Skalierung der aus Großfeuerungen [8-12] bekannten Wirbelschichttechnik in den Kilowattmaßstab. Dabei handelt es sich um ein von unten durchströmtes Sandbett, was bei ausreichend hoher Anströmgeschwindigkeit gelockert wird und ein flüssigkeitsähnliches Verhalten annimmt. Die Verbrennung des Brennstoffs erfolgt dann bei Betttemperaturen von typischerweise 750-850 °C innerhalb der Wirbelschicht. Als große Vorteile von Wirbelschichtfeuerungen gelten üblicherweise die geringen NO_x-Emissionen, die große Brennstoffflexibilität aber auch die guten Wärmeübergangsmechanismen infolge der Partikelbewegung und -kollisionen.

Mit der Anordnung des Erhitzerkopfs eines Stirlingmotors als Tauchheizfläche direkt in die Wirbelschicht (Abbildung 2, links) kann damit einfach und effektiv die benötigte Wärme auf einem hohen Temperaturniveau bereitgestellt werden [13, 14]. Dies ist nicht nur geeignet für die Beheizung von Stirlingmotoren, sondern auch für indirekt gefeuerte Gasturbinen [15,16]. Allerdings ist dort die Konstruktion eines Wärmeübertragers mit möglichst geringem Druckverlust die große Herausforderung. Gleichzeitig wird durch das leicht abrasive Verhalten des Bettmaterials auch die Bildung von Verschlackungen zuverlässig verhindert. Zur Vermeidung von Erosion gilt es, kleine Partikel und möglichst geringe Fluidisierungsgeschwindigkeiten zu wählen [17-19], gleichzeitig aber auch den Zielkonflikt für die benötigte Querschnittsfläche bei geforderten Feuerungsleistungen zu beachten. Vergleichbare Anlagen wie zum Beispiel der Biomasse-Heatpipe-Reformer haben jedoch bereits gezeigt, dass für diese Anlagengrößen keine nennenswerte Erosion zu erwarten ist.

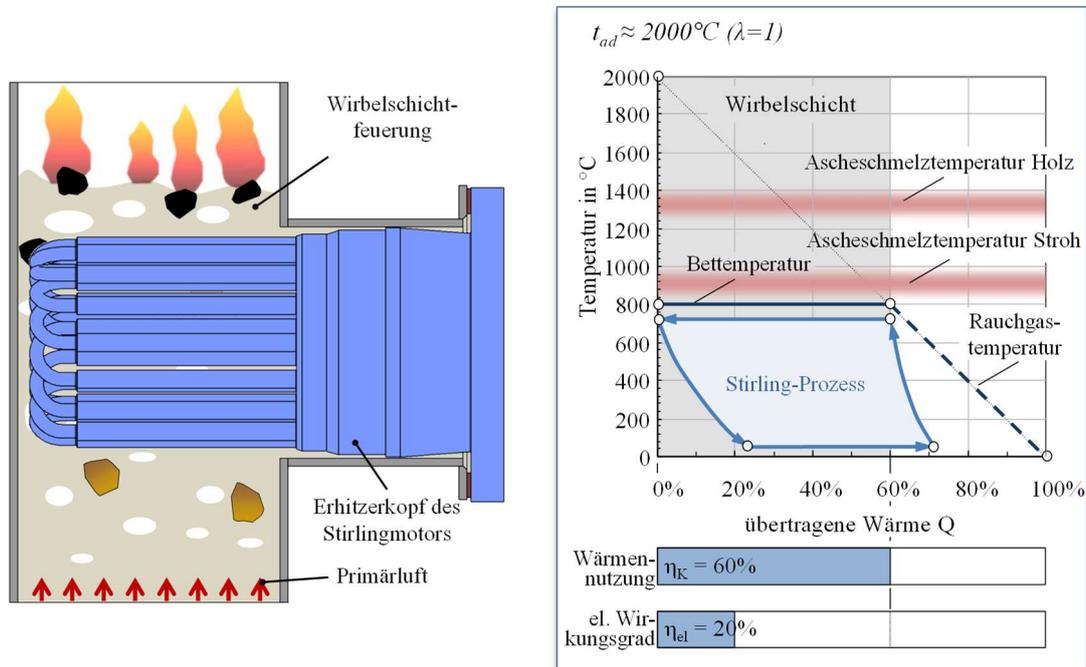


Abbildung 2: Schematische Anordnung des Erhitzerkopfs eines Stirlingmotors als Tauchheizfläche innerhalb einer stationären Wirbelschichtfeuerung (links) und thermodynamische Randbedingung dieses Anlagenkonzepts (rechts)

Die Wärmeauskopplung und die hohe Wärmekapazität des Bettmaterials wirken gleichzeitig als Kühlung der Verbrennungszone, was eine Reduktion der Luftzahl λ zu nahezu stöchiometrischen Bedingungen erlaubt. Gleichzeitig werden die Ascheschmelztemperaturen zuverlässig unterschritten und der Feuerungswirkungsgrad deutlich gesteigert (Abbildung 2, rechts).

4. Vorversuche und Feuerungsentwicklung

Im Jahr 2012 wurde am Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik eine 100 kW Laborwirbelschichtfeuerung errichtet. Der Wirbelschichtdurchmesser beträgt 200 mm bei einer typischen Betthöhe von 400 mm, im Freeboard anschließend eine Erweiterung des Durchmessers auf 400 mm vorgesehen. Die Brennstoffzugabe erfolgt mit einer Schnecke und einem Fallrohr von oben als Wurfbeschickung, der Düsenboden ist als poröse Platte ausgeführt. Der Anfahrprozess kann dank einer zusätzlichen elektrischen Bettheizung innerhalb von 2 Stunden erfolgen.

Die Anlage wurde für Brennstoff- und Bettmaterialuntersuchungen aber auch zur Validierung von CFD-Modellierungen ausgelegt. Dank des einfachen und modularen Aufbaus war es möglich, einen 3 kW_{el} Stirlingmotor (SUNMACHINE, α -Typ, Arbeitsgas: Stickstoff bei 40 bar) als Tauchheizfläche einzubinden (Abbildung 3). Es zeigte sich, dass ein elektrischer Output von nahezu 3 kW_{el} erreichbar ist, aber aufgrund der Hydrodynamik einer Wirbelschicht die waagerechte Anordnung der Wärmeübertragerrohre vorteilhaft ist [13].

Die Herausforderung bestand nun darin, eine Wirbelschichtfeuerung mit einer Feuerungsleistung von 30 kW zu entwickeln, die über eine effektive Staubabscheidung verfügt und zur Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte für die Kohlenmonoxidemissionen einen vollständigen Ausbrand sicherstellt. Gleichzeitig soll die Bauraumgröße mit bisherigen Feuerungsanlagen vergleichbar sein.

Für die Staubabscheidung sind prinzipiell verschiedene Verfahren verfügbar, in der ersten Stufe soll jedoch zunächst das heiße Bettmaterial auf einem einfachen Weg abgeschieden und wieder der Wirbelschicht zugeführt werden. Hierfür kommt ein Zyklonabscheider zum Einsatz, der jedoch nicht wie üblich eine vertikale Rotationsachse besitzt, sondern in liegender Ausführung als sogenannter Horizontalzyklon. Diese Konfiguration nach Garcia-Mallol [20] erlaubt eine platzsparende Anordnung des Erhitzerkopfs direkt



Abbildung 3: Experimenteller Aufbau der 100 kW Wirbelschichtfeuerung mit dem Erhitzerkopf eines Stirlingmotors als In-Bett-Wärmeübertrager [13].

oberhalb der Wirbelschicht ohne zusätzliche Umlenkungen des Rauchgases. Gleichzeitig kann über einen Fallschacht am hinteren Ende des Abscheiders das Bettmaterial direkt in die Wirbelschicht zurückgeführt werden. Da für derartige Zyklonbauformen keine etablierten Auslegungsvorschriften vorhanden sind, wurde der hier eingesetzte Zyklon mittels CFD-Simulationen dimensioniert [21]. Mit der Wahl von Standardrohrdurchmessern und einfachen Geometrien ist es möglich, derartige Abscheider sehr kostengünstig und einfacher zu fertigen.

5. Versuchsaufbau

Abbildung 4 zeigt die im Rahmen der präsentierten Arbeit entwickelte Anlage aus einer 30 kW Wirbelschichtfeuerung und deren Kopplung mit einem 3 kW_{el} Stirlingmotor ohne jegliche Instrumentierung (links) und im betriebsbereiten Zustand (rechts).

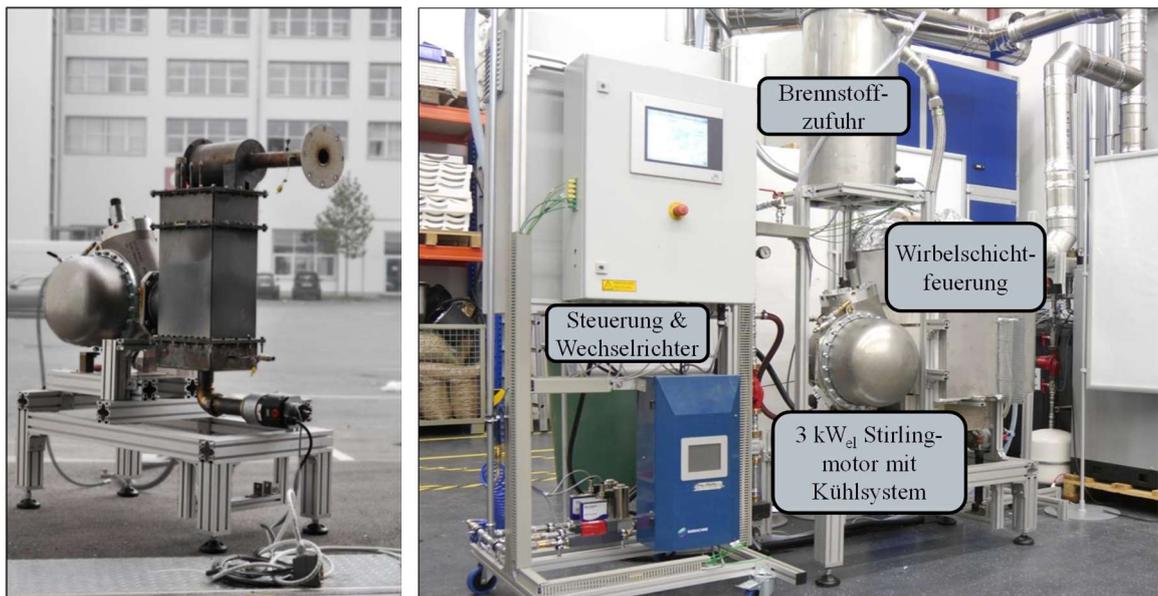


Abbildung 4: Laborwirbelschichtfeuerung mit einem 3 kW Stirlingmotor für Feuerungsleistungen bis 30 kW (links: Darstellung ohne Dämmung und Instrumentierung, rechts: betriebsbereiter Zustand)

Als Bettmaterial kommt ein handelsüblicher Quarzsand mit einer mittleren Korngröße von 500 μm zum Einsatz, was bei den sonstigen gewünschten Betriebsparametern eine Querschnittsfläche von 0.064 m^2 erfordert. Gegenüber den Vorversuchen wurde eine rechteckige Querschnittsfläche gewählt, die Höhe der Brennkammer beträgt 500 mm. Für diese Laboranlage wurde erneut eine poröse Platte als Gasverteiler eingesetzt und ebenso eine elektrische Bettheizung für den Anfahrprozess vorgesehen. Sie verfügt zudem über eine vollständig automatisierte Regelung aller Massen- und Volumenströme sowie einer Erfassung der relevanten Leistungsdaten sowie des abgeführten Wärmestroms an das Kühlsystem.

Für die Versuche wurden bisher drei verschiedene Brennstoffe eingesetzt. Neben handelsüblichen Holzpellets wurden als Reststofffraktion selbst produzierte Pellets aus Kaffeehütchen vorgesehen. Um den Einfluss eines geringeren Flüchtigengehalts, wie er beispielsweise bei torrefizierter Biomassen vorliegt, zu bestimmen, wurden zuletzt noch Restbestände einer Braunkohlefraktion verfeuert. Die Messungen erfolgten bei Betttemperaturen von 750-850 $^{\circ}\text{C}$. Abhängig von den einzelnen Betriebspunkten lag

die Feuerungsleistung zwischen 25-30 kW bei Luftzahlen zwischen $1.25 < \lambda < 1.7$. Um die Auswirkungen verschiedener Kühlmitteltemperaturen zu bestimmen, kann das Kühlsystem des Stirlingmotors auf Vorlauftemperaturen von 15 – 60 °C geregelt werden, ebenso wie der Durchfluss um konstante Spreizungen von 20 K zu realisieren.

6. Ergebnisse und Diskussion

Bestimmt wurden die elektrischen und die thermischen Leistungen des Stirlingmotors bei Betttemperaturen zwischen 750 °C und 850 °C und Kühlmittelvorlauftemperaturen von 20 bis 50 °C. Gemäß dem Carnot-Wirkungsgrad steigt die elektrische Leistung mit höherer Betttemperatur, während eine Erhöhung der Kühlmitteltemperatur die Leistung mindert. Im schlechtesten Falle erreichte der Motor eine Leistung von 1,5 kW_{el}, während er bei für ihn optimaleren Bedingungen (Vorlauftemperatur 20 °C und Betttemperatur 850 °C) seine Nominalleistung von 3 kW_{el} liefern konnte. Diese Charakteristik erlaubt auch eine gewisse Lastflexibilisierung indem durch die Anpassung der Feuerungsleistung die Betttemperatur problemlos variiert werden kann. Dies ist vor allem aus dem Grund wichtig, dass die Anlage mit ihrer großen Wärmekapazität für einen hochdynamischen und getakteten Betrieb geeignet ist, in gewissen Grenzen aber dennoch dem Leistungsbedarf folgen kann.

Der elektrische Bruttowirkungsgrad beträgt etwa 10 %, wobei zu beachten ist, dass hier der elektrische 4 kW Luftvorwärmer vernachlässigt wird. Die Abgastemperaturen liegen bei nahezu 800 °C, somit kann in weiteren Entwicklungsschritten eine rekuperative Wärmeübertragung innerhalb der Anlage selbst erfolgen. Wird es damit möglich die Verbrennungsluft auf mehr als die 400 °C des Luftvorwärmers zu erwärmen, würde der Wirkungsgrad noch weiter steigern.

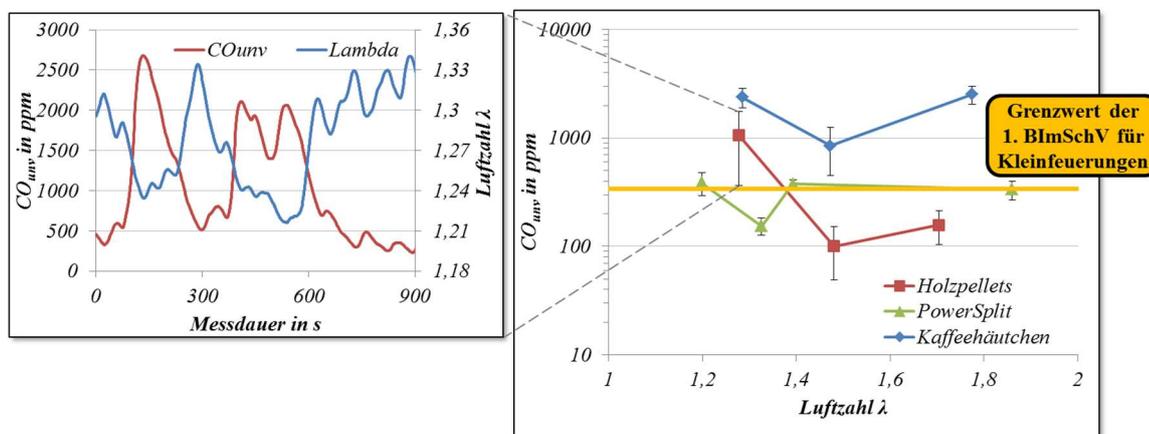


Abbildung 5: Kohlenmonoxidemissionen der Feuerung für verschiedene Brennstoffe und Luftzahlen

Abbildung 5 zeigt die CO-Emissionen der Feuerung. Für Holzpellets können bereits bei Luftzahlen von $\lambda > 1,35$ die gesetzlichen Grenzwerte aus der 1. BImSchV eingehalten werden. Auffällig ist, dass für die kontinuierliche Förderung deutliche Schwankungen beim Verlauf der gemessenen Luftzahl – und für nahstöchiometrische Betriebspunkte auch stark erhöhte CO-Emissionen – feststellbar sind. Dies ist der Leistungsklasse und der hohen Energiedichte von Holzpellets geschuldet, begegnet werden kann dem jedoch mit einer optimierten Brennstoffzufuhr. PowerSplit mit seinem geringen Flüchtigengehalt zeigt ein gänzlich anderes Verhalten. Durch die deutlich langsamere Verbrennungskinetik des gebundenen Kohlenstoffs ergeben sich kaum Schwankungen der

CO-Emissionen. Auffällig sind die hohen CO-Emissionen der Kaffeehütchenpellets, diese sind auf ein unzureichendes Pelletierungsverfahren zurückzuführen. Durch das mangelhafte Verfahren zerfallen diese Pellets während der Verbrennung leicht zu feinstem Staub und werden mit dem Rauchgas aus der Wirbelschicht ausgetragen. Trotz der hohen Temperaturen im Zyklon ist die Verweilzeit dort nicht ausreichend um einen kompletten Brennstoffumsatz zu erzielen.

Der verwendete Stirlingmotor war vorher in einer SUNMACHINE montiert und musste aufwendig von groben Ascheresten gereinigt werden. Zum Zeitpunkt des Einbaus waren im motornahen Bereich noch einige festere Rückstände vorhanden. Bereits nach den Vorversuchen an der 100 kW Wirbelschichtfeuerung konnte beobachtet werden, dass diese Verschmutzungen abgereinigt wurden (Abbildung 6). Obwohl je nach Betriebszustand und eingesetztem Bettmaterial auch Erosionserscheinungen am Material des Wärmeübertragers zu erwarten sind, konnte auch nach etlichen Stunden gefeuerten Betriebs inklusive dem jeweiligen mehrstündigen An- und Abfahren der Anlage kein Verschleiß beobachtet werden. Die Erosionsrate ist grundsätzlich primär vom Impuls der Partikel-Wand-Kollisionen abhängig. Dabei ist die Verwendung eines Bettmaterials mit einer relativ geringen Partikelgröße von 500 µm und den dementsprechend geringen Fluidisierungsgeschwindigkeiten gegenüber Großfeuerungen deutlich von Vorteil. Auch bei der vergleichbaren Anwendung von In-Bett-Wärmeübertragern beim Heatpipe-Reformer der Firma agnion wurde keine Erosionsproblematik berichtet. Es ist demnach davon auszugehen, dass mit geeigneter Werkstoffwahl auch praxisrelevante Standzeiten des Wärmeübertragers erreicht werden können.



Abbildung 6: Erhitzerkopf des Stirlingmotors bevor (links) und nach (rechts) den Experimenten in der Wirbelschichtfeuerung [13].

7. Schlussfolgerungen & Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit ist die Präsentation eines neuartigen Konzepts für innovative Mikro-KWK-Anlagen auf Basis von Wirbelschichtfeuerungen. Tauchheizflächen bringen durch die Kühlung der Feuerung thermodynamische Vorteile mit sich und eignen sich zudem zur Hochtemperaturwärmebereitstellung für Stirlingmotoren.

Basierend auf Voruntersuchung an einer 100 kW Wirbelschichtfeuerung erbrachten den Funktionsnachweis dieses Anlagenkonzepts und bildeten die Grundlage zur Entwicklung einer geeigneten kleinskaligen und emissionsarmen Wirbelschichtfeuerung im Maßstab bis zu 50 kW Feuerungsleistung. Sie verfügt über einen Horizontalzyklon zur

Bettmaterialrückführung, der gleichzeitig als Nachbrennkammer einen vollständigen Ausbrand sicherstellt.

Der Stirlingmotor liefert im Betrieb seine Nominalleistung bei CO-Emissionen innerhalb der Grenzwerte aus der 1. BImSchV, gleichzeitig konnten keine Erosionsmechanismen beobachtet werden.

Die kommenden Herausforderungen bestehen in der Entwicklung eines Ascheaustragsystems insbesondere für Brennstoffe mit hohen Aschegehalten und der Sicherstellung eines kontinuierlichen Bettmaterialaustauschs um Agglomerationen des Bettmaterials zuverlässig zu verhindern. Zudem muss der Schritt aus dem Labor angestrebt werden, indem gezielt eine Pilotanlage mit diesen neuen Teilkomponenten aber auch einer internen Luftvorwärmung aufgebaut werden soll. Anschließend kann die Erprobung in einer geeigneten Umgebung wie zum Beispiel einem Heizkraftwerk mit der dort vorhandenen Betriebsmannschaft erfolgen, um Langzeiterfahrungen zu gewinnen.

Literaturquellen

- [1] Thrän, D.: CHP based on biomass – technologies and potential. The highly efficient Use of Biomass in CHP-Plants - Experience, Potential, Recommendations. Hannover, 2006.
- [2] Plankenbühler, T.: Influence on fuel fine particles on slagging of commercial size biomass boilers. Conference Proceeding, 22nd European Biomass Conference and Exhibition, Hamburg, 23.-26. June 2014.
- [3] Kuosa, M.; Kaikko, J.; Koskelainen, L. (2007): The impact of heat exchanger fouling on the optimum operation and maintenance of the Stirling engine. Applied Thermal Engineering 27, pp. 1671-1676.
- [4] Gatternig, B.; Hohenwarter, U.; Karl, J. (2010): Ascheproblematik in biomassegefeuerten Wirbelschichtanlagen. 11. Symposium Energieinnovation, Graz.
- [5] Betz, R.: Sunmachine GmbH. Zweiter Deutscher Stirlingkongress 2008.
- [6] <http://www.bhkw-prinz.de/button-energy-erneut-pleite-insolvenzverfahren-eroeffnet/3112>, (Aufrufdatum 14.08.2016).
- [7] http://www.pelletsheizung.at/de/pellematic_smart_e/ (Aufrufdatum 14.08.2016)
- [8] Scala, F.; Chirone, R.: Fluidized bed combustion of alternative solid fuels. Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 28, pp. 691-699, 2004.
- [9] Chirone, R.; Scala, F.; Solimene, R.; Urciuolo, M.: Fluidized bed combustion of pelletized biomass and waste-derived fuels. Combustion and Flame, Vol. 155, pp. 21-36, 2008.
- [10] Khan, A.A.; de Jong, W.; Jansens, P.J.; Spliethoff, H.: Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel Processing Technology, Vol. 90, pp. 21-50, 2009.
- [11] van den Broek, R.; Faaij, A.; van Wijk, A.: Biomass combustion for power generation. Biomass and Bioenergy, Vol. 11, pp. 271-281, 1996.
- [12] Youssef, M.A.; Wahid, S.S.; Mohamed, M.A.; Askalany, A.A.: Experimental study on Egyptian biomass combustion in circulating fluidized bed. Applied Energie, Vol. 86, pp. 2644-2650, 2009.
- [13] Müller, D.; Karl, J. (2013): Biomass CHP with Micro-fluidized-bed combustion. 21st European Biomass Conference, Kopenhagen.
- [14] Marra, F.; Miccio, F.; Solimene, R.; Urciuolo, M.; Chirone, R.; Continillo, G.; Lombardi, S.; Fusco, G.: Setup of an integrated Stirling Engine - Fluidized Bed (SE-FB) experimental system. 16th International Stirling Engine Conference, Bilbao, 2014.

- [15] Vincent, T.: Linking a Fluidized Bed Combustion Reactor with an Externally Fired Micro Gas Turbine. PhD thesis, University of Rostock, 2008.
- [16] Gaderer, M.; Gallmetzer, G.; Spliethoff, H.: Biomass fired hot air gas turbine with fluidized bed combustion. Applied Thermal Engineering, Vol. 30, pp. 1594-1600, 2010.
- [17] Lindsley, B.A.; Marder, A.R.: The effect of velocity on the solid particle erosion rate of alloys. In: Wear 225-229 (1999), S. 510–516.
- [18] Wiman, J.; Almstedt, A.E.: Hydrodynamics, erosion and heat transfer in a pressurized fluidized bed: influence of pressure, fluidization velocity, particle size and tube bank geometry. In: Chemical Engineering Science 52 (1997), S. 2677–2695.
- [19] Stringer, J.; Wright, I.G.: Materials Issues in Fluidized Bed Combustion. In: Journal of Materials for Energy Systems 8 (1986).
- [20] Patent US 6,245,300 (August 1994). Garcia-Mallol, J.A. (Inventor); Foster-Wheeler Energy Corporation.
- [21] Hippe, C.: CFD-basierte Konzeption der Partikelabscheidung im Freeboard von stationären Wirbelschichtfeuerungen, FAU Erlangen-Nürnberg, Masterarbeit, 2014

Innovatives Regelungs- und Überwachungssystem zur Steigerung der Effizienz und Schadstoffminderung in automatischen und handbeschickten Vielbrennstoffsystemen

(Dr. Mohammad Aleysa, M. Sc. Niro Akbary, M. Sc. Souha Meriee; alle Fraunhofer Institut für Bauphysik Stuttgart)

Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Kurzfassung

Biomasse ist ein Brennstoff für die Ewigkeit und der am häufigsten eingesetzte Energieträger zur Bereitstellung von Wärme und Warmwasser im Haushaltsbereich. Jede Anstrengung, die zu einer Weiterentwicklung geeigneter und verbesserter Verbrennungstechnik führt, ist lohnenswert, denn tendenziell kommt Biomasse aufgrund derzeit steigender bzw. instabiler Preise für fossile Energieträger und vor allem wegen der Energiewende in Deutschland zunehmend als Brennstoff zum Einsatz. Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern gibt Biomasse nur jene Menge an Kohlenstoffdioxid frei, die zuvor beim Wachstum eingelagert wurden und ist damit zwar theoretisch CO₂-neutral, doch erst der Einsatz hoch entwickelter moderner Anlagentechnik bringt die ökologischen Vorteile im Verbrennungsbereich. Trotz Klimaneutralität hat die energetische Nutzung von Biomasse ihre Schattenseiten. Nach aktuellen Erkenntnissen des Umweltbundesamts sind häusliche Kleinf Feuerungsanlagen eine der Hauptquellen für partikuläre und zahlreiche gasförmige Schadstoffemissionen wie Kohlenmonoxid (CO), flüchtige organische Komponenten (VOCs) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs), die hauptsächlich bei einer unvollständigen Verbrennung entstehen und mit gesundheitsschädlichen Auswirkungen in Zusammenhang gebracht werden. Rund 24.000 Tonnen Staubemissionen sind im vergangenen Jahr aus privaten Kamin- und Ofenrohren sowie Heizkesseln in die Atmosphäre entwichen.

Durch das Betreiberverhalten wird sowohl der Brennstoff als auch die Verbrennungstechnik maßgeblich beeinflusst. Aufgrund dieser Doppelbeeinflussung soll die Regelung des Betreiberhaltens maßgeblich zu einer effizienten und umweltverträglichen Energiebereitstellung durch die thermische Umsetzung von Biomasse beitragen und dadurch einen ökologischen und wirtschaftlichen Beitrag zum aktiven Klimaschutz leisten. In diesem wissenschaftlichen Beitrag geht es um ein Konzept zur regelungstechnischen Optimierung der Verbrennung und permanenten Überwachung des Betriebs von Biomasseheizkesseln der 1. BImSchV. Durch die Kombination von Regelung und Überwachung soll eine hohe Betriebszuverlässigkeit, hohe Umsetzbarkeit, verbesserte Wirtschaftlichkeit und somit eine signifikante Schadstoffminderung in Wohngebieten erzielt werden. Dieses Konzept wurde im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP erstmals beschrieben, und befindet sich in der Entwicklungsphase. Im Rahmen eines laufenden Projekts, welches von dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und in Kooperation mit der Firma LAMTEC GmbH & Co.KG sowie der Firma HDG Bavaria GmbH als renommierte Biomasseheizkessel- und Sensorhersteller durchgeführt wird, soll dieses Konzept entwickelt und im Dauerbetrieb in der Praxis untersucht werden.

Abstract

Biomass is a fuel for eternity and most often used for providing heat, and hot water in households. Any effort for further development of better combustion technologies is worthwhile, because biomass will be more often used in the future as a fuel, due to the fluctuating market prices and a turnaround in energy policy in Germany. In contrast to fossil fuels (oil, coal, gas), biomass emits only the amount of CO₂, which has been previously absorbed by photosynthesis. Despite climate neutrality, the energetic use of biomass also has downsides. According to the German Federal Environment Agency, Small-scaled biomass combustion systems are a relevant emission source of particulate and numerous gaseous emissions such as volatile organic compounds (VOCs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). These pollutants are mostly released by incomplete combustion due to improper operation, technical defects and aging of the technical components of the combustion system, which cannot be recognised in time by the usual monitoring of chimney sweep. Given the increased usage of biomass for producing hot water and heat for both commercial and private purposes, the pollutant components concentrations will steadily increase in residential areas. The speciality of the biomass combustion plants regulated by the first BImSchV (The First Federal Immission Protection Ordinance for Small and Medium-Sized Combustion Systems) is that the operator's behaviour can extremely influence both, the fuel and the combustion system. Due to this double influence, the control of the operator's behaviour must lead to an efficient and environmentally sustainable energy supply by the thermal conversion of biomass in such special combustion systems. Thereby an ecological and economic contribution as well as climate protection is to be achieved.

This paper is about an innovative concept for combustion optimization and permanent monitoring of the small-scaled biomass combustion systems of the first BImSchV. The combining of control with monitoring at the combustion systems shall ensure an operating reliability, high feasibility and improved economy. In addition, both an efficiency improvement and a significant pollutant reduction in residential areas can be achieved. This system is currently at the development stage in the research group for Combustion Systems of Fraunhofer-Institute for Building Physics IBP. In the current project, supported by Bundesministerium für Wirtschaft und Energie and cooperation with the companies LAMTEC GmbH & Co.KG and HDG Bavaria GmbH, this concept will be developed and tested in practice.

Überwachung von Emissionen bei Großverbrennungsanlagen

In Großverbrennungsanlagen werden die Emissionen und Bezugs- sowie Betriebsgrößen wie beispielsweise Sauerstoffgehalt, Abgastemperaturen, Abgasvolumenströme und Abgasfeuchte kontinuierlich durch stationäre Messsysteme gemessen, ausgewertet und online an die verantwortlichen bzw. überwachenden Behörden übermittelt. Hierzu müssen sachgemäße Einrichtungen für die Kalibrierung und Wartung der Mess- und Auswertesysteme vorhanden sein. Die gesetzlichen Anforderungen an die eingesetzten Messverfahren sowie Messeinrichtungen sind in der 13. BImSchV (Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen) und in der 17. BImSchV (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen) geregelt. Abbildung 1 zeigt ein beispielhaftes Emissionsdaten-Managementsystem der Firma Durag Data System GmbH zur permanenten Überwachung der Emissionen von Großverbrennungsanlagen.

Das Überwachungskonzept von Großverbrennungsanlagen lässt sich wegen des hohen technischen Aufwands und der exorbitanten Kosten nicht auf häusliche Biomasseheizkessel der 1. BImSchV übertragen.

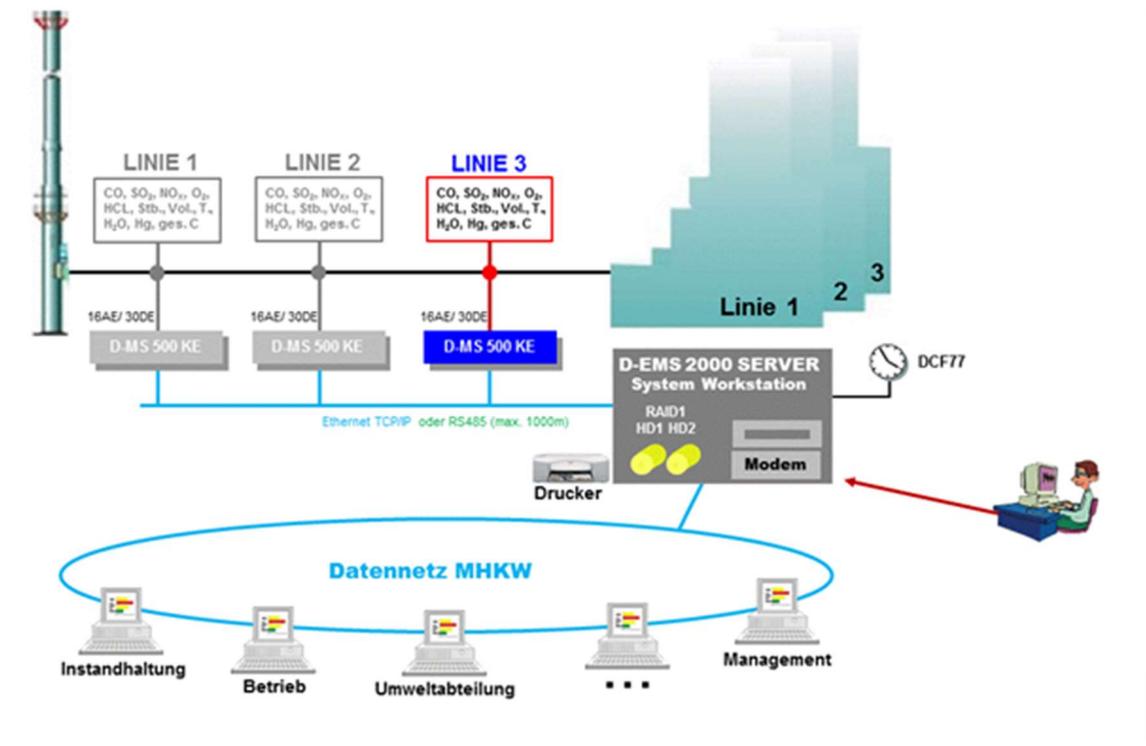


Abbildung 1: Emissionsdaten-Managementsystem (D-EMS 2000) nach der 17. BImSchV.

Stand der Überwachung gemäß der 1. BImSchV

Gemäß der 1. BImSchV erfolgt die Überwachung von Kleinf Feuerungsanlagen entweder einmalig auf dem Prüfstand wie im Fall der Einzelraumfeuerungsanlagen oder wiederkehrend wie bei Heizkesseln mit einer thermischen Leistung größer als vier Kilowatt.

Die einmalige Überwachung von Einzelraumfeuerungsanlagen findet vor dem Inverkehrbringen im Rahmen einer Typprüfung nach bestimmten Prüfnormen (beispielsweise DIN EN 13240 für freistehende Raumheizer, DIN EN 13229 für Kamineinsätze) bei einer unabhängigen Prüfstelle wie z. B. der Prüfstelle Feuerstätten und Abgasanlagen des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP (D-PL-11140-11-03) statt.

Die wiederkehrende Überwachung wird bei Heizkesseln mit einer Nennwärmeleistung von vier oder mehr Kilowatt durchgeführt. Hierbei misst der Schornsteinfeger einmal in jedem zweiten Kalenderjahr die Konzentrationen von Staub und Kohlenstoffmonoxid bei optimalem Betrieb bzw. Nennwärmeleistung in der Regelbetriebsphase über einen Zeitraum von 15 Minuten. Stellt der Schornsteinfeger bei der Überwachung technische oder betriebliche Mängel fest, wodurch die Grenzwerte der 1. BImSchV überschritten werden, wird der Anlagenbetreiber über den problematischen Zustand des Heizkessels informiert. Der Anlagenbetreiber hat anschließend die Möglichkeit den Fehler innerhalb einer Frist zu beheben, sodass die Heizkessel nach der Fehlerbehebung erneut vom Schornsteinfeger überprüft werden. Kann der Heizkessel die Grenzwerte auch nach

der Behebung der Fehler nicht einhalten, muss der Heizkessel außer Betrieb genommen werden.

Bei dem heutigen Überwachungskonzept für Kleinfeuerungsanlagen handelt es sich lediglich um eine stichprobenartige Messung der Emissionen. Hierbei erfolgt die Messung der Emissionen nur unter speziellen Sonderbedingungen (optimale Brennstoffeigenschaften und Bedienungsqualitäten), mit denen die biomassebetriebenen Heizkessel die Grenzwerte einhalten können. In der Praxis werden diese Sonderbedingungen meistens nicht eingehalten, sodass über das gesamte Betriebsjahr höheren Emissionen entstehen als bei der Überwachungen durch den Schornsteinfeger gemessen wurden. Die Bewertung des Betriebs der Heizkessel ist folglich weder repräsentativ für die Qualität der Bedienung, noch für den gesamten Betrieb der Heizkessel. Außerdem werden andere Betriebsphasen, wie die Anfahrbetriebsphase, die Ausbrandbetriebsphase oder der Teillastbetrieb für die Bewertung der Verbrennung nicht berücksichtigt, obwohl hier über 90 % der Emissionen entstehen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Dadurch wird die heutige Art der Überwachung durch den Schornsteinfeger langfristig nicht zu einer nachhaltigen Minderung der Schadstoffemissionen in Wohngebieten (besonders urbane Räume) führen.

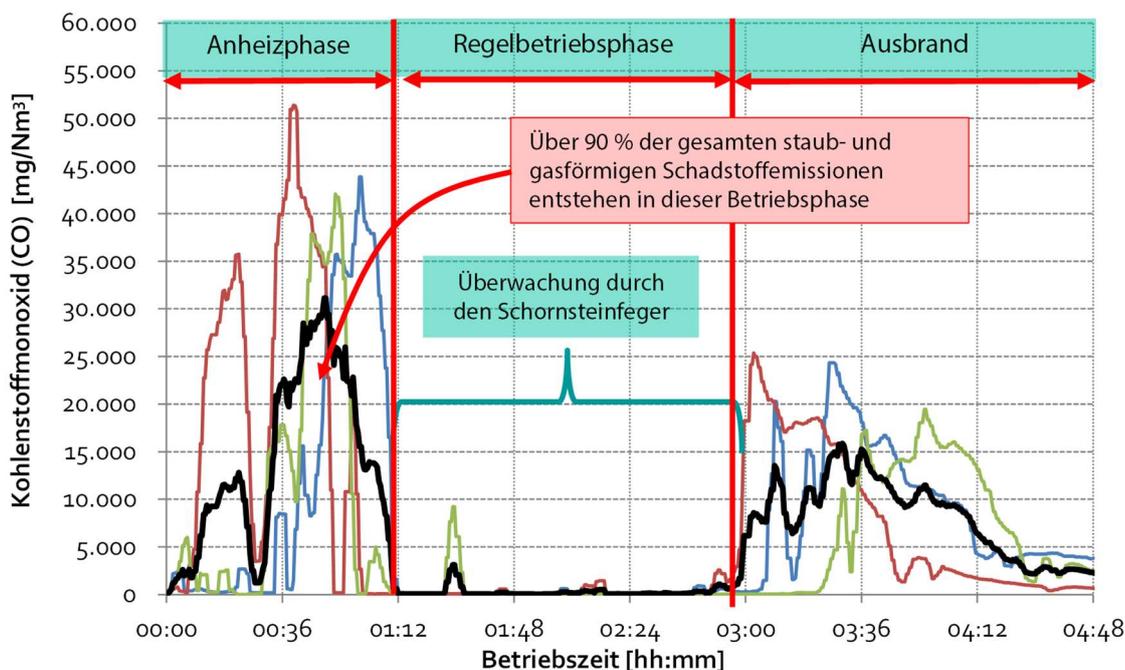


Abbildung 2: Kohlenstoffmonoxid beim Betrieb von biomassebetriebenen Heizkesseln.

Durch die heutigen technischen Möglichkeiten ist eine stichprobenartige Erfassung der Emissionen zur Bewertung des Betriebs von biomassebetriebenen Heizkesseln nicht mehr zeitgemäß. Auf Basis heutiger Technologien können moderne Überwachungssysteme ökologisch und ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden, wodurch sich die Verbrennung und die Anlagentechnik regelungstechnisch optimieren, permanent überwachen und folglich konsequenter bewerten lassen.

Einflussfaktoren auf den Betrieb von Heizkesseln

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Betrieb von Heizkesseln haben die Verbrennungstechnik, der Brennstoff und der Anlagenbetreiber (Abbildung 3). Für einen sachgemäßen (emissionsarm und effizient) Betrieb müssen diese drei Einflussfaktoren synergetisch zusammenwirken.

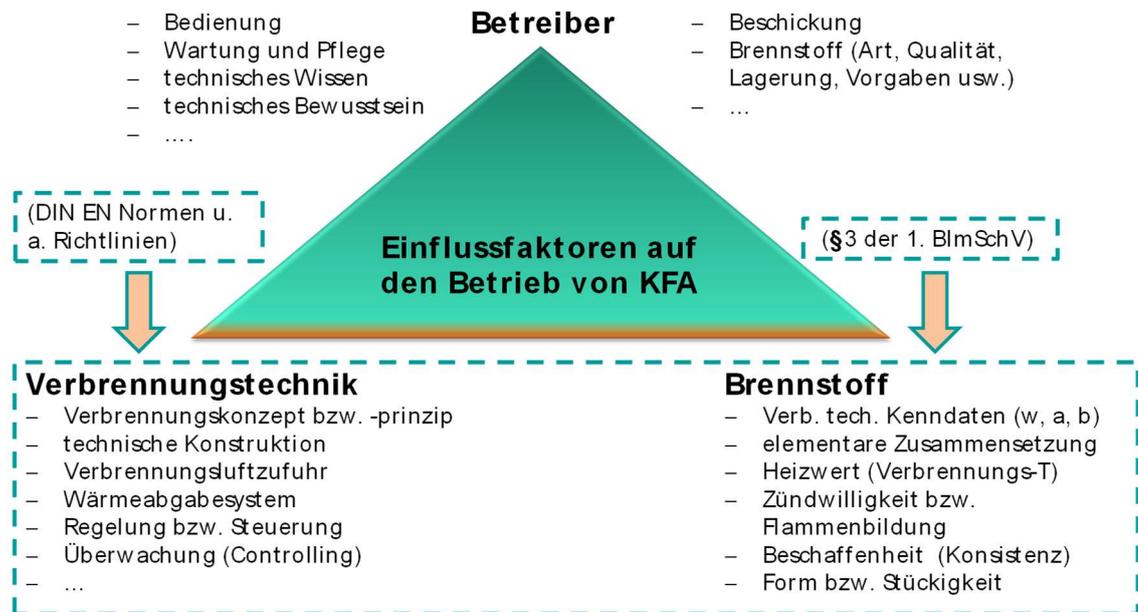


Abbildung 3: Wesentliche Einflussfaktoren auf den Betrieb von Kleinfeuerungsanlagen.

Die Verbrennungstechnik beschreibt die technischen Eigenschaften der Feuerungsanlagen wie z. B. Verbrennungskonzepte und Verbrennungsluftzufuhr. Die rechtlichen Anforderungen für die Verbrennungstechnik sind in den Richtlinien wie z. B. der Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) oder den entsprechenden Prüfnormen geregelt. In der 1. BImSchV sind die zugelassenen Brennstoffe, die Art der Überwachung sowie die immissionsschutzrechtlichen Anforderungen von Kleinfeuerungsanlagen geregelt. Das Betreiberverhalten wird bisher nicht überwacht bzw. gesetzlich geregelt, obwohl der Betreiber insbesondere durch das Bedienungs- und Wartungsverhalten einen maßgeblichen Einfluss sowohl auf die Verbrennungstechnik, als auch auf den Brennstoff hat. Die Regulierung des Betreiberhaltens soll deshalb maßgeblich dafür sorgen, dass die thermische Verbrennung von Biomasse über das gesamte Jahr ökologischer und effizienter ablaufen wird. Langfristig wird durch die Steigerung der Effizienz ein massiver Beitrag zur Minderung der Treibhausgasemissionen und somit zum Klimaschutz geleistet.

Die Regulierung des Betreiberhaltens soll mit der permanenten Überwachung erreicht werden. Hierbei sollen nicht nur die Bedienqualitäten des Betreibers, sondern auch der technische Zustand der Kleinfeuerungsanlagen kontinuierlich überwacht und aufgezeichnet werden. Dadurch soll das Bewusstsein des Betreibers für einen sachgemäßen Betrieb durch die richtige Einstellung der Verbrennungstechnik und die richtige Verwendung von biogenen Brennstoffen gemäß der 1. BImSchV gesteigert werden.

Regelungs- und Überwachungssystem des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP

Im Fachgebiet Verbrennungssysteme des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP wurde ein innovatives System entwickelt, mit dem biomassebetriebene Heizkessel intelligent geregelt und permanent überwacht werden können. In Kooperation mit den Firmen LAMTEC GmbH & CO.KG und HDG Bavaria GmbH wird das in Abbildung 4 dargestellte Regelungs- und Überwachungssystem im Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP im Rahmen eines Forschungsprojekts untersucht.

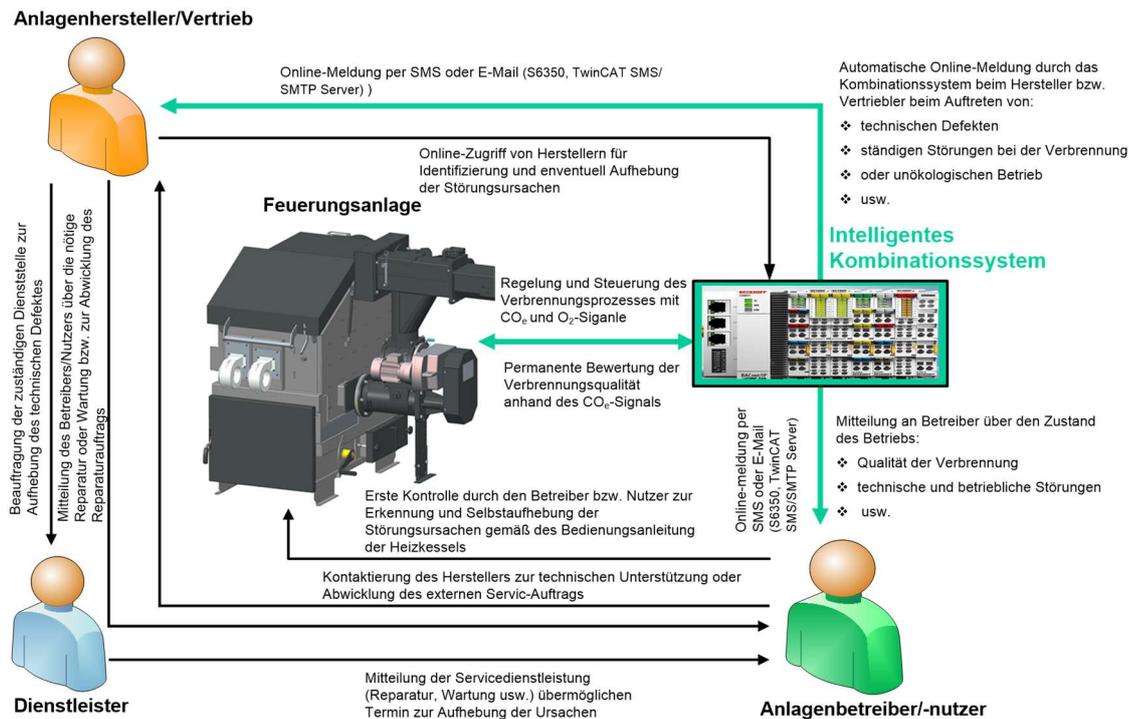


Abbildung 4: Regelungs- und Überwachungssystem des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP.

Durch das Überwachungssystem werden die für den sicheren Betrieb von Heizkesseln relevanten Parameter zu jedem Zeitpunkt online bewertet. Für diese Bewertung werden Sensoren eingesetzt, mit denen die Qualität der Verbrennung durch direkte Größen beurteilt werden kann. Die Bewertung und Überwachung erfolgt durch O₂/CO₂-Sonden, Temperaturfühler und Druckmessgeräte. Wenn sich der Betrieb des Heizkessels verschlechtert, kann durch das intelligente Regelungssystem eine Änderung des Betriebszustands eingestellt werden, sodass zu jedem Zeitpunkt der optimale Betriebszustand des Heizkessels erreicht bzw. beibehalten werden kann. Wenn das intelligente Regelsystem die Fehler nicht selbstständig beheben kann, werden die Anlagenhersteller über den Betriebszustand des Heizkessels z. B. per SMS oder E-Mail informiert. Anschließend können die Störungen des Betriebs von geschultem Fachpersonal beseitigt werden.

Durch dieses innovative Regelungs- und Überwachungssystem des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP sollen erstmals konkrete Kenntnisse über das Betriebsverhalten von Biomasseheizkesseln in der Praxis und eine bessere Abschätzung der tatsächlichen Emissionen in biomassebetriebenen Heizkesseln geliefert werden. Da es sich dabei um eine permanente Bewertung der Verbrennungsqualität und nicht um

eine stichprobenartige Messung - wie bei der Überwachung durch einen Schornsteinfeger - handelt, kann dadurch eine angemessene, konsequente Überwachung und somit eine realistische Bewertung für Kleinf Feuerungsanlagen im Vergleich zur derzeit praktizierten Kontrolle gemäß der 1. BImSchV erreicht werden.

Hard- und Software des Regelungs- und Überwachungssystems

Die Regel- und Überwachungsalgorithmen des Regelungs- und Überwachungssystems werden mit Hilfe einer SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung) von der Firma Beckhoff New Automation Technology in der Programmiersprache ST (Structured Text) entwickelt. Die Hardwarekomponenten sind in dem TwinCat Systemmanager dargestellt und als Entwicklungsumgebung dient das TwinCat PLC Control.

Der TwinCat Systemmanager erkennt und verwaltet die Ein- und Ausgangsklemmen. Hier kann die Kommunikation zwischen den Klemmen und den Sensoren sowie Aktoren überwacht und gesteuert werden. Das Programm zur Überwachung und intelligenten Regelung der Verbrennung wird mit dem TwinCat PLC Control programmiert. Hier werden die Signale der Sensoren und Aktoren auf die intelligente Software übertragen. Die Software besteht aus speziellen Bausteinen, mit denen die Ein- und Ausgangssignale zur Vermeidung von Fehlerfortpflanzungen mehrfach gefiltert, überprüft und gegebenenfalls konditioniert werden. In Abbildung 5 ist das Konzept der Signal- und Datenübertragung dargestellt.

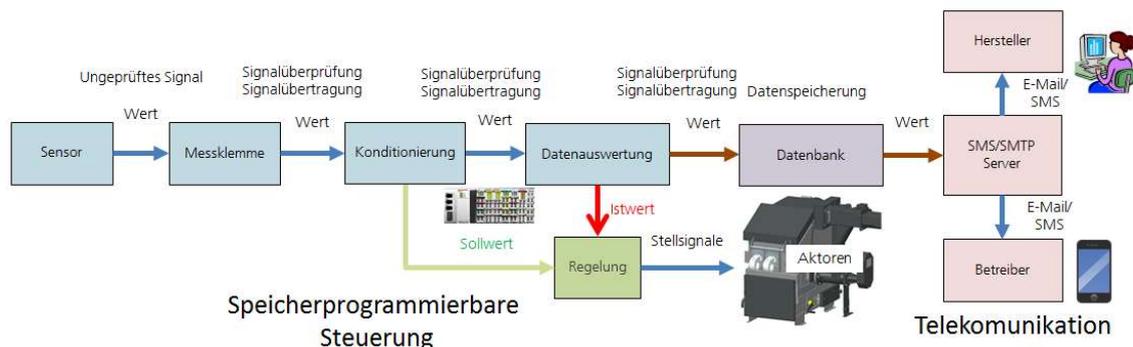


Abbildung 5: Signal- und Datenübertragung des Regelungs- und Überwachungskonzepts des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP.

Dank der internen Datenverarbeitung können die Anlagenbetreiber und Hersteller über den Zustand des Betriebs der Heizkessel unmittelbar informiert werden. Die Signal- und Datenübertragung erfolgt durch den TS6350 TwinCat SMS/SMTP Server. Mit diesem Server können unter der Verwendung von SPS-Bausteinen sowohl Dateianhänge als auch Textnachrichten versendet werden, sodass die Anlagenbetreiber und Hersteller in kurzer Zeit über Störungen und Fehler des Heizkessels per SMS und E-Mail informiert werden können.

Vorteile der permanenten Überwachung von Heizkesseln

Durch die permanente Überwachung lassen sich im Vergleich zum heutigen Überwachungskonzept gemäß der 1. BImSchV über das gesamte Betriebsjahr eine Reihe von ökologischen, ökonomischen und technischen Vorteilen erzielen.

Die technischen Vorteile der permanenten Überwachung ergeben sich aus der Steigerung der Effizienz und aus der schnelleren innovativen Entwicklung von Heizkesseln, die durch die rasche Erkennung und Behebung von betrieblichen Fehlern der Heizkessel möglich werden soll. Mit der permanenten Überwachung kann der Wirkungsgrad im Praxisbetrieb von etwa 78 % auf 93 % gesteigert werden. Durch die intelligente Regelung und Überwachung sollen die Heizkessel jederzeit optimal betrieben werden. Wenn die Betriebsfehler von dem Regelungs- und Überwachungssystem eigenständig nicht behoben werden können, werden die Anlagenhersteller über den Zustand der Heizkessel informiert, sodass die Betriebsfehler anschließend durch geschultes Fachpersonal behoben werden können. Dadurch kann die Verbrennung über das gesamte Betriebsjahr stabil bzw. effizient ablaufen. Mit den Informationen über den Anlagenbetrieb können die Anlagenhersteller Schwachstellen der Heizkessel schneller identifizieren und diese bei Neuentwicklungen der Heizkessel berücksichtigen.

Der ökologische Vorteil der Überwachung ergibt sich aus der Steigerung der Effizienz und aus der Minderung gefährlicher Emissionen, die durch die kontinuierliche Optimierung des Verbrennungsprozesses erreicht werden kann. Durch die Steigerung der Effizienz können Brennstoffe eingespart werden, sodass die Treibhausgasemissionen, die bei der Verarbeitung und Aufbereitung von biogenen Brennstoffen entstehen, um etwa 25 % reduziert werden können. Feinstäube können um etwa 40 % und versauernde Emissionen um etwa 15 % gesenkt werden. Mit diesem System kann folglich besonders in Wohngebieten eine wichtige Minderung von gesundheitsgefährdenden Emissionen erreicht werden, die vor allem durch schlechte Verbrennung entstehen.

Der ökonomische Vorteil der permanenten Überwachung entsteht durch die Ersparnis von Brennstoffen, welche durch die Steigerung der Effizienz erreicht wird, und durch den Einsatz sogenannter Vielbrennstoffsysteme, welcher Dank der kontinuierlichen Regelung und Überwachung der Heizkessel möglich wird. Durch die Steigerung des Wirkungsgrades kann selbst bei einer vermehrten thermischen Nutzung der Biomasse eine Reduzierung des Primärenergieverbrauchs erreicht werden, sodass die thermische Nutzung von Biomasse im Vergleich zu fossilen Energieträgern zukünftig ökonomisch attraktiver werden könnte. Da mit diesem System jeder Heizkessel permanent optimal geregelt und überwacht werden kann, können zukünftig auch neue, günstigere biogene Brennstoffe für die Verbrennung in biomassebetriebenen Heizkesseln verwendet werden, wodurch ein zusätzlicher ökonomischer Anreiz zum Einsatz von biomassebetriebenen Heizkesseln geschaffen werden kann.

Umsetzbarkeit des Kombinationssystems

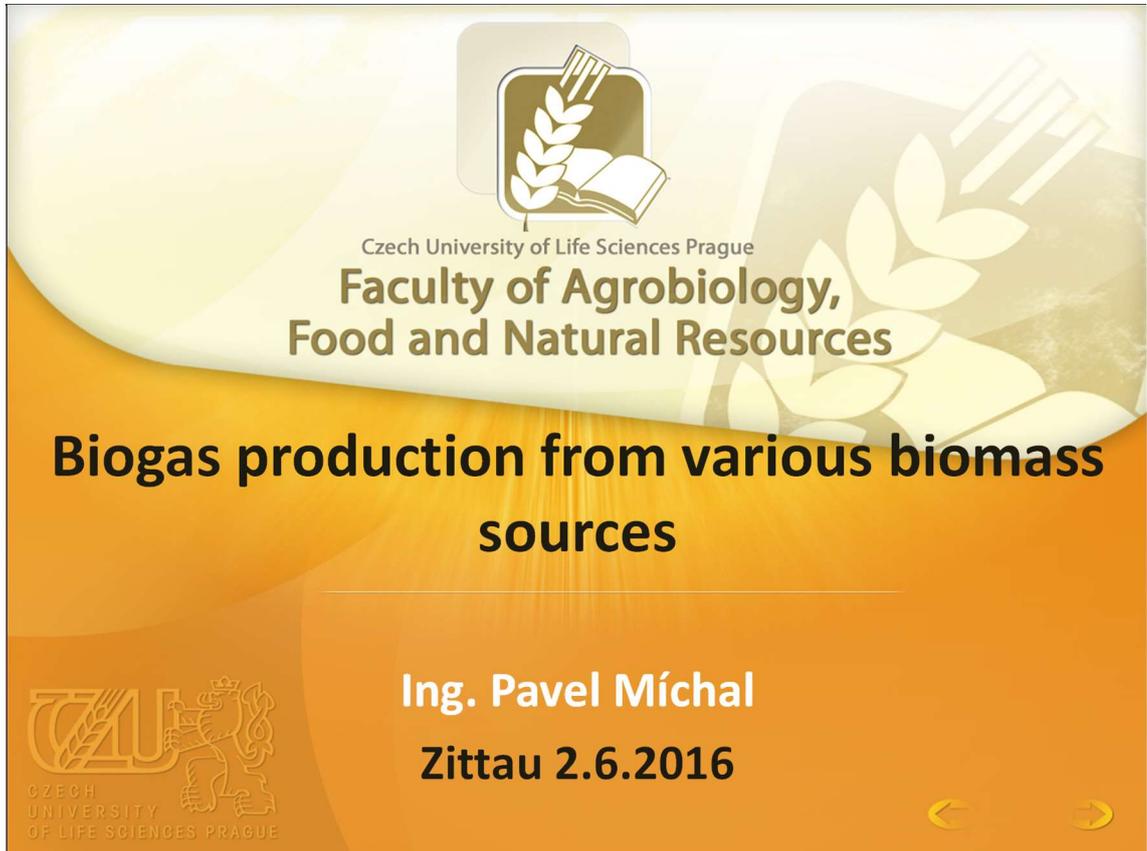
Die Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse haben einen nicht zu vernachlässigenden negativen Einfluss auf die Luftqualität besonders in urbanen Gebieten. Das derzeitige Überwachungskonzept für Kleinf Feuerungsanlagen gemäß der 1. BImSchV leistet einen ersten Beitrag zur Reduzierung der staub- und gasförmigen Emissionen. Zur nachhaltigen Minderung der Emissionen ist eine permanente Überwachung zukünftig unabdingbar. Die Umsetzung der permanenten Überwachung hängt nicht mehr länger von der reinen technischen Entwicklung der Branche, sondern auch von der Entwicklung der Gesetzgebung ab.

Für die praktische Umsetzung des Überwachungskonzepts müssen neben einer Prüfung der Eignung der Überwachungsalgorithmen auch rechtliche Grundlagen für die 1. BImSchV erarbeitet werden, wodurch die permanente Überwachung legitimiert wird.

Zusammenfassend: Durch die Entwicklung bzw. Umsetzung solch eines intelligenten Überwachungssystems kann ein hohes Umweltschutzniveau gewährleistet werden. Die Vorteile dieses Systems ergeben sich nicht nur für die Kontrolleure, sondern auch für die Betreiber und die Anlagenhersteller. Ein solches System ist bis heute nicht vorhanden und kann erstmals konkrete Daten über das Betriebsverhalten von Kleinfeuerungsanlagen in der Praxis und eine deutlich verbesserte Abschätzung des tatsächlichen Schadstoffpotentials aus diesen Anlagen liefern. Da es sich bei der permanenten Überwachung nicht um eine stichprobenartige Messung - wie bei der Überwachung durch den Schornsteinfeger - sondern um eine permanente Ermittlung der Verbrennungsqualität über den gesamten Betrieb handelt, kann dadurch eine angemessene, konsequente Überwachung und somit eine realistische Bewertung für Kleinfeuerungsanlagen im Vergleich zur heutigen Kontrolle gemäß der 1. BImSchV erreicht werden.

Biogas production from different biomass resources

(Pavel Míchal; Czech University of Life Sciences Prague)



Czech University of Life Sciences Prague
**Faculty of Agrobiography,
Food and Natural Resources**

Biogas production from various biomass sources

Ing. Pavel Míchal
Zittau 2.6.2016

OZECH
UNIVERSITY
OF LIFE SCIENCES PRAGUE

◀ ▶

Table of content

- Introduction
 - Biogas plants in Czech Republic and biomass sources
 - Biogas production – anaerobic digestion
- Pre-treatment methods of biomass
- Material and methods
- Opportunities for diversification of biogas production



Introduction

- Anaerobic digestion inoculated with anaerobic microorganisms
- Main output is biogas (CH_4 and CO_2)
- Residue after the anaerobic digestion is called digestate (liquid fraction of digestate and solid fraction of digestate)
- Biogas plants (BP) is used as a source of renewable energy
 - organic structures of biomass and another sources can be transformed into the useful energy
- Important sources for biogas production
 - plant biomass
 - organic wastes
 - livestock excrements



Biogas plants (BP) in Czech Republic

- Long tradition of biogas production derived from waste water treatment plant
- Significant increase of biogas plants (mainly agricultural BP, BP at waste water treatment plants, landfill biogas and few instalations of waste and industry BP)

	BP total	BP agricultural
2005	133	8
2015	507	318



- Share of biogas in CZE on renewables - 24,7%
- Share of biogas in CZE on electricity production - 3,1%



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

4

Sources for biogas plants

- **Agricultural BP mainly used:**
 - livestock ectrements
 - plant biomass
 - organic wastes
 - dominant source – maize silage
- **Organic waste BP:**
 - green wastes from city maintainance, parks and gardens
 - organic wastes from market stores
 - food wastes and gastro wastes
- **Industrial BP:**
 - according to the type of industry (brewery, distillery, sugar refinery...)
- **BP on waste water treatment plants:**
 - sawage sludge derived from waste water treatment plant



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

5

Agricultural biogas plants

- **Dominant source is maize** (problem with soil erosion) – it is need to find more alternative possibilities
- Using alternative plants and other materials for biogas production
- Optimize the harvest time of alternative plants focusing of maximal biogas production
- Using of various types of pre-treatment on hard degradable materials

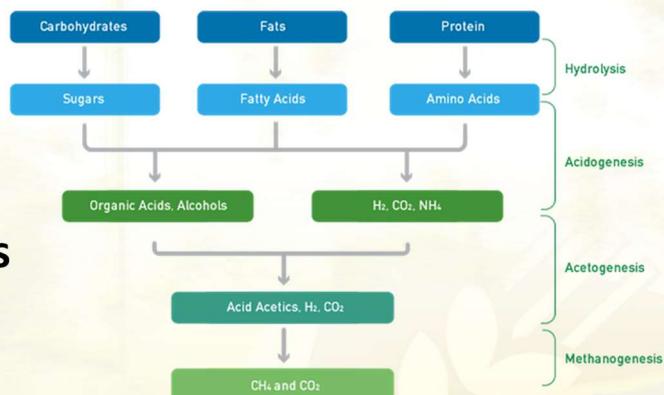


Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

6

Steps of biogas production

- **Hydrolysis**
- **Acidogenesis**
- **Acetogenesis**
- **Methanogenesis**



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

7

Factors influencing anaerobic digestion

- Temperature
- pH
- C/N ration
- Volatile fatty acids
- Ammonia
- Nutrients and substrate
- Chemical composition



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

8

Substrate biodegradability

- Degradability of biomass and biogas yield depends on the ratio of basic compounds
 - easy degradable materials (contain fats, proteins, carbohydrates)
 - hardly degradable materials (contain cellulose, hemicellulose)
 - Non degradable materials (contain lignin, lignans, terpens)
- Methane theoretical values
 - fats – 1018 l/kg
 - proteins – 496 l/kg
 - cellulose – 415 l/kg



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

9

Pre-treatment of materials

- Mechanical methods
 - Chemical methods
 - Physical methods
 - Biological methods
- leads to higher biogas production



Pre-treatment of materials

- **Mechanical methods**
 - milling, grinding
 - enlargement of active surface
 - easier enzymatic degradation
- **Chemical methods**
 - alkali (NaOH, KOH)
 - acids (HCl, HNO₃, H₂SO₄)
 - oxidation reagents (H₂O₂, O₂, O₃)



Pre-treatment of materials

- **Physical methods**
 - pressure explosion (high temperature and pressure, short retention time)
 - ultrasonic treatment
 - microwave radiation
- **Biological methods**
 - microorganisms (mainly *Trichoderma*, *E. coli*...)
 - silages (contain lactic acid bacteria)



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

12

Anaerobic fermentation tests

- Laboratory fermentation tests – batch tests
- Subsequent biogas tests



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

13

Laboratory fermentation tests – batch tests

Materials used in experiments

1) Plant materials

- Wheat, barley (milk, wax, full ripeness)
- Maize (milk, wax, full ripeness)
- Lucerne (Alfaalfa)
- Industrial hemp

2) Waste materials

- Green wastes from maintenance (grass biomass)
- Wastes from market stores (fruits and vegetables)
- Sugar beet pulp (biowaste from sugar refinery)



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

14

Laboratory fermentation tests – batch tests (plant material)

	Biogas production (l/kg ODM*)	CH ₄ composition	Degradability (%)
Lucerne - I. cut	626	57,0	62,1
Lucerne - II. cut	649	56,6	60,2
Lucerne - III. cut	553	56,8	62,7
Maize - milk ripeness	530	58,0	84,4
Maize - wax ripeness	610	56,9	86,2
Maize - full ripeness	504	57,8	89,2
Barley - milk ripeness	616	56,3	82,1
Barley - wax ripeness	557	56,4	82,1
Barley - full ripeness	462	57,5	84,3
Wheat - milk ripeness	638	54,9	80,2
Wheat - wax ripeness	471	56,5	79,5
Wheat - full ripeness	648	55,2	77,8
Industrial hemp	437	60,3	69,2

*ODM = Organic dry matter = VS = Volatile Solids



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

15

Laboratory fermentation tests – batch tests (waste material)

	Biogas production (l/kg ODM*)	CH ₄ composition	Degradability (%)
Intensively grass lawns	501 - 607	62,0 - 64,0	62,2 - 68,8
Extensively grass lawns	286 - 468	59,8 - 62,0	34,6 - 56,5
Wastes from market stores	355 - 420	57,4 - 64,3	---
Sugar beet pulp	867 - 913	51,6 - 52,3	---

*ODM = Organic dry matter = VS = Volatile Solids



Opportunities for diversification of biogas production

- Using new materials suitable for anaerobic production
- Monitoring of impact and optimization of plant development phases
- Influence of pre-treatment of substrates on biogas production (storage, type of pre-treatment)
- Application of thermal (pressure) hydrolysis leading to higher debradability of materials and higher biogas production

The authors gratefully acknowledge the support given by the University-wide internal grant agency of CULS Prague – CIGA, project number 20152013.



Thank you for your attention

Ing. Pavel Míchal

e-mail: michalp@af.czu.cz

phone.: + 420 22438 2429



Czech University of Life Sciences Prague
Faculty of Agrobiolgy,
Food and Natural Resources

← 18 →

Comparison of biochar derived from contaminated biomass with commercially produced biochar and their ability to increase sorption of risk elements in two fluvisols

(Katerina Brendova; Czech University of Life Sciences Prague)



Czech University of Life Sciences Prague
**Faculty of Agrobiography,
Food and Natural Resources**

COMPARISON OF BIOCHAR DERIVED FROM CONTAMINATED BIOMASS WITH COMMERCIALY PRODUCED BIOCHAR AND THEIR ABILITY TO INCREASE SORPTION OF RISK ELEMENTS IN TWO FLUVISOLS

Kateřina Břendová , Pavel Tlustoš, Jiřina Száková



Department of Agroenvironmental Chemistry and Plant Nutrition

CZECH UNIVERSITY OF LIFE SCIENCES PRAGUE



Disposal of contaminated biomass: pyrolysis

Plant biomass used in remediation technologies

energetic purposes: incineration (Šyc et al., 2012)

pyrolysis (Stals et al., 2010) reduction of CO₂ emission

oil, gas

char

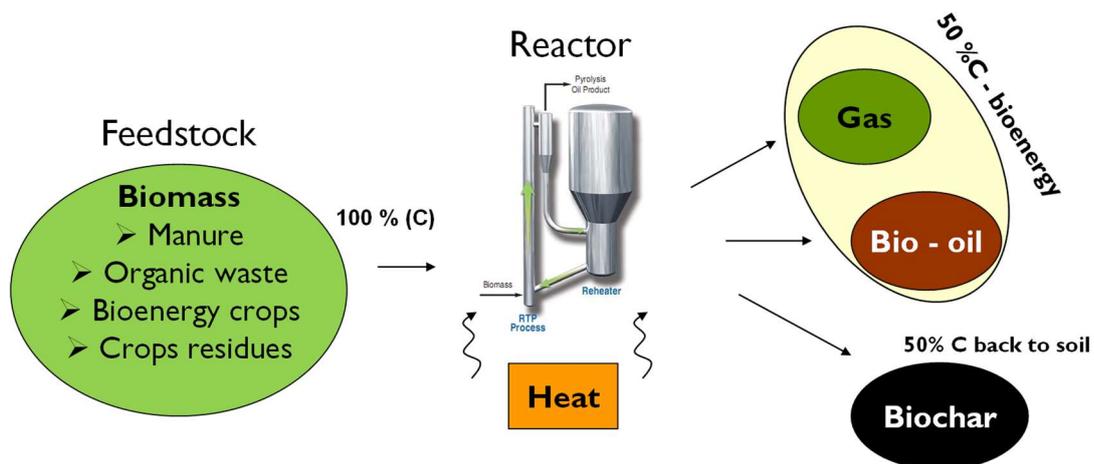


Posibility of *biochar* using as soil amendment (up to 50% of carbon, back to soil)

Introduction



Pyrolysis





Pyrolysis conditions

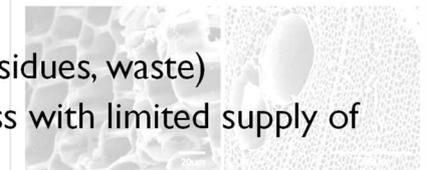
Mode	Conditions	Liquid (%)	Char (%)	Gas (%)
Fast	Moderate temperature (~1000°C), short vapour residence time (1s)	75	12	13
Slow	Moderate temperature (500°C), very long vapour residence time (~30min)	30	35	35
Gasification	High temperature >750°C, moderate vapour residence time (10 - 20s)	5	10	85

Introduction



What is biochar??

Biomass pyrolysis (plants, agriculture residues, waste)
 = thermochemical decompose process with limited supply of oxygen giving useful products



- fine, high porous, high surface area, high in pH values
- carbon rich material (~80 - 90%)
- properties are determined by material origin, method of preparing
- man made material
- origin of renewable energy resources



Introduction



Biochar for soil remediation

Biochar of different properties is able to sorb:

A) organic pollutants

- simazine Jones et al., 2011; Zhang et al., 2011
- atrazine Cao et al., 2009
- naphthalene, nitrobenzene, m- dinitrobenzene Chen et al., 2008

B) risk elements

- cadmium Zhang et al., 2012
- copper, nickel, lead Uchimiya et al., 2011; Uchimiya et al., 2010a, b, 2011 c, d
- lead Qui et al., 2008; Cao et al., 2009

Introduction



Biochar for soil fertility

Biochar is able to

- increase carbon content in soil
- increase cation exchange capacity
- increase of water retention
- increase available K (by 69-89%), P (179-208%), N (by 39-53%)

Widowati and Asnah (2014)

- facilitate nitrification
- reduce N leaching (Zhao et al., 2014)

X

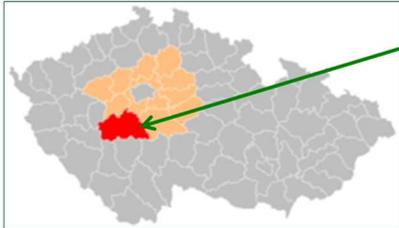
Lack of long- term experiments



Introduction



Plant biomass from old smelting and mining area converse into biochar



Sorption properties of biochar
chemical immobilization of risk elements
= support biomass production of accumulators

Příbram locality: heavily damaged by risk elements contamination

phytoremediation technology

Harvested plants

Slow pyrolysis

Introduction



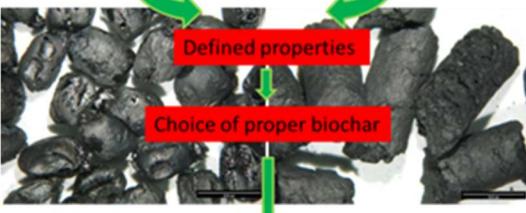
Objectives

To **compare** commercial biochar x biochar derived from contaminated biomass



PYROLYSIS

their potential to increase sorption ability of contaminated Fluvisol and poor uncontaminated Fluvisol



EFFECTIVE SOIL APPLICATION



Biochar preparation – slow pyrolysis

– A) feedstock biomass

Willow, poplar (shoots) – wood chips (W)

– B) slow pyrolysis conditions

- Residence time: 30 minutes
- Carried gas: nitrogen, $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$
- Five final temperatures (400, 450, **500**, 550, 600 °C)



Materials and methods I.



Batch sorption and desorption experiments

Biochar from contaminated wood and commercial biochar from coconut shells
Background electrolyte: 0.01 M KNO_3 (Trakal et al., 2011)

- Desorption
 - 1g of biochar/soil/mixture
- Sorption
 - Solutions of different concentration of Cd(II), Zn(II), Pb(II)
 - 1 g soil + 1% (w/w) of biochar

Samples: 24 h shaking for equilibrium (Uchymia et al., 2010)
Risk elements determined by ICP-OES

Materials and methods II.

Comparison of biochar derived from contaminated biomass with commercially produced biochar and their ability to increase sorption of risk elements in two fluvisols



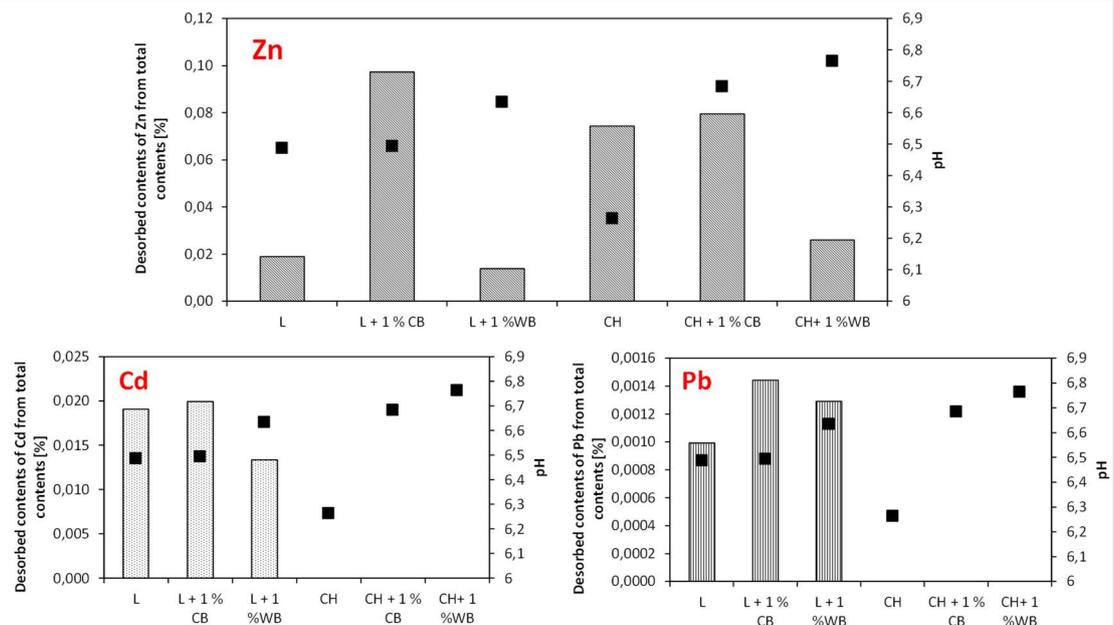
Soil and biochar characteristics

		Soil				Biochar		
Element	Unit	Litavka	Chot'ánky	Element	Unit	Contaminated	Commercial	
Ca	mg/kg	2110±218	914±54.3	K	g/kg	16.1	0.5	
Cd		40.6±6.5	0.10±0.03	Ca		28	2.9	
Cu		67.4±4.3	3.33±0.06	Mg		not detected	2.2	
K		6030±360	1035±40.8	Fe		2.8	4.1	
Mg		3126±136	557±1.7	Cd	mg/kg	27	<0.1	
P		553±46	301±14.4	Pb		282	bdl	
Pb		3706±214	11.6±3.2	Zn		950	8.3	
Zn		5623±411	22.0±4.7	C (total)	(% w/w)	64	93	
pH _{CaCl2}			5.93	5.91	ash	(% w/w)	13	12
CEC		mmol/kg	103	33	CEC	mmol/kg	176.4	94.5
				pH _{CaCl2}		7.3	8.1	
				SSA _(BET)	m ² /g	176	486	

Results I.

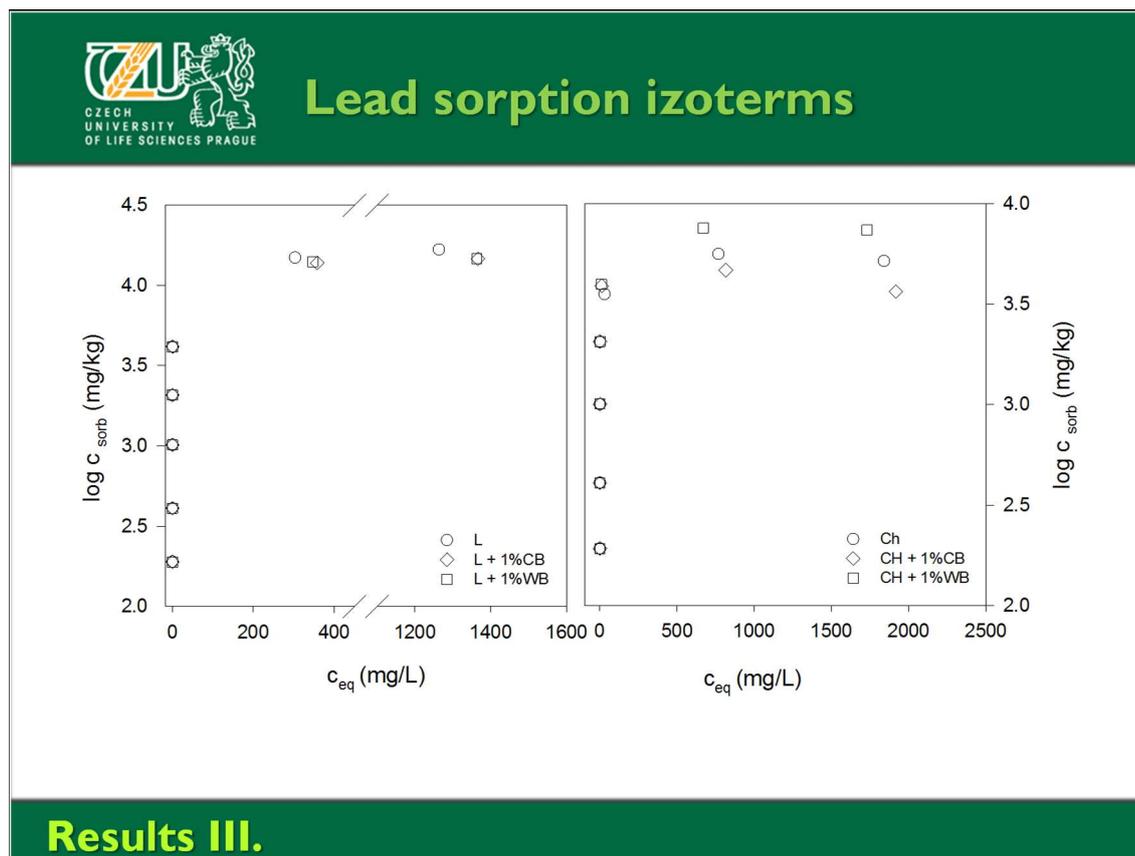


Desorption soils and soil matrices

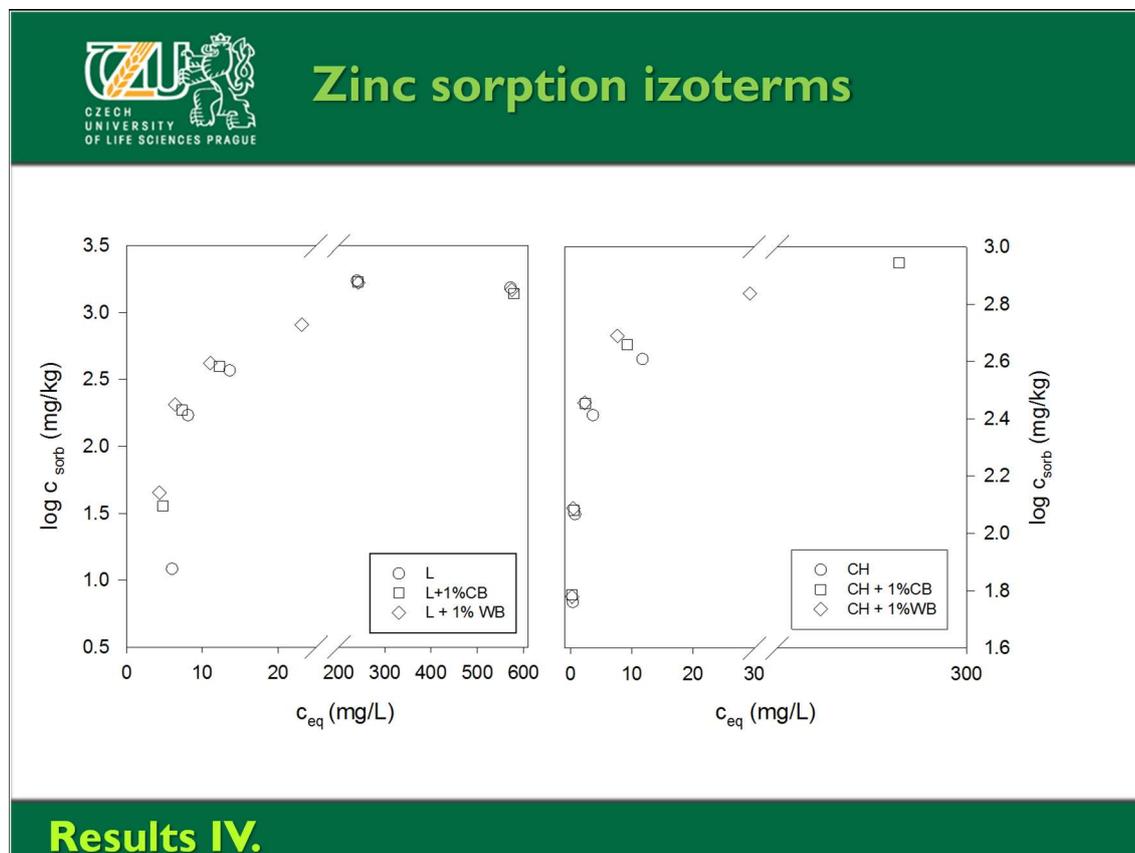


Results II.

Comparison of biochar derived from contaminated biomass with commercially produced biochar and their ability to increase sorption of risk elements in two fluvisols

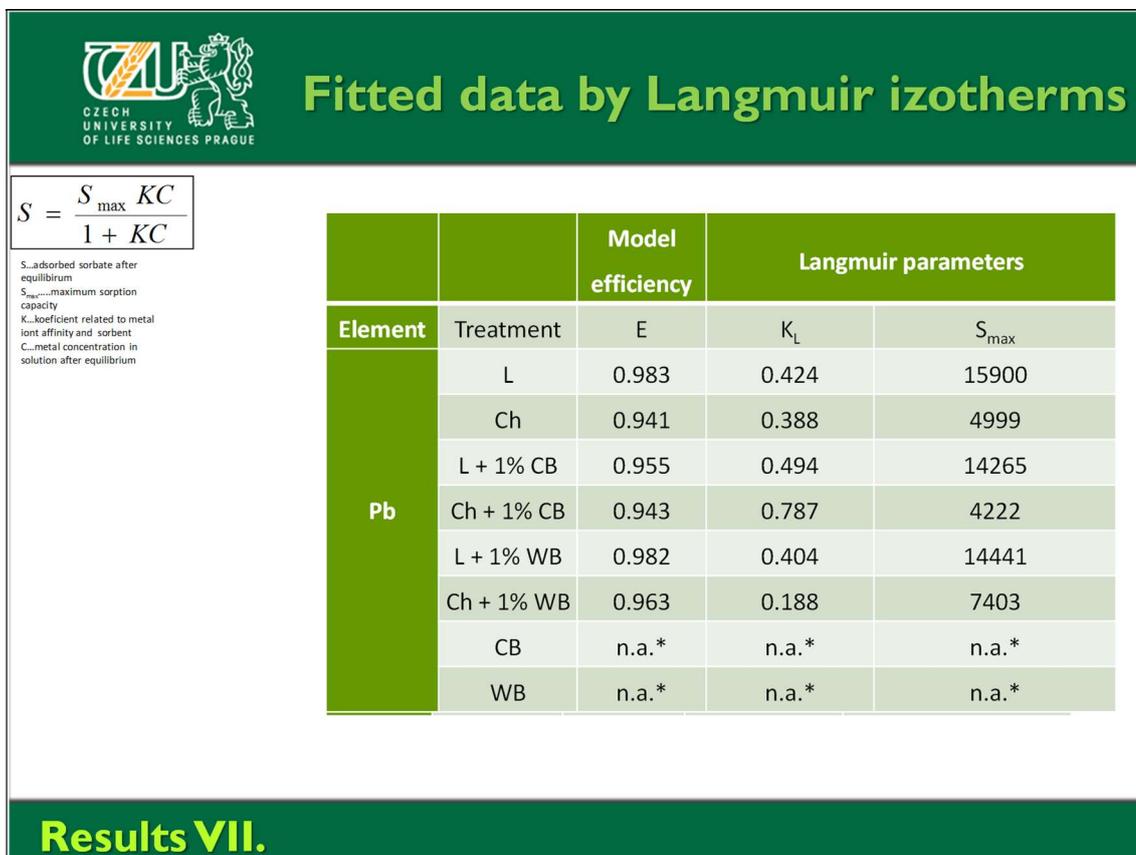
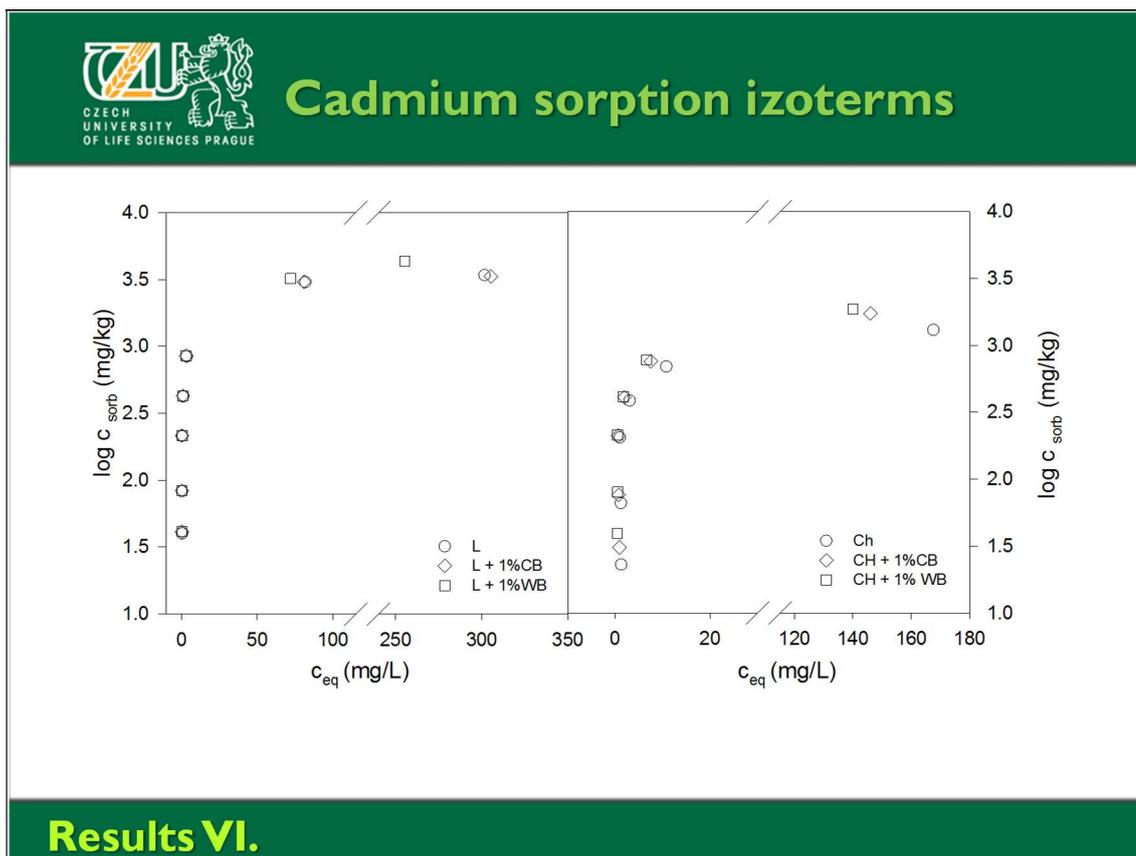


Results III.



Results IV.

Comparison of biochar derived from contaminated biomass with commercially produced biochar and their ability to increase sorption of risk elements in two fluvisols





Conclusions

- ✓ Biochar derived from phytoremediation technologies is potential soil amendment.
- ✓ Positive influence on soil sorption properties. Homogeneous surface of biochars.
- ✓ Observed low desorption of cadmium, lead from biochar+soil matrices

!!! NEED of

precise production of biochar
suitability for specific purpose of use

??

price
method of application



Thank you for your attention!





References

- Brunauer S., Emmett P. H., Teller E. (1938):** Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society*. vol. 60, no. 2, pp. 309-319
- Chen B., Zhou D., Zhu, L. (2008):** Translational adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environmental Science Technology*. vol. 42, pp: 5137–5143.
- Kubešová M., Kučera J., (2010):** Validation of k0 standardization method in neutron activation analysis - The use of Kayzero for Windows programme at the nuclear physics institute, Rež. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 622. pp. 403-406
- Lehmann J., Joseph J (2009):** Biochar for environmental management: science and technology. Earthscan. London. pp. 416
- Trakal L., Komárek M., Száková J., Tlustoš P., Tejnecký V., Drábek O. (2012):** Sorption behavior of Cd, Cu, Pb, and Zn and their interactions in phytoremediated soil. *International Journal of Phytoremediation*. vol.14, n. 8, pp. 372-380
- Trakal L., Komárek M., Száková J., Zemanová V., Tlustoš P. (2011):** Biochar application to metal-contaminated soil: Evaluating of Cd, Cu, Pb and Zn sorption behavior using single- and multi-element sorption experiment. *Plant Soil and Environment*. vol. 57, n. 8, pp. 372-380
- Uchimiya M., Wartelle L.H., Klasson K.T., Fortier C.A., Lima I.M. (2011a):** Influence of Pyrolysis Temperature on Biochar Property and Function as a Heavy Metal Sorbent in Soil. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. vol. 59, pp. 2501-2510.
- Uchimiya M., Klasson K. T., Wartelle L. H., Lima I. M. (2011b):** Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biochar amendment: 1. Copper sorption isotherms and the release of cation. *Chemosphere*. vol 82, pp. 1431-1437
- Uchimiya M., Klasson K. T., Wartelle L. H., Lima I. M. (2011c):** Influence of soil properties on heavy metal sequestration by biochar amendment: 2. Copper desorption isotherms. *Chemosphere*. vol. 82, pp. 1438-1447
- Zhang, Z.; Solaiman, Z. M.; Meney, K.; Murphy, D. V.; Rengel, Z. (2012):** Biochars immobilize soil cadmium, but do not improve growth of emergent wetland species *Juncus subsecundus* in cadmium-contaminated soil. *Journal of Soils and Sediments*, DOI: 10.1007/s11368-012-0571-4

Enhancement of combustible properties of syngas, applied in a spark ignition engine in autonomous biomass into electricity conversion systems

(PhD Ass. Prof. Aliaksandr Pilatau; Technological Institute of Aeronautics Brazil)

*A. Pilatau¹, K. Czajka², O. Mukha³, G. Petraconi F¹, H.S. Medeiros¹ and H. Viarshyna⁴

¹ Technological Institute of Aeronautics, Sao Jose dos Campos, Brazil.

² Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland.

³ Lvivska Politechnika, Lviv, Ukraine.

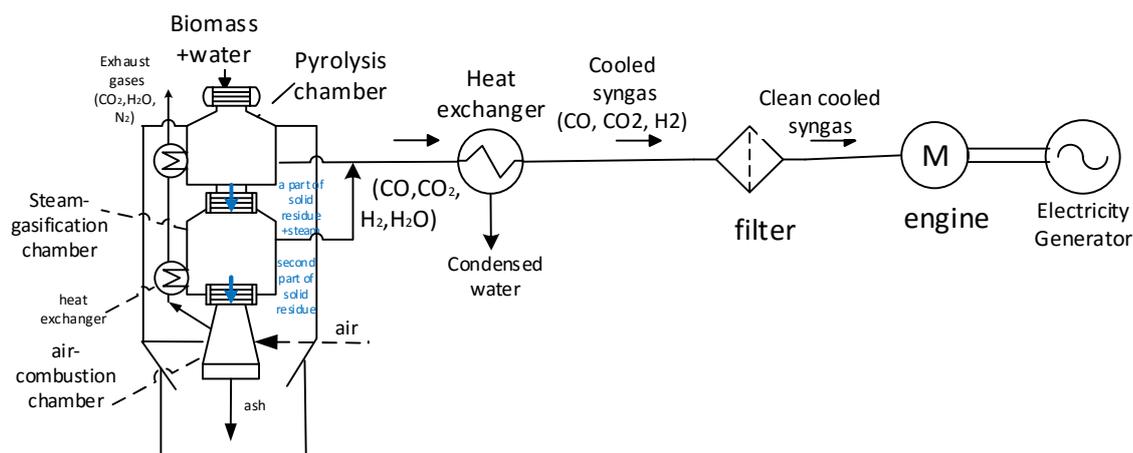
⁴ Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus.

*Corresponding author: a.pilatau@gmail.com, +375292618311

Keywords: Biomass conversion system, combustible properties of syngas, catalytic effect, improvements of conversion system parameters

Abstract

In this research a new approach of improvement of syngas combustible properties, which is used as a fuel in a spark ignition engine, is presented. The main purpose of the research is providing of high level of electrical autonomy of small village house through enhancement power of spark ignition engine, driving electricity generator, and decreasing the cost of produced electricity through rise of the biomass conversion system efficiency. According to the suggested approach to obtain electricity from biomass, a kind of biomass is supplied to pyrolysis process, which occurs at 400 °C with catalytic additives (Lewis acids) in a gasification-pyrolysis unit. The catalytic additives have significant influence to increase volatiles matter yield up to 66 % (in wt. of d.b.) at low and middle temperature region (200-400 °C) of the torrefaction. The obtained pyrolysis gas is separated from the pyrolysis solid residue with increased carbon content (up to 60 % in wt.), and is directed to a spark ignition engine through cooling and particle capturing sub-systems. A part of the solid residue, obtained after the pyrolysis, is loaded to a pure steam-gasification chamber without air at 950 °C with production of syngas through the gasification. The syngas, obtained during the gasification of the solid residue, is mixed with obtained earlier pyrolysis gas. The raw biomass and its solid residue are processed simultaneously in a pyrolysis chamber and steam - gasification chamber, respectively (see fig.).



Outlet syngas contains the following gases: CO, CO₂, H₂ and H₂O with cooled syngas low heat value (LHV) of about 10 MJ/m³ and its total syngas yield value of about 1,1 m³/kg. The high LHV of the produced syngas can be based on absence of nitrogen as inert component in the pyrolysis and the gasification chambers and capturing of condensed water in a heat exchanger. Moreover, the high LHV causes high value of engine power which can be achieved values of gasoline the engine running. Electricity generator, driven the engine, can provide 90 % of electricity power consumption of small village house in comparison to typical biomass gasification, that can provides the level in the range of 50-60 %. Second part of the solid residue, obtained in pyrolysis, is directed to an air combustion chamber for heat supporting of necessary thermodynamic level of pyrolysis and gasification endothermic reactions. The solid residue has carbon content after torrefaction higher (up to 10-20 %) than raw loaded biomass. By carried out calculations, released heat due to the solid residue combustion is in 30 times more than necessary level of the endothermic reactions supporting. It can give opportunity to exempt addition fuel combustion and, consequently, to make higher total efficiency of the biomass into electricity conversion system with value up to 20 %.

1. INTRODUCTION

Biomass is important renewable alternative to replace fossil fuel in its combustion process for different industrial branches, such as power engineering, transport and etc. Besides, biomass is one of the most perspective fuels with huge renewable storage potential. The estimated biomass production in the world is 104,9 petagrams (104,9 · 10¹⁵ g - about 105 billion metric tons) of carbon per year, about half in the ocean and half on land [1].

The fuels, which are produced in gasification process of biomass, such as syngas, can be used as gaseous fuel for internal combustion engine. Hence, they have significantly less Low Heat Values (LHV) in the average range of 4.5-7.2 MJ/kg (4.0-10 MJ/m³) [2] in comparison to natural gas (approx. 50 MJ/m³) and other fossil types of fuels (42-45 MJ/kg). Besides, the syngas usually contains unacceptable levels of detrimental impurities, such as tar and particulates [3,4]. Tars can cause operational problems in downstream processes by blocking gas coolers, filter elements, and engine suction channels, which can lead to a seriously damages in the units.

Therefore, before the gas can be used for electricity production, it is necessary to undertake some technical preparing steps that make produced syngas combustible prop-

erty more appropriate for heat engine operation. Moreover, the decreasing of LHV for produced syngas leads to sufficient declines of engine power and produced electricity power. The reducing of engine power can cause necessity to use additives (gasoline, diesel) with higher energy values (dual fuel engine) or to increase biofuel consumption in a biomass to electricity conversion system. It can decrease an autonomy level of small village house, because it needs to produce additional engine power for providing required level of produced electricity power. The mentioned problems can raise cost of produced electricity for consumers.

In this research a new approach of improvement of syngas combustible properties, which is used as a fuel in a spark ignition engine, is presented. The main purpose of the presented biomass conversion system is providing of their high level of electrical autonomy for small village house through enhancement power of spark ignition engine, driving electricity generator, and decreasing of cost of produced electricity through rise of the biomass conversion system efficiency.

2. MATERIALS AND METHODS

Analysis of carried out researches [5-11] of gasification and torrefaction processes, as an important parts of the biomass gasification, showed the most typical features of the gasification, which can cause problems with quality of produced syngas for heat engine electricity generator. There are simultaneous redox processes in a volume of gasification and high level of temperature for providing of important reducing chemical reactions. They lead to high content of inert and inflammable parts of syngas (N_2 , CO_2 and H_2O) and cost rise of gasifier, as well as increase of biomass consumption.

In order to remove the disadvantages we consider a scheme of conversion biomass into combustible gas for heat engine (Fig.1). Having developed the process scheme, we have based on the following principles to improve gasifier performances, as well as the biomass conversion systems:

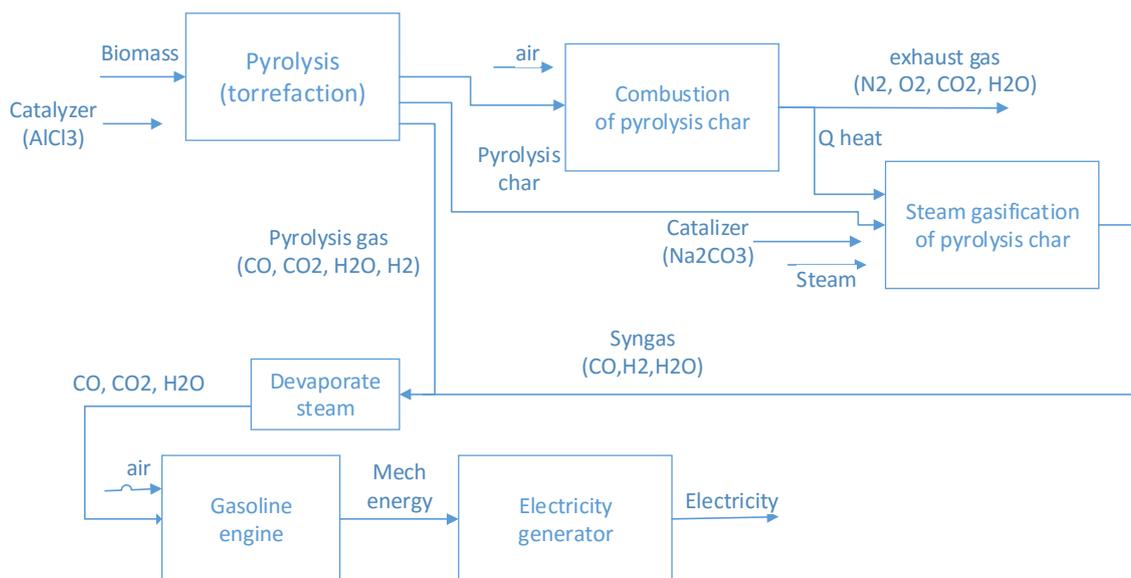


Figure 1: Process scheme of the biomass conversion into combustible gas.

1. Separated pyrolysis, gasification and combustion, which can be used to provide needed thermodynamic level of steam gasification in steam gasification of pyrolysis char unit
2. We used catalytic pyrolysis for decreasing of torrefaction temperature up to 200-250 °C for biomass with high volatile content, for example *Sunflower oil cake* (SuOC).

A part of outlet pyrolysis char from the torrefaction can be supplied to further steam gasification chamber. Second part can be used as fuel in combustion chamber, separated from the pyrolysis and gasification chambers. High temperature of pyrolysis char combustion (about 1000 °C) can provide necessary level of steam gasification (800-900 °C) with assistance of Na₂CO₃ additive, which increases reactivity of the char [12].

Obtained pyrolysis and steam gasification syngas is supplied to a chamber where condenses steam from the obtained syngas. Then, the syngas are sucked in the gasoline engine, proceed through clean and cooling systems.

In order to detect an effect of catalyzers, we have carried out experiments with different types of biomass and its catalytic additive (AlCl₃, ZnCl₂, Na₂CO₃). The catalyzers have been studied early [13] and they are well known as Lewis acid components [12], excepting Na₂CO₃ additive. Carried out analyzes of data (Table 1) showed the following distinguishes in comparison with a common gasification:

1. Decreasing of energy activation at I and II phase of devolatilization with values up to 25 % for AlCl₃ additive and Na₂CO₃ for II phase)
2. Lower devolatilization temperature (up to 200 °C). So, the low level of energy activation of pyrolysis can give opportunity to decline carbon mass, which needs for combustion and thereby, to decrease biomass consumption.

Moreover, the low level of devolatilization temperature conditions low energy losses in gasifier, thereby, it increases its thermal efficiency.

Table 1: Kinetic parameters obtained from the Direct Arrhenius Method for the SuOC mixtures

Designation of mixture	Order of reaction n		Pre-exponential factor, A , min ⁻¹		Activation energy, E , kJ/mol		R^2	
	I phase	II phase	I Phase	II phase	I phase	II phase	I Phase	II phase
Pure SuOC	0.5	3.6	9.9	9.7	10.11	13.3	0.99	0.96
50%SuOC+50%AlCl ₃	2.2	2.2	8.78	9.7	7.7	8.4	0.97	0.97
75%SuOC+25%AlCl ₃	1.11	2.4	8.81	9.33	10.11	7.2	0.97	0.97
50%SuOC+50%ZnCl ₂	3.4	3.9	7.4	6.1	10.2	10.33	0.99	0.96
75%SuOC+25%ZnCl ₂	2.6	3.6	6.72	9.7	12.96	16.98	0.97	0.99
50%SuOC+50%Na ₂ CO ₃	0.5	2.7	7.7	9.41	10.67	9.41	0.98	0.96
75%SuOC+25%Na ₂ CO ₃	0.5	2.7	8.12	8.54	10.6	8.54	0.98	0.98

Moreover, we have predicted primary tars formation based on well-known in literature original reaction scheme from Ranzi et al. [14,15], described devolatilization process. Simplified kinetic scheme (Table 2) of the heavy hydrocarbons, formation of which can be corresponded with primary tars generation, is written in assumption, that considered biomass consists from a cellulose, a hemicellulose and a lignin. Second assumption is

that tars, as heavy hydrocarbons, can be generated from components, such as cellulose and lignin.

Table 2: Simplified reaction scheme of primary tars formation during pyrolysis based on Ranzi et al [14, 15]

#	Reaction	A (s ⁻¹)	E (kJ/mol)
1	Cell → Cella	8·10 ¹³	192.5
2	Cella → 0.95HAA+0.25GLYOX+0.2CH ₃ CHO+0.25HMFU+0.2C ₃ H ₆ O+0.16CO ₂ +0.23CO+0.9H ₂ O+0.1CH ₄ +0.61Char	1·10 ⁹	125.5
3	Cella → LVG	4·T	41.8
4	Cell → 5H ₂ O+6Char	8·10 ⁷	133.9
5	Lig → Fe2MACR	8·T	50.2
6	Lig → H ₂ O+0.5CO+0.2CH ₂ O+0.4CH ₃ OH+0.2CH ₃ CHO+0.2C ₃ H ₆ O+0.6CH ₄ +0.65C ₂ H ₄ +G{CO}+G {COH ₂ }+5.5Char	1.2·10 ¹¹	125.5
7	G{COH ₂ } → CO+H ₂	5·10 ¹¹	272.0
8	G{CO} → CO	1·10 ¹³	209.2

List of species of Equation 1 is presented in the Table 3.

Table 3: List of species of Equation 1 is presented in the Table 3.

Abbreviation	Name	Atomic composition
<i>Cell</i>	Cellulose	C ₆ H ₁₀ O ₅
<i>Cella</i>	Activated Cellulose	C ₆ H ₁₀ O ₅
<i>Char</i>	Char	C
<i>HAA*</i>	Hydroxyacetaldehyde	C ₂ H ₄ O ₂
<i>GLYOX*</i>	Glyoxal	C ₂ H ₂ O ₂
<i>CH₃CHO*</i>	Acetaldehyde	CH ₃ CHO
<i>HMFU*</i>	5-hydroxymethyl-furfural	C ₆ H ₆ O ₃
<i>C₃H₆O*</i>	Acetone	C ₃ H ₆ O
<i>Lig</i>	Lignin	C ₁₁ H ₁₂ O ₄
Fe2MACR	Sinapaldehyde	C ₁₁ H ₁₂ O
<i>CH₂O</i>	Formaldehyde	CH ₂ O

*) Volatile component

Low temperature devolatilization can cause low intensification of primary tars formation, such as heavy hydrocarbons (*5-hydroxymethyl-furfural* and *sinapaldehyde*). Therefore it can make possible to provide biomass decomposition with low level of torrefaction temperature with AlCl₃ additive according to carried out experiments, using TGA equipment Fig. 2. Estimated level of temperature (500-600 °C) of exhaust gases during pyrolysis char combustion is sufficient for exhaust gases of further char combustion.

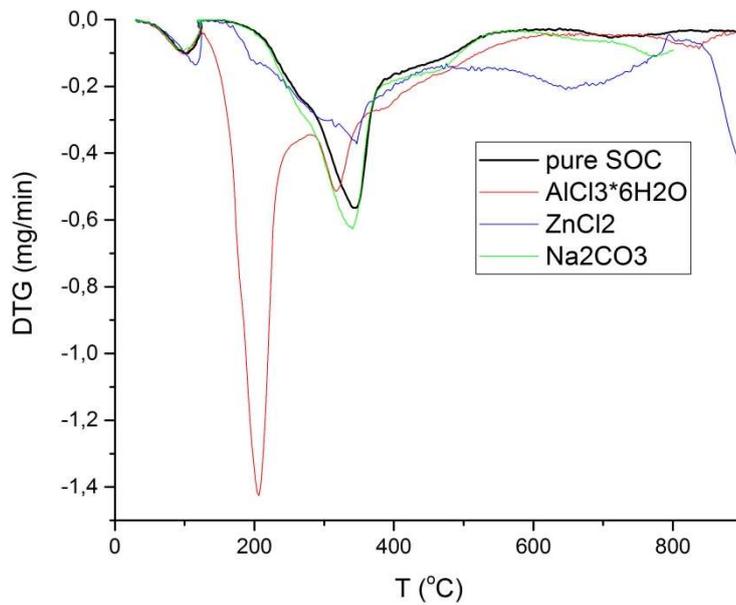


Figure 2: Derivative TG curves of SuOC, combined for considered catalytic additives ZnCl₂, AlCl₃*6H₂O and Na₂CO₃ at their 50% mass fraction and at heating rate of 5 °C/min⁻¹

The principal scheme of the conversion system, which contains pyrolysis and gasification units, heat exchanger for water condensation, for realizing of the processes (Fig.1) of biomass conversion, is depicted on the Fig.3.

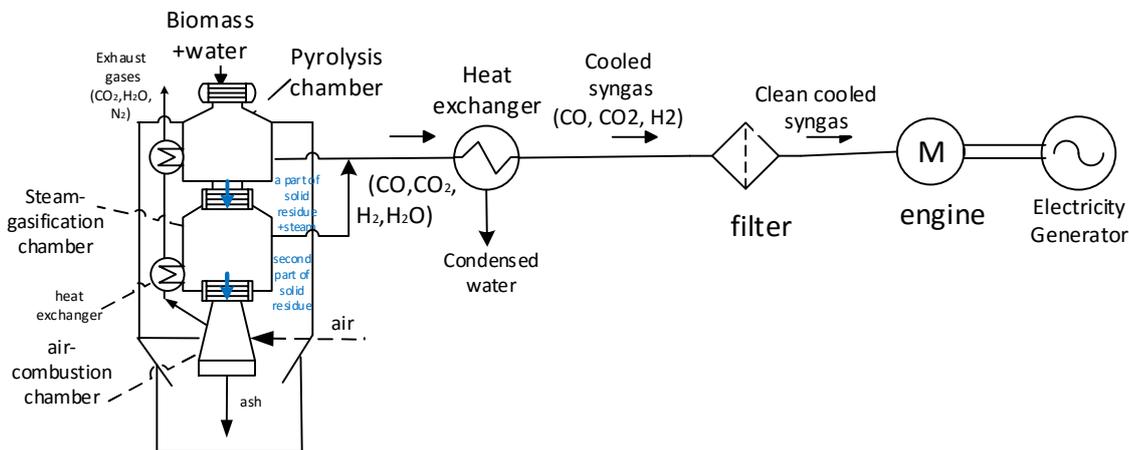


Figure 3: A principal scheme of the biomass into electricity conversion system

As a result of nitrogen absence in obtained syngas we can predict syngas composition, which should have high concentration of combustible gases (CO, H₂), especially after steam condensation from syngas (Table 4). Therefore, the stoichiometric number and LHV of syngas will be high (Table 5), hence by lower density and a little syngas yield in comparison to usual case.

Table 4: Predicted syngas composition

Components	%, in vol. in hot syngas (after gasifier)	%, in vol. in cooled syngas
CO	7,70	21,0
CO ₂	4,07	11,5
H ₂	24,20	66,5
CH ₄	0,34	0,90
H ₂ O	63,69	----

Table 5: Predicted syngas parameters

Parameters	Units	Value
Stoichiometric number	m ³ air/ m ³ syngas	2,16
Syngas flow	m ³ /h	13,5
Syngas density	kg/m ³	0.51
Syngas yield	m ³ /kg biomass	1.13
LHV of syngas	MJ/m ³	10.0

In order to assess improvements impact in the conversion system we have suggested two the following parameters. There are a level of electrical autonomy and efficiency of the biomass conversion system. A level of electrical autonomy, which can provide a biomass conversion system, can be estimated as

$$\eta_a = \frac{N_e}{N_n} \quad (1)$$

where N_e is electricity power which can be produced in generator, driven by engine, which operates on the produced syngas, kW; N_n is needed electricity power for providing of village house (about 5-10 kW, which includes lightning, refrigerator, TV, some computers, washing machine and etc.), kW.

An efficiency of the biomass conversion system can be calculated according to the following equation

$$\eta_e = \frac{N_e}{LHV_b \cdot G_f + Q_{add}} \quad (2)$$

where LHV_b is low heat value of biomass feedstock, MJ/kg; G_f is biomass fuel consumption, kg/s⁻¹; Q_{add} is additional energy which needs for process providing.

4. CONCLUSIONS

The high value of LHV can cause to increase engine power (Table 6) and, thereby the electricity power. Therefore, it can raise level of electricity autonomy in comparison to the analogues and to increase total efficiency of conversion system. However, it should be noted that needs to increase value of biofuels consumption, in order to produce more amount of syngas. Besides, to achieve the enhancement of the performances, it should be used only biomass with high level of volatiles content.

Table 6: Predicted parameters of conversion system

Parameter	Analogue (C. Frau et al./ Fuel 152 (2015) 138–145)		Suggested gasifier
	S.African Bituminous	Wood chips	
<u>LHV of syngas</u> , MJ/m ³	4,08	6,66	10,0
<u>Gas yield</u> , m ³ /kg	5,36	2,12	1,13
<u>Biofuel consumption</u> , kg/h	8	12	11,5
<u>LHV of biomass</u> , MJ/kg	27,18	17,25	14,1
<u>level of electrical autonomy</u> , %	52	69	90,5
<u>Efficiency</u> , %	17	11,5	19

REFERENCES

- [1] Field, C. B.; Behrenfeld, M. J.; Randerson, J. T.; Falkowski, P. (1998). "Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components". *Science* 281 (5374): 237–240. doi:10.1126/science.281.5374.237.
- [2] C. Frau et al./ Fuel 152 (2015) 138–145.
- [3] Boloy, R.A.M.; Silvera, J.L.; Tuna, Coronado, C.E.; C.R.; Antunes, J.S.; *Renew. Sust. Energ. Rev.*, (2011), 15, 5194-5202.
- [4] Martinez, J.D.; Mahkamov, Andrade, K.R.V.; SilvaL.,E.E.; *Renew.Energ.*,(2012) 38,1-9
- [5] J. Li et al. / Fuel 122 (2014) 261–269 [6] G. Teixeira et al. / Fuel 123 (2014) 194–204
- [7] D. Reichel et al. / Fuel 114 (2013) 64–70
- [8] K. Anastasakis et al. / Fuel Processing Technology 142 (2016) 157–166 [9] J. Moon et al. /Bioresource Technology 133 (2013) 429–436 [10] J. Chen et al./ Bioresource Technology 192 (2015) 592–60
- [11] J. Hu et al. /Fuel 111 (2013) 628–635
- [12] Cusumano JA, Dalla Betta RA, Levy RB. Catalysis in coal conversion. New York; Academic Press; 1978

- [13] Encinar JM, Beltran FJ, Ramir'o A, Gonzalez JF. Pyrolysis/gasification of agricultural residues by carbon dioxide in the presence of different additives: influence of variables. *Fuel Process Technol* (1998); 55:219-15
- [14] Ranzi E, Cuoci A, Faravelli T, Frassoldati A, Migliavacca G, Pierucci S, et al. Chemical kinetics of biomass pyrolysis *Energy Fuels* (2008);22:4292–300.
- [15] Andres Anca-Couce, Ramin Mehrabian, Robert Scharler, Ingwald Obernberger Kinetic scheme of biomass pyrolysis considering secondary charring reactions *Eng. Convers. Manage.* (2014); 87:687–69.

Erfahrungen mit alternativen Brennstoffen im Entrade Biomassevergaser E3

(Christian Zuber; ENTRADE Energiesysteme AG)



ENTRADE
ENERGIESYSTEME AG

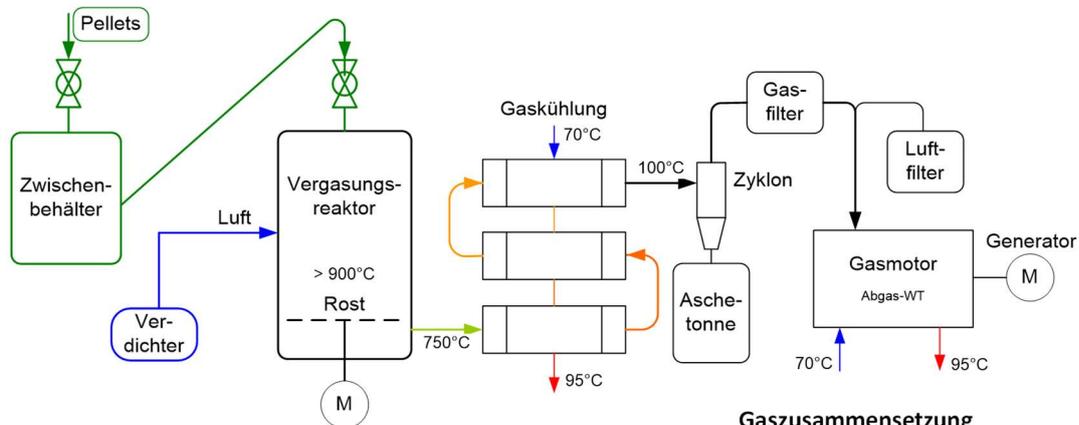
Erfahrungen mit
alternativen Brennstoffen
im Entrade
Biomassevergaser E3



CHRISTIAN ZUBER
02.06.2016 | ZITTAU



Systemschema und thermochemische Prozesse



Sehr geringe Teerkonzentration im Gas:
→ Keine weitere Teerentfernung notwendig

Gaszusammensetzung

H ₂ :	ca. 18 Vol.-%
CO:	ca. 24 Vol.-%
CO ₂ :	ca. 8,5 Vol.-%
CH ₄ :	ca. 1,5 Vol.-%
N ₂ :	ca. 48 Vol.-%



E3 – Strom und Wärme aus Biomasse

- Genormter Standardbrennstoff: Holzpellets DIN+
 - Konstante, zuverlässige Brennstoffqualität ermöglicht einfache und somit kostengünstiges Anlagendesign
- Vollautomatisierter Betrieb mit 24/7 Fernwartung und Überwachung
- Zuverlässiger 24/7 Betrieb – Verfügbarkeit >95%
- Geringer Service- und Wartungsaufwand
 - Motoröl, Ascheentsorgung, Filterwechsel
- Plug & Play
- Konstante Wärme- und Stromproduktion:
 - 25kW elektrische Leistung
 - 60kW thermische Leistung
 - Gesamtwirkungsgrad: 85%



Containerlösungen – Turn Key Anlagen



Brennstoffpotenziale

Holzpellets gewährleisten einen stabilen Betrieb mit minimalem Wartungsaufwand

Sehr großes Potenzial an nutzbaren Reststoffen aus Industrie, Agrarindustrie

- Sehr große Nachfrage am Markt
- Betriebskosten können erheblich gesenkt werden
- Untersuchung unterschiedlichster Brennstoffe im E3
 - Mischpellets aus unterschiedlichen Brennstoffen
 - Mischungen von Holzpellets mit Reststoffen

STABILE, BEKANNTE BRENNSTOFFQUALITÄT IST FÜR ZUVERLÄSSIGEN BETRIEB ABSOLUT ERFORDERLICH



Brennstoffe - Kriterien

ZIEL: REGIONALE BRENNSTOFFE zur DEZENTRALEN ENERGIEVERSORGUNG nutzbar machen

KONVERSIONSVERHALTEN:

- Heizwert, Wasseranteil: → Reaktortemperatur, Gasqualität
- Beständigkeit des Brennstoffs während der Konversion
- Ascheanteil
- Aschezusammensetzung → Ascheschmelztemperaturen
- Chlor- und Schwefelanteile → Korrosion

WEITERE HERAUSFORDERUNGEN:

- Konditionierung
 - Wasseranteil im Rohzustand
 - Stückigkeit
 - Pelletierung notwendig, Förderfähigkeit?
 - Pelletierbarkeit



Brennstoffversuche im Labor: MEHRSTUFIGES TESTVERFAHREN

- Tests der interessanten Brennstoffe im Glühofen
 - Bestimmung Ascheanteil
 - Bestimmung Ascheschmelzverhalten
- Elementaranalyse Brennstoff und Asche

BISHER ÜBER 100 BRENNSTOFFE UNTERSUCHT



Brennstoffversuche im Labor: MEHRSTUFIGES TESTVERFAHREN

- Versuche zur Brennstoffaufbereitung (Pelletierbarkeit, Mischbarkeit)
- Versuche im E3 Biomassevergaser
 - Meist Beimischung zu Holzpellets
 - Versuchsdauer meist mehrere Tage
 - Erfasste Größen:
 - Anlagenparameter: Temperaturen, Drücke, Gasmenge, ...
 - Gaszusammensetzung
 - Teerkonzentrationen
 - Stabilität
 - anfallende Aschemenge
 - Nach Versuchsende Inspektion der gesamten Anlage, insb. Reaktor



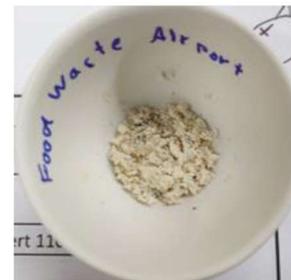
Bisher im E3 durchgeführte Brennstoffversuche

- Unterschiedliche Holzarten
- Sonnenblumenkernschalenpellets
- Heupellets
- Strohpellets
- Kirschkern
- Haselnusschalen
- Erdnusschalenpellets
- Weinrebenschnittpellets
- Lebensmittelreste getrocknet
- Gärrestpellets
- Kaffeesatz
- Mandelschalen
- Kunststoffe (PE)
- ...



Beispiel: Food Waste

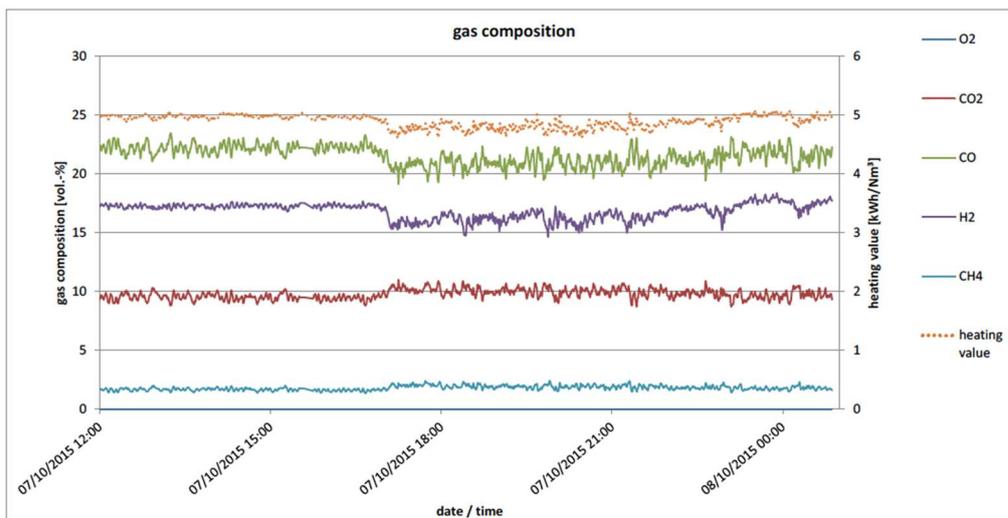
Proximate Analysis (as received)	Feedstock Type		
	EN-Plus A1 wood pellets	Airport catering waste	Restaurant waste
wt.% (dry basis)			
Ash	<0.3	3.6	7.8
Moisture Content	<10	9.6	7.7
Volatile Matter	80	81.3	71.9
HHV (MJ/kg)	17.5 - 18.5	19.82	20.65



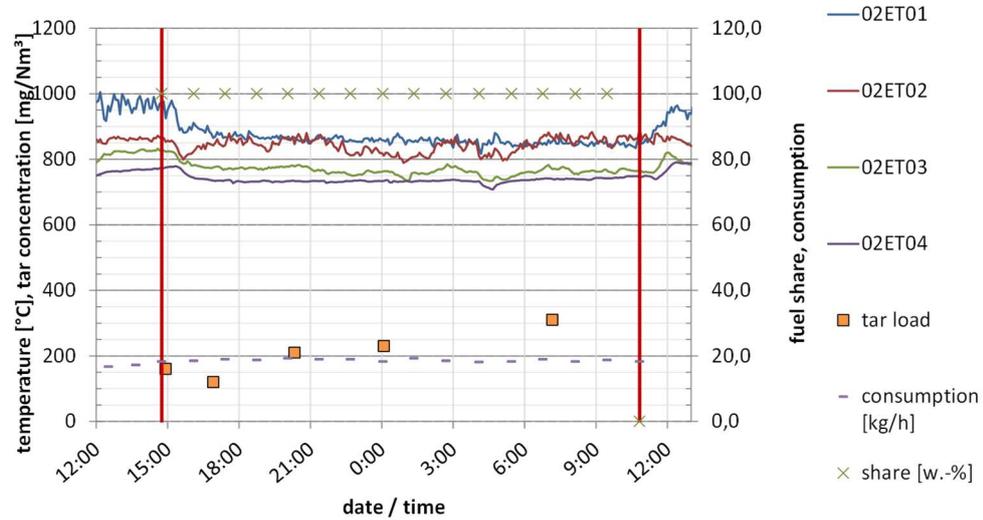
Ascheschmelztemperatur: >1300°C



Beispiel: Food Waste



Beispiel: Weinrebenschnitt



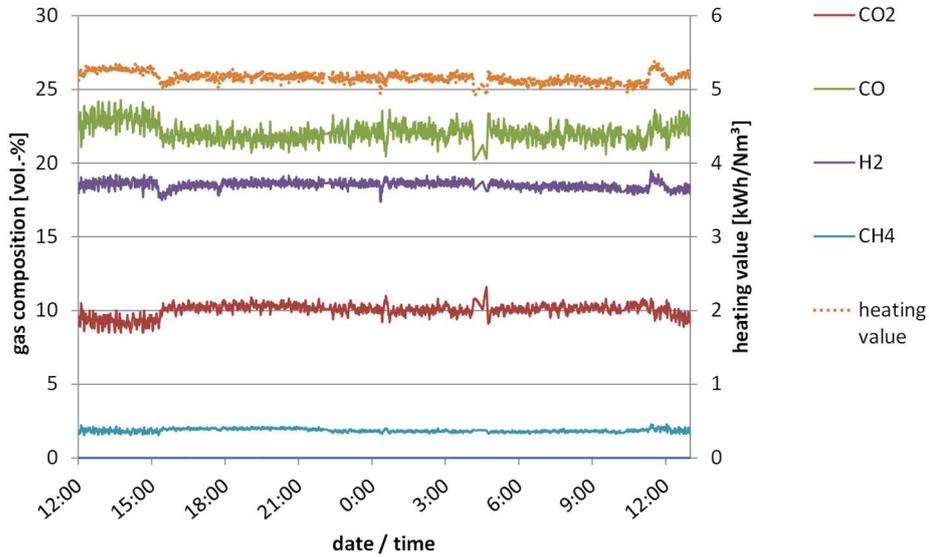
Beispiel: Weinrebenschnitt



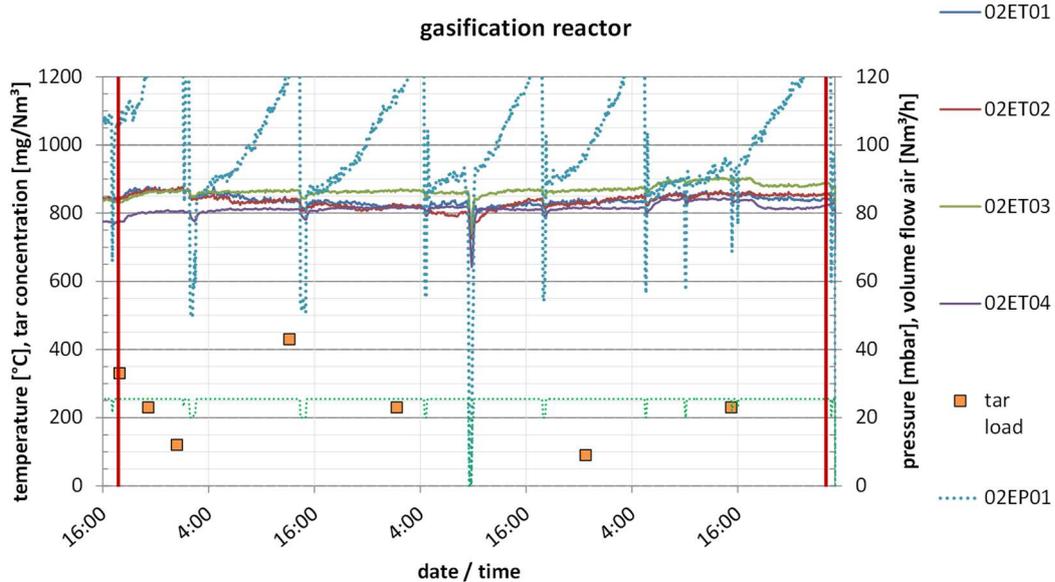
Wasseranteil	8,5 %
Ascheanteil	3,3 %
Ascheerweichungstemperatur	1360 °C
Kohlenstoff	48,5 %
Wasserstoff	5,7 %
Stickstoff	0,8 %
Sauerstoff	40,1 %
Schwefel	0,057 %
Chlor	0,018 %
Unterer Heizwert	16,04 MJ/kg



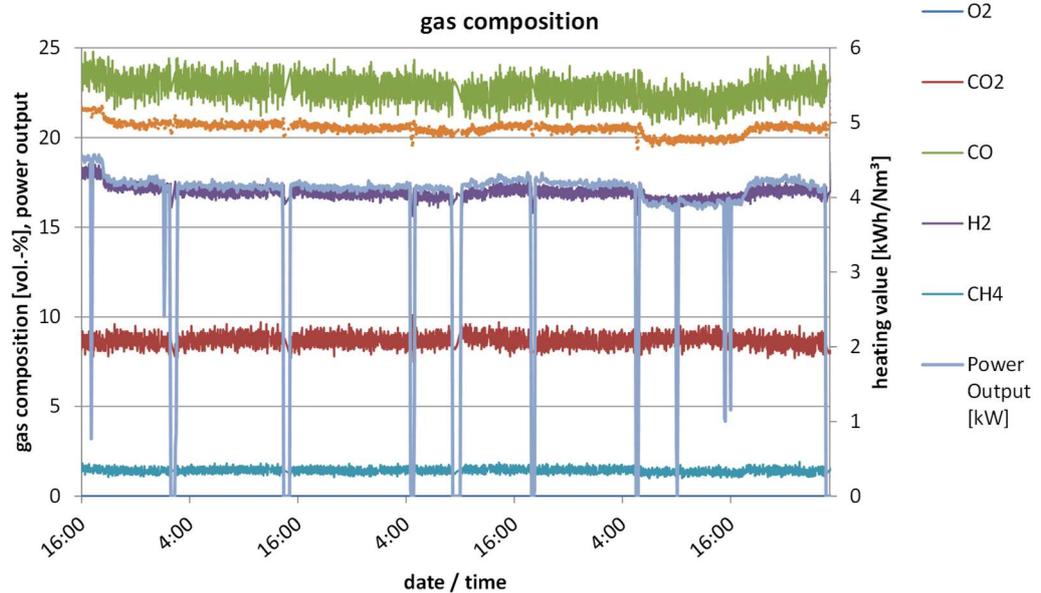
Beispiel: Weinrebenschnitt



Beispiel: Heupellets mit Additiv



Beispiel: Heupellets mit Additiv



NASDAQ Private Market™

LACI PORTFOLIO COMPANY
laincubator.org

Co-funded by the Intelligent Energy Europe Programme of the European Union

Supported by:
Federal Ministry of Economics and Technology
on the basis of a decision by the German Bundestag

FFG

Beispiel: Heupellets mit Additiv

- Stabiler Betrieb möglich für > 100h
- Erhöhter Anfall an Filterasche und Zyklonasche auf Grund des höheren Ascheanteils
- Teilweises Schmelzen der Asche im Zentrum des Reaktors



NASDAQ Private Market™

LACI PORTFOLIO COMPANY
laincubator.org

Co-funded by the Intelligent Energy Europe Programme of the European Union

Supported by:
Federal Ministry of Economics and Technology
on the basis of a decision by the German Bundestag

FFG

ZUSAMMENFASSUNG

- E3 – zuverlässige Produktion von Strom / Wärme / Kälte aus Biomasse
- Einfache, kompakte, robuste Anlage
- Geringer Wartungsaufwand
- Hohe Wirkungsgrade
- Holzpellets als Standardbrennstoff – starker Fokus auf die Verwendung anderer biogene Reststoffe
- Konstante Wärme- und Stromproduktion:
 - 25kW elektrische Leistung
 - 60kW thermische Leistung
 - Gesamtwirkungsgrad: 85%



ENTRADE E3 - SMALL SOLUTION FOR GLOBAL MARKETS



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!
Christian Zuber | christian.zuber@agnion.de



Frust oder Lust? Erkenntnisse aus dem Betrieb von geförderten bayerischen Holzvergasanlagen

(Wolfram Schöberl; C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing)

Im Rahmen des bayerischen Förderprogramms BioSol wurden in den Jahren 2013 und 2014 insgesamt 16 Holzvergasanlagen im Leistungsbereich bis 250 kW_{el} als Demonstrationsanlagen gefördert. Förderaufgabe war unter anderem eine umfassende Dokumentationspflicht der Betreiber innerhalb der Zweckbindungsfrist. Aufgrund eines novellierten europäischen Beihilferechts konnte das Förderprogramm nach dem Jahr 2014 nicht mehr fortgeführt werden.

Im Jahr 2015 waren somit erstmals alle geförderten Anlagen in Betrieb, was eine erste Auswertung der im Rahmen der Berichtspflicht eingegangenen Jahresberichte möglich machte. Zum Zeitpunkt der Vortragerstellung waren leider erst die Jahresberichte von acht Anlagen eingegangen, so dass die Untersuchungen auf diese Anlagen beschränkt werden mussten. Fünf der Anlagen werden mit Hackschnitzel betrieben, drei verwenden als Brennstoff Holzpellets. In den Jahresberichten finden sich neben Brennstoff- und Reststoffmengen auch monatliche Zählerstände zur Strom- und Wärmeerzeugung. Außerdem sind dort im Rahmen eines Betriebstagebuchs Wartungs- und Störungsfälle dokumentiert.

Grenzen der Auswertung

Leider stellte sich schnell heraus, dass manche Auswertungen zu keinen sinnvollen Ergebnissen führen. Beim Brennstoff Hackschnitzel ergeben sich aufgrund der Unsicherheiten bei Wassergehalt und Holzart so große Ergebnisspannen für die eingesetzte Brennstoffenergie, dass eine Aussage über Nutzungsgrade der Anlagen nicht sinnvoll möglich ist. Erstaunlicherweise lieferten auch die Berechnungen für die drei Pellet-Holzvergasanlagen, die alle von dem gleichen Hersteller stammen, sehr unterschiedliche Ergebnisse. Der ermittelte elektrische Nutzungsgrad lag zwischen 21 % und 34 %, beim thermischen Nutzungsgrad war die Spanne mit 28 % bis 52 % sogar noch größer. Das lässt sich nur durch mangelnde Sorgfalt in der Datenerfassung bei manchem Betreiber erklären. Auch im Bereich der anfallenden Reststoffe waren die Angaben in den Berichten zu ungenau, um seriöse Rückschlüsse oder Vergleiche ziehen zu können.

Volllaststunden und Leistungen

Die acht Anlagen, die ausgewertet werden konnten, wiesen folgende elektrische Leistungen auf (Herstellerangaben):

Anlage	1	2	3	4	5	6	7	8
kW _{elektrisch}	30	30	45	45	125	180	180	180

Aus den erzeugten Strommengen ergaben sich damit für die Anlagen folgende rechnerische Volllaststunden:

Frust oder Lust? Erkenntnisse aus dem Betrieb von geförderten bayerischen Holzvergassungsanlagen

Anlage	1	2	3	4	5	6	7	8
Stunden	8079	8887	8060	5558	7919	4580	6747	6639

Diese Zahlen lassen die positive Schlussfolgerung zu, dass bei keiner der Anlagen größere technische Probleme auftraten. Die Anlage 2 beweist sogar, dass bei optimalen Bedingungen auch über längere Zeiträume höhere elektrische Leistungen erreichbar sind als auf dem Typenschild angegeben. Eine solche Fahrweise der Anlage ist aber grundsätzlich eher nicht empfehlenswert und sollte unbedingt mit dem Hersteller abgestimmt sein, um Schäden am BHKW zu vermeiden.

Leider lieferten zwei der acht Betreiber im Bereich Stromerzeugung nur Jahresdaten, so dass die Graphik mit der monatlichen Stromerzeugung nur sechs Linien enthält:

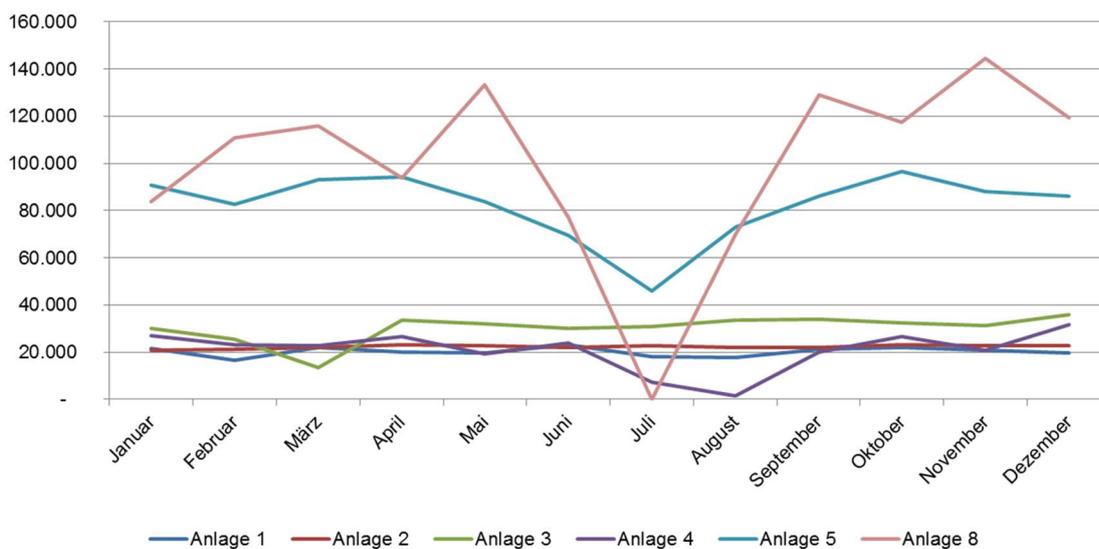


Abbildung 1: Monatliche Stromerzeugung der Anlagen (in kWh)

Bei der Betrachtung der monatlichen Zahlen sieht man deutlich, dass die geringeren Volllaststunden bei den Anlagen 4 und 8 in erster Linie auf sommerliche Abschaltungen zurückzuführen sind. Die Delle in der Stromerzeugungskurve der Anlage 3 im März ist auf einen Motorschaden zurückzuführen, der einen Ausfall von über 400 Stunden verursachte. Wie später noch zu sehen sein wird, war dieser Motorschaden der einzige Störfall bei den untersuchten Anlagen, der einen längerfristigen Stillstand hervorrief.

Um die von den Herstellern angegebenen thermischen Leistungen der Anlagen mit den Praxisdaten abzugleichen wurde für jede Anlage die erzeugte thermische Energie durch die aus der elektrischen Leistung ermittelten Volllaststunden dividiert. Damit ergaben sich folgende rechnerische thermische Leistungen:

Anlage	1	2	3	4	5	6	7	8
kW _{thermisch}	64	53	98	93	234	232	281	227

Die unterschiedlichen thermischen Leistungen bei baugleichen Anlagen gehen synchron mit den schon erwähnten Unsicherheiten bei den thermischen Nutzungsgraden. Zur Ermittlung der Ursache dieser Differenzen müssten weitergehende Nachforschungen angestellt werden.

Auswertung der Betriebstagebücher

In den Betriebstagebüchern waren laut Vorgabe von den Betreibern bei jeder Eintragung folgende Angaben zu machen:

- 1) Art (Wartung oder Störung)
- 2) Objekt (Vergaser, BHKW oder Allgemein)
- 3) Eigene Arbeitszeit (in Stunden)
- 4) Fremde Arbeitszeit (in Stunden)
- 5) Hervorgerufener Anlagenstillstand (in Stunden)

Leider lag zum Zeitpunkt der Erstellung das Tagebuch der Anlage 4 noch nicht vor. Bei den absoluten Zahlen ergibt sich folgendes Bild:

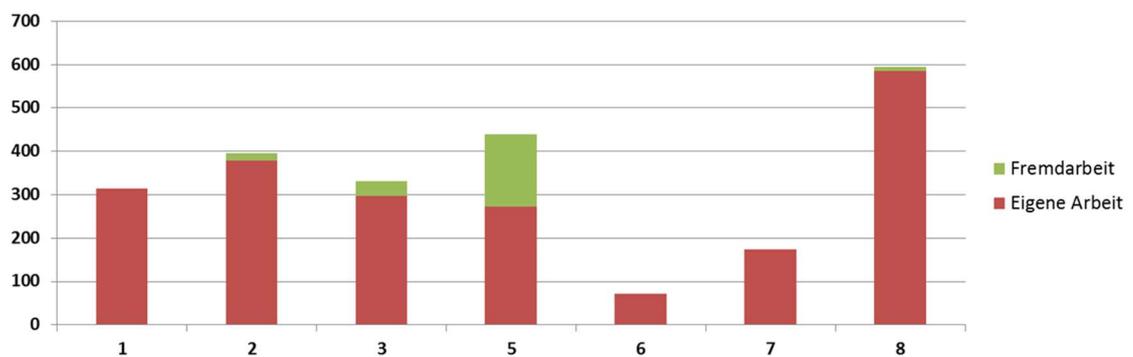


Abbildung 2: Wartungsarbeit (in Stunden)

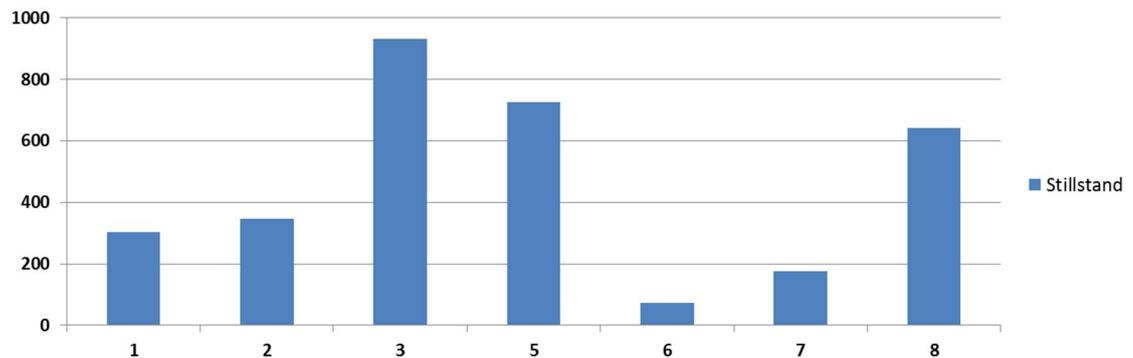


Abbildung 3: Anlagenstillstand (in Stunden)

Die hohen Stillstandstunden der Anlage 3 sind auf den schon erwähnten Motorschaden zurückzuführen. Auch die Anlage 5 hatte Motorenprobleme, dort musste die Anlage aufgrund zu hoher Motorentemperaturen in Sommermonaten einige Male für jeweils wenige Stunden abgeschaltet werden. Tatsächlich waren in diesen Monaten aufgrund eines sehr heißen Sommers die Außentemperaturen außergewöhnlich hoch. Die Angaben im Tagebuch der Anlage 6 erscheinen so niedrig, dass sie im Folgenden nicht mehr berücksichtigt werden. Auch die Werte der Anlage 7 sind so gering, dass vermutlich nicht alle Tätigkeiten erfasst wurden.

Insbesondere für die Wirtschaftlichkeit einer Anlage ist das Verhältnis aus Wartungsaufwand und erzeugter Energie interessant. Daher werden in der nächsten Graphik die Ergebnisse in Arbeitsstunden pro erzeugte MWh Strom dargestellt:

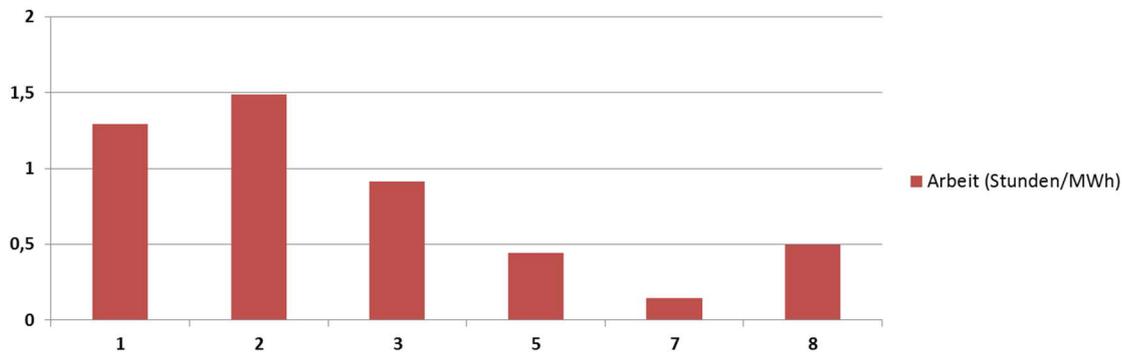


Abbildung 4: Wartungsarbeit (in Stunden/MWh)

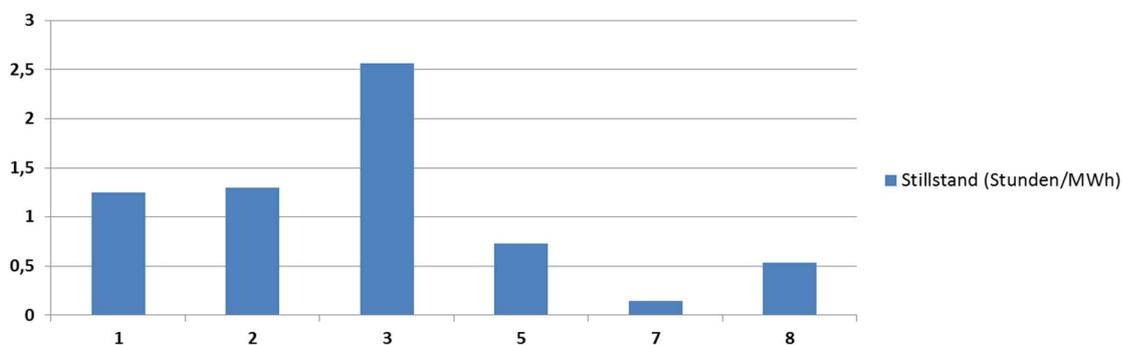


Abbildung 5: Anlagenstillstand (in Stunden/MWh)

Als sehr grobe Faustregel kann daraus abgeleitet werden, dass bei kleinen Anlagen in etwa 1 Stunde Arbeit pro erzeugte MWh Strom anfällt, bei großen Anlagen sinkt dieser Wert mindestens auf die Hälfte.

Liegt die Hauptarbeit mehr im Wartungsbereich oder sind Störungen arbeitsintensiver? Darüber kann die nächste Abbildung Antwort geben:

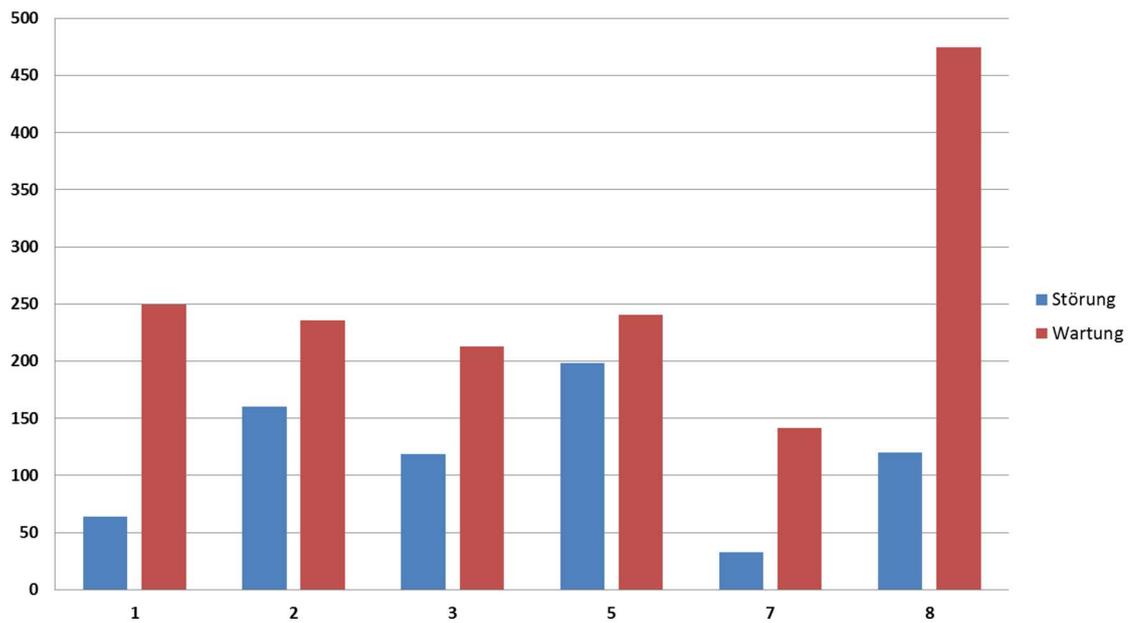


Abbildung 6: Arbeitsaufwand für Wartung und Störungen (in Stunden)

Bei allen Anlagen zeigt sich, dass die Wartungstätigkeiten mehr Zeit in Anspruch nehmen als die Beseitigung von Störungen. Dabei ist zu beachten, dass sich alle Anlagen noch in der Anfangsphase ihres Betriebs befinden, in der Störungen vermutlich öfter auftreten. Aussagen über den zeitlichen Verlauf des Betriebsaufwands einer Anlage werden in einigen Jahren möglich sein, wenn Berichte einer Anlage über mehrere Jahre hinweg vorliegen.

Konkrete Wartungs- oder Störungsfälle wurden in den Tagebüchern plausibel aufgezeichnet und liegen je Anlagentyp auch in etwa in derselben Höhe. Bei den allgemeinen Wartungstätigkeiten gibt es jedoch deutliche Unterschiede. Vermutlich weichen die Auffassungen der Betreiber darüber, was als Wartungstätigkeit zu zählen ist, stark voneinander ab. So kann z.B. in einem Heizwerk ein Betreiber die regelmäßigen Kontrollgänge ganz, teilweise oder gar nicht der Holzvergasanlage zuordnen und im Betriebstagebuch erfassen. In der nächsten Abbildung wird das deutlich:

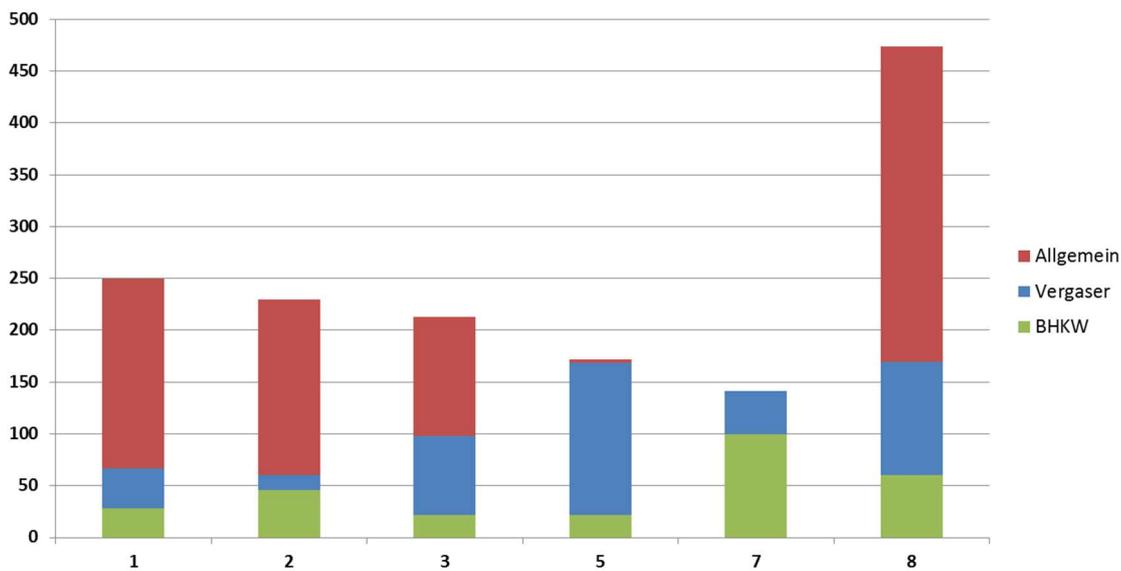


Abbildung 7: Arbeitsaufwand für BHKW-, Vergaser- und Allgemein-Wartung (in Stunden)

Weiterhin zeigt sich hier, dass die Wartung des BHKW nicht unterschätzt werden darf, in manchen Fällen nimmt sie mehr Zeit in Anspruch als die des Vergasers.

Zusammenfassung

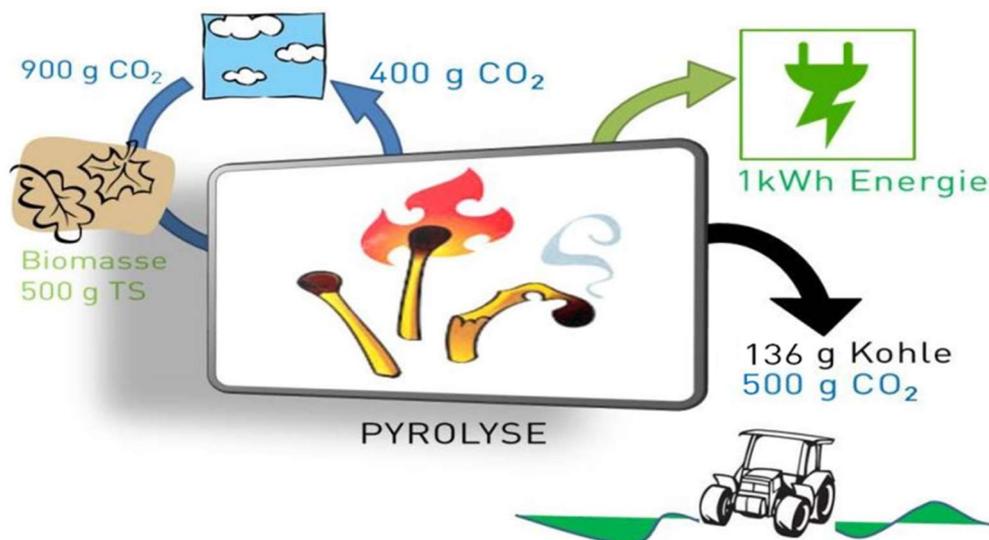
Alle Anlagen werden erfolgreich betrieben und erreichen teilweise sehr hohe Volllaststunden. Der dafür nötige Betrieb erfordert aber einen entsprechenden Arbeitseinsatz. Inwieweit sich dieser eventuell mit zunehmender Betriebsdauer und -erfahrung reduzieren lässt, kann derzeit noch nicht untersucht werden. Außerdem lässt sich festhalten, dass Aussagen von Betreibern über den Arbeitsaufwand nicht unbedingt vergleichbar sind und daher mit entsprechender Vorsicht gewertet werden sollten.

Dekarbonisation und Energie-Erzeugung geht gleichzeitig. Die Zukunft ist klimapositiv!

(Martin Schmid; Ökozentrum Langenbruck)

Martin Schmid; Rolf Fröhlich; Robert Stucki, Joachim G. Wüning

Kontaktperson: Martin Schmid; martin.schmid@oekozentrum.ch; www.CharNet.ch



Pro kWh Nutzenergie wird dem Kreislauf der Natur und so der Atmosphäre 500 g CO₂ entzogen

Zusammenfassung

Die Pflanzenkohle und deren Herstellung durch Pyrolyse birgt das Potential, den gesamten vom Menschen verursachten Anstieg des Kohlenstoffs in der Atmosphäre zu kompensieren oder gar rückgängig zu machen. Die fruchtbarsten Böden der Welt heißen „Schwarzerden“ (russisch „Tschernosem“, portugiesisch „Terra Preta“) und enthalten Pflanzenkohle, die entweder durch natürliche Ereignisse wie Steppenbrände (Ukraine, Russland) oder durch Menschen-Hand (Amazonasbecken, Westafrika) in den Humusboden gelangt ist. Gemäß den Funden zeigt sich die Kohle nachweislich über mehrere Tausend oder mehrere Zehntausend Jahre stabil, unabhängig von der Bodenzusammensetzung. Die Verkohlung von Ernterückständen auf jedem Quadratmeter Ackerland dieses Planeten zu 200 Gramm Pflanzenkohle und deren Rückführung in den Humusboden würde sämtliche menschengemachten Klimagas-Emissionen kompensieren. Diese Maßnahme würde aber nicht nur global dem Klima nützen, sondern auch lokal die Bodenfruchtbarkeit und die Toleranz gegenüber Dürre und Staunässe der Böden erhöhen, sowie den Nährstoffrückhalt verbessern und damit auch gleichzeitig Gerüche und weitere Klimagas-Emissionen wie Lachgas und Methan reduzieren.

Der am Ökozentrum weiterentwickelte Pyrolyseprozess stellt die sauberste Form der Verbrennung dar, bringt also auch Verbesserungen in der Lufthygiene bei der Biomassennutzung. Die Abgase dieser WKKK- (Wärme-Kraft-Kohle-Kopplung) sind nach bisherigen Messungen auch bei aschereicher Biomasse frei von Partikel-Emissionen und weisen geringste Kohlenmonoxid-Emissionen auf. Durch die gleichzeitige stoffliche und

energetische Nutzung von bisher schlecht nutzbarer Biomasse-Sortimente (Beispiele: Landschaftspflegeschnitt, Wurzelstock- und Schwemmholz mit Sandgehalt, Siebüberkorn aus Kompostierung und Kompogas mit Störstoffen (Plastikfolie, Karton, Mineralstoffe), Getreidespelzen, Fruchtkerne, Nussschalen, Klärschlamm, Papierschlamm, Stroh) erzeugt einen lokalen Nutzen von 300 bis 500 CHF pro Tonne abgeschiedenes CO₂. Dies ist somit nicht nur die sicherste sondern auch die einzige finanziell kostenlose „Carbon-Capture&Storage“- (CCS-) Strategie, die zudem den ländlichen Raum weltweit nachhaltig stärken wird.

1. Ausgangslage

Die Landwirtschaft trägt massiv zum Ausstoß von Klimagasen bei, in Form von Oxidation von gepflügten Böden, anderen Formen von Humusverlust (Erosion), sowie Methan-, Lachgas- und Ammoniak-Emissionen durch die Düngerproduktion, sowie dem Handling des Hofdüngers (Jauche anstatt Mist, etc.) [1]. Sie hat aber auch das Potential, selber zur Reduktion des Klimagas-Ausstoßes beizutragen. Die dortigen Potential-schätzungen reichen bis hin zur vollständigen Kompensation des menschengemachten Ausstoßes und zusätzlicher Reduktion des Kohlenstoff-Gehaltes der Atmosphäre auf Vorindustrielle Werte [2]. Das Interessante an den Maßnahmen den Klimaschutz-Möglichkeiten der Landwirtschaft ist ihr lokaler Zusatznutzen (Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit, Erhöhung der Toleranz gegenüber extremen Wetter-Situationen, Reduktion von Düngerverlust und Geruchsbelästigungen, Erhöhung der Stallhygiene, entsprechende Reduktion der Fremdkosten für Dünger, Bewässerung und Veterinärmedizinische Behandlung) welcher mitunter oder sogar meistens die Kosten der Maßnahmen überschreitet, sodass der globale Nutzen des Klimaschutzes kostenlos wird [3].

Eine dieser Maßnahmen reicht weit über die Grenzen der Landwirtschaft hinaus und auch hinein in die urbane Energieerzeugung und das Stoffrecycling: die Pyrolyse von Biomasse-basierten Reststoffen zu Pflanzenkohle (engl. Biochar). Pyrolyse ist die thermische Zerlegung von Kohlenwasserstoff-haltigen Stoffen unter Luftabschluss. Dabei entsteht eine wasserstoff-reiche Gasmischung, sowie ein Gemisch flüssiger Stoffe (unter Teere oder Pyrolyseöl zusammengefasst) und Koks oder Aktivkohle, je nach Einsatzstoff auch Holzkohle oder eben Pflanzenkohle genannt. Werden sorten-reine Kunststoffe eingesetzt, kann mit der Pyrolyse nach dem Hamburger Verfahren wieder Monomer und ein Anteil Energie erzeugt werden [4]. Da die Pyrolyse stark exotherm ist, wird gleichzeitig Energie frei und trotzdem auch ein gut nutzbarer Stoffstrom erzeugt.

Die fruchtbarsten Böden der Welt heißen Schwarzerde und enthalten Pflanzenkohle, die entweder natürlich entstanden ist, zum Beispiel durch Steppenbrände in der Ukraine und Westrussland [5] (Schwarzerde, Russisch чернозем [Tschernosem]) oder von Menschenhand zusammen mit Fäkalien und Kompost in den Boden eingebracht wurde, vor 3'000 bis 7'000 Jahren im Amazonas-Becken [6] (Schwarze Erde portugiesisch Terra Preta) oder in West-Afrika seit mindestens 700 Jahren praktiziert wird (Neueste Entdeckungen der Ethnologie in Sierra Leone, Ghana, Guinea und Liberia [7]). Es ist durch die Funde aber auch weiterführende Forschung mittlerweile erwiesen, dass der als Pflanzenkohle eingebrachte Kohlenstoff über Tausende Jahre stabil bleibt in allen untersuchten Bodenarten [8]. Gleichzeitig kann die Pflanzenkohle durch die große Oberfläche und den anfänglich hohen pH-Wert weitere Stoffe im Boden halten, sowie als Ionentauscher nützliche Umwandlungsprozesse unterstützen.

Gleichzeitig harren weltweit Milliarden Tonnen von schwer nutzbaren Stoffen einer sinnvollen Nutzung: Ernterückstände (Stroh, Spelzen, Schalen, Pulpe, Rinde, Kerne),

Landschaftspflegeschnitt (Grünschnitt, Wurzelholz mit Sand), Ausgesiebtes aus Kompostierung, Biogas- und Wasserkraft (Siebüberkorn, feste Gärreste, Schwemmholz), sowie bereits ausgefaulte oder schwer vergärbare Schlämme (Klärschlamm, Papierschlamm).

Gerade in ländlichen Gebieten der Tropen ist der Zugang zu technischer Energie und Dünger oft schwierig, sowie die Böden oft humusarm.

Mit angepasster Technologie können nun für alle Einsatzstoffe, trocken oder feucht, für jede Betriebsgröße oder gar familiäre Kleinstbauernbetriebe Lösungen basierend auf der Pyrolyse entwickelt werden, welche lokal oder zumindest regional Energie und Pflanzenkohle erzeugt. Dies kann der Pyro-Cook [9] sein, der in Haiti einer Kleinbauernfamilie ermöglicht, trockenes Gartenschnittgut anstatt Waldholz in Holzkohle und gleichzeitig ein rauchfreies Kochfeuer umzusetzen, oder eine PPP120-Anlage [10], welche in einem Kaffee-Verarbeitungszentrum für 30 Kleinbauern oder einem mittleren Betrieb aus der feuchten Kaffeepulpe Pflanzenkohle und Prozesswärme erzeugt, die den Rohkaffee gleichzeitig auf marktfähige Qualität trocknen lässt – oder aber, und dies ist der aktuelle Projektinhalt – aus 2'000 Tonnen pro Jahr Siebreste aus der Kompostierung einer großen Gärtnerei mit Gewächshäusern in der Schweiz 300 Tonnen Pflanzenkohle, 200 kW Heizwärme-Dauerleistung sowie 50 kW elektrische Dauerleistung zu erzeugen, was einer jährlichen Klimagas-Reduktion von fast 1'500 t CO₂ entspricht.

2. Vorgehen

Seit 1983 werden am Ökozentrum Biomasse-Energiesysteme entwickelt und getestet, seit 1994 die FLOX® (für Flammenlose Oxidation) weiterentwickelt, seit 2004 die daraus abgeleitete Schwachgas-Verbrennungstechnik und deren industrielle Anwendung entwickelt. Für die gekoppelte Strom- und Wärmeproduktion aus Feststoffbiomasse wird seit 2006 die Heissluft-Turbinentechnik favorisiert [11] – und entsprechend ebenfalls geprüft und weiterentwickelt. Die angepassten Technologien werden sowohl hier in Mitteleuropa sowie in der Entwicklungs-zusammenarbeit auch weltweit mit den lokalen KMU's bis zur Serien-Produktion begleitet.

Kaffeepulpe ist ein umweltschädigender Reststoff, dessen Nutzung seit den 1960er-Jahren erfolglos erforscht wurde [12]. Das Ökozentrum untersuchte im Auftrag der Cleaner Production Center Initiative ab 2009 neue Lösungen [13] und schlug 2011 die Pyrolyse zu Pflanzenkohle vor und entwickelte einen vereinfachten Prozess, der im Labor 2013 erfolgreich umgesetzt und geprüft werden konnte. 2014 wurde daraufhin ein Full-scale Prototyp für einen peruanischen Maschinen-hersteller für die Kaffee-Ernte-Verarbeitung gebaut und geprüft. Das Gerät verarbeitet bis zu 40 kg/h feuchte Kaffeepulpe mit bis zu 54 % Wassergehalt und erzeugt daraus bis zu 70 kW Heizleistung und bis zu 6 kg/h Pflanzenkohle. 2015 fanden der erste Technologie-Transfer-Workshop statt [14] und Anfang 2016 sind erste Anlagen im Bau oder bereits in Betrieb in Peru und Vietnam. Die Verbreitung in Vietnam sowie ein Landwirtschafts-Forschungsprojekt mit einer Kleinbauernkooperative mit Unterstützung durch das Forschungsinstitut für Biolandbau FiBL wird zurzeit begleitet.

Auf Grund der vielen Aktivitäten und Anfragen zu Pflanzenkohle in der Schweiz wurde im Herbst 2015 ein Profi-Netzwerk gegründet unter dem Namen CharNet [15]. Dieses Netzwerk bündelt den Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Pflanzenkohle und vernetzt intern wie extern. Es zählt bereits über 70 Mitglieder aus Forschung (Eawag, ZHAW, FiBL, Agroscope, Ithaka, Ökozentrum), Urban Farming, Landwirtschaft, Kom-

postierung, Gartenbau, Gewässerschutz, Bodenschutz, sowie Anlagenbauer für kleine und große Pyrolyse-Systeme. CharNet ist seit Juni als Verband Mitglied von Biomasse-Suisse.

Parallel dazu wird am Ökozentrum zusammen mit einem erfahrenen Schweizer Kompostierwerke- und Biogas-Anlagenbauer seit Oktober 2015 eine Anlage entwickelt die die erwähnte Schwachgas-Technik, die Heissluftturbinentechnik und die Pyrolyse zu einer robusten Einheit verbindet, die jegliche feste Biomasse-Reststoffe inklusive Störstoffe wie Sand, Steine und Plastikfolien zu Pflanzenkohle, Strom, Wärme, Klimaschutz sowie sehr sauberen Abgasen umsetzt.

Der neue abgewandelte Pyrolyse-Prozess, den wir vorerst PPP nennen (von Pulpa Pyro Peru, bzw. Pyro Power Plant) weist einige Vorteile auf: Er benötigt weniger bis gar keinen hitzebeständigen Stahl, da die Wärme nicht über die Reaktoroberfläche eingebracht wird, sondern durch Eindüsung von sauerstoffarmem Abgas direkt in den Reaktor geführt wird. Dadurch ist die Anlage auch unempfindlich gegen Überhitzung im Falle eines Stromausfalles. Der Reaktor wird dadurch kompakter und benötigt keine Fördersysteme im Innern. Durch die Strömungsumkehr wird das Gas im kalten Teil des Reaktors durch die frische Biomasse gefiltert und auskondensiert. Das Gas ist danach beinahe teerfrei und kalt und kann gut gefördert werden. Die Teere werden in der Folge mit der Biomasse nochmals der Pyrolyse zugeführt und zu mehr Kohle und Gas gecracked. Die erzeugte Kohle hat direkt die Eigenschaften von Aktivkohle, da die Gasaktivierung im Prozess integriert ist.

3. Resultate

Emissionsschutz

Das Wichtigste bei der Einführung einer umwelttechnischen Maßnahme ist selbstverständlich, dass keine neuen potentiellen Gefahren zu Land, zu Wasser und in der Luft erzeugt werden. Die Pyrolyse kann, wie wir von der traditionellen Köhlerei in Meilern wissen, auch Klimagase emittieren, Energie verschwenden, sowie eine Kohle erzeugen, die durch Schwermetalle und Chlorbestandteile der Einsatzstoffe, sowie auch durch unsaubere Prozessführung umwelttoxische Stoffe erzeugen könnte. Deshalb wurde das vom Ithaka-Institut (Arbaz VS), von Agroscope (Tänikon ZH) und von Eurofins Ost (Freiberg Sachsen) das European Biochar Certificate EBC entwickelt [16] welches dies alles regelt - sowohl durch Grenzwerte bei PAK (Polyaromatische Kohlenwasserstoffe), PCB (Polychlorierte Byphenole) und Schwermetallen, als auch durch eine Positiv-Liste der zugelassenen Einsatzstoffe, sowie einer Empfehlung zur Wärmenutzung. Im Weiteren müssen die Abgase die entsprechenden Abgasvorschriften einhalten.

Hält die Pflanzenkohle die Regeln dieses EBC ein, ist sie in der Schweiz seit dem März 2013 gemäß Düngemittelverordnung „verkehrs-fähig“ [17]. Im Weiteren ist sie in den meisten europäischen Ländern (inklusive Schweiz) auch als Futtermittel-Zusatz zulassbar.

Untersuchungen am System „PPP“ für die Kaffeepulpe haben bereits gezeigt, dass die Abgase dieses neuen Prozesses auch ohne Filter strengste Grenzwerte einhalten kann: Es ist partikelfrei (unter der Messschwelle des Direkt-Messgerätes) und die CO-Emissionen liegen unter 10 mg/m^3_n (bei 13 % O_2) [18]. Die erzeugte Kohle hat in allen untersuchten Fällen die Grenzwerte für PAK mit sehr großer Sicherheitsmarge eingehalten [18].

Klimaschutz

Wird die erzeugte Pflanzenkohle im Humusboden eingelagert, so entspricht jedes Kilogramm Kohlenstoff einer Reduktion von 3.66 kg CO₂ im Kreislauf und somit in der Atmosphäre. Wird nun aus der Sicht der gleichzeitig mit der Pyrolyse erzeugten Energie gesprochen, so wurden für jede Kilowattstunde kWh erzeugte Nutzenergie aus der Atmosphäre 900 g CO₂ entzogen durch das vorhergehende Pflanzenwachstum zu 500 g trockener Biomasse. Bei der Pyrolyse wird durch den Verbrennungsprozess der Pyrolysegase aber auch wieder 400 g CO₂ freigesetzt. Netto werden der Atmosphäre also pro kWh Nutzenergie 500 g CO₂ entzogen und als 136 g Kohlenstoff (wieder Faktor 3.66) im Boden eingelagert. Es kann also von klimapositiver Energie gesprochen werden.

Die zusätzlichen Klimaschutz-Effekte, die die Pflanzenkohle im Tierdarm, im Stall, in der Jauchegrube und auf dem Acker erbringt durch Verhinderung anderer Emissionen (Lachgas-, Methan-) sind hierbei noch nicht berücksichtigt. Es gibt Forschende, die diesen Effekt auf mindestens nochmals so viel einschätzen [19].

Ökonomie und technische Umsetzung

Da eine Pyrolyse-Anlage im Vergleich etwa zu einer Biogasanlage sehr schnell arbeitet, das heißt den Einsatzstoff nur rund eine Stunde im Reaktor beherbergt (für Trocknung, Aufwärmung, Pyrolyse und Abkühlung), ist sie auch entsprechend kompakt in der Bauform. Die Energie wird zudem ähnlich einem Verbrennungssystem innert weniger Minuten abgegeben und die Anlagen sind entsprechend schnell in Betrieb genommen und auch wieder abgestellt. Dadurch liefern sie Prozessenergie nach Bedarf.

Werden nun die Nutzen der Pflanzenkohle berechnet, so entsteht ein Marktwert, der im Bereich jenes von Holzkohle liegt – kann aber als Futtermittelzusatz auch höhere Werte (ähnlich Aktivkohle) annehmen. Weltweit gesammelte Zahlen ergeben ein Spektrum von 500 US-\$ bis 1'300 € pro Tonne bei größeren Abnahmemengen (Big-Bag (1.3 m³) oder grösser).

Der Marktwert der Energie richtet sich vor allem nach der Reduktion des Eigenverbrauches von landwirtschaftlichen oder industriellen Betrieben. Für die folgenden Aussagen wurde er mit 0.16 CHF / kWh Strom und 0.06 CHF / kWh Wärme angenommen.

Mit diesen Werten kann gesagt werden, dass der Ertrag durch die Erzeugung von Pflanzenkohle und Energie je etwa die Hälfte zum Umsatz beitragen werden. Geht man davon aus, dass gegenüber einem Biomasse-Heizkessel sogar noch „schlechtere“ und somit preiswertere oder gar kostenlose oder entsorgungskostenpflichtige Brennstoffe eingesetzt werden können, sowie keine Abgas-Nachbehandlung benötigt wird, kann ein Pyrolyse-System um ein mehrfaches wirtschaftlicher sein, als eine reine Biomasse-Energie-Anlage.

Aus der Sicht des Klimaschutzes kann gesagt werden, dass pro Tonne abgeschiedenes CO₂ (auch wieder ohne weitere Emissionsminderung durch die Kohle in der Landwirtschaft) ein Nutzen von 300 bis 500 US\$, CHF oder € entsteht. Dies ist somit vermutlich die einzige Carbon-Capture&Storage-Technologie, die nicht nur nichts kostet, sondern Einkommen erzeugt!

4. Diskussion und Ausblick

Mit der Pyrolyse kann also in der Landwirtschaft weltweit ein weiterer Stoffkreislauf geschlossen werden, der viele zusätzliche Nutzen schafft. Dadurch kann auch die Wirtschaftlichkeit der Biomasse-Energieanlagen massiv gesteigert werden und nicht zuletzt ein großer Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden, ohne dies mit Zertifikaten oder anderen Subventionen finanzieren zu müssen. Im Folgenden sind im Kontext eines Schweizer Landwirtschaftsbetriebes, der die Pyrolyse bereits selbst einsetzt, die bestehenden (blau) und die neuen (rot) Stoff- und Produktströme eingezeichnet.

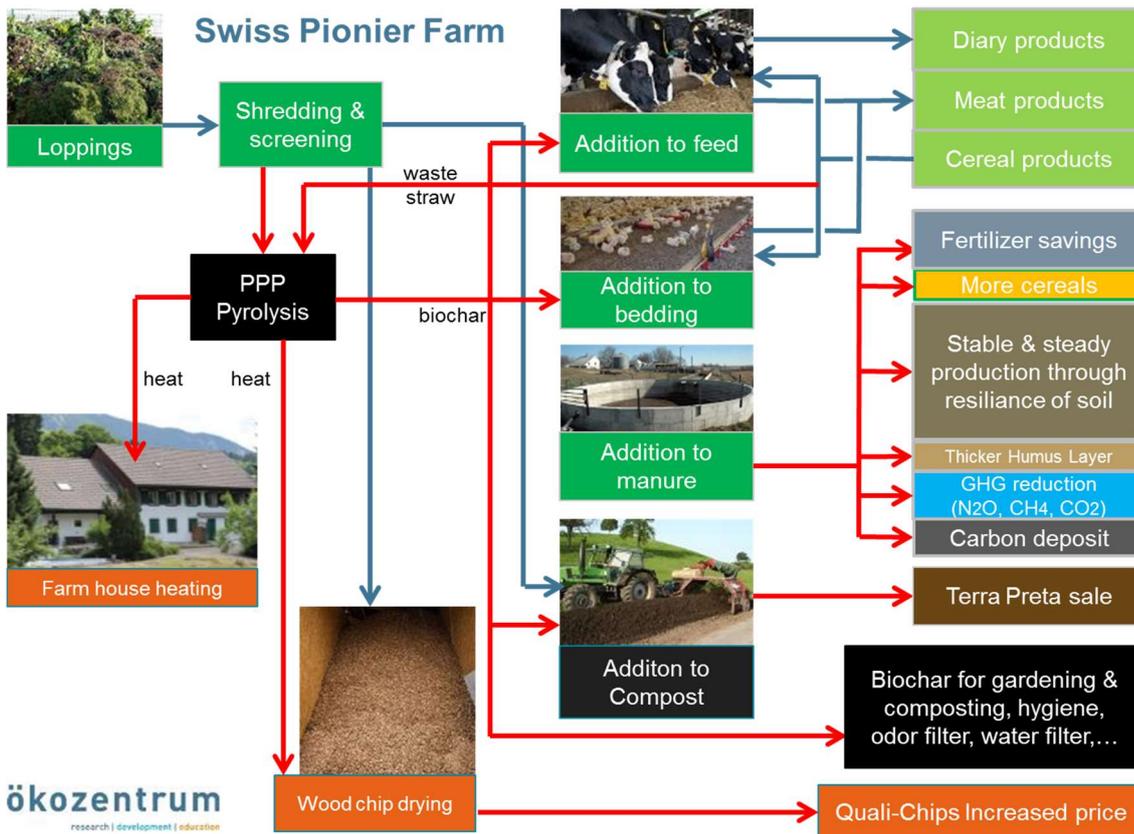


Abbildung 1: Beispiel eines Schweizer Landwirtschaftsbetriebes mit Milch- und Fleisch-Produktion, eigenem Futteranbau, sowie Lohnbetrieb im Straßen- und Wegrand-Pflege: in blau die bestehenden Pfade, in rot die durch die Pyrolyse und Pflanzenkohle neuen Wege hin zu zusätzlichen Produkten. Der Grünschnitt geht in die Pyrolyse – mit der Wärme werden die besseren Hackschnitzel zu Qualischnitzel getrocknet und der Hof geheizt. Die Kohle geht ins Futter, in das Einstreu, in die Güllegrube und in die Feldrandkompostierung, sowie direkt in Big-Bags in den Direktverkauf an Gärtnereien und andere Kompostierer. Neben der Kohle und den Qualischnitzel entstehen als zusätzliche Produkte „Terra-Preta“ (Schwarzerden-Kompost), Mehrertrag und oder Düngereinsparung, stabilere Trockenheits- und Staunässe-resistentere Böden, eine bessere Stickstoff-Bilanz mit geringeren Lachgas- und Geruchs-Emission, sowie Klimaschutz.

Die weltweite Forschung auf diesem Gebiet stimmt sehr hoffnungsvoll, in den Tropen sind die Ertragssteigerungen immens. Würden auf jedem Quadratmeter Ackerland weltweit 200 Gramm Kohle aus den Ernterückständen erzeugt und in den Boden rück-

geführt, würde dies den gesamten menschengemachten Klimagasausstoss kompensieren. Also: Lasst uns richtig Kohle machen!

Literatur/Referenzen

- [1] <http://www.umweltbundesamt.de/daten/klimawandel/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>
- [2] Hans-Peter Schmidt, Swiss Biochar, Jaques Fuchs, FiBL; Anlässlich des Kompostgespräches 2010 in Illnau, Switzerland 2010
- Allan Savory: Can Livestock Grazing Stop Desertification?; scientific American; 2013
<http://www.scientificamerican.com/article/can-livestock-grazing-stop-desertification/>
- [3] Martin Schmid; Char-up & Decarbonize! The potential multi-role of biochar - reducing climate change and increasing resilience of soils; Poster für Swiss Global Change Day, Bern; 2016
- [4] https://de.wikipedia.org/wiki/Hamburger_Verfahren
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzerde>
- [6] <http://www.welt.de/wissenschaft/umwelt/article132867147/Hobbygaertner-schwoeren-auf-Supererde-Terra-Preta.html>
- [7] Leach, M., J. Fairhead and J. Fraser; Green grabs and biochar: Revaluing African soils and farming in the new carbon economy; Sussex 2012, Journal of Peasant Studies, 39:2
- [8] Yakov Kuzyakov, Irina Subbotina, Haiqing Chen, Irina Bogomolova, Xingliang Xub; Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling; Soil Biology and Biochemistry; Volume 41, Issue 2, February 2009, Pages 210–219
- [9] <http://www.kaskad-e.ch/html/pyrocook.html>
- [10] Martin Schmid; Posterbeitrag für REPIC Jahrestagung 2013; http://web537.136.hosttech.eu/wordpress/wp-content/uploads/2016/03/PulpaPyroPeru_valuable-resources-from-difficult-residues_Ökozentrum_Schmid_2015.pdf
- [11] Martin Schmid, Christian Gaegauf, Michael Sattler; Dezentrale Stromerzeugung mit Feststoffbiomasse, Ökozentrum Langenbruck, 2007
- [12] J.E. Braham and R. Bressani: Coffee Pulp - Composition, Technology, and Utilization. Institute of Nutrition of Central America and Panama. 1979
- [13] Michael Sattler, Akos Lukacs: Entwicklung und Implementierung einer Technologie zur umweltfreundlichen Verbrennung von Kaffeefruchtfleischabfällen in El Salvador. Ökozentrum Langenbruck, 2010
- [14] <http://www.oekozentrum.ch/291-0-Pulpa-Pyro-Peru.html>;
<https://www.youtube.com/watch?v=SWST8pmsu1M#t=27> (Film)
- [15] <http://www.ee-news.ch/de/article/32676>; <http://www.oekozentrum.ch/322-0-Gruendung-des-Pflanzenkohle-Netzwerks-Charnetch.html>; CharNet.ch
- [16] EBC (2012) 'European Biochar Certificate – Richtlinien für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle', European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland.

<http://www.european-biochar.org/en/download>. Version 7.2 of 4th February 2016, DOI: 10.13140/RG.2.1.4658.7043

[17] Grossenbacher Doris; BLW gibt grünes Licht - Pflanzenkohle vorerst frei einsetzbar. Schweizerbauer.ch, April 2016;
<https://www.schweizerbauer.ch/pflanzen/ackerbau/blw-gibt-gruenes-licht---pflanzenkohle-vorerst-frei-einsetzbar-10391.html>

[18] Martin Schmid; Pulpa Pyro Peru - Clean generation of biochar and energy from coffee pulp; Schlussbericht; Langenbruck, Dezember 2015.

[19] Sonja Schimmelpfennig; Ludger Grünhage; Claudia Kammann; Christoph Müller, Christian Koch; Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland - Effects on greenhouse gas emissions and plant growth; Agriculture, Ecosystems and Environment, Elsevier, 2014

Auswirkungen regionaler Energiemärkte auf die dezentrale Energieversorgung

(Jens Maiwald, Prof. Tino Schütte; Hochschule Zittau/Görlitz)

1 Einleitung

Ansätze zum Gelingen der Energiewende finden sich derzeit viele rund um die Themen Energietechnik und Energiewirtschaft. Smart Grid, flexible Anlagenfahrweisen, Lastmanagement auf Angebots- und Nachfrageseite (DSM) und Energieeffizienz sind nur einige der oft benutzten Schlagworte. Sie verdeutlichen, wie vielschichtig das Vorhaben Energiewende angegangen wird. Ein grundlegendes Problem hingegen, das mit hin bekannt ist aber häufig außerhalb der Betrachtungen liegt, ist die langfristige Finanzierungslücke von Stromerzeugungsanlagen auf Basis Erneuerbarer Energien (EE). Im Rahmen eines ESF-finanzierten Projektes widmet sich ein Forscherteam an der Hochschule Zittau/Görlitz dieser Problematik.

Im Folgenden wird u. a. aufgezeigt, warum diese Finanzierungslücke entsteht, welche Fragestellung sich daraus ergibt und wie sie beantwortet werden soll. Es werden erste Ergebnisse aus Voruntersuchungen dargestellt.

2 Problem der langfristigen Finanzierung

Im Hinblick auf auslaufende Förderungen für Strom aus EE-Anlagen müssen diese zukünftig an wettbewerblich organisierten Strommärkten teilnehmen. Die derzeit hierfür zur Verfügung stehenden Instrumente führen auf langfristige Sicht jedoch nicht zu einer ausreichenden Erlösbildung.

Direktvermarktung und CO₂-Zertifikate

Die Finanzierung durch Direktvermarktung wird aufgrund des Merit-Order-Effekts versagen. Derzeit liegen die Vollkosten von EE-Anlagen über denen konventioneller Anlagen. Zwar ist es denkbar, dass der Zeitpunkt kommt an dem sich dies, durch z.B. Verteuerung fossiler Brennstoffe und technischen Fortschritt, umkehrt, doch selbst dann sind EE nicht automatisch marktfähig. Der Grund ist ihre spezifische Kostenstruktur mit verhältnismäßig hohen Vollkosten und extrem geringen Grenzkosten. Geringe Grenzkosten führen gemäß dem Merit-Order-Prinzip zu geringen Strompreisen an der Börse. Je mehr EE-Anlagen an die Börse drängen, umso kleiner wird der Strompreis und mit hin der erzielbare Beitrag zur Deckung der Fixkosten.¹ Weiterhin ergeben Hochrechnungen anhand des geplanten Ausbaus² von EE-Anlagen, dass die Anzahl der Stunden mit negativer Residuallast bis zur Jahrhundertmitte signifikant zunehmen wird.³

¹ Ziel der Bundesregierung sind 80% EE am Bruttostromverbrauch bis zur Jahrhundertmitte.

² Vergleiche DLR, ISET, IFNE (2010), BMU-Leitstudie.

³ Quelle Kopp u.a. (2012). Berechnungen durch Kopp u.a. (2012) auf Grundlage BMU-Leitstudie DLR, ISET, IFNE (2010).

Infolgedessen wird es häufiger dazu kommen, dass konventionelle Anlagen seltener ans Netz müssen, um die Stromnachfrage zu decken. Dadurch wird der Strompreis niedrig bleiben.

Auch eine Anhebung der Preise für CO₂-Zertifikate führt zu keinen direkten Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der EE-Anlagen, da hierdurch nur die Grenzkosten der konventionellen Anlagen betroffen sind.⁴ Dazu entfällt in Stunden mit negativer Residuallast die Wirkung einer Preiserhöhung völlig. Lediglich in Stunden in denen konventionelle Anlagen zum Einsatz kommen, ergibt sich durch deren höhere Grenzkosten ein höherer Deckungsbeitrag für EE-Anlagen-Betreiber an der Börse. Im Hinblick auf einen Anteil von 80 % Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch, müssten die Zertifikatspreise zudem sehr hoch sein, um für ausreichend hohe Deckungsbeiträge bei den Erneuerbaren zu sorgen.

Optionales EEG-Instrument: Marktprämienmodell

Das Marktprämienmodell stellt ebenfalls kein langfristiges Instrument zur Marktintegration von EE-Anlagen dar. Einerseits beruht das System darauf, dass der Staat und nicht der Markt festlegt, welche Erlösströme dem Anlagenbetreiber zur Kostendeckung zur Verfügung stehen. Andererseits würde die Senkung der Börsenerlöse durch den Merit-Order-Effekt zu einer steigenden Marktprämie führen. Tendiert der Preis an der Börse gegen Null konvergiert die Marktprämie gegen den EEG-Satz.

Alternative Marktmodelle: Grünstromzertifikate und Kapazitätsmärkte

Den vorangegangenen Ausführungen folgend ergibt sich eine Lücke in der Finanzierung, wenn die Erlöse allein aus Stromverkäufen stammen. Systeme mit einem zweiten Erlösstrom könnten hier Verbesserung bewirken. Diskutiert werden derzeit vor allem die Einführung von Grünstromzertifikaten oder die Etablierung eines Kapazitätsmarktes.

Auf Basis des Quotensystems ist der Handel mit Grünstromzertifikaten als grundsätzlich möglich einzustufen. Somit existieren zwei Erlösströme; Erlöse aus dem Verkauf des Stroms und aus dem Verkauf der Grünstromzertifikate. Zertifikate sind fungible Güter. Dies führt zum Markteintritt von Spekulanten was sowohl die Preisvolatilität erhöht, als auch das Handelsvolumen. Stabile Einkommensströme können folglich nur über langfristige Kontrakte gewährleistet werden. Hierzu sind i. d. R. ordnungsrechtliche Eingriffe notwendig.

Kapazitätsmärkte bieten dem Anlagenbetreiber ebenfalls zwei Erlösströme. Zum einen für die Bereitstellung der Kapazität, zum anderen für den tatsächlich produzierten Strom. Es bleibt jedoch die Frage inwieweit EE-Anlagen überhaupt „kapazitätsmarktfähig“ sind, da nur gesicherte Leistung gehandelt werden darf. Portfoliomanager könnten in der Praxis mit einem Mix aus ungesicherter EE-Leistung und gesicherter konventioneller Leistung agieren. Dann aber müssen gesicherte und ungesicherte Leistung unterschiedlich vergütet werden, da sie nicht die gleiche Wertigkeit besitzen. Auch hier müssen stabile Einkommensströme über langfristige Verträge erzeugt werden.

Quotenmodelle und Kapazitätsmärkte weisen den Nachteil auf, dass die Volatilität der Preise deutlich ansteigen kann. Daher ergeben sich nicht ausreichend robuste Preissignale an mögliche Investoren. Hierdurch sinkt die Investitionssicherheit gegenüber

⁴ Folglich werden EE-Anlagen nicht „marktfähiger“, sondern konventionelle Anlagen „marktunfähiger“.

der EEG-Vergütung. Beide Instrumente eignen sich mithin weniger als „Anschubinstrument“ und stellen somit keine geeignete Handlungsoption dar.

Ungeachtet dieser Ausführungen ist zurzeit nicht abschließend geklärt, inwieweit die Vollkostendeckung von EE-Anlagen tatsächlich über diese Instrumente gewährleistet werden kann.

3 Aufgabenstellung

Die Fragestellung besteht darin, aufbauend auf dem sogenannten Zellularen Ansatz sowohl Erzeuger als auch Verbraucher zu einem „netzfrendlichen“ Verhalten zu bewegen. Netzfrendlich heißt in diesem Fall, dass der in einer Region erzeugte Strom aus EE zeitgleich in derselben Region verbraucht wird. Kerngedanke dieser Idee ist es, über das Setzen ökonomischer Anreize (verbrauchs- und erzeugungsseitig) den erforderlichen Netzausbau auf ein Minimum zu begrenzen. Ergänzend dazu spielt die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs eine tragende Rolle, um Antworten auf die Frage über die momentane als auch langfristige Finanzierung von EE-Anlagen zu finden.

Dazu wird über agentenbasierte Simulation ein rechenfähiges Modell eines komplexen, realen, regionalen Energiemarktes erschaffen. Anhand von detaillierten Szenarioanalysen werden Verbraucher- und Erzeugerverhalten untersucht. Diese Daten dienen im Anschluss als Referenzszenario. Abweichend dazu werden weitere Szenarien simuliert, welche veränderte (Versorgungs-)Strukturen aufweisen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um Ansatzpunkte für Anreizmechanismen und Vergütungssysteme herauszuarbeiten.

4 Voruntersuchung Vermarktungssysteme

Im Rahmen von Voruntersuchungen alternativer Vermarktungssysteme von Strom aus dargebotsabhängigen EE wurden zwei exemplarische Nutzungsszenarien formuliert. Im Fokus der Betrachtungen stand der Neubau einer PV-Anlage und einer Onshore-Wind-Anlage. Über einen Zeitraum von 20 Jahren wurden die feste Einspeisvergütung nach EEG, das Marktprämienmodell und die regionale Direktvermarktung für diese Szenarien untersucht. Ein Überblick über die angenommenen spezifischen Parameter beider Szenarien ist der Tabelle 1 zu entnehmen. Für allgemeine Modellannahmen wurde auf das Weißbuch des BMWi zum zukünftigen Strommarktdesign zurückgegriffen. Darin werden u. a. steigende Strompreise unterstellt.

Tabelle 1: Parameter Nutzungsszenarien

	Szenario: PV	Szenario: Wind
Inbetriebnahme:	August 2015	Februar 2015
Anlagentyp:	Dachanlage, 20 kWp	Kleinanlage, 65 kW
Vollbenutzungsstunden:	900 h/a	1.600 h/a
Spez. Investitionskosten:	1.400 EUR/kW	3.000 EUR/kW
Stromgestehungskosten:	13,90 ct/kWh	11,97 ct/kWh
Strombezugspreis:	28,81 ct/kWh	28,81 ct/kWh
Eigenverbrauch:	4.000 kWh/a	50.000 kWh/a
Abnahmemenge (reg. DV):	8.000 kWh/a	25.000 kWh/a
Strompreis Abnehmer (reg. DV):	25 ct/kWh	20 ct/kWh

Szenario 1 – Photovoltaik

Das betrachtete Szenario für eine 20 kW PV-Dachanlage zeigt deutliche Unterschiede zwischen den betrachteten Vermarktungsalternativen. Bei der klassischen Festvergütung nach EEG und dem Marktprämienmodell ist ein kontinuierlicher Gewinnverlauf zu beobachten. Die Markt- und Managementprämie bringt der Direktvermarktung einen finanziellen Vorteil. Die regionale Direktvermarktung erreicht erst nach vier Jahren das gleiche Gewinnniveau wie die Festvergütung. Verluste durch die börsliche Eigenvermarktung großer Strommengen sind Grund für diese Stellung. Nach weiteren zwei Jahren gleichen sich auch die Gewinne zwischen der Direktvermarktung im Marktprämienmodell und der regionalen Veräußerung aus. Die nicht lukrative Eigenvermarktung an der Strombörse muss mit immer weniger Mengen in Anspruch genommen werden, was die Negativeinnahmen immer weiter senkt. Auch im weiteren Verlauf steigen die jährlichen Gewinne an.

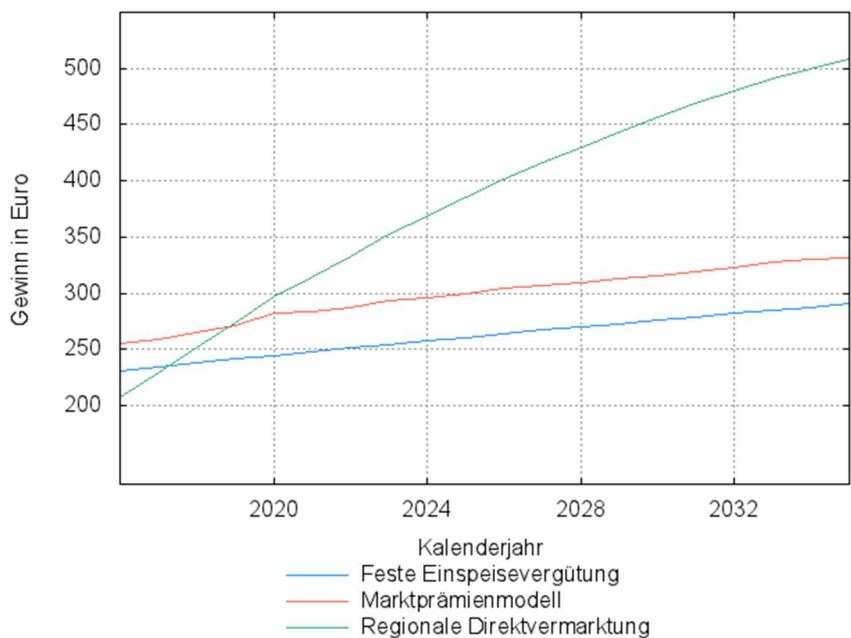


Abbildung 1: PV-Szenario, jährlicher Gewinn

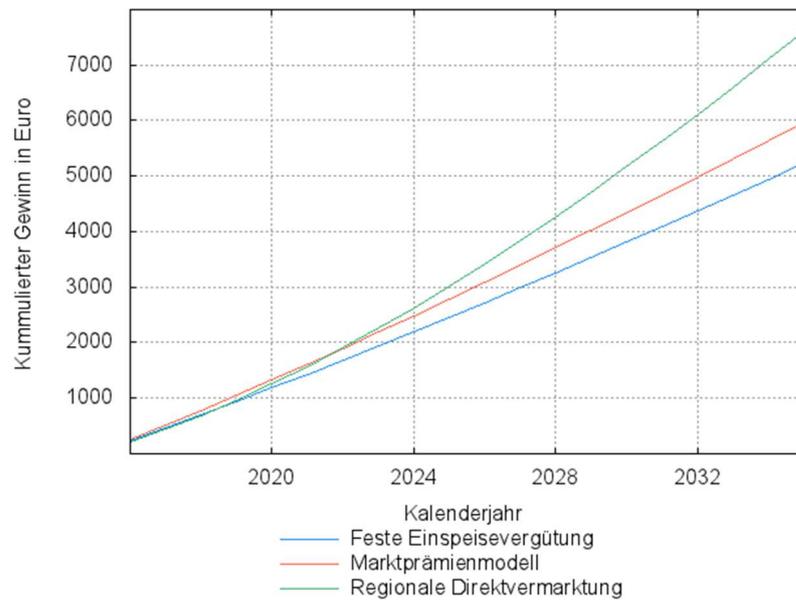


Abbildung 2: PV-Szenario, kumulierte Gewinne

Szenario 2 – Wind

Die regionale Direktvermarktung hat die ersten fünf Jahre die niedrigsten Gewinne zu verzeichnen. Somit besteht ein Defizit gegenüber der festen Einspeisevergütung nach EEG und dem Marktprämienmodell. Dies liegt vor allem an den Verlusten durch den direkten Vertrieb von Überproduktionen an der Börse. Die festgelegte Abnahmemenge von angrenzenden Abnehmern ermöglicht es ab dem sechsten Jahr höhere Gewinne gegenüber den anderen Vermarktungssystemen zu erzielen. Im Jahr 2024 übertreffen die kumulierten Erlöse der regionalen Direktvermarktung erstmals die der festen Einspeisevergütung. Im Jahr darauf sind die Gewinne auch gegenüber der Direktvermarktung nach Marktprämienmodell höher. Ab diesem Zeitpunkt ist die regionale Direktvermarktung die lukrativste Vermarktungsvariante aller betrachteten Systeme.

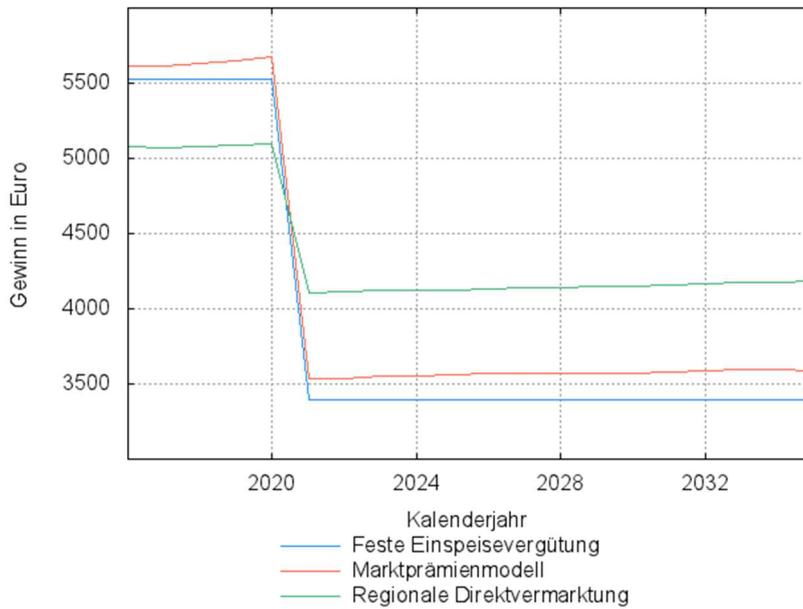


Abbildung 3: Wind-Szenario, jährlicher Gewinn

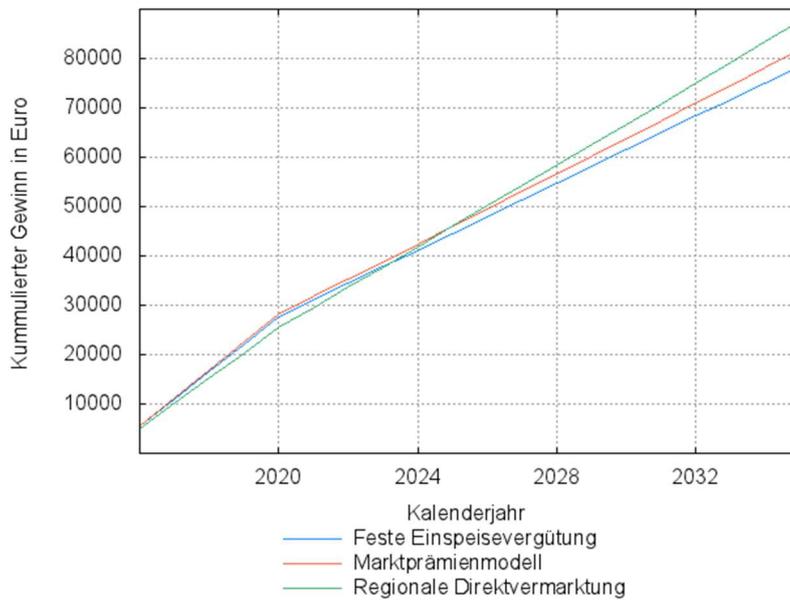


Abbildung 4: Wind-Szenario, kumulierte Gewinne

5 Fazit

Unabhängig vom Szenario zeigt sich, dass alle Vermarktungsalternativen Gewinne ermöglichen. Dabei spielt vor allem der Eigenverbrauch eine entscheidende Rolle. Börslicher Handel mit Überschussmengen, sollte generell nur in Hochpreiszeiten erfolgen. Für die ausgewählten Szenarien ermöglicht die regionale Direktvermarktung den höchsten kumulierten Gewinn. Auslaufende respektive sinkende Förderungen werden diesen Trend beeinflussen. Dieses Ergebnis beruht auf der fraglichen Prämisse steigender Strompreise. Die größten Potenziale für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb

bietet dennoch die regionale Direktvermarktung. Diese Erkenntnis gilt es aufzugreifen und in die weiterführenden Betrachtungen einzubeziehen.

Literatur

[Benz u.a. (2015)] VDE-Studie; „Der zellulare Ansatz“; Thomas Benz, Jörg Dickert, Maik Erbert, Niels Erdmann, Christopher Johae, Burkhard Katzenbach, Wolfgang Glaunsinger, Holger Müller, Peter Schegner, Jürgen Schwarz, Rainer Speh, Hanno Stagge, Markus Zdrallek, 2015

[Bode und Groscurth (2008)] Energiewirtschaftliche Tagesfragen; „Anreize für Investitionen in Anlagen zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien“; Sven Bode, Helmut-M. Groscurth, 2008, Ausgabe 7

[DLR, ISET, IFNE (2010)] Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global „Leitstudie 2010“, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit

[Kopp u.a. (2012)] Zeitschrift für Energiewirtschaft; „Können sich erneuerbare Energien langfristig auf wettbewerblich organisierten Strommärkten finanzieren?“; Oliver Kopp, Anke Eßer-Frey, Thorsten Engelhorn, 2012, Ausgabe 4, abgerufen über Springer-Link am 30.09.2015