



Effizient, umweltverträglich, dezentral

Neue Konzepte für die Nutzung von
biogenen Festbrennstoffen

Teil 2



**Energetische
Biomassenutzung**



**Energetische
Biomassenutzung**

Schriftenreihe des Förderprogramms
„Energetische Biomassenutzung“

BAND 17

**Effizient, umweltverträglich, dezentral –
Neue Konzepte für die Nutzung von biogenen
Festbrennstoffen**

Teil 2

Herausgegeben von

Daniela Thrän, Diana Pfeiffer

Gefördert durch



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Projektträger



Programmbegleitung



Impressum

Herausgeber

Daniela Thrän, Diana Pfeiffer

Kontakt

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
D-04347 Leipzig
Telefon: +49 (0)341 2434-554
Telefax: +49 (0)341 2434-133
E-Mail: diana.pfeiffer@dbfz.de
www.energetische-biomassenutzung.de

Geschäftsführung

Wissenschaftlicher Geschäftsführer:
Prof. Dr. mont. Michael Nelles
Administrativer Geschäftsführer:
Dipl.-Kfm. (FH) LL.M. Daniel Mayer

Redaktion

Programmbegleitung des Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“
www.energetische-biomassenutzung.de

Bildnachweis

Umschlag vorn: M. Dotzauer/DBFZ, Peter Franz/pixelio, Thinkabout/pixelio, Fraunhofer UMSICHT
Umschlag hinten: tutto62/pixelio, M. Dozauer/DBFZ, DBFZ, Gisela Peter/pixelio

Layout & Herstellung

Steffen Kronberg
Angela Gröber

Druck

FISCHER druck&medien, Leipzig

Förderung

Im Jahr 2008 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB, ehemals BMU) initiiert, wird das Förderprogramm seit 2014 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) weitergeführt.

ISSN 2199-2762

© Copyright: Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieses Druckerzeugnisses darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, die Aufnahme in elektronische Datenbanken und die Vervielfältigung auf anderen digitalen Datenträgern.

Alle Rechte vorbehalten.

© DBFZ 2014

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	7
Energieholz und Biodiversität	8
Feinstaubemissionen aus biomassebefeuerten Kleinf Feuerungsanlagen	22
BioKommunal - Netzwerk und Mobilisierungsmaßnahmen für einen verstärkten Einsatz von Bioenergie in Kommunen	32
Demonstration von Maßnahmen zur Emissionsminderung an Biomasse-Kleinf Feuerungen	44
Optimierung regionaler Kreisläufe zur Bereitstellung biogener Brennstoffe für Energieerzeugungsanlagen am Beispiel des Biomassehofs Achental	60
Entwicklung von Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe unter Einsatz der Strömungssimulation	74
LignoBioFuel - Verfahren zur Herstellung von Bioagglomeraten auf der Basis von Lignin	85
Der Einfluss von Temperatur, Verweilzeit und Aufheizrate in der Pyrolyse auf die Bildung von Benzol und anderen Teerverbindungen	100
Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsmodul bestehend aus schadstoffarmem Pelletbrenner und wartungsfreiem Freikolben-Stirlingmotor	111

Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser,

Energie aus Biomasse ist weltweit und auch in Deutschland die quantitativ bedeutendste erneuerbare Energieform – rund zwei Drittel des erneuerbaren Primärenergieverbrauchs werden hierzulande durch Bioenergie abgedeckt. Biogene Festbrennstoffe sind dabei traditionell die Stütze der erneuerbaren Wärmebereitstellung – in vielen Regionen der Welt sogar die einzige Energiequelle.

Der in Deutschland politisch gewollte und von weiten Teilen der Bevölkerung mitgetragene Umbau der Energieversorgung sowie gestiegene Preise für Öl und Gas haben in den letzten 10 bis 15 Jahren zu einem nennenswerten Ausbau der Bioenergienutzung geführt. Damit verbunden rücken die Fragen nach den potentiellen Schattenseiten der Bioenergie verstärkt in den Vordergrund. Bei der Nutzung von Festbrennstoffen sind dies insbesondere die für die nahe Zukunft absehbare Holzversorgungslücke mit steigenden Preisen für Holzprodukte aller Qualitäten und die Feinstaubemissionen, die weitergehend zu mindern sind.

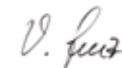
Das Bundesumweltministerium hat in den vergangenen Jahren von 2009-2013 mit seinem Förderprogramm zur „Optimierung der energetischen Biomassenutzung“ zu diesen Themen neun spannende Projekte gefördert. Seit 2014 wird das Programm vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) fortgeführt. Die im zweiten Teil der Schriftenreihe „Effizient, umweltverträglich, dezentral – Neue Konzepte für die Nutzung von biogenen Festbrennstoffen“ vorgestellten neun Vorhaben widmen sich sowohl der Rohstoffseite, als auch der technologischen Weiterentwicklung sowie der Integration von Bioenergieanlagen im kommunalen Umfeld. Kurzumtriebsplantagen galten einige Zeit als vielversprechende Lösung des wachsenden Holzbedarfs. Mittlerweile wurde deutlich, dass in dicht besiedelten Regionen diese Art der Rohstoffgewinnung in größerem Flächenumfang wahrscheinlich nur mit zusätzlichen Synergieeffekten und Ökosystemdienstleistungen, wie der untersuchten Steigerung der Biodiversität, vertretbar sein könnte. Mit der Nutzbarmachung von Lignin aus Zellstoffgewinnungsprozessen für hochwertige energetische Anwendungen wird der politisch gewollten Erschließung von Reststoffen und Nebenprodukten entsprochen. Drei der geförderten Projekte beschäftigen sich mit den verschiedenen Aspekten der Feinstaubminderung an Einzelraumfeu-

erstätten und Biomassekesseln. Mit einem Projekt zur Mikro-KWK sowie zwei Projekten zur Optimierung der Vergasung wurden besonders zukunftssträchtige Ansätze verfolgt. Den wichtigen Schritt von der Forschung zur Umsetzung sowie zur Akzeptanzgewinnung im realen Umfeld betrachtete ein Vorhaben, welches Optionen zu einer verbesserten Integration der Bioenergienutzung im kommunalen Umfeld untersuchte.

Allen Projektverantwortlichen des Förderprogramms ist an dieser Stelle ausdrücklich für ihr Engagement zur gemeinsamen Erstellung von Messhandbüchern, wie der „Messmethodensammlung Feinstaub“ (zwölf Autoren aus elf Institutionen), sowie harmonisierten Messverfahren und der Teilnahme an den regelmäßigen Statuskonferenzen im Rahmen dieses Förderprogramms zu danken. Letztlich kann die Forschung zur Optimierung von Technologien nur dann effizient vorangetrieben werden, wenn Fortschritte in den verschiedenen Projekten nachvollziehbar und einheitlich gemessen und dokumentiert werden können – und dies zunehmend nicht nur im nationalen, sondern auch im europäischen Kontext.

Liebe Leserinnen und Leser freuen Sie sich in diesem Sammelband auf eine spannende Lektüre zu Lösungsansätzen auf dem Weg der Transformation der quantitativen Bioenergienutzung hin zu einer mehr auf Qualität ausgerichteten Nutzung. Dabei steht neben der verbesserten Nachhaltigkeit der Brennstoffgewinnung die Entwicklung effizienter Technologieoptionen, die Erprobung neuer Demonstrationsanlagen und eine regional angepasste Integration der Nutzung im Vordergrund.

Ich wünsche Ihnen viele neue Erkenntnisse und Anregungen zu vielversprechenden eigenen Ideen!



Dr.-Ing. Volker Lenz

Bereichsleiter „Thermo-chemische Konversion“ am DBFZ und
Leiter der Arbeitsgruppe „Technologien - Emissionsarme Kleinfeuerungsanlagen“





Foto: Naturstiftung David

Energieholz und Biodiversität

Dierk Conrady¹, Adrian Johst¹, Sabine Kathke¹, Wolfram Rösch¹, Erik Findeisen⁴, Thomas Hering⁵, Annett Baasch², Karen Runge², Norbert Grosser³, Valeska Krebs³

Vorhaben: Energieholz und Biodiversität – Die Nutzung von Energieholz als Ansatz zur Erhaltung und Entwicklung national bedeutsamer Lebensräume

FKZ-Nr.: 03KB020

Laufzeit: 01.07.2009 – 30.09.2013

Zuwendungssumme: 669.965 €

Koordination:

¹ Naturstiftung David
Trommsdorffstr. 5, 99084 Erfurt
www.naturstiftung.de

Projektpartner:

² Hochschule Anhalt (FH), Fachbereich 1 (LOEL)
Prof. Dr. habil. Sabine Tischew
Strenzfelder Allee 28, 06406 Bernburg

³ Fachhochschule Erfurt, Fakultät Landschaftsarchitektur, Gartenbau und Forst
Prof. Dr. habil. Norbert Grosser
Altonaer Straße 25 (Leipziger Straße 77), 99085 Erfurt

Assoziierte Projektpartner:

⁴ Forsttechnisches Ingenieur- und Sachverständigenbüro Findeisen & Partner
Prof. Erik Findeisen
Herderstr. 42, 98693 Ilmenau

⁵ Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Zentrum nachwachsende Rohstoffe
Thomas Hering
Apoldaerstr. 4, 07778 Dornburg

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Stefan Majer
Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig



Kontakt:

Dr. Dierk Conrady
Telefon: +49 (0)361 5550330
E-Mail: post@naturstiftung-david.de

Dierk Conrady (Projektleiter):

Die energetische Nutzung von Landschaftspflegeholz hat ein hohes Potenzial, ist aber gleichzeitig eine große Herausforderung. Dies gilt auch für die Naturschutzseite, auf der immer noch ein Nachholbedarf über Erfahrungen mit Technik und Ökonomie besteht.

Zusammenfassung

Mit dem praxisorientierten Verbundvorhaben „Energieholz und Biodiversität“ wurden Synergien zwischen dem Schutz der Artenvielfalt und der Verbesserung des Klimaschutzes durch die Gewinnung von Energieholz aufgezeigt sowie das Optimierungspotenzial ermittelt und erschlossen. Im Mittelpunkt des Projektes stand die Beerntung des Gehölzaufwuchses von 35 repräsentativ ausgewählten Naturschutzflächen mit für Deutschland typischen Lebensraumtypen des Offenlandes in Thüringen und Brandenburg. Dabei wurde der Zeitaufwand für die Abstimmung, Vergabe und Umsetzung der Maßnahmen aufgenommen. Drei Methoden für die Abschätzung des Biomassepotenzials wurden (weiter-)entwickelt und bewertet. Bei der Beerntung wurden 16 unterschiedliche Verfahrensketten getestet und ökonomisch detailliert bilanziert. Für fast alle Maßnahmen wurden die Technikfolgen und die naturschutzfachliche Effizienz untersucht. Bei ausgewählten Beerntungen erfolgten darüber hinaus eine Analyse der Hackschnitzelqualität sowie eine Treibhausgasbilanzierung. Das gesamte Vorhaben war eingebettet in eine umfassende projektbegleitende Informationsarbeit.

Summary

The practice-oriented joint project „Biodiversity and wood fuel“ aimed to show synergies between biodiversity conservation and climate protection by using woody biomass as fuel. Furthermore, the project sought to identify and develop potentials of optimization in this context. The focus of the project was to harvest woody biomass on 35 nature reserves or other protected areas. These areas are representative for open landscapes in Germany and are located in Brandenburg and Thuringia. During the management measures all efforts for coordination, contracting and realization of harvesting the woody biomass were recorded. To assess the woody biomass potential before harvesting, three different methods were developed or enhanced and evaluated. To harvest woody biomass for woodchip production, 16 different process lines using different technologies and logistics were tested and economical balances were calculated. Scientific investigations with regard to ecological efforts on species and communities (vegetation surveys and faunistic investigations) and

to impacts of technology took place in nearly all project areas. Some selected management measures were also analysed in terms of quality of the provided woodchips and with regard to balances of greenhouse gases. The entire project was integrated into a comprehensive project-related information work.

Einleitung

Die Biomasse-Strategie der Bundesregierung kann sich bei Beachtung bestimmter Rahmenbedingungen positiv auf die Artenvielfalt auswirken und somit die Ziele der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt (BMU 2007) unterstützen: Viele Pflanzen-, Tierarten und Lebensgemeinschaften in naturschutzfachlich wertvollen Lebensraumtypen des Offen- und Halboffenlandes sind durch Gehölzsukzession gefährdet. Die Entwicklung der Gehölze ist dabei eine Folge von Nutzungsveränderungen auf diesen Flächen, wie z. B. der zeitweiligen Einstellung der Beweidung. Die Entnahme der Gehölzsukzession ermöglicht die Wiederaufnahme der ursprünglichen Nutzungsform, fördert also die Entwicklung hin zum ursprünglichen, naturschutzfachlich wertvollen Biotoptyp mit seinen Lebensgemeinschaften aus meist gefährdeten Arten und schafft gleichzeitig Potenziale für eine energetische Verwertung.

Der Kern des Vorhabens „Energieholz und Biodiversität“ war die wissenschaftlich begleitete und wirtschaftlich attraktive energetische Nutzung des Landschaftspflegeholzes auf für Deutschland repräsentativen Naturschutzflächen unter Berücksichtigung verschiedener Ernte-, Hack- und Logistikketten. Am Beispiel von 35 naturschutzfachlich wertvollen Modellflächen in Thüringen und Brandenburg wurden folgende Aspekte der energetischen Verwertung von Landschaftspflegeholz analysiert, bewertet, weiterentwickelt bzw. das Optimierungspotenzial untersucht (Abbildung 1):

- der verwaltungstechnische Aufwand (Teilprojekt 1)
- Ansätze zur Biomassepotenzialbestimmung (Teilprojekt 2)
- aktuell eingesetzte Bereitstellungstechnologien (Wald, Kurzumtriebsplantagen) und kostengünstige Verfahren in der Ernte und Aufarbeitung des Landschaftspflegeholzes (Teilprojekt 3)
- die Qualitätsansprüche sowie die Brennstoffeigenschaften der Hackschnitzel in Abhängigkeit von der Aufbereitungstechnologie (Teilprojekt 4)
- der naturschutzfachlichen Erfolg und potentielle Technikfolgen sowie davon abgeleitete Pflegeanleitungen für die Lebensraumtypen (Teilprojekt 5)
- die Treibhausgasbilanzen unterschiedlicher Energieholzbereitstellungspfade in Relation zur Treibhausgaseinsparung (Teilprojekt 6)

Das Gesamtvorhaben wurde gefördert vom BMUB im Rahmen der Klimaschutzinitiative nach der Förderrichtlinie „Energetische Biomassenutzung“, vom Freistaat Thüringen und Land Brandenburg mit EU-kofinanziertes Programmen und von der Stiftung NaturSchutz-Fonds Brandenburg.

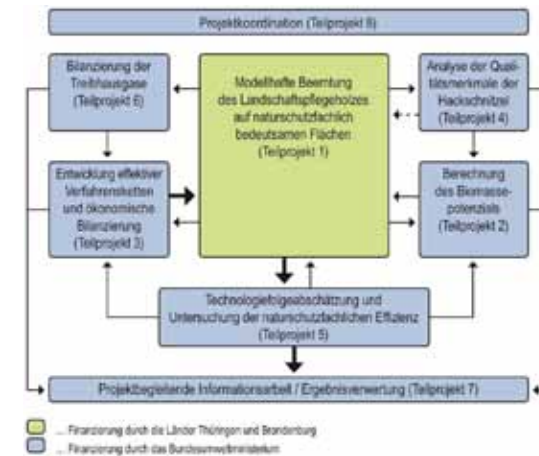


Abbildung 1: Strukturplan des Projekts „Energieholz und Biodiversität“

Methoden und Ergebnisse

Biotoptypen der Modellflächen

Der Schwerpunkt der insgesamt 35 in den Winterhalbjahren 2009/10 bis 2013/14 beernteten Modellflächen lag auf den trockenen Biotoptypen Trockenrasen und Heiden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Biotoptypen der Modellflächen in Thüringen und Brandenburg

Biotoptyp	Thüringen	Brandenburg
Halbtrockenrasen	12	
Sand- / Halbtrockenrasen		6
Heide	2	1
Mesophiles Grünland	9	
Lesesteinriegel	2	
Hecken	1	2

Abstimmung und Umsetzung der Maßnahmen

Für einen Überblick über den Zeitaufwand der einzelnen Arbeitsschritte im Teilprojekt „Vorabstimmung, Ausschreibung und Umsetzung“ wurden für jeden einzelnen Schritt für jede Modellfläche der Zeitaufwand bestimmt, getrennt nach Zeitaufwand der Naturstiftung David (Projektträger) sowie der regionalen Verwaltung (Hauptansprechpartner auf jeder Modellfläche; Tabelle 2). Aufgrund der erheblichen Unterschiede im Zeitaufwand zwischen den Flächen wurde neben dem Mittelwert auch der Median angegeben.

Tabelle 2: Arbeitsaufwand für die einzelnen Abstimmungsschritte von der Vorbereitung bis zur Abnahme der Maßnahmenumsetzung (*Anträge auf Nutzungsartenänderung nur in Thüringen)

Arbeitsschritt	Mittelwert [h]	Median [h]	Spanne [h]
Vorbereitung	25	23	7 – 84
Eigentümergebarung	40	8	0 – 460
Nutzungsartenänderung*	5	0	0 – 60
Ausschreibung / Umsetzung	74	66	34 – 180
Gesamtaufwand	142	98	58 – 679

Der Aufwand für Vorbereitung und Abstimmung einer Maßnahme zur Entnahme holzigen Landschaftspflegegutes ist mit im Mittel 142 Stunden grundsätzlich sehr hoch. Dies liegt im Naturschutzwert der Fläche und der notwendigen Beteiligung einer Vielzahl von Akteuren mit teilweise unterschiedlichen Interessen begründet. Der zeitliche Aufwand lässt sich in Einzelfällen reduzieren – bleibt jedoch insgesamt hoch. Hervorzuheben ist, dass dieser hohe Abstimmungsaufwand nicht aus der energetischen Verwertung des Holzes resultiert, sondern allein in der Durchführung der (vom Naturschutz erwünschten) Gehölzernte begründet liegt.

Aus Unternehmersicht wird die Energieholzgewinnung von Naturschutzflächen aufgrund der sehr spezifischen Anforderungen des Naturschutzes (z. B. generell hoher Abstimmungsaufwand) und insbesondere wegen der oft nicht gegebenen Kostendeckung aus dem Verkauf der Hackschnitzel kurz- bis mittelfristig kein eigenständiges Geschäftsfeld sein. Dies wurde nicht zuletzt auch im Rahmen des Projektes deutlich: Aufgrund der immer weiter wachsenden Anforderungen des Naturschutzes haben sich immer weniger Unternehmen an den Ausschreibungen beteiligt. Wegen der teilweise schwer kalkulierbaren Nachpflegeaufwendungen und der daraus resultierenden kalkulatorischen Unsicherheit sind die Angebotssummen zudem während des Projektverlaufes deutlich gestiegen. Hackschnitzel aus dem Wald oder von Kurzumtriebsplantagen lassen sich deutlich schneller, einfacher und unbürokratischer gewinnen. Die im Projektantrag postulierten „neuen Verdienstmöglichkeiten im ländlichen Raum“ im Hinblick auf die energetische Nutzung des Landschaftspflegewaldes haben sich in den letzten Jahren zwar verbessert, sind aber insgesamt hinter den Erwartungen zurückgeblieben.

Trotz der schwierigen unternehmerischen Rahmenbedingungen hat die Verknüpfung von Landschaftspflege mit der energetischen Verwertung des Hackgutes gleichwohl ein großes Potenzial – und zwar vor allem aus dem Blickwinkel von Naturschutzbehörden und Naturschutzflächeneigentümern. Diese sollten alleine aus ökonomischen Gründen ein großes Eigeninteresse an einer energetischen Verwertung des Hackgutes und dem damit einhergehenden Technologieeinsatz haben.

Berechnung des Biomassepotenzials

Die Ermittlung der Dendromasse im Vorfeld der Maßnahmen war für eine Kalkulation der Kosten von hoher Bedeutung. Die Herausforderung bestand in der flächigen Ausprägung sehr heterogener Gehölzstrukturen auf den Landschaftspflegeflächen, für deren Potenzialabschätzung bisher keine Verfahren vorlagen. Lediglich für linear ausgeprägte Gehölz-

strukturen (Hecken) bestanden bei Projektstart erste Verfahrensansätze, die auf der Ausweisung und Aufnahme von Referenzflächen beruhten. Das Ziel dieses Teilprojekts bestand deshalb darin, ein wissenschaftlich abgesichertes Konzept durch die Weiterentwicklung bestehender Methoden zur Biomassepotenzialberechnung sowie durch die Entwicklung und den Test neuer Methoden zu erarbeiten. Aus den Ergebnissen sollten durch Vereinfachung praxistaugliche Konzepte abgeleitet werden, die auf Basis einfacher und im Gelände bestimmbarer „Gehölzklassen“ eine Zuordnung des jeweiligen Biomassepotenzials ermöglichen (Entwicklung einfacher Biomassetafeln). Der Fehler in der Abschätzung sollte nach Möglichkeit $\pm 10\%$ der tatsächlich geernteten Biomasse nicht überschreiten.

Das für Hecken erprobte Referenzflächenverfahren wurde vom Projektträger aufgenommen und weiterentwickelt sowie mit der Entwicklung einfacher Biomassetafeln als praxistaugliches Konzept vereinfacht. Das Verfahren erwies sich als gut geeignet. Die Methodik ist mittlerweile für Biotoptypen mit hoher Stichprobenzahl ausreichend genau und kann von Naturschutzbehörden und Unternehmern angewendet werden. Eine forstliche Vorbildung ist dabei von Vorteil.

Als zwei weitere Konzepte wurden in diesem umsetzungsorientierten Vorhaben ein forstliches Stichprobenverfahren und ein luftbildgestütztes Verfahren getestet (Befliegung mit einer Drohne, Abbildung 2). Das forstliche Stichprobenverfahren ist für die Bestimmung der Biomasse auf Landschaftspflegeflächen wenig geeignet, da es eine hohe Fehleranzahl aufweist, kostenintensiv und arbeitsaufwendig ist. Das luftbildgestützte Verfahren bietet eine Genauigkeit entsprechend den Ergebnissen des Referenzflächenverfahrens. Diese Methodik sollte weiterentwickelt werden – da es sich perspektivisch als das ökonomisch günstigste Verfahren abzeichnet. Handlungsbedarf besteht bei der Weiterentwicklung der Sensoren zur Erkennung bzw. zur detaillierten Beschreibung der Gehölzbestände sowie in der weitgehenden Automatisierung der Auswertungsschritte. Derzeit hat das Verfahren aber den Nachteil, dass es zwingend an einen externen Dienstleister gebunden ist.



Abbildung 2: Oktokopterflug zur Bestimmung der Biomasse (Foto: Naturstiftung David)

Entwicklung effektiver Verfahrensketten und ökonomische Bilanzierung

Bei der Beerntung der 35 Modellflächen wurden insgesamt elf unterschiedliche Ernte- und Hacktechnologien in 16 verschiedenen Verfahrensketten getestet und ökonomisch bilanziert (vgl. Johst et al. 2014). Dem Einsatz vorausgegangen war eine umfassende Recherche sinnvoll anwendbarer Technologieansätze.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es keine optimale und überall einsetzbare Verfahrenskette gibt. Je nach Zustand der Fläche bieten sich unterschiedliche Technologien an. Besonders bewährt haben sich im Vorhaben:

- die klassische Verfahrenskette (Motormanuelle Ernte – Forstlicher Rückezug [Forwarder] – Hacken und Transport)
- die teilmechanisierte Verfahrenskette (Motormanuelle Ernte – Vorrücken mit Seilschlepper/Seilwinde – Forwarder – Hacken und Transport)
- die hochmechanisierte Verfahrenskette mit Schreitbagger und Aggregaten
- sowie zwei verschiedene Prototypen des „Aufnehmenden Mulchers“ (Abbildung 3).

Bei der Auswahl der Technik sind besonders das Stückmasse-Verhältnis, die Verteilung der Gehölze auf der Fläche sowie Befahrbarkeit, Bodentragfähigkeit, Mikrorelief, Hangneigung und -länge, und die Erreichbarkeit der Fläche von Bedeutung. Aus den jeweiligen Kenngrößen kann zukünftig die für die jeweilige Fläche geeignete optimale Beerntungstechnologie abgeleitet werden.

Der technisch sinnvolle und naturschutzverträgliche Einsatz von teil- und hochmechanisierten Ernte- und Hacktechnologien scheitert derzeit oft noch an der mangelnden regionalen Verfügbarkeit sowie an der vergleichsweise geringen Größe der zu beerntenden Naturschutzflächen. Hinzu kommt, dass die vorhandenen Erntetechnologien v. a. für den Einsatz in Waldlebensräumen ausgelegt sind. Die naturschutzfachlichen Ziele einer Beerntung im Wald und im Offenland unterscheiden sich jedoch grundlegend. Während im Wald i. d. R. ausschließlich Bäume genutzt werden, ist im Offenland der Gebüschanteil hoch. Im Wald



Abbildung 3: Einsatz der hochmechanisierten Verfahrensketten „aufnehmender Mulcher“ (links) und Schreitbagger (rechts; Foto: Naturstiftung David und Seeber, Hildburghausen)

soll möglichst viel Rest- und Totholz belassen werden, im Offenland muss möglichst alles holzige Restmaterial beseitigt werden, um den Nährstoffeintrag zu minimieren. Sowohl die Technologie als auch die – v. a. im Wald tätigen – Unternehmer/innen sind daran (noch) nicht angepasst. Notwendig sind deshalb die Weiterentwicklung der Ernte- und Hacktechnologie, aber auch die Weiterbildung der Unternehmer/innen und deren Mitarbeiter/innen. Die Besonderheit der ökonomischen Bilanzierung war die umfassende finanzielle Analyse jedes einzelnen Arbeitsschrittes der getesteten elf Technologien bzw. 16 unterschiedlichen Verfahrensketten. Die Fülle von Einzeldaten liefern wichtige Vergleichsgrößen, um den Einsatz der Technologien bzw. Verfahrensketten zu optimieren und damit langfristig Kosten für die Freistellung von Offenlandlebensräumen zu reduzieren.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass durch die energetische Nutzung von Landschaftspflegeholz und den daraus resultierenden Verkaufserlösen in jedem Fall eine erhebliche Reduzierung der Freistellungskosten naturschutzfachlich bedeutsamer Lebensräume erreicht werden kann. Eine vollständige Kostendeckung wird vorerst nur in Ausnahmefällen möglich sein (z. B. auf großen, ebenen Flächen mit hoher Dendromasse). Gegenüber dem bisher im Naturschutz üblichen Verbrennen der Holzbiomasse auf der Fläche können durch die energetische Nutzung im Durchschnitt ein Drittel der Kosten eingespart werden.

Generell werden hier weitere Optimierungspotenziale gesehen: Durch eine Optimierung der Ernte- und Hacktechnologie für gebüschreiche Flächen kann eine Reduzierung der Kosten erreicht werden. Da es sich bei den meisten freizustellenden Naturschutzflächen um trockene Flächen mit guter Bodentragfähigkeit handelt, wird insbesondere in der Weiterentwicklung und teilweisen Neukonzipierung des „Aufnehmenden Mulchers“ ein großes Optimierungspotenzial gesehen. Vor allem die Verknüpfung der Arbeitsschritte „Ernte“, „Hacken“ und „Transport sowie Verladung des Hackgutes“ bietet hier ein deutliches Einsparpotenzial. Ziel sollte dabei eine Reduzierung der Einsatzkosten auf rund 2.500 €/ha bei einer Erntemenge von rund 200 Srm/ha sein. Für Flächen in Steilhanglagen sollte hingegen die Schreitbaggertechnologie weiterentwickelt werden.

Den Optimierungspotenzialen sind jedoch auch Grenzen gesetzt. Auf Flächen mit besonders ungünstigen Rahmenbedingungen (sehr steil oder sehr feucht, niedrige Stückmasse) wird die energetische Nutzung des zu beerntenden Landschaftspflegeholzes auch mittel- bis langfristig schwerlich kostendeckend möglich sein. Ein Großteil des aktuellen Handlungsbedarfes aus Sicht des Naturschutzes betrifft jedoch den Erhalt von Halbtrockenrasen, Sandmagerrasen und Streuobstwiesen. Hier ist ein entsprechender Technologieeinsatz sowohl aus technischen als auch ökonomischen Gründen sinnvoll.

Qualitätsmerkmale der Hackschnitzel

Für eine Analyse der Qualitätsmerkmale der Hackschnitzel wurden aus der gehackten Dendromasse von im Vorfeld ausgesuchten Modellflächen repräsentative Proben gezogen und die Brennstoffeigenschaften der Hackschnitzel in den unterschiedlichen Lebensräumen bestimmt. Die Analysen beinhalteten physikalisch-mechanische und chemisch-stoffliche Parameter. Im Anschluss wurden die Ergebnisse in Bezug auf die technische und emissionsseitige Eignung der Brennstoffe eingeschätzt. Die Klassifizierung von biogenen Festbrennstoffen wurde gemäß der DIN EN 14961 durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Qualität der Hackschnitzel aus Landschaftspflegeholz besser ist als ihr Ruf. Mit Ausnahme der Aerosole gibt es aus Sicht des Emissionsschutzes keine Einschränkungen. Problematisch ist in einigen Fällen die technische Eignung im Hinblick auf Wassergehalt,

Partikelgröße und Aschegehalt. Durch eine Reduzierung des Wassergehalts (längere Lagerung als Vollholz auf der Fläche) und der Partikelgröße (weniger Übergrößen) ließe sich ein um über 20 % höherer Erlös erzielen. Durch die Hackung mit Siebeinsätzen bzw. weitere Konfektionierung mit Siebvorrichtungen könnten die Hackschnitzelqualitäten voneinander getrennt und zu unterschiedlichen Preisen vermarktet werden. Lediglich der hohe Aschegehalt aufgrund des vergleichsweise hohen Rindenanteils lässt sich nicht einfach verringern. Dies ist für die Verwertung der Hackschnitzel jedoch kein Ausschlusskriterium (kein emissionsseitiges Problem) und schlägt sich deshalb „nur“ in einem geringeren Verkaufserlös nieder. Grundsätzlich eignen sich Hackschnitzel aus der Landschaftspflege sehr gut für die energetische Nutzung.

Bilanzierung der Treibhausgase

Die Bilanzierung der THG-Emissionen (d. h. CO₂-Äquivalente) erfolgte mithilfe des Instruments der Ökobilanzierung (LCA). Für die Erstellung einer solchen Bilanz existieren die international gültigen Normen DIN EN ISO 14040 und ISO 14044. Dabei wurden zuerst die Systemgrenzen definiert: Verfügbarmachung und Aufarbeitung der holzigen Biomasse sowie Umschlag, Lagerung und Transport der Hackschnitzel.

Die Ergebnisse der Bilanzierung der Treibhausgase fielen sehr positiv aus. Es konnte nachgewiesen werden, dass der zusätzliche CO₂-Ausstoß für die Bereitstellung der Hackschnitzel aus der Landschaftspflege im Durchschnitt lediglich 3 % der eingesparten Emissionen aus fossilen Energieträgern beträgt. Es lassen sich leichte Tendenzen der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit des Mechanisierungsgrades der eingesetzten Verfahrenskette erkennen. Eine eindeutige Aussage kann hierzu jedoch nicht getroffen werden. Dies liegt einerseits an der geringen Stichprobenzahl innerhalb des jeweiligen Mechanisierungsgrades, andererseits sind die Kraftstoffverbräuche bei der Holzernte von zahlreichen weiteren Faktoren abhängig (z. B. Hangneigung, Verteilung des Holzes auf der Fläche).

Mit diesen Ergebnissen wird das Vorurteil widerlegt, dass der mit der energetischen Verwertung des Landschaftspflegeholzes einhergehende Technischeinsatz mehr fossil gebundenes CO₂ ausstößt als am Ende durch die Energieholznutzung als Heizölsubstitut eingespart wird. Mit der energetischen Verwertung des Landschaftspflegeholzes der 35 im Projekt freigestellten Maßnahmeflächen konnten insgesamt rund 8.334 t CO₂-Äq. eingespart werden, im Vergleich zur Verwendung fossiler Energieträger (Heizöl).

Zusätzlich unterstreichen die sehr günstigen THG-Bilanzen die Nachhaltigkeitsaspekte. Mit der durchschnittlichen Einsparung von 97 % der Treibhausgase sind die Vorgaben von 60 % durch den Rat für nachhaltige Entwicklung erfüllt (Rat für nachhaltige Entwicklung 2013).

Technikfolgen und naturschutzfachliche Effizienz

Ein Schwerpunkt des Gesamtvorhabens lag auf dem Teilprojekt Technikfolgeabschätzung und naturschutzfachliche Effizienz. Dabei erfolgte die zoologische und vegetationskundliche Bewertung anhand eines Vorher-Nachher-Vergleichs unter Berücksichtigung der Entwicklung hin zu dem für jede Modellfläche definierten Zielbiotop (vgl. Baasch et al. 2013, Grosser et al. 2013).

Die Technikfolgeabschätzung ergab keine direkten negativen Folgen für den Naturschutzwert der untersuchten Flächen durch den für die energetische Verwertung des Landschaftspflegeholzes notwendigen Technischeinsatz. Beurteilt wurden die potenziellen Folgen anhand der Parameter „Höhe der Restholzauflagen“, „Anteil vegetationsfreier Bereiche“, „Ausprägung der Fahrspuren“ und „Höhe der verbliebenen Gehölzstümpfe bzw. -strünke“. Kritisch für die aus Naturschutzsicht zwingend erforderliche Folgepflege (Beweidung), die für das Erreichen des Zielbiotops notwendig ist, wurden die teilweise hohen Restholzaufgaben und hohen Stubben gesehen (Abbildung 4). Hier ist eine Optimierung insbesondere der teil- und vollmechanisierten Beerntung erforderlich.

In der naturschutzfachlichen Effizienz der realisierten Freistellungsmaßnahmen zeigten sich positive Tendenzen für eine Entwicklung der Flächen hin zu den jeweiligen Zielbiotopen, die aber aufgrund der Kürze der Projektlaufzeit nicht statistisch abgesichert werden konnten. Dies steht jedoch nicht im Zusammenhang mit der energetischen Nutzung des Hackgutes. Der naturschutzfachliche Erfolg der Freistellung einer Fläche ist vielmehr abhängig von der möglichst schnellen und intensiven Beweidung nach der Beerntung. Hier gilt es die Fördersysteme für die Beweidung zu optimieren – da eine Forderung im Jahr der Holzbeerntung i. d. R. nicht gewährt wird. Zudem treten aufgrund der teilweise Jahrzehnte währenden Unternutzung und der damit einhergehenden Nährstoffakkumulation nach Freistellung der Flächen in den ersten Jahren verstärkt auch ruderalen, nährstoffliebenden Pflanzenarten auf. Erst nach einer Nährstoffauflockerung durch angepasste Beweidung wird sich das typische Artenspektrum auf den freigestellten Flächen einstellen. Da dies über einen längeren Zeitraum erfolgt, konnte diese (erwartete) Entwicklung während der Projektlaufzeit nur in leichten Tendenzen nachgewiesen werden.

Naturschutzfachlich wertvolle Offenlandlebensräume sind in der Regel nicht allein durch eine Energieholznutzung wiederherstellbar bzw. zu entwickeln. Eine Energieholznutzung



Abbildung 4: Restholzaufgaben und hohe Gebüschstubben nach der Ernte des Landschaftspflegeholzes behindern die Folgenutzung (Fotos: Hochschule Anhalt)

kann jedoch die Voraussetzungen für eine Erhaltung und Entwicklung von Offenlandlebensräumen und ihren charakteristischen Arten schaffen. Entscheidend ist, dass:

- die naturschutzfachlichen Anforderungen an die Ausführung der Freistellungsmaßnahmen hinreichend definiert und erfüllt werden,
- die Entwicklungs- und Folgepflege hinreichend gesichert ist sowie gefördert wird,
- die Flächen (noch) über hinreichendes Entwicklungspotenzial verfügen.

Fazit und Schlussfolgerungen

Die energetische Nutzung von Landschaftspflegeholz bietet eine ganze Reihe von Vorteilen. Es besteht weder eine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion noch müssen Biomasse oder Biomassesträger importiert werden. Gleichzeitig existiert ein hoher Bedarf: Die bundesweit hohe Zahl an zu erhaltenden Offenlandlebensräumen – beispielsweise mindestens 32.000 ha in Thüringen (Lux et al. 2014) und mindestens 11.000 ha allein auf ehemaligen und aktiv genutzten Militärfächen in Brandenburg (Lehmann 2012) – mit hohem Gebüschanteil zeigt die Notwendigkeit, Verfahren für einen möglichst effizienten Erhalt der Lebensräume zu entwickeln und in der Praxis umzusetzen. Weiterhin zeigen die Ergebnisse des Projektes auf vielfältige Art und Weise, dass durch eine energetische Verwertung des von Naturschutzflächen geernteten Landschaftspflegeholzes Synergien zwischen dem Erhalt der Artenvielfalt (Biodiversität) und dem Klimaschutz (Ersatz fossiler Energieträger durch klimaneutrales Energieholz) genutzt werden können. Aus Nachhaltigkeitsaspekten beurteilt ist die CO₂-Bilanz sehr gut.

Die Projektergebnisse weisen aber auch auf die bestehenden Hemmnisse hin. Der Zeitaufwand für die Abstimmung bis hin zur Umsetzung der Maßnahmen ist hoch. Wenn es der politische Wille ist, den biogenen Reststoff Landschaftspflegeholz stärker als bisher zu nutzen, dann ist die Politik zudem gefordert, Abstimmungs- und Genehmigungsverfahren zu vereinfachen.

Die momentan für die Holznutzung in Wäldern und KUP entwickelte Technik kann auf Landschaftspflegeflächen nur bedingt eingesetzt werden. Gleichzeitig besteht in der Technikentwicklung aber auch deutliches Optimierungspotenzial. Bisher erfolgte die Holzernte auf Landschaftspflegeflächen in der Regel motormanuell. Ein verstärkter Technikeinsatz bei der Beerntung ist jedoch alleine aus arbeitsergonomischen Gesichtspunkten geboten. Ein an die jeweiligen Rahmenbedingungen der Flächen angepasster Technikeinsatz kann darüber hinaus auch deutlich kosteneffizienter als eine motormanuelle Beerntung sein. Die Kosten für die Erstpflge von stark zugewachsenen Naturschutzflächen lassen sich durch eine energetische Verwertung des Hackgutes zwar deutlich reduzieren, aber eine Kostendeckung ist nur bei der Freistellung großer, möglichst ebener und mit hoher Stückmasse charakterisierter Naturschutzflächen zu erreichen. Durch die Verbesserung der Technologien und der Optimierung der Hackschnitzelqualitäten (und einer Erhöhung der Erlöse) ist eine kostendeckende Maßnahmenumsetzung auf größeren Halbtrocken- und Trockenrasen, Sandmagerrasen und Heiden realistisch. Es gilt jedoch in diesem Zusammenhang immer auch einen Kompromiss zwischen den Ansprüchen des Naturschutzes an die Qualität der Flächenbearbeitung und dem „ökonomisch Machbaren“ aus Sicht eines Energieholzdienstleisters zu finden. Das gilt generell unabhängig von der energetischen Nutzung des Hackgutes: Solange der naturschutzfachlich gewollte und europarechtlich er-

forderliche Erhalt von Offenlandlebensräumen durch die enge Auslegung der jeweiligen Landeswaldgesetze blockiert ist, werden viele Ansätze für eine Verbesserung der Offenlandlebensräume im Sande verlaufen.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten umfassenden ökologischen Begleituntersuchungen haben deutlich gemacht, dass der naturschutzfachliche Erfolg der jeweiligen Freistellungsmaßnahme unabhängig von der Frage ist, ob das Hackgut energetisch verwertet wird oder nicht. Entscheidende Faktoren sind vielmehr, ob die Flächen nach der jahrzehntelangen Verbuschung (noch) über ein hinreichendes Entwicklungspotenzial verfügen und ob die Entwicklungs- und Folgepflege ausreichend gesichert ist und gefördert wird. Angesichts der oft sehr schlechten ökonomischen Rahmenbedingungen für die Schäfereibetriebe ist fraglich, ob es gelingen kann, alle an die Europäische Union als Offenlandlebensräume entsprechend der FFH-Richtlinie gemeldeten Flächen dauerhaft durch Beweidung zu erhalten. In diesem Zusammenhang sollte untersucht werden, ob Flächen, die derzeit nicht durch die in jedem Fall zu favorisierende Beweidung offen gehalten werden können, temporär auch in Form einer wiederholten Energieholzernte im Sinne einer niederwaldähnlichen Verwertung genutzt werden könnten. Aus vegetationsökologischer Sicht lassen sich damit die charakteristischen Arten wahrscheinlich nicht dauerhaft erhalten – aus zoologischer Sicht könnte eine niederwaldartige Gebüschnutzung jedoch zumindest im Vergleich zur Alternative „Vorwald“ mit einer deutlich höheren Artenvielfalt einhergehen.

Neben der Verbesserung der Rahmenbedingungen für die Freistellung der Flächen lässt sich aus dem Vorhaben der folgende Untersuchungsbedarf ableiten:

- Weiterentwicklung des luftbildunterstützten Verfahrens zur Abschätzung des Biomassepotenzials (Sensoren zur Erkennung der Gehölzbestände und automatisierte Bildauswertung)
- Weiter- und Neuentwicklung der Technologie des „Aufnehmenden Mulchers“ sowie der Verwendung bzw. Aufarbeitung des Ernteguts von Landschaftspflegeflächen (Erstpflge Grünlandssysteme, Folgepflege Stockausschläge, Heidemahd, wiederkehrende, niederwaldartige Gehölzentnahme etc.)
- Optimierung der Arbeitsorganisation bei der Freistellung von Naturschutzflächen durch die Erarbeitung von Schulungsangeboten für Einsatzleiter/innen, Arbeiter/innen und Maschinenführer/innen. Durchführung von Weiterbildungsveranstaltungen
- Untersuchungen zur verlängerten Lagerung des ungehackten Holzes im Freiland mit den damit einhergehenden Auswirkungen auf den Wassergehalt (z. B. Dauer der Lagerung, Lage des Polterplatzes) unter Berücksichtigung von Naturschutzaspekten
- Durchführung eines systematischen Technikvergleichs (experimenteller Versuch) zur Untersuchung der Ökonomie und Technikfolgen
- Vegetationsökologische und zoologische Bewertung einer regelmäßig wiederkehrenden niederwaldähnlichen Nutzung als Erweiterung der Weidenutzung
- Vegetationsökologische und zoologische Wiederholungsuntersuchungen auf ausgesuchten, im Rahmen des Vorhabens freigestellten Halbtrockenrasen, Heiden und mesophilen Grünländern, um die naturschutzfachliche Effizienz der umgesetzten Maßnahmen eindeutig beurteilen zu können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Rahmen des Vorhabens „Biodiversität und Energieholz – Die Nutzung von Energieholz als Ansatz zur Erhaltung und Entwicklung national bedeutsamer Lebensräume“ wesentliche Grundlagen für eine verbesserte energetische Nutzung von Landschaftspflegeholz erarbeitet wurden. Diese Grundlagen sind auf entsprechende Landschaftsräume und Biotoptypen in anderen Regionen Deutschland übertragbar.

Diese Grundlagen für eine verbesserte Nutzung von Landschaftspflegeholz gilt es jetzt möglichst breit anzuwenden und weiter zu optimieren. Mit den Ergebnissen des Verbundvorhabens haben Naturschutzverwaltungen und Naturschutzflächeneigentümer das notwendige Rüstzeug, um Maßnahmen zum Erhalt von bedrohten Offenlandlebensräumen kosteneffizient sowie natur- und Klimaschutzverträglich umzusetzen. Nicht zuletzt die projektbegleitende Öffentlichkeitsarbeit hat dazu beigetragen, dass die Ergebnisse des Projektes schon jetzt stark nachgefragt und in vielen Fällen auch schon in der Praxis angewendet werden. Alle Projektergebnisse wurden in eine öffentlich zugängliche Datenbank eingespeist (Direktlink: www.naturstiftung.de/energieholzdatenbank). Weitere Informationen (z. B. Projektberichte) wurden auf der Internetseite (www.naturstiftung.de/energieholz) zugänglich gemacht.

Literaturverzeichnis

BAASCH, A.; TISCHEW, S.; RUNGE, K. (2013): Energieholz und Biodiversität – Die Nutzung von Energieholz als Ansatz zur Erhaltung und Entwicklung national bedeutsamer Lebensräume“. Teilprojekt: „Technikfolgenabschätzung und naturschutzfachliche Effizienz“ – Flora. Unveröffentlichter Abschlussbericht. Bernburg.

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (Hrsg., 2007): Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt. Berlin.

GROSSER, N.; KREBS, V. (2013): „Energieholz und Biodiversität – Die Nutzung von Energieholz als Ansatz zur Erhaltung und Entwicklung national bedeutsamer Lebensräume“. Teilprojekt Technologiefolgenabschätzung und naturschutzfachliche Effizienz – Fauna. Abschlussbericht. Erfurt.

JOHST, A.; CONRADY, D.; KÄTHKE, S.; RÖSCH, W. (2014): Energieholz und Biodiversität – Die Nutzung von Energieholz als Ansatz zur Erhaltung und Entwicklung national bedeutsamer Lebensräume. – Unveröffentlichter Abschlussbericht, Erfurt.

LEHMANN, R. (2012): Erhalt von Sandtrockenheiden und Sandtrockenrasen – Empfehlungen für die munitionsbelasteten Offenflächen Brandenburgs. Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie Band 46 (1), S. 36-45.

LUX, A.; BAIERLE, H. U.; BODDENBERG, J.; FRITZLAR, F.; ROTHGÄNGER, A.; ÜTHLEB, H.; WESTHUS, W. (2014): Der Erhaltungszustand der Arten und Lebensraumtypen der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie in Thüringen 2007 bis 2012. Landschaftspflege und Naturschutz in Thüringen 51 (2).

RAT FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG (2013): Biomasse soll nachhaltiger werden. URL: <http://www.nachhaltigkeitsrat.de/news-nachhaltigkeit/2013/2013-08-29/biomasse-soll-nachhaltiger-werden/> (Stand: 29.08.2013).





Feinstaubemissionen aus biomassebefeuelten Kleinfuerungsanlagen

Niels Woltersdorf, Alfons Kather

Vorhaben: Feinstaubemissionen aus biomassebefeuelten Kleinfuerungsanlagen

FKZ-Nr.: O3KB033

Laufzeit: 01.11.2009 – 31.03.2013

Zuwendungssumme: 241.295 €

Koordination:

Institut für Energietechnik, Technische Universität Hamburg-Harburg
Denickestr. 15, 21073 Hamburg
www.tuhh.de/iet

Endbericht:

<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/785933344.pdf>

Kontakt:

Niels Woltersdorf
Telefon: +49 (0)40 42878 3043
E-Mail: woltersdorf@tuhh.de

Niels Woltersdorf (Projektleiter):

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die zukünftig geltenden Emissionsgrenzwerte für Feinstaub von aktuell betriebenen Anlagen im realen Betrieb zumeist nicht eingehalten werden. Das Niveau der Emissionen ist von der Zusammensetzung des eingesetzten Brennstoffs sowie von Betriebsparametern wie dem Unterdruck im Kamin und der Luftaufteilung am Brenner abhängig.



Zusammenfassung

Durch die Novellierung der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) im März 2010 werden für zukünftig installierte, biomassebefeuelte Kleinfuerungsanlagen strengere Emissionsgrenzwerte bezüglich der Schadstoffe Feinstaub und Kohlenstoffmonoxid gelten. Im abgeschlossenen Projekt „Feinstaubemissionen aus biomassebefeuelten Kleinfuerungsanlagen“ wurde untersucht, inwieweit diese Emissionsgrenzwerte bereits von aktuell installierten Kleinfuerungsanlagen eingehalten werden können. Hierzu wurde in den Heizperioden 2010/11 und 2011/12 das Emissionsverhalten von 35 biomassebefeuelten Kleinfuerungsanlagen im Großraum Hamburg unter realen Betriebsbedingungen detailliert untersucht. Des Weiteren wurde der Einfluss ausgewählter Randbedingungen auf die Emission dieser Schadstoffe an einem Versuchskessel ermittelt. Bei allen durchgeführten Messungen wurden die Rauchgaszusammensetzung (O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_2) und die Korngrößenverteilung des emittierten Feinstaubes entsprechend dem aerodynamischen Durchmesser mit Hilfe kontinuierlicher Verfahren ermittelt. Parallel zu den kontinuierlichen Messungen wurden diskontinuierliche Probenahmen zur Ermittlung der Feinstaubemissionen durchgeführt.

An 18 der im Feld untersuchten Anlagen wurde parallel die wiederkehrende Messung durch einen Schornsteinfeger durchgeführt. Mit den im Feld gewonnenen Ergebnissen kann die Möglichkeit der Einhaltung kommender Emissionsgrenzwerte für die untersuchten Kessel aufgezeigt werden; die Ergebnisse der am Versuchstand durchgeführten Messungen zeigen mögliche Ansätze zur Verringerung der Emissionen durch Anpassung von Randbedingungen.

Summary

Due to the amendment of the first Federal Immission Control Ordinance (1stBImSchV) in March 2010 biomass-fired small scale furnaces, which are installed prospectively will have to comply with stricter emission standards for the pollutants particulate matter (PM) and carbon monoxide (CO). The completed project examines to what extent these upcoming emission standards can already be complied by currently installed small-scale furnaces. For this purpose, the emission behavior of 35 biomass-fired small-scale furnaces in Hamburg was investigated in detail under real operating conditions. These furnaces are regulated by the 1st BImSchV due to their thermal output. The measurements were performed during the heating seasons 2010/11 and 2011/12. Furthermore the influence of boundary conditions on the emission level of these pollutants was examined at a test-furnace. During all measurements, the flue gas composition (O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_2) and the particle size distribution of the emitted PM was measured continuously. Parallel to the continuous measurements discontinuous sampling was performed to determine the PM-emissions. At 18 of the investigated furnaces, the recurring chimney sweeper measurement was performed simultaneously. The results of the field measurements demonstrate the possibility of the boilers investigated to comply with the forthcoming emission standards. The results of the test-furnace measurements demonstrate possible approaches to reduce the emission level by adapting boundary conditions.

Durch die der Novellierung der 1. BImSchV (1. BImSchV 2010: 38) gelten für biomassebefeuerte Kleinfeuerungsanlagen, die nach dem 31.12.2014 errichtet werden, verschärfte Emissionsgrenzwerte für Feinstaub (PM) und Kohlenstoffmonoxid (CO). Der zulässige Emissionsgrenzwert für Feinstaub (PM) wird von 150 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ (Inbetriebnahme vor 04/2010) auf 20 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ (Inbetriebnahme ab 01/2015) herabgesetzt. Der bis jetzt leistungsabhängige Emissionsgrenzwert für Kohlenstoffmonoxid wird von 1.000 bis 4.000 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ unabhängig von der Nennwärmeleistung des Kessels auf 400 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ herabgesetzt. Um zu untersuchen, ob diese zukünftigen Vorgaben schon von heute betriebenen Anlagen erfüllt werden, wurden Feldmessungen an 35 im Großraum Hamburg betriebenen Anlagen durchgeführt. An einer am Institut für Energietechnik (IET) der Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH) installierten Versuchsanlage wurde der Einfluss verschiedener Randbedingungen auf das Emissionsverhalten untersucht.

Untersuchte Anlagen

Alle untersuchten Anlagen werden zur Wärmebereitstellung eingesetzt. Der Kontakt zu den Anlagenbetreibern wurde durch die Schornsteinfeger-Innung Hamburg vermittelt. Die untersuchten Anlagen unterscheiden sich in verschiedenen wesentlichen Merkmalen wie

- Kesseltyp, Hersteller
- Art des eingesetzten Brennstoffs (Pellets, Scheitholz, Hackschnitzel, Mahlrückstände)
- Nennleistung (14,9 kW bis 500 kW)
- Baujahr (1995 bis 2012).

In Abbildung 1 werden die im Feld untersuchten Kessel in fünf Klassen entsprechend ihrer thermischen Nennleistung unterteilt. Der in den Anlagen eingesetzte Brennstoff ist zusätzlich farblich dargestellt. Die meisten Kessel (46 %) verfügen über eine Nennleistung zwischen 15 und 50 kW. Der in den untersuchten Kesseln am häufigsten eingesetzte Brenn-

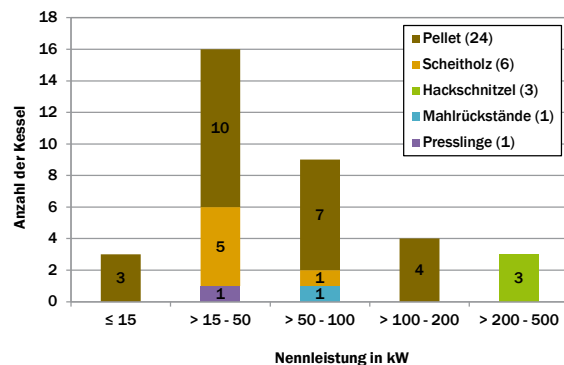


Abbildung 1: Nennleistung und eingesetzter Brennstoff der im Feld untersuchten Kessel

stoff sind Holzpellets. Die am IET installierte Versuchsanlage hat eine Nennleistung von 30 kW und wird vollautomatisch mit Holzpellets betrieben.

Versuchsaufbau und Messtechnik

Alle Messungen wurden nach dem gleichen Vorgehen bezüglich der verwendeten Messgeräte sowie deren Anordnung im Rauchgaskanal durchgeführt. Ausnahmen sind die Messungen des Schornsteinfegers und die Messungen mit dem elektrostatischen Niederdruckimpaktor (ELPI). Ein Schornsteinfeger war bei 18 der 35 durchgeführten Feldmessungen anwesend, der elektrostatische Niederdruckimpaktor konnte aus Platzgründen an 10 der 35 untersuchten Kessel nicht eingesetzt werden. In Tabelle 1 ist eine Übersicht über die wichtigsten Messgrößen sowie eine kurze Erläuterung gegeben. Die in Tabelle 1 aufgeführte Nummerierung der Messstellen ergibt sich aufsteigend aus der räumlichen Anordnung der Messgeräte in Strömungsrichtung des Rauchgases. Die Bezeichnungen 3 und 3a resultieren aus dem Umstand, dass nicht immer beide Messungen durchgeführt wurden. Bei Durchführung beider Messungen werden diese in derselben Ebene des Rauchgaskanals vorgenommen. Bis auf die Messung des Gesamtstaubs nach VDI 2066 (VDI 2066 2006) erfolgen alle Messungen kontinuierlich und ermitteln somit auch das Emissionsverhalten während nicht stationärer Betriebsabläufe, wie z. B. beim Anfahren und beim Abfahren der untersuchten Kessel. Die Gesamtstaubprobenahme erfolgt im stationären Betrieb der Anlage. Dieser wird anhand einer möglichst konstanten Sauerstoffkonzentration im Rauchgas sowie einer konstanten Rauchgastemperatur bestimmt. Die Dauer der Gesamtstaubprobenahme variiert und beträgt 15 Minuten, wenn die Messung des Schornsteinfegers parallel durchgeführt wird. Wird keine Messung des Schornsteinfegers parallel durchgeführt, so erfolgt die Messung über einen Zeitraum von 30 Minuten. Infolge des längeren Zeitraums der Probenahme wird der Fehlereinfluss für die auf dem Filter abgeschiedene Staubmasse und für das entnommene Rauchgasvolumen minimiert (VDI 2066 2006).

Tabelle 1: Übersicht über die gemessenen Parameter

Nummer	Messwert	Messgerät	Art der Messung; Stelle der Probenahme
1	Rauchgastemperatur	Temperaturfühler Typ K	Kontinuierliche Messung; hinter dem Rauchgasaustritt des Kessels
2	Rauchgaszusammensetzung O ₂ , CO ₂ , CO, NO _x , SO ₂	Horiba PG-250	Kontinuierliche Messung; hinter dem Rauchgasaustritt des Kessels
3	Gesamtstaubprobenahme	Planfilterkopfgerät	Diskontinuierliche Messung nach VDI 2066; Stelle der Probenahme nach örtlichen Gegebenheiten angepasst mit möglichst langer Vor- und Auslaufstrecke des Gases.
3a	O ₂ , CO, Gesamtstaub	Wöhler SM 96 CO	Messgerät des Schornsteinfegers, an gleicher Stelle wie die Sonde des Planfilterkopfgeräts.
4	Aerodynamischer Durchmesser des Feinstaubes in 12 Fraktionen von 7 nm bis 10 µm	ELPI	Kontinuierliche Messung; Elektrostatischer Niederdruckimpaktor; hinter Gesamtstaubprobenahme, vor Zugbegrenzer

Die Anlagen wurden für die Messungen sowohl im normalen Modus als auch, wenn verfügbar, im Schornsteinfeger-Modus betrieben. So kann ein realistisches Bild des Emissionsverhaltens ermittelt werden. Die im Folgenden präsentierten Messwerte sind jeweils das arithmetische Mittel der sekundär aufgenommenen, kontinuierlichen Messwerte im Zeitraum der Gesamtstaubprobenahme. Dementsprechend ergibt sich für jede Gesamtstaubprobenahme ein Datensatz aus Mittelwerten. Die hier präsentierten Ergebnisse der IET-Versuchsanlage wurden bei Vollast ermittelt.

Ergebnisse der Messungen im Feld

Die für die 1. BImSchV relevanten Emissionsdaten (Feinstaub, Kohlenstoffmonoxid) wurden an 18 der untersuchten Kessel parallel gemessen - zum einen mit Hilfe eines Wöhler SM 96 CO (Tabelle 1, 3a) zum anderen mit Hilfe eines Planfilters nach VDI 2066 (VDI 2066 2006) und des portablen Rauchgasanalysators Horiba PG-250 (vergleiche Tabelle 1, Punkt 2 und 3). In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der parallel durchgeführten Feinstaubmessungen gegenübergestellt. Die in Abbildung 2 eingetragene diagonale Linie hat eine Steigung von eins. Liefern beide Messverfahren identische Ergebnisse, so liegt der zu der Messung gehörige Punkt genau auf dieser Linie. Bis auf drei der Messungen, bei denen beide Messverfahren signifikante Unterschiede liefern, ist eine gute Übereinstimmung der beiden Messverfahren erkennbar. Die Gründe für die auftretenden Unterschiede bei den drei Messungen konnten nicht ermittelt werden. Der Mittelwert der relativen Standardabweichung der Messwertpaare zueinander beträgt 22,8 %. Werden die drei sichtbaren Ausreißer bei der Berechnung der relativen Standardabweichung nicht berücksichtigt, verringert sich diese auf 13 %.

Die zugehörigen Messungen von Kohlenstoffmonoxid führen zu einem vergleichbaren Ergebnis (Woltersdorf 2013).

Zur übersichtlichen Darstellung der im Feld ermittelten Messergebnisse werden die Ergebnisse entsprechend dem eingesetzten Brennstoff in die Kategorien „Pellet“ und „andere Biomassen“ unterteilt. Pellets werden somit den anderen verwendeten Brennstoffen gegenübergestellt. Die anderen Biomassen weisen eine größere Schwankungsbreite bezüglich

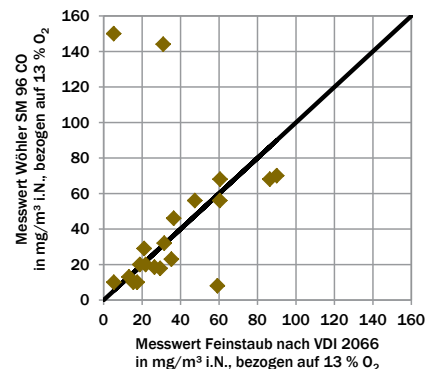


Abbildung 2: Vergleich der Feinstaubmessergebnisse; ermittelt mit Wöhler SM 96 CO und nach VDI 2066

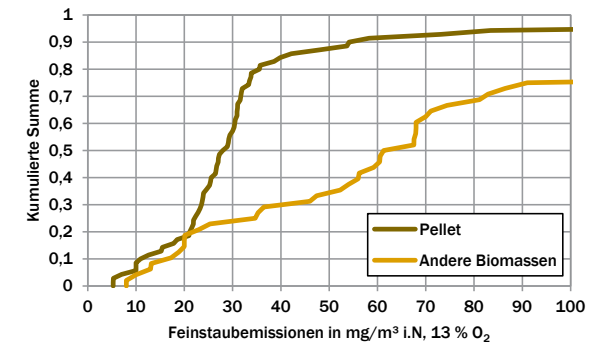


Abbildung 3: Verteilung der Messergebnisse der Feinstaubemissionen

lich ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrer Form auf, als die genormten Pellets. Alle Emissionsmessergebnisse für Feinstaub und Kohlenstoffmonoxid sind in Abbildung 3 (Feinstaubemissionen) und Abbildung 4 (Kohlenstoffmonoxidemissionen) als kumulierte Verteilung aufgetragen. Der Wertebereich der Abszissenachse ist bei den Graphen bis zum fünffachen (PM) bzw. zehnfachen (CO) Emissionsgrenzwert der 2. Stufe der 1. BImSchV dargestellt. Höher liegende Messwerte sind in der Darstellung nicht aufgetragen, um den relevanten Bereich nahe dem kommenden Emissionsgrenzwert übersichtlich zu gestalten. In Abbildung 3 sind bei den anderen Biomassen acht von 45 Einzelmessungen nicht aufgeführt. Die maximal gemessenen Feinstaubkonzentrationen betragen $753 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$ und $449 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$. Bei der Darstellung der an mit Pellets befeuerten Kesseln gewonnenen Messwerte sind fünf von 79 Werten nicht aufgeführt. Die maximal gemessenen Feinstaubkonzentrationen betragen $855 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$ und $150 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$. In Abbildung 3 ist zu sehen, dass der zukünftige Emissionsgrenzwert für Feinstaubemissionen von $20 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$ bei 17 % der an pelletbefeuerten Kesseln durchgeführten Messungen eingehalten wurde. Bei den Messungen an mit anderen Biomassen befeuerten Kesseln wurde der Emissionsgrenzwert bei 18 % der durchgeführten Messungen eingehalten.

Da die Bestimmung der Feinstaubemissionen mit einer Messunsicherheit behaftet ist, wird diese vom ermittelten Wert nach der Vorschrift der 1. BImSchV abgezogen und das Ergebnis anschließend gerundet. Mit einer solchen Rechtsauslegung ergibt sich, dass ein Messwert von $31 \text{ mg/m}^3 \text{ i.N., } 13 \text{ Vol.-% O}_2$ als den Emissionsgrenzwert erfüllend eingestuft werden kann. Diese Betrachtungsweise würde bei den durchgeführten Messungen zu folgenden Ergebnissen führen:

- Pelletbefeuerte Kessel: 64 % halten die zukünftigen Emissionsgrenzwerte nach Abzug der Messunsicherheit und anschließender Rundung ein.
- Mit anderen Biomassen befeuerte Kessel: 25 % halten die Emissionsgrenzwerte der 2. Stufe nach Abzug der Messunsicherheit und anschließender Rundung ein.

Somit schneiden die pelletbefeuernden Kessel unter Berücksichtigung der Messunsicherheit und der Rundungsvorgaben besser ab als die anderen Biomassen, weil 47 % der an pelletbefeuernden Kesseln ermittelten Feinstaubemissionen zwischen 20 und 31 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ und somit im Bereich der Messunsicherheit und Rundungstoleranz des Emissionsgrenzwerts liegen.

In Abbildung 4 sind die Messergebnisse der Kohlenstoffmonoxidemissionen als kumulierte Summe aufgetragen. Sechs von 47 Einzelmessungen, die an mit anderen Biomassen befeuernden Kesseln durchgeführt wurden, sind nicht aufgeführt. Die maximal gemessene Kohlenstoffmonoxidkonzentration betrug 10.220 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂.

Die Darstellung der kumulierten Messwerte in Abbildung 4 zeigt, dass der zukünftige Emissionsgrenzwert für Kohlenstoffmonoxid (400 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂) bei 92 % der an pelletbefeuernden Kesseln durchgeführten Messungen sowie bei 34 % der an mit anderen Biomassen befeuernden Kesseln durchgeführten Messungen eingehalten wird.

Wenn durch eine mögliche Rechtsauslegung ein Messergebnis von 550 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂ ausreicht, um die vorgeschriebenen Kohlenstoffmonoxidemissionen der zweiten Stufe der 1. BImSchV einzuhalten, würde sich das Ergebnis bezüglich der den Emissionsgrenzwert erfüllenden Messungen nur in geringem Maße ändern. Durch diese Bewertung würden 96 % der an pelletbefeuernden Kesseln und 36 % der an mit anderen Biomassen befeuernden Kesseln durchgeführten Messungen den zukünftigen Emissionsgrenzwert für Kohlenstoffmonoxid einhalten. Bezüglich der Schadstoffe SO₂ und NO_x weisen die untersuchten Kessel ebenfalls brennstoffabhängige Unterschiede auf. Die untersuchten pelletbefeuernden Kessel weisen zumeist geringere Emissionen dieser Schadstoffe auf. Diese Ergebnisse sind im Schlussbericht nachzulesen (Woltersdorf 2013).

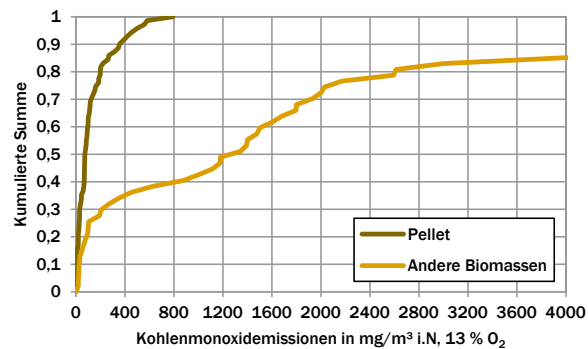


Abbildung 4: Verteilung der Messergebnisse der Kohlenstoffmonoxidemissionen

Ergebnisse der Messungen am Versuchskessel

Am Versuchskessel wurden einzelne Randbedingungen separat auf ihren Einfluss auf das Emissionsverhalten des Kessels untersucht. Dabei wurden sämtliche nicht untersuchten Randbedingungen konstant gehalten. Eine Variation des Unterdrucks im Kamin (Kamin-

zug) wurde durch Einsatz eines Saugzuges bei gleichzeitiger Schließung des Zugbegrenzers herbeigeführt. In Abbildung 5 sind die gemessenen Feinstaubemissionen bei variierendem Unterdruck von 10 bis 170 Pa aufgetragen.

Ein steigender Unterdruck im Kamin führt zur Erhöhung der Feinstaubemissionen. Bei einem Unterdruck von 11 Pa liegen die Feinstaubemissionen durchschnittlich bei 24 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂; bei 150 Pa Unterdruck liegen sie durchschnittlich bei 50 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂. Die Kohlenstoffmonoxidemissionen sind in Abbildung 6 bei variierendem Kaminzug aufgetragen.

Die Kohlenstoffmonoxidemissionen steigen, wie die Feinstaubemissionen, mit steigendem Unterdruck im Kamin an: bei 11 Pa Unterdruck liegen die Kohlenstoffmonoxidemissionen durchschnittlich bei 187 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂; bei 150 Pa liegen sie durchschnittlich bei 806 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂. Eine Erhöhung des Unterdrucks im Kamin führt somit zu erhöhten Emissionen der Schadstoffe Feinstaub und Kohlenstoffmonoxid. Die relative Steigerung der Kohlenstoffmonoxidemissionen ist stärker als die der Feinstaubemissionen. Ein funktionierender Zugbegrenzer kann das Emissionsniveau von Kleinf Feuerungen bezüglich PM und CO deutlich reduzieren.

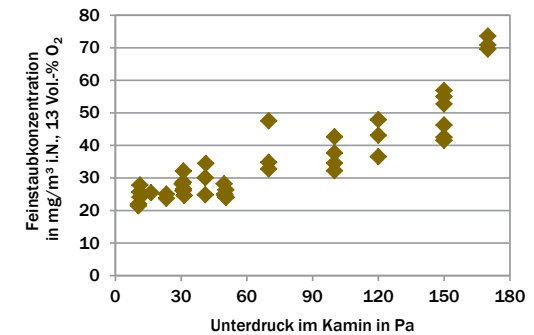


Abbildung 5: Feinstaubemissionen bei variierendem Unterdruck im Kamin

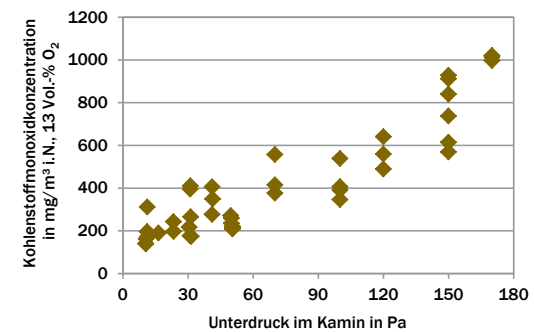


Abbildung 6: Kohlenstoffmonoxidemissionen bei variierendem Unterdruck im Kamin

Die Aufteilung der Verbrennungsluft in Primär- und Sekundärluft stellt sich beim Versuchskessel automatisch durch den Druckverlust der jeweiligen Zuleitung ein. Diese kann durch eine Stellscheibe beeinflusst werden. Die Aufteilung der Verbrennungsluft auf Primär- und Sekundärluft wird als Luftaufteilung Λ bezeichnet und liegt bei neutraler Stellung der Stellscheibe zwischen 1,12 und 1,19.

$$\Lambda = \frac{\dot{V}_{\text{primär}}}{\dot{V}_{\text{sekundär}}} \quad (1)$$

In Abbildung 7 sind die Feinstaubemissionen bei variierender Luftaufteilung dargestellt.

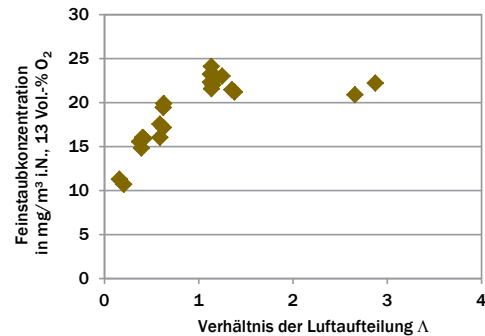


Abbildung 7: Feinstaubemissionen bei variierender Luftaufteilung

Eine Verringerung der Primärluft zugunsten der Sekundärluft ($\Lambda < 1$) reduziert die Feinstaubemissionen auf bis unter 12 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂. Bei Erhöhung der Primärluftzufuhr kann kein Einfluss auf die Feinstaubemissionen festgestellt werden.

In Abbildung 8 sind die Kohlenstoffmonoxidemissionen bei veränderter Luftverteilung Λ aufgetragen.

Die Kohlenstoffmonoxidemissionen sinken bei reduzierter Primärluft ($\Lambda < 1$) auf ein Niveau < 40 mg/m³ i.N., 13 Vol.-% O₂. Eine Erhöhung des Primärluftvolumenstroms lässt die Kohlenstoffmonoxidemissionen vergleichsweise schwach ansteigen.

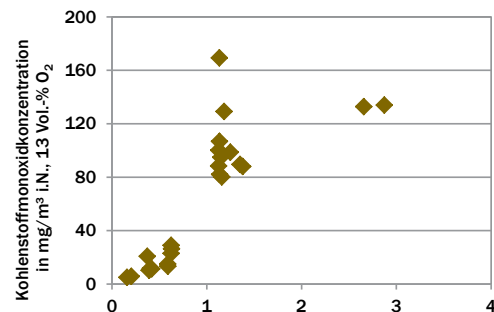


Abbildung 8: Kohlenstoffmonoxidemissionen bei variierender Luftaufteilung

Im Rahmen des Projekts wurde der Einfluss weiterer Randbedingungen untersucht. Der Einfluss des Brennstoffs sowie des Teillastbetriebs auf das Emissionsverhalten wird im Schlussbericht (Woltersdorf, 2013) aufgeführt. Die Auswirkungen der variierten Randbedingungen auf das Niveau der Stickoxidemissionen (NO_x) sind ebenfalls im Schlussbericht dargestellt.

Nachhaltigkeitsaspekte

Die im Projekt ermittelten Schadstoffemissionen von biomassebefeuerten Kleinfeuerungsanlagen sind bei der Bewertung der Nachhaltigkeit dieser Anlagen nicht zu vernachlässigen. Die vorliegenden Ergebnisse bieten somit die Grundlage, um die Nachhaltigkeit dieser Technologie umfassend zu bewerten.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der parallel ermittelten Emissionswerte von Feinstaub und Kohlenstoffmonoxid zeigen, dass die vom Schornsteinfeger eingesetzte Messtechnik und die anderen eingesetzten Verfahren zur Ermittlung der in der 1. BImSchV reglementierten Emissionswerte weitestgehend gut übereinstimmende Ergebnisse liefern. Die Ergebnisse der Feldmessungen zeigen, dass die Einhaltung der zukünftigen Emissionsgrenzwerte der 1. BImSchV im Betrieb schon heute möglich ist. Dies gilt jedoch nur für einen Teil der untersuchten Anlagen, sodass zukünftige Anlagen im Vergleich zu den heute bestehenden weiter verbessert werden müssen, um den zukünftigen Emissionsgrenzwert bei der wiederkehrenden Messung des Schornsteinfegers zuverlässig einzuhalten. Die untersuchten pelletbefeuerten Anlagen emittieren geringere Mengen der relevanten Schadstoffe PM und CO als die mit anderen Biomassen befeuerten Anlagen. Diese Vorteile sind auf den normierten Brennstoff und die damit verbundene gut dosierbare, automatische Beschickung zurückzuführen. Speziell bei Kohlenstoffmonoxid zeigen die durchgeführten Messungen deutliche Vorteile für diese Gruppe von Anlagen.

Die am Prüfstand durchgeführten Messungen zeigen, dass einfache Veränderungen wie die Überprüfung des Kaminzugs oder eine Anpassung der Luftaufteilung auf Primär- und Sekundärluft das Emissionsverhalten von Kleinfeuerungsanlagen deutlich beeinflussen. Besonders bei unzureichender Einstellung dieser Parameter kann deren Korrektur bereits ausreichend sein, um die Emissionen unter den Emissionsgrenzwert zu senken.

Literaturverzeichnis

VDI 2066 (2006): Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss

KRdL: VDI 2066 Teil 1: Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen, Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. Beth-Verlag, Düsseldorf.

1. BImSchV Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (1. BImSchV). BGBl. I (2010), S. 38.

WOLTERSDOFF, N.; KATHER, A. (2013): Feinstaubemissionen aus biomassebefeuerten Kleinfeuerungsanlagen. Schlussbericht, Institut für Energietechnik, TUHH, Hamburg.



BioKommunal – Netzwerk und Mobilisierungsmaßnahmen für einen verstärkten Einsatz von Bioenergie in Kommunen

Bernd Geisen¹, Niels Alter²

Vorhaben: BioKommunal – Aufbau eines bundesweiten kommunalen Bioenergie-Netzwerks und Mobilisierungsmaßnahmen für einen verstärkten Einsatz von Bioenergie in Kommunen

FKZ-Nr.: 03KB040

Laufzeit: 01.09.2010 – 31.08.2013

Zuwendungssumme: 259.100 €

Koordination:

¹Bundesverband BioEnergie e.V. (BBE)
Godesberger Allee 142-148, 53175 Bonn
www.bioenergie.de

Projektpartner:

²C.A.R.M.E.N. e.V.
Schulgasse 18, 94315 Straubing
www.carmen-ev.de

Kontakt:

Bernd Geisen
Telefon: +49 (0)228 8100259
E-Mail: geisen@bioenergie.de



**Bernd Geisen
(Projektleiter):**

Das Informations- und Kommunikationsprojekt „BioKommunal“ ist mit seinen diversen Dienstleistungen von den Zielgruppen sehr gut angenommen und nachgefragt worden.

Die Ziele von BioKommunal (Vernetzung, Informations- und Erfahrungsaustausch, Multiplikator-Effekte) konnten mit guten Ergebnissen umgesetzt werden. Insgesamt haben sich 3.186 Teilnehmer aktiv an den diversen BioKommunal-Aktivitäten beteiligt.

Zusammenfassung

Das Projekt „BioKommunal - Aufbau eines bundesweiten kommunalen Bioenergie-Netzwerks und Mobilisierungsmaßnahmen für einen verstärkten Einsatz von Bioenergie in Kommunen“ hatte zum Ziel, ein bundesweites Netzwerk für Bioenergie-Kommunen aufzubauen und diesbezüglich verschiedene Mobilisierungsmaßnahmen für einen verstärkten Einsatz von Bioenergie in Kommunen zu initiieren. Der inhaltliche Schwerpunkt des Projektes und der einzelnen Maßnahmen lag dabei in Absprache mit dem BMU/PU sowie dem BMELV/FNR auf mittleren, größeren sowie insbesondere städtischen Kommunen und zielte in erster Linie auf eine nachhaltige Nutzung der in diesen Kommunen vorhandenen biogenen Reststoffe und Bioabfälle ab (biogene Reststoffe aus dem häuslichen, gewerblichen und industriellen Bereich, kommunaler Grünschnitt, Naturschutz- und Landschaftspflegematerialien, Bioabfälle, Stroh etc.). Ziel von „BioKommunal“ war es durch die verschiedenen Projektbausteine und -maßnahmen Anreize und Motivationen zur Mobilisierung insbesondere der biogenen Reststoff-Potentiale in den Kommunen zu geben. Im Fokus standen dabei insbesondere neue und innovative Technologien, die aktuell in der Forschung und Entwicklung für die Markteinführung vorbereitet und optimiert werden und von denen durch eine breite Marktanwendung ökonomische und ökologische Effizienzsteigerungen erwartet werden.

Summary

The project „Bioenergy in municipalities – Building-up a nationwide local bioenergy network and mobilisation activities to boost the use of bioenergy in municipalities“ was initiated in order to create a nationwide network of bioenergy communities and to develop and implement various activating measures for an increased use of bioenergy in municipalities. The focus of the project was in consultation with the BMU / PTJ and the BMELV / FNR on the sustainable use of biogenic residues and organic waste (biogenic waste from domestic, commercial and industrial sectors, municipal green waste, nature protection and landscape maintenance materials, bio-waste, straw, etc.) in average, larger and especially urban communities.

The aim of the project „Bioenergy in municipalities“ was to give incentives and motivation to mobilize particularly the biogenic residue potentials in the municipalities by different project activities. New and innovative technologies that are currently being prepared and optimized for their market launch in research and development projects were the focus of consideration. An increase in economic and ecological efficiencies is expected by a wide market application of these new technologies.

Hintergrund und Zielsetzung

Das Projekt „BioKommunal“ legte die Grundlage für ein bundesweites Netzwerk von Bioenergie-Kommunen und initiierte verschiedene Mobilisierungsmaßnahmen für einen verstärkten Einsatz von Bioenergie in Kommunen. Der inhaltliche Schwerpunkt der einzelnen Maßnahmen lag dabei in Absprache mit dem BMU/PU sowie dem BMELV/FNR auf mittleren, größeren sowie insbesondere städtischen Kommunen und zielte in erster Linie

auf eine nachhaltige Nutzung der in diesen Kommunen vorhandenen biogenen Reststoffe und Bioabfälle (biogene Reststoffe aus dem häuslichen, gewerblichen und industriellen Bereich, kommunaler Grünschnitt, Naturschutz- und Landschaftspflegematerialien, Bioabfälle, Stroh etc.). Während der Projektlaufzeit wurden verstärkt Anreize zur Mobilisierung insbesondere der biogenen Reststoff-Potentiale in den Kommunen gegeben. Im Fokus standen dabei insbesondere neue und innovative Technologien, die aktuell in der Forschung und Entwicklung für die Markteinführung vorbereitet und optimiert werden. Von diesen Technologien können bei breiter Marktanwendung ökonomische und ökologische Effizienzsteigerungen erwartet werden.

Konkrete Zielgruppen von „BioKommunal“ in den mittleren, größeren sowie insbesondere städtischen Kommunen waren:

- Bürgermeister und kommunale Entscheidungsbeauftragte
- Energiebeauftragte
- Umweltbeauftragte
- Abfallbeauftragte
- Gemeinderäte
- Stadträte
- Stadtwerke und deren Aufsichtsratsmitglieder
- Entscheidungsträger, Multiplikatoren und Beschäftigte in themenrelevanten kommunalen Institutionen.

Neben den eigenen Aktivitäten der Kommunen, sei es bei der Umsetzung von Maßnahmen in kommunalen Liegenschaften, im Energiemanagement oder bei der Öffentlichkeitsarbeit, spielte die interkommunale Kooperation, die Mitwirkung von Bürgerinnen und Bürgern, Initiativen, kommunalen Unternehmen, Privatwirtschaft und Vereinen eine bedeutende Rolle für die Realisierung von Klimaschutz-Projekten, so dass auch eine Vernetzung der kommunalen Partner untereinander eine wichtige Aufgabe des Projektes „BioKommunal“ war.

Methoden & Ergebnisse

Die Schwerpunkte im Projekt umfassten die Durchführung einer Bundesweiten Road-Show „Bioenergie für Kommunen“ und von Lehr- und Demonstrationsfahrten „Bioenergie für Kommunen“ sowie die Erstellung eines projektbezogenen Informationsportals „BioKommunal“, projektbegleitende Öffentlichkeitsarbeit und die Etablierung einer kommunalen Bioenergie-Bundesliga.

Im Folgenden sind die detaillierten Maßnahmen und Ergebnisse in den einzelnen Themenschwerpunkten dargestellt:

Online-Fragebogenaktion

Um die genannten Schwerpunkte detailliert auf die Informations- und Kommunikationsbedürfnisse der Zielgruppen anpassen zu können, wurde zum Projektstart ein Online-Fragebogen konzipiert, welcher folgende Zielsetzungen verfolgte:

- Identifizierung und Schärfung von Hemmnissen, Barrieren, Akzeptanzproblemen und Handlungsnotwendigkeiten durch den Fragebogen
- Identifizierung und Schärfung der Kommunikations- und Informationsbedürfnisse
- Identifizierung und Schärfung von Schlüsselakteuren und Multiplikatoren
- Auswertung: Zielgruppenanalyse und Zielgruppenschärfung
- Auswertung: Detaillierte Festlegung und Feinsteuerung der weiteren Kommunikations- und Informationsangebote von „BioKommunal“ auf Grundlage der geäußerten Analysen, Präferenzen und Wünsche
- Ergebnisdokumentation und -präsentation im Rahmen der weiteren Schwerpunkte im Projekt „BioKommunal“

So wurden in der Umfrage Fragen zur kommunalen Energieversorgung (Wärme- / Strom- / Kraftstoffversorgung, Bioenergieanlagen, Brennstoffe, Potenziale), zur Bewertung der Bioenergie (Arbeitsplätze, Wertschöpfung, Innovationen, Versorgungssicherheit), zum Informationsbedarf (Informationsbereitstellung und -beschaffung, Informationsmaterial, Veranstaltungen, Lehrfahrten) und zu Akzeptanzproblemen der Bioenergie (Thesen, Hemmnisse und Barrieren) gestellt.

Die Online-Fragebogenaktion hat sowohl quantitativ als auch qualitativ sehr gute Ergebnisse geliefert. Die Beteiligung von 588 Kommunen unterstreicht, dass der Einsatz von Bioenergie in Kommunen ein wichtiges Thema ist. Die qualitativen Ergebnisse der Fragebogenaktion erlaubten eine genaue Analyse des aktuellen Status-Quo der Bioenergienutzung in Kommunen und darauf aufbauend eine zielgerichtete Feinsteuerung der konkreten Projekt-Maßnahmen in den weiteren Arbeitspaketen. Eine detaillierte Dokumentation der Ergebnisse der Online-Fragebogenaktion ist auf der Projekt-Internetseite unter www.bio-kommunal.de dokumentiert.

Bundesweite Road-Show „Bioenergie für Kommunen“ durch Praxisseminare und Vorträge auf kommunalen Messen, Konferenzen und Fachtagungen (von 2011 bis 2013)

Die Umsetzung der Projektziele sollte durch eine bundesweite Road-Show „Bioenergie für Kommunen“ intensiv unterstützt und flankiert werden. Durch die Road-Show wurde an verschiedenen geeigneten Orten und Schauplätzen in Deutschland mit Beachtung einer regionalen Ausgewogenheit nahezu über die gesamte Projektlaufzeit eine intensive Ansprache und Information der Zielgruppen vorgenommen und für die Umsetzung von kommunalen Bioenergieprojekten, insbesondere auf Basis von biogenen Reststoffen und Bioabfällen, mit den bestverfügbaren Bioenergie-Technologien und -verfahren geworben.

Die Road-Show verfolgte folgende Ziele:

- Vorstellung der Projektinhalte im Rahmen einer Road-Show
- Motivation und Informationen für kommunale Bioenergieprojekte
- Zusammenfassung bestehender kommunaler Projekte über die Projektlaufzeit in einem bundesweiten Netzwerk
- Durchführung der Road-Show „Bioenergie für Kommunen“ als Informations- und Austauschplattform für kommunale Initiativen

- Capacity Building: Entscheidungsträger aus der Kommunalwirtschaft erhalten „Rüstzeug“, Ideen, Anregungen und Motivation für die Optimierung bestehender und für die Gründung und Etablierung neuer regionaler Bioenergie-Projekte.
- Förderung & Intensivierung der Informationsbasis unter den Akteuren durch einen intensiven Erfahrungsaustausch (Informationen zu Leitfäden, Finanzierung, Rechtsfragen, administrative und institutionelle Aspekte): „Voneinander lernen“ ist das Motto und nicht „Das Rad immer wieder neu erfinden“.
- Erzeugung von Multiplikatoreffekten durch Best-Practice-Fallbeispiele, Vermittlung von Kontakten >> Entstehung eines vernetzten Informationsaustauschs
- Vermittlung von Beratungsstellen für interessierte Akteure

Um eine hohe Zielgruppen-Trefferquote zu erreichen, wurden für die Road-Show geeignete kommunale Messen, kommunale Fachkonferenzen und Fachtagungen, kommunale Gremiensitzungen sowie passende Bioenergie-Branchenveranstaltungen ausgewählt, bei denen die Ziele und Inhalte von „BioKommunal“ in Form von Praxisseminaren und Vorträgen angeboten werden. Für die Jahre 2011 und 2012 wurden dabei jeweils pro Jahr vier Praxisseminare und sechs Vorträge angeboten, für das Jahr 2013 (nur acht Monate Projektlaufzeit) zwei Praxisseminare und drei Vorträge (d. h. über die gesamte Projektlaufzeit umfasst die Road-Show insgesamt zehn Praxisseminare und 15 Vorträge). Die Road-Show berücksichtigte dabei eine möglichst bundesweit regionale Ausgewogenheit und nutzte Synergien zu bereits bestehenden kommunalen Events.

Die detaillierten Veranstaltungsprogramme und die Vorträge der Praxisseminare sind auf der Projekt-Internetseite unter www.biokommunal.de dokumentiert und können dort von allen Interessierten genutzt und heruntergeladen werden, um eine Informationsverbreitung über die Teilnehmer hinaus sicherzustellen.

Lehr- und Demonstrationsfahrten „Bioenergie für Kommunen“

Ziel des Projektes „BioKommunal“ war es, kommunale Entscheidungsträger für passende Bioenergie-Projekte in ihren Kommunen zu überzeugen und umfangreiche Informationen zu den best verfügbaren und innovativen Technologien und deren ökonomischer und ökologischer Effizienz zu liefern. Erfahrungsgemäß ist das eigene „Sehen und Erleben“ von technischen Innovationen und neuen Verfahren die beste Überzeugungsarbeit und Motivation, um aufbauend von Erfahrungen in Pionier-Kommunen eine Machbarkeit und Übertragbarkeit für den eigenen kommunalen Wirkungsbereich anzustoßen. In den Lehr- und Demonstrationsfahrten „Bioenergie für Kommunen“ wurden daher den Zielgruppen-Vertretern innovative kommunale Bioenergieprojekte und deren ökonomische und ökologische Wirksamkeit anhand von Best-Practice-Fallbeispielen als Transfermaßnahme und Wissensvermittlung demonstriert. Bei der Auswahl der Projektstandorte wurde auf einen Querschnitt von markterprobten und innovativen Technologien des gesamten Bioenergiespektrums geachtet.

Folgende Ziele wurden bei der Durchführung der Lehr- und Demonstrationsfahrten verfolgt:

- Durchführung von sechs Lehr- und Demonstrationsfahrten „Bioenergie für Kommunen“ (jeweils zwei in 2011, 2012 und 2013)
- Zielgruppe: Kommunale Entscheidungsträger, Presse

- Eintägige Bus-Exkursion zu ausgewählten Bioenergieanlagen und kommunalen und regionalen Best-Practice-Beispielen mit hohem Innovationspotenzial
- Vermittlung von fachspezifischen Informationen und Materialien

Die detaillierten Veranstaltungsprogramme der Lehr- und Demonstrationsfahrten in 2011 bis 2013 sind auf der Projekt-Internetseite unter www.biokommunal.de dokumentiert.

Informationsportal „BioKommunal“ und projektbegleitende Öffentlichkeitsarbeit

Unter www.biokommunal.de wurde direkt zu Beginn des Projektes eine eigene Projekt-Internetseite von „BioKommunal“ eingerichtet, in der über die gesamte Laufzeit des Projektes aktuelle Informationen zu den Projektaktivitäten und die diesbezüglichen Kommunikations- und Beteiligungsmöglichkeiten zur Verfügung gestellt wurden. Ergänzend wurde im Rahmen der übergreifenden Internetpräsentation des Förderprogramms „Optimierung der energetischen Biomassennutzung“ unter www.energetische-biomassennutzung.de eine eigene Projekt-Internetseite von „BioKommunal“ eingerichtet.

Um das Projekt öffentlichkeitswirksam zu begleiten, wurden zudem folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Aufbau und Etablierung eines BioKommunal-Logos
- Online-Ankündigung der diversen BioKommunal-Aktivitäten an 10.000 kommunale E-Mail-Adressen (10 Praxisseminare + 6 Lehr- und Demonstrationsfahrten)
- Ankündigung der BioKommunal-Road-Show-Termine 2011 und 2012 in den BBE-Holzenergie-Kongressprogramm 2011 und 2012 (jeweils 1 Seite, Auflage: 35.000 Stück)
- BioKommunal-Online-Newsletter an 10.000 kommunale E-Mail-Adressen mit regelmäßigen aktuellen Informationen zu BioKommunal, Projekt-Homepage
- Interview mit der Deutschen Welle am 13.10.2011
- Interview mit dem Lokal-Fernsehen Rosenheim am 3.7.2013
- diverse Terminankündigungen der BioKommunal-Aktivitäten in Fachzeitschriften
- 10 Artikel zu BioKommunal in Fachzeitschriften (2* stadt+werk / 3* DBFZ-Newsletter bzw. DBFZ-PM / Biogas-Journal / ZfK / Nawaro-Kommunal / PM 3. Kongress Energieautarke Kommunen / Umweltbriefe)
- Online-Dokumentation der Vorträge der 10 BBE-Praxisseminare „Bioenergie für Kommunen“ in 2011, 2012 und 2013 unter www.biokommunal.de
- 11 Posterpräsentationen von BioKommunal in 2010, 2011, 2012 und 2013 (Statuskonferenz zum Förderprogramm „Energetische Biomassennutzung“ in 2010 und 2011 / BBE-Fachkongress für Holzenergie in 2010, 2011, 2012 / BBE-Symposium bio.net 2011 / Messe enerotec 2011 und 2013 / Messe Kommunale 2011 / Messe Stadt-Land-Umwelt-Schleswig-Holstein / Messe BioEnergy Decentral 2012)
- Teilnahme an der Statuskonferenz zum Förderprogramm „Energetische Biomassennutzung“ in 2010, 2011, 2012 und 2013 mit aktueller Berichterstattung zu BioKommunal



Bioenergie-Bundesliga mit Verleihung eines kommunalen Bioenergie-Preises

Bisher blieben die Möglichkeiten zur öffentlichen Darstellung der Stärken einer Kommune hinsichtlich der Nutzung von Bioenergie zur Imagebildung häufig ungenutzt, obwohl dies nicht nur positive Effekte im touristischen Bereich, sondern auch bei der Regionalentwicklung nach sich ziehen kann. Noch bedeutender ist eine vergleichbare öffentliche Darstellung des gemeindlichen Bioenergieeinsatzes hinsichtlich deren Anreizwirkung für den kommunalen Klimaschutz. Um dem Wettbewerbsgedanken im interkommunalen Vergleich eine Grundlage zu geben, wurde im Rahmen des Gesamtprojektes „BioKommunal“ eine sogenannte Biomasse-Bundesliga entwickelt, bei der über eine eindeutige Platzierung innerhalb einer Rangfolge das Engagement einer Kommune beim Einsatz von Bioenergie einfach verdeutlicht werden kann.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde in Abstimmung mit den verschiedenen C.A.R.M.E.N.-Fachabteilungen für Feste Brennstoffe, Biogas- und Biokraftstoffe, dem Fördermittelgeber sowie dem Projektbeirat ein System zur Bewertung des Bioenergieeinsatzes innerhalb der Kommunen entwickelt. Es resultierte eine umfangreiche Bewertungsmatrix, die neben der reinen Menge der eingesetzten Bioenergeträger besonderen Wert auf die regionale Herkunft sowie auf die Art der eingesetzten Biomasse legte. Folgende Festlegungen bildeten die Grundlage für die Bewertung:

- Gemäß den Zielen von „BioKommunal“ wird die Verwendung von Biomasse-Reststoffen stets positiver bewertet als speziell zum Zweck der energetischen Nutzung angebaute Biomasse.
- Je kleiner der Umkreis der Herkunft um die Stelle des Verbrauches, umso positiver die Wertung.
- Die Nutzung von aus Biomasse erzeugtem Strom wird sachgerecht über einen aktuellen GEMIS-Faktor verrechnet und gegenüber der Wärmenutzung höher gewertet.

Für die Darstellung des Wettbewerbes und die Teilnahme an ihm wurde ein Internet-Angebot geschaffen, welches die Möglichkeit zu einer Online-Meldung aller relevanten Daten bot (www.bioenergie-bundesliga.de). Kommunen ab einer Größe von 2.000 Einwohnern waren aufgerufen, ihren Einsatz von festen, flüssigen und gasförmigen Bioenergeträgern für Strom, Wärme und Mobilität anzugeben.

Die Erstbewerbung der Bioenergie-Bundesliga erfolgte durch Pressemitteilungen, Auslage von Flyern auf Messen mit Energie-Bezug, Vorträge zum Projekt bei der BioKommunal-Roadshow und damit die gezielte Ansprache von Multiplikatoren. Bereits erfasste Kommunen mit Bioenergieanlagen sowie alle über erworbene Daten der Statistischen Landesämter bekannten Kommunen wurden direkt angeschrieben und auf die Möglichkeiten der Bioenergie-Bundesliga aufmerksam gemacht.

Die eingereichten Angaben der Wettbewerbsteilnehmer wurden einzeln mit den Faktoren für Art der Biomasse und deren Herkunft gewichtet. Die sich in Summe der Bioenergie-Anlagen eines Teilnehmers ergebende Zahl wurde abschließend in Relation zur jeweiligen Einwohnerzahl der Kommune gesetzt. Dieser Punktwert ist nicht dimensionslos, die Einheit ist kWh/(Einwohner × Jahr). Durch die Verrechnung mit den Gewichtungsfaktoren ist diese Einheit jedoch nicht mehr korrekt verwendbar. Es wurde daher festgelegt, die erreichten Punktwerte als „BioEnergie-Punkte pro Einwohner“ zu bezeichnen.

Die Preisverleihung fand jährlich im Rahmen einer geeigneten öffentlichkeitswirksamen

kommunalen Veranstaltung oder im Umfeld einer zentralen Bioenergie-Branchenveranstaltung statt. Die erste Preisverleihung wurde am 8. November 2011 in Potsdam im Rahmen der Abendveranstaltung des 3. Statuskolloquiums zum Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ durchgeführt. Die Preisgelder für die drei besten Bioenergie-Kommunen wurden durch Herrn Dr. Bernhard Dreher (ehemals BMU) verliehen:

1. Preis in Höhe von EUR 3.000,-: Stadt Hardeggen, Niedersachsen
2. Preis in Höhe von EUR 2.000,-: Stadt Malchin, Mecklenburg-Vorpommern
3. Preis in Höhe von EUR 1.000,-: Stadt Delitzsch, Sachsen

Aus den bioenergetischen Konzepten der drei Siegerkommunen ist gut ersichtlich, dass man mit sehr unterschiedlichen Herangehensweisen viel in Sachen Bioenergienutzung erreichen kann. So ist die Stadt Hardeggen – der spätere Gesamtsieger – sicher die idealtypische Bioenergiekommune, mit einer breiten und diversifizierten Nutzung von Bioenergie. Neben Kleinf Feuerungsanlagen für Scheitholz und Holzpellets sind dort ein Holzheizkraftwerk mit ORC-Turbine sowie mehrere Biogasanlagen, jeweils mit Nahwärmenetz im Einsatz. Eine weitere Biogasanlage speist Biomethan ins Erdgasnetz ein, das dann auch überregional zur Energieversorgung oder als Kraftstoff genutzt werden kann. Die biogenen Einsatzstoffe kommen aus dem näheren Umfeld. Zudem nutzt die Bevölkerung von Hardeggen häufig Stückholz anstelle von fossilen Brennstoffen zur häuslichen Wärmeerzeugung. Unterstützt wird die Bioenergienutzung zudem durch eine Informations- und Beratungskampagne des zugehörigen Landkreises Northeim. Die Stadt Malchin hingegen hat ihre gute Platzierung durch Biogasanlagen, speziell aber auch durch die thermische Nutzung von biogenen Reststoffen in Form von Zitrusfrucht-Schalen errungen. Die Stadt Delitzsch punktete mit großen Altholzkraftwerken, zwar ohne bedeutende Abwärmenutzung, aber dennoch positiv bewertet durch die hohe Stromerzeugung aus Biomasse.

Im weiteren Verlauf sollte eine zusätzliche Wertung für die Zunahme des Einsatzes von Bioenergeträgern entwickelt werden. Da vor dem Wettbewerb bereits diverse Kommunen mit sehr weitgehender Nutzung von Bioenergie existierten, bestand die Gefahr, dass insbesondere die Spitzenpositionen der Bioenergie-Bundesliga für andere engagierte Gemeinden



schwer zu erreichen sind, obwohl deren Engagement im betrachteten Zeitraum höher war. Diese Einschätzung hat sich als nicht zutreffend herausgestellt. So konnten sich einige vermeintlich schwache Teilnehmer durch die Zunahme von Bioenergienutzung und den Bezug der Biomasse aus kurzen Entfernungen im Laufe des Wettbewerbs sehr wohl nach vorne arbeiten. Zunächst starke Teilnehmer fielen hingegen zum Teil durch Stilllegung von sehr großen Anlagen (z. B. Altholzwerkwerke) deutlich zurück. Um in den zunächst nur drei Spielzeiten der Bioenergie-Bundesliga Kontinuität und eine Möglichkeit zum Vergleich der Ergebnisse zu wahren, wurde deshalb - in Absprache mit dem Projektbeirat - auf eine spezielle Wertung hinsichtlich der Zunahme von Bioenergie ab der zweiten oder dritten Spielzeit verzichtet.

Die zweite Preisverleihung fand am 5. November 2012 in Berlin erneut bei der Abendveranstaltung des nun 4. Statustreffens zum Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“ statt. Die Preisgelder für die drei besten Bioenergie-Kommunen wurden wieder durch Herrn Dr. Bernhard Dreher (ehemals BMU) verliehen:

1. Preis in Höhe von EUR 3.000,-: Gemeinde Stephanskirchen, Bayern
2. Preis in Höhe von EUR 2.000,-: Stadt Hardeggen, Niedersachsen
3. Preis in Höhe von EUR 1.000,-: Stadt Malchin, Mecklenburg-Vorpommern

2013 haben insgesamt 131 Kommunen in der Bioenergie-Bundesliga-Saison „mitgespielt“. Die dritte Preisverleihung im Jahr 2013 fand aufgrund des Endes der Projektlaufzeit etwas früher als in den Vorjahren statt. Als geeigneter Rahmen wurde das alljährlich stattfindende und renommierte C.A.R.M.E.N.-Symposium in Straubing gewählt. Die Preisgelder für die drei besten Bioenergie-Kommunen wurden durch den bayerischen Landwirtschaftsminister, Herrn Helmut Brunner, verliehen:

1. Preis in Höhe von EUR 3.000,-: Stadt Hardeggen, Niedersachsen
2. Preis in Höhe von EUR 2.000,-: Gemeinde Stephanskirchen, Bayern
3. Preis in Höhe von EUR 1.000,-: Markt Eichendorf, Bayern

Bezüglich der Gesamt-Beteiligung an den diversen BioKommunal-Aktivitäten ergeben sich folgende qualitativen Ergebnisse:

Gesamt-Resonanz 2011-2013:

- AP 1: Projektbeirat und Fragebogenaktion (BBE): 620 Teilnehmer
- AP 2: 10 Praxisseminare (BBE): 405 Teilnehmer
- AP 2: 15 Vorträge (BBE): 1.630 Teilnehmer
- AP 3: 6 Lehr- und Demonstrationsfahrten (BBE): 210 Teilnehmer
- AP 5: Bioenergie-Bundesliga (C.A.R.M.E.N. e.V.): 321 Teilnehmer
- Gesamt-Resonanz 2011 bis 2013: 3.186 Teilnehmer

Aus der Vielzahl der BioKommunal-Tätigkeiten können folgende qualitativen Kern-Ergebnisse festgehalten werden:

- Rekommunalisierung der Energiewirtschaft ist eine zentrale Herausforderung der Energiewende.
- Kommunen sind ein wichtiger und entscheidender Erfolgsfaktor für das Gelingen der Energiewende.
- Eine nachhaltige, umweltverträgliche und sichere Energieversorgung ist eines der ganz zentralen kommunalen Themen.
- Es gibt ein riesiges Interesse von Kommunen und regionalen Institutionen die Energiewende aktiv mitzugestalten.
- Hierzu sind innovative Partizipations- und Beteiligungsmodelle notwendig (neue Stadtwerke, Energiegenossenschaften, Bürgerbeteiligungsmodelle)
- Energiewende sowie der Marktausbau der Erneuerbaren Energien und der Bioenergie müssen mit einer intensiven Kommunikations- und Informations-offensive auf kommunaler Ebene begleitet werden.
- Es gibt auf kommunaler Ebene ein sehr großes Interesse an regionalen Bioenergieprojekten, aber auch erhebliche Informationsdefizite.
- Es gibt zugleich aber auch diverse Akzeptanzprobleme und Vorbehalte gegenüber der Bioenergie (berechtigter und unberechtigter).
- Kommunale Einbindung sowie intensive Information und Aufklärung sind der Erfolgsgarant für eine nachhaltige gesellschaftliche Akzeptanz des Bioenergie-Marktausbaus.
- Energiewende, der Ausbau der Erneuerbaren Energien und neue Bioenergie-Projekte müssen regional vor Ort viel intensiver kommunikativ begleitet werden, um eine gesellschaftliche Akzeptanz sicherzustellen.
- Biogene Reststofffraktionen sind in Kommunen noch unzureichend erschlossen und vielfach nicht sinnvoll genutzt.
- Schnittstellen zwischen Energie- und Abfallwirtschaft sind vielfach unzureichend bzw. nicht vorhanden und müssen daher optimiert werden.
- Nur mit biogenen Reststoffen lassen sich die Bioenergie-Ausbauziele nicht erreichen, land- und forstwirtschaftliche Biomasse muss ebenfalls intensiv genutzt werden.
- Effizienzsteigerungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette und nachhaltige Nutzungskonzepte sind die zentralen Herausforderungen für die Bioenergiebranche.
- Fortführung und Intensivierung der BioKommunal-Aktivitäten ist vor dem Hintergrund dieser vielfältigen Herausforderungen notwendig und sinnvoll.
- Prüfung von möglichen Anschlussaktivitäten (Finanzierung muss hierzu sichergestellt sein).
- Herzlichen Dank an das BMU und alle Projektpartner, die BioKommunal ermöglicht, unterstützt und mitgestaltet haben.

Übertragbarkeit und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Folgender Nutzen und folgende Verwertbarkeit der Ergebnisse von BioKommunal ist gegeben:

- Die Fragebogenaktion wurde unter www.biokommunal.de veröffentlicht und zum Download angeboten. Zudem wurden die Ergebnisse der Fragebogenaktion im Rahmen der Beiratssitzungen, der Road-Show, der Lehr- und Demonstrationsfahrten sowie der kommunalen Bioenergie-Bundesliga relevanten Schlüsselakteuren zur Verfügung gestellt.
- Die Ergebnisse und Präsentationen der Road-Show, die Programme der Lehr- und Demonstrationsfahrten sowie die Ergebnisse der Bioenergie-Bundesliga wurden unter www.biokommunal.de veröffentlicht.
- Das Projekt-Internet-Informationsangebot steht unter www.biokommunal.de zur Verfügung.
- Die begleitende Öffentlichkeitsarbeit gewährleistete über die gesamte Projektlaufzeit eine gute und öffentlichkeitswirksame Einbindung des Themas „Bioenergie für Kommunen“. Auf diese Weise wurde eine mediale Aufmerksamkeit sowie ein damit verbundener Wissens- und Know-how-Transfer erreicht, der auch einen Multiplikator-Effekt auf andere Kommunen unterstützt hat.
- Die Bioenergie-Bundesliga hat mit einer jährlichen Preisverleihung im Rahmen einer geeigneten (Branchen-)Veranstaltung eine medien- und öffentlichkeitswirksame Aufmerksamkeit erhalten.
- Die Projektinhalte und die detaillierten Projektangebote wurden innerhalb der Bioenergiebranche (Bioenergie-Fachverbände und den Bioenergie-unternehmen) kommuniziert, so dass eine dauerhafte Einbindung und Vernetzung von kommunalen Vertretern mit wichtigen Schlüsselakteuren und Multiplikatoren aus dem Bioenergiesektor gewährleistet war.
- „BioKommunal“ leistete als Kommunikationsprojekt einen Beitrag, dass verschiedene innovative Technologien, Verfahren und Konzepte durch die diversen Demonstrations- und Transfermaßnahmen kommunalen Entscheidungsträgern präsentiert wurden.
- BioKommunal hat das mittelfristige Ziel unterstützt, ein nachhaltiges Interesse mit dauerhaften Aktivitäten zum Thema „Bioenergie in Kommunen“ anzustoßen und auf diese Weise innovative Projekte, Technologien, Verfahren und Konzepte mit einer hohen ökonomischen und ökologischen Effizienz und Übertragbarkeit auf andere Kommunen anzureizen.
- BioKommunal hat als Informations- und Kommunikationsprojekt intensiv für eine nachhaltige und effiziente kommunal Bioenergienutzung geworben. Bestehende Hemmnisse und Akzeptanzprobleme bei kommunalen Bioenergienutzung wurden offensiv angesprochen. Nachhaltigkeitsaspekte wurden in allen Arbeitspaketen von BioKommunal prioritär berücksichtigt und offensiv kommuniziert.

- In der Fragebogenaktion im Arbeitspaket 1 wurden mögliche Akzeptanzprobleme der Bioenergie, so auch diverse Nachhaltigkeitsaspekte konkret abgefragt. Die Ergebnisse sind unter www.biokommunal.de ausführlich dokumentiert und boten die Grundlage für den Dialog mit kommunalen Vertretern im Rahmen der Praxisseminare, Vorträge und Lehr- und Demonstrationsfahrten in den Arbeitspaketen 2 und 3

Fazit & Ausblick

In dem Projekt BioKommunal wurde in drei Jahren ein bundesweites Netzwerk für Bioenergie-Kommunen aufgebaut und etabliert, sowie der verstärkte Einsatz von Bioenergie in Kommunen durch ein umfangreiches Informationsangebot unterstützt. In Praxisseminaren, Vorträgen, Lehr- und Demonstrationsfahrten zu Best-Practice-Bioenergieanlagen wurden kommunalen Akteuren wie Bürgermeistern, städtischen Energie-, Umwelt- und Abfallbeauftragten oder Stadtwerken kosteneffiziente und übertragbare Nutzungskonzepte und innovative Technologien präsentiert und zur Nachahmung empfohlen. Insgesamt haben 3.186 Akteure aktiv an den einzelnen BioKommunal-Maßnahmen teilgenommen. Das Projekt BioKommunal hat somit erfolgreich die vorhandenen Bedürfnisse und Notwendigkeiten der Kommunikation, Information und Vernetzung auf kommunaler Ebene aufgegriffen und eine wichtige Starthilfe zum „Herunterbrechen der Energiewende“ auf die kommunale Ebene geleistet.

In den Kommunen ist die nachhaltige, umweltverträgliche und sichere Energieversorgung eines der ganz zentralen Themen und es gibt ein hohes Interesse die Energiewende aktiv mitzugestalten. Hierzu sind jedoch innovative Partizipations- und Beteiligungsmodelle notwendig, wie etwa neue Stadtwerke, Energiegenossenschaften oder Bürgerbeteiligungsmodelle. Dem großen Interesse an regionalen Bioenergieprojekten stehen aber auch erhebliche Informationsdefizite gegenüber und nach wie vor diverse Akzeptanzprobleme sowie Vorbehalte gegenüber der Bioenergie. Aus diesem Grund ist eine intensive Information und Aufklärung kommunaler Akteure der Erfolgsgarant für einen nachhaltigen Ausbau der Bioenergie. Zumal es gerade in Kommunen ein riesiges Potenzial an biogenen Ressourcen gibt. So sind beispielsweise kommunale Reststoffe aus dem häuslichen, gewerblichen und industriellen Bereich, kommunaler Grünschnitt, Naturschutz- und Landschaftspflegematerialien, Bioabfälle oder Stroh derzeit noch unzureichend erschlossen und werden vielfach nicht sinnvoll genutzt. Nur mit biogenen Reststoffen lassen sich die Bioenergie-Ausbauziele nicht erreichen, land- und forstwirtschaftliche Biomasse müsste ebenfalls intensiv genutzt werden. Des Weiteren sind die Schnittstellen zwischen Energie- und Abfallwirtschaft vielfach noch unzureichend bzw. nicht vorhanden und müssen daher optimiert werden.

BioKommunal hat für alle diese Herausforderungen im Rahmen der Energiewende wertvolle Informationen, Erfahrungen und Empfehlungen angeboten, die von kommunalen Entscheidungsträgern genutzt worden sind.

Damit die gewonnene Expertise sowie wertvolle Netzwerke weiter genutzt und ausgebaut werden können, und „Bioenergie für Kommunen“ als dauerhafte Informations- und Austauschplattform für kommunale Initiativen etabliert werden kann, ist jedoch die Fortführung und Intensivierung der Aktivitäten von BioKommunal notwendig und wünschenswert.



Foto: Uschi Dreiuicker, pixelio.de

Demonstration von Maßnahmen zur Emissionsminderung an Biomasse-Kleinfeuerungen

Ingo Hartmann¹, Mirjam Matthes¹, Christian Thiel¹, Heinz Kohler³, Andreas Groll², Ulrich Riebel²

Vorhaben: Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse-Kleinfeuerungen

FKZ-N .: 03KB051

Laufzeit: 01.01.2011 – 31.03.2014

Zuwendungssumme: 876.139 €

Koordination:

¹DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig
www.dbfz.de

Projektpartner:

A.P. Bioenergie-technik GmbH
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Uli Dobler
Träglhof 2, 92242 Hirschau

Spartherm Feuerungstechnik GmbH
Ansprechpartner: Dr. sc. nat. Volker Schmatloch
Maschweg 38, 49324 Melle

² Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl Mechanische Verfahrenstechnik
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Riebel
Burger Chaussee 2, 03046 Cottbus

³Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS)
Prof. Dr. rer. nat. Heinz Kohler
Moltkestr. 30, 76133 Karlsruhe



Kontakt:

Dr. Ingo Hartmann
Telefon: +49 (0)341 2434 541
E-Mail: ingo.hartmann@dbfz.de

Ingo Hartmann (Projektleiter):

Eine Reduzierung von Emissionen bei der Verbrennung von Festbrennstoffen in Kleinanlagen ist notwendig. Durch die direkte Integration von Abgasbehandlungsaggregaten in Feuerungsanlagen können sowohl die Staubmasse- als auch die Kohlenstoffmonoxidkonzentration durch entsprechende Adaption an die Feuerungsanlage erheblich gemindert werden.

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Verbundprojektes wurden an zwei unterschiedlichen Feuerungsanlagen (Einzelraumfeuerung und Multifuelkessel) integrierte Maßnahmen zur Emissionsminderung durch Kombination aus Katalyse und Elektroabscheidung sowie durch Verbrennungsluft-Regelungsoptimierung untersucht und entwickelt. Die Entwicklung und Optimierung der Maßnahmen erfolgte anhand von Prüfstandsuntersuchungen. Zusätzlich wurde die Praxistauglichkeit bei Feld- und Demonstrationsmessungen nachgewiesen. Sowohl die bei der Biomasseverbrennung auftretenden partikel- als auch gasförmigen Schadstoffe konnten erheblich reduziert werden.

Summary

Integrated measures to reduce emissions at two different furnaces (a single room wood log furnace and a boiler for agricultural residues) have been studied and developed in the context of a joint project. The combined application of catalysis, electrostatic precipitation and combustion air control optimization has been examined for both furnaces. The development and optimization of the measures were based on test bench experiments. In addition, the practicality has been demonstrated in field and demonstration measurements. Particulate and gaseous pollutants occurring during biomass combustion have been substantially reduced.

Hintergrund und Zielstellung

In Deutschland beträgt die Zahl der Biomassekleinfeuerungen ca. 15 Millionen (14 Mio. Einzelraumfeuerungen, 1 Mio. Kessel). Ohne die gezielte Entwicklung neuer Verfahrens- und Anlagentechnik im Kleinfeuerungsgebiet ist die Nutzung und der nachhaltige Ausbau

der klimaschonenden regenerativen Wärmebereitstellung durch feste Biomasse nicht realisierbar.

Das Ziel des Kooperationsvorhabens war die Entwicklung von integrierten und kombinierten Maßnahmen zur Schadstoffreduzierung für die Anwendung in Biomassefeuerungen. Als integrierte und primäre Emissionsminderungsmaßnahmen an ausgewählten Biomassefeuerungen wurden folgende Verfahrenstechniken entwickelt und an Prototypen der Hersteller demonstriert:

- Katalytische Nachverbrennung, elektrostatische Staubabscheidung und Wärmeübertragung in einem an hochwertigen Einzelraumfeuerungen (ERF) adaptierten Modul,
- Integrierte mehrstufige elektrostatische Staubabscheidung und katalytisch-regenerative Totaloxidation mit elektrischer Katalysatorvorheizung im Wärmeübertrager eines Biomassekessels modernster Bauart für Holz- und Alternativbrennstoffe, abgekürzt: Multifuelkessel (MFK),
- Verbrennungsoptimierung in jeder Phase des Verbrennungsprozesses durch vollautomatische Verbrennungsluftregelung auf der Basis moderner Abgassensoren und angepasster Regelungsalgorithmen.

Stand der Technik

Moderne vollautomatische Kessel nach Stand der Technik können heute unter bestimmten Bedingungen umweltfreundlich Wärme mit geringem Schadstoffausstoß bereitstellen. Dies zeigen vom DBFZ durchgeführte Forschungskoooperationsprojekte (Lenz 2010, Döhling 2012). Dazu müssen jedoch zwei wesentliche Voraussetzungen erfüllt sein:

- Es ist ein kontinuierlicher Betrieb mit stationärer Fahrweise der Kesselanlage anzustreben. Diese Forderung kann zumindest teilweise durch entsprechende Gesamtsystemauslegungen der Heizungsanlage unter Berücksichtigung von Pufferspeichern und Lastprofilen der Verbraucher eingehalten werden. Eine Voraussetzung für den emissionsarmen Betrieb ist somit, dass die Feuerungen für die Grundlast bei Vollast ausgelegt sind. Der Teillastbetrieb und/oder häufiges An- und Abfahren („Takten“) eines Biomassekessels können auch bei modernen Anlagen aufgrund des grundsätzlich begrenzten Modulationsvermögens zu einem erheblichen Schadstoffausstoß führen.
- Eine emissionsarme Wärmeerzeugung kann ermöglicht werden, wenn Biomassebrennstoffe mit hoher Qualität genutzt werden. Probleme hinsichtlich relevanter Emissionen können bei vollautomatischen Kesseln auftreten, wenn diese mit alternativen Brennstoffen, welche beispielsweise höhere Mengen an anorganischen Elementen (Na, K, Si, N, Cl, S) enthalten, betrieben werden. Die Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte ist dann nur durch Einsatz kostenintensiver sekundärer Abgasreinigungsverfahren möglich.

Stückholzfeuerungen können aufgrund des charakteristischen Chargenabbrandes mit variablen Brennraumtemperaturen in Abhängigkeit des Nutzerverhaltens höhere Emissionswerte als mit Holz automatisch beschickte Kesselfeuerungen emittieren. Vor allem die

handbeschilderten Einzelraumfeuerungen des unteren Preissegmentes sind im Regelfall für die emissionsarme Wärmebereitstellung nur bedingt geeignet (Hartmann 2011). Der Betreiber kann auf den Verbrennungsprozess und damit auf die Schadstoffemissionen bei diesen Feuerstätten einen erheblichen Einfluss haben. Die Überladung des Brennraumes, die Verbrennung von zu feuchtem Holz und der Einsatz von nicht zugelassenen Brennstoffen sind wesentliche Einflussfaktoren des Nutzers, die zu einem überproportionalen Anstieg der Schadgasemissionen führen (Lenz 2010, Döhling 2012). Moderne hochwertige Einzelraumfeuerungen sind jedoch auch für eine emissionsarme Verbrennung geeignet, wenn die Nutzer sich an die Vorgaben der Hersteller halten.

An Biomassekleinfeuerungen unter 100 kW Nennleistung ist der integrierte Einsatz von Abgasreinigungsmaßnahmen nicht üblich, weil die alten Grenzwerte der Kleinfeuerungsanlagenverordnung im Regelfall mit Anlagen nach dem Stand der Technik eingehalten werden konnten oder diese Anlagen erst ab 15 kW Nennleistung erfasst wurden. Zudem sind bisher nur wenige marktnahe wirksame Abscheideverfahren für Staub in Europa erhältlich, bei denen zusätzlich detaillierte Langzeiterfahrungen und Bauartzulassungen für die Nachrüstung fehlen. Da die Wirksamkeit der verfügbaren Stauabscheider im Allgemeinen nicht durch unabhängige und zertifizierte Prüfstandsmessungen nachgewiesen wurde, erfolgen am DBFZ Messungen mit einem speziell konzipierten Abscheiderteststand (Lenz 2013). Zusätzlich wurden Angaben der Hersteller herangezogen. Die Auswertung der vorhandenen Daten zeigt, dass bei Einsatz von Holzpellets in automatisch beschickten Feuerungen unter stationären Prüfstandsbedingungen vor allem Elektroabscheider zur Reduzierung der Staubmasse technologisch geeignet sind. Jedoch wurden neben Problemen zum sicheren Rückhalt der abgeschiedenen Partikel vor allem Störungen bei längeren Betriebsintervallen beobachtet. Ähnliche Ergebnisse wurden auch im vom TFZ Straubing durchgeführten Demonstrationsprojekt unter Feldtestbedingungen erzielt (Kiener 2010). Diese Feuerungstypen für hochwertige Holzpellets sollen nach neuestem Stand der Technik im Normalfall keine Sekundärtechnologien zur Grenzwerteinhaltung benötigen. Elektrofilter (Riebel 2012) sind daher als Nachrüstlösung für ältere Bestandskesselanlagen oder für den Einsatz an Feuerungen für alternative Brennstoffe interessant.

Für Einzelraumfeuerungen und Multifuelkessel kleinerer Leistungen sind bisher keine ausreichend wirksamen, langzeiterprobten und wirtschaftlichen Emissionsminderungstechniken bekannt. Zudem ist die teilweise komplexe Einbindung nachgeschalteter separater Maßnahmen in den Abgasstrang verbunden mit einem höheren Wartungs- und Bedienungsaufwand. Es ist weiterhin zu beachten, dass diese Sekundäraggregate auf die Feuerung, beispielsweise durch einen zusätzlichen Druckverlust, rückkoppeln können und damit den Verbrennungsprozess erheblich stören, da diese bei der Entwicklung und dem Design der Feuerung sowie der Auslegung der Abgasanlage nicht berücksichtigt wurden und zumeist separate Regelungseinheiten vorhanden sind.

Neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu den von Biomasse-Verbrennungsprozessen emittierten Schadstoffen und deren umwelt- und klimaschädigenden sowie toxikologischen Eigenschaften zeigen deutlich, dass die derzeit verfügbaren sekundären Emissionsminderungsverfahren als Nachrüstlösung nur bedingt für eine ökologisch nachhaltige energetische Biomasseverwertung im kleinen und mittleren Leistungsbereich geeignet sind. Der Grund hierfür ist, dass bei der Mehrzahl der heute eingesetzten Feuerungsanlagen primärseitige Emissionsvermeidungsstrategien nicht im ausreichenden Maße ausgeschöpft werden. Auch besteht erhebliches Verbesserungspotenzial bei den Regelungskonzepten durch

Einsatz neuer Sensortechnologie und der getrennten Primär- und Sekundärverbrennungsluftregelung. Da auch bei der Emissionsreduzierung die Grundsätze des Umweltrechtes angewandt werden sollen, müssen zunächst integrierte primärseitige Prinzipien an Feuerungsanlagen eingesetzt werden, um mittel- und langfristig die regenerative Wärmebereitstellung aus Biomasse sicher zu stellen.

Methodik Einzelraumfeuerung

Die primäre Emissionsminderung an der Einzelraumfeuerung der Firma Spartherm sollte durch eine hohe Verbrennungsqualität der Biomasse mit Hilfe einer optimalen Verbrennungsluftregelung erreicht werden. Dazu wurden neben der Temperaturmessung in der Nachbrennkammer entsprechende Sensoren zur Messung der Restsauerstoffkonzentration und des CO/HC-Gehaltes im Abgaskanal eingesetzt (vgl. Abbildung 1).

Die Sensorsignale werden als Regelungseingangsgrößen verwendet (Kohler 2012, 2013 Butschbach 2009). Ausgangsseitig werden durch zusätzlichen Einsatz von Luftmassenstromsensoren und motorbetriebenen Stellklappen die Verbrennungsluftströme direkt geregelt. Durch dieses Verfahren werden inhärent unterschiedliche Naturzugbedingungen (z. B. infolge unterschiedlicher Kamintemperaturen, Witterungsbedingungen etc.) berücksichtigt. Des Weiteren wurde ein neuentwickelter elektrostatischer Staubabscheider eingesetzt, welcher in einem Wärmeübertragermodul zur Abscheidung der partikelförmigen Emissionen integriert wurde. Zusätzlich zum Elektroabscheider wurde die Integration eines Katalysators ermöglicht.

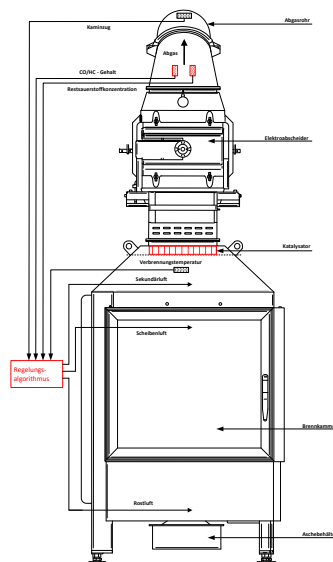


Abbildung 1: Gesamtkonzept der Maßnahmen zur Emissionsminderung an der Einzelraumfeuerung

Der Katalysator wurde im Abgasstutzen vor dem Elektroabscheider angeordnet, um die an dieser Stelle vorliegenden hohen Temperaturen von teilweise über 400 °C für einen effektiven katalytischen Umsatz an CO und VOC sowie ggf. periodischen und nachzuweisenden Rußabbrand zu nutzen (Hartmann 2012).

Die Versuche zur Entwicklung, Optimierung und Charakterisierung der einzelnen Maßnahmen erfolgten auf einem Prüfstand am DBFZ an einer Einzelraumfeuerung der Firma Spartherm (Varia 2L) mit 12 kW Nennwärmeleistung und im Feuerungstechnikum am Institut für Sensorik und Informationssysteme (ISIS) an der Hochschule Karlsruhe-Technik und Wirtschaft. Am DBFZ kam als Brennstoff Buchenscheitholz zum Einsatz. Um die Ergebnisse der einzelnen Messungen untereinander vergleichen zu können, wurde der Anzünd- und Nachlegevorgang jeweils gleich gestaltet. Die Ermittlung der Staubkonzentration erfolgte gravimetrisch über einen gesamten Abbrandzyklus (35 min). Die gasförmigen Abgaskomponenten wurden mittels eines FTIR, eines FID sowie eines paramagnetischen Sauerstoffanalysators bestimmt. Zusätzlich erfolgte eine kontinuierliche Aufzeichnung von Temperatur- und Druckwerten (Staudruck, Druckverlust über Katalysator, Temperatur im Brennraum, Sekundärbrennkammer, Glutbett und Katalysator). Die Abgaskonzentrationen der relevanten Bestandteile wurden sowohl für den Betrieb mit und ohne Katalysator bzw. mit und ohne E-Abscheider ermittelt.

Die Praxistauglichkeit wurde in drei Heizperioden an zwei unterschiedlichen Feldanlagenstandorten untersucht.

Am ISIS wurde eine modifizierte Einzelraumfeuerung des gleichen Typs betrieben. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Entwicklung der Hardware zur separaten Regelung von drei Verbrennungsluftströmen und zur Registrierung der Sensorsignale, von Verbrennungsluft-Regelungsalgorithmen (Software), getrennt für alle Phasen der Verbrennung (Zünd-, Hochtemperatur-, Ausbrand- und Nachlegephase) und auf die Untersuchung der Stabilität der Abgassensoren. Die Referenzierung der Verbrennungsluft-Regelung wurde experimentell durch ähnliche Abgasanalyseverfahren (HT-FTIR, paramagnetische Sauerstoffanalyse) wie am DBFZ durchgeführt.

Methodik Multifuelkessel

Die Umsetzung von elektrostatischer und katalytischer Abgasreinigung an einem ausgewählten Kessel wurde nach dem in Abbildung 2 dargestellten konzeptionellen Aufbau vorgenommen.

Die Positionierung des Elektroabscheiders vor dem Katalysator erfolgte zur Minimierung der Staubbelastung am Katalysator und somit zur Erhöhung der Standzeit als auch Betriebssicherheit. Die Gefahr der Desaktivierung durch Staubablagerungen als auch der Verblockung wird dadurch reduziert. Weiterhin waren die konstruktiven Gegebenheiten des Kessels limitierend für die Integrationsmöglichkeiten.

Die Versuche zur Entwicklung, Optimierung und Charakterisierung der Maßnahmen erfolgten auf dem Prüfstand an einem Kessel mit 49 kW Nennwärmeleistung. Die Praxistauglichkeit wurde anhand von Feld- bzw. Demonstrationsmessungen an einer 120 kW-Anlage gleichen Bautyps bei einem Praxisbetreiber untersucht.

Im Rahmen eines Katalysatorscreenings bezüglich geeigneter kommerziell verfügbarer Materialien wurde die Eignung monolithischer Edelmetallkatalysatoren für den Anwendungs-

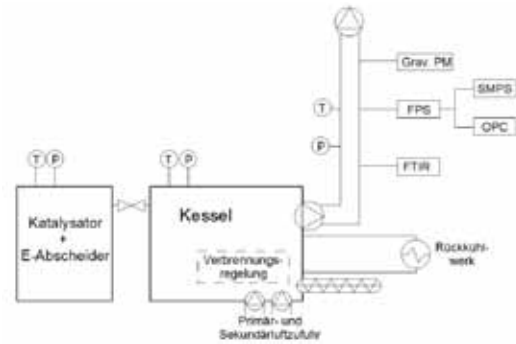


Abbildung 2: Schematische Skizze des Versuchsaufbaus bei den Untersuchungen am Multifuelkessel

fall festgestellt. Mit diesen Systemen ist sowohl eine Oxidation von Kohlenstoffmonoxid als auch flüchtigen organischen Verbindungen möglich (Hartmann 2012). Da bei höheren Temperaturen vor dem Elektroabscheider jedoch eine rasche Desaktivierung zu beobachten war, wurde im Hinblick auf den Dauerbetrieb für die Umsetzung am Feldstandort die Integration einer leicht handhabbaren edelmetallbeschichteten Metallwabe der Fa. Heraeus in einer kühleren Temperaturzone nach dem Elektroabscheider gewählt. Die Temperaturen im Vollastbetrieb liegen an dieser Position bei ca. 250 °C und im Teillastbetrieb von 30 % Leistung bei 150 °C. An der Prüfstandsanlage wurde die Aktivität der Metallwabe untersucht. Die Charakterisierung erfolgte bei Voll- und Teillastbetrieb des Kessels auf Basis der gemessenen Abgaszusammensetzung. Die Staubkonzentration wurde gravimetrisch gemessen. Die gasförmige Abgaszusammensetzung wurde mit einem FTIR, einem FID sowie einem paramagnetischen Sauerstoffanalysator bestimmt und zusätzlich wurden Temperatur- und Druckwerte aufgezeichnet (Staudruck, Druckverlust über Katalysator, Temperatur im Brennraum, Wärmeübertrager und am Katalysator). Die Versuche zur Charakterisierung der Katalysatoren wurden mit ENplus-Holzpellets durchgeführt. Die Abgaskonzentration der relevanten Bestandteile wurde für den Betrieb mit und ohne Katalysator als auch für verschiedene Katalysatoren verglichen. Hinsichtlich folgender Aspekte wurden Versuche durchgeführt:

- Edelmetallbelastung
- Eignung für den Dauerbetrieb/Alterung (Aktivität nach 11-wöchigem Betrieb am Feldmessstandort)
- Steigerung des katalytischen Umsatzes durch Beheizung (im Teillastbetrieb)

Anhand der vorliegenden Prozessbedingungen wurde von dem Projektpartner BTU Cottbus ein Elektroabscheider ausgelegt. Im Rahmen erster Untersuchungen wurde die Konstruktion der Sprüh- und Abscheideelektroden als auch der Hochspannungseinführung variiert und angepasst, um eine geeignete Funktionsweise für den Dauerbetrieb zu erreichen (Hartmann 2012). Die Ausführung mit den höchsten Abscheidegraden als auch einer stabilen Betriebsweise wurde für die weitere Vorgehensweise eingesetzt. Im Hinblick auf die Über-

tragung der Entwicklung auf den Praxisbetrieb mit Temperaturen bis 550 °C am Feldmessstandort wurden Versuche zu folgenden Untersuchungsschwerpunkten durchgeführt:

- Abscheideleistung in Abhängigkeit vom eingesetzten Brennstoff (Brennstoffe: Holz und Miscanthus)
- Wirksamkeit des Elektroabscheiders bei Dauerbetrieb (notwendige Wartungsintervalle)

Zur Bestimmung der Praxistauglichkeit der Maßnahmen wurden der Elektroabscheider und ein Katalysator an der Feldanlage über drei Monate während der Heizperiode 2012/13 betrieben. Die Maßnahmen wurden entsprechend der größeren Nennleistung sowie Dimensionierung des Kessels angepasst. Die Wirksamkeit wurde im Rahmen von drei Messtagen am Anfang, in der Mitte sowie am Ende des Betriebszeitraumes überprüft. Dabei fanden jeweils eine Wartung der Anlage als auch eine Messung der Abgaszusammensetzung statt. Der Betrieb der Kesselanlage wurde durch Aufzeichnen der Kesseldaten (Leistung, Brennstoff- und Luftzufuhr, Abgastemperatur etc.) über den gesamten Betriebszeitraum dokumentiert. Die Fahrweise wurde durch den Anlagenbetreiber bestimmt. Als Brennstoff kamen Industrieholzpellets zum Einsatz.

Ergebnisse Einzelraumfeuerung

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Technikumsuntersuchungen und Feldmessungen zeigen das große Potenzial der einzelnen Emissionsminderungsmaßnahmen auf (Thiel 2013). So konnten am DBFZ mit dem vom Projektpartner BTU Cottbus entwickelten Elektroabscheider an der Einzelraumfeuerung Staubminderungsgrade von ca. 60 % bei Verweilzeiten von durchschnittlich 1,5 s erzielt werden. Durch den Einsatz der modifizierten Drahtgestrickkatalysatoren konnten die Kohlenstoffmonoxidemissionen um 50 % gegenüber dem Betrieb ohne Katalysator reduziert werden. Auch flüchtige organische Verbindungen (VOC) wurden mit dem eingesetzten Katalysator oxidiert und können bei ausreichend hohen Katalysatortemperaturen zur Absenkung von VOC-Belastungen eingesetzt werden. Das Katalysatormodul ermöglicht dementsprechend einen sicheren Betrieb bei gleichzeitiger Reduzierung von CO und VOC.

Am ISIS wurde die ERF ohne Elektroabscheider jedoch auch mit Oxidationskatalysator betrieben. Die Neuentwicklung der abgassensorbasierten Verbrennungsluftregelung zeigte ein hohes Emissionsminderungspotenzial. Insbesondere können durch Verbrennungsluftregelung emissionsintensive, instationäre Verbrennungsbedingungen (Zündphasen bei Kaltstart und nach dem Nachlegen) deutlich besser geregelt und insgesamt kürzer gehalten werden als bei Handbetrieb. Dies bedeutet eine erhebliche Absenkung sowohl der gasförmigen als auch der partikulären Emissionen. Beispielweise wurden in den Hochtemperaturphasen CO-Abgaskonzentrationen von unter 300 mg/m³ (bezogen auf 13 % Restsauerstoffgehalt) erzielt. In der Heizperiode 2012/13 konnten unter Nutzung der am ISIS entwickelten Hard- und Software Praxisergebnisse an der Einzelraumfeuerung mit dem eingebauten Katalysatormodul, dem Elektroabscheider und dem ersten Funktionsmuster der Regelung gewonnen werden (Thiel 2013).

Eine wirtschaftliche Umsetzung bzgl. Regelung und Abgassensorik, aber auch hinsichtlich des E-Filter, ist derzeit jedoch noch nicht realisierbar. Insbesondere reicht die Langzeitstabilität des CO/HC-Sensors bisher nicht aus. Gelingt es, den CO/HC-Gehalt im Abgas mit einer ausreichend langzeitstabilen Sensorik zu analysieren und die Kosten für Sensorik und Regelungstechnik auf ein akzeptables Maß zu reduzieren, dann stehen allerdings der Einführung dieses erheblich umweltentlastenden Feuerungskonzeptes keine wesentlichen Hürden mehr im Wege. Weiterführende Optimierungen wurden in der Heizperiode 2013/2014 durchgeführt und an einem zweiten Feldstandort erfolgten abschließende Demonstrationmessungen.

Am zweiten Feldstandort in Bad Lausick wurde die Demonstrationsanlage im Gegensatz zum ersten Feldstandort mit dem Elektroabscheider „Airbox“ und der Steuerung „S Thematik pro“ der Firma Spartherm ausgerüstet. Als Katalysator wurde das bereits am ersten Feldstandort eingesetzte Katalysatormodul basierend auf edelmetallbeschichteten Drahtgestriken verwendet. Die Versuchsdurchführung an beiden Feldmessstandorten war identisch.

Tabelle 1: Ergebnisse der ersten Demonstrationmessung am Standort Bad Lausick (zweiter Feldstandort) ohne Katalysatormodul

Versuch	O ₂ Vol.-%	CO mg/m ³ i.N.	Gesamtstaub mg/m ³ i.N.
Referenz (Prüfstand)	15,5	1.548	170
mit HV	14,4	825	26
Reduzierung	7 %	47 %	85 %
ohne HV	14,7	757	44
Reduzierung	5 %	51 %	74 %

Tabelle 2: Ergebnisse der zweiten Demonstrationmessung am Standort Bad Lausick (zweiter Feldstandort) mit Katalysatormodul

Versuch	O ₂ Vol.-%	CO mg/m ³ i.N.	Gesamtstaub mg/m ³ i.N.
Referenz (Prüfstand)	15,5	1.548	170
mit HV	13,1	394	24
Reduzierung	15 %	75 %	86%
ohne HV	13,1	337	67
Reduzierung	15 %	78 %	61%

Die gasförmigen Abgaskomponenten wurden mit einem tragbaren Abgassenssystem der Firma Messtechnik Eheim gemessen, zusätzlich wurden vier gravimetrische Staubmessungen, jeweils abwechselnd mit ein- bzw. ausgeschaltetem Elektroabscheider durchgeführt. Der Abscheidegrad lag an beiden Versuchstagen zwischen 48 % und 54 %. Hinsichtlich der CO-Emissionen konnte an beiden Versuchstagen eine Reduzierung von 75 bis 85 % im Vergleich zur Referenzmessung erzielt werden. Die Ergebnisse an zwei unterschiedlichen Tagen sind in Tabelle 1 (Betrieb ohne Katalysatormodul) und Tabelle 2 (Betrieb mit Katalysatormodul) dargestellt.

Auch ohne den Einsatz des Katalysatormoduls (vgl. Tabelle 1) wurden durch den Betrieb der Einzelraumfeuerung mit der Steuerung gegenüber der Referenzmessung deutlich geringere Emissionen erzielt. Der durch den Elektroabscheider erzielte Abscheidegrad für Staub lag bei ca. 41 %.

Weiterhin erfolgten Messungen mit eingebautem Katalysator. Als Katalysatormodul wurde der bereits am Feldstandort 1 eingesetzte und damit über eine Heizperiode gealterte Drahtgestrickkatalysator verwendet. Insgesamt wurden vier gravimetrische Staubmessungen durchgeführt, abwechselnd bei ein- bzw. bei ausgeschaltetem Elektroabscheider. Hinsichtlich der CO-Emissionen konnte gegenüber dem Betrieb ohne Katalysator eine Reduzierung von 52 % bei eingeschaltetem Elektroabscheider bzw. von 55 % bei ausgeschaltetem Elektroabscheider erzielt werden. Die Staubemissionen konnten durch den Einsatz des Elektroabscheiders um ca. 65 % von 67 auf 24 mg/m³i.N. bei 13 Vol.-% O₂ reduziert werden. Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Referenzmessungen und dem Betrieb der Anlage ohne und mit Katalysator und Elektroabscheider kann der Abbildung 3 entnommen werden.

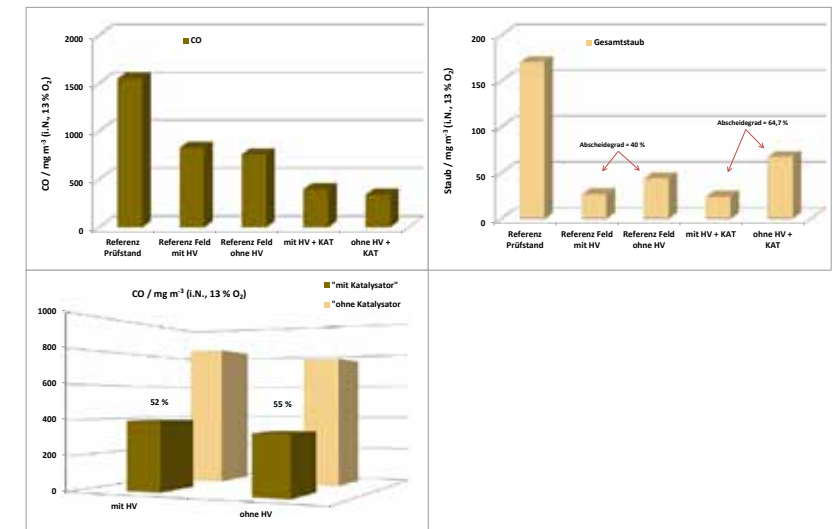


Abbildung 3: Gegenüberstellung der Emissionen aus der Referenzmessung und der Feldmessung am zweiten Feldstandort

Ergebnisse Multifuelkessel

Die auf dem Prüfstand und am Feldmessstandort durchgeführten Untersuchungen zeigen eine Reduzierung der Kohlenstoffmonoxid- und Staubkonzentration im Abgas mit der entwickelten Kombination von Elektroabscheider und Katalysator (Matthes 2013). Es bestehen jedoch noch weitere Optimierungs- und Entwicklungspotenziale sowohl in Bezug auf die Reduzierungsrate von CO und den Abscheidegrad von Staub als auch hinsichtlich einer Emissionsminderung an flüchtigen organischen Verbindungen sowie Stickoxiden.

Die innerhalb des Projektes durchgeführten Versuche zeigen, dass bei den untersuchten kommerziell verfügbaren Edelmetallkatalysatoren zwar eine Aktivität für die Oxidation von CO und VOC vorhanden ist, die notwendige Stabilität für den Einbau des Katalysators in der gewünschten Temperaturzone der Anlage zur Umsetzung von VOC jedoch nicht ausreicht. Begründet liegt dies in den schwankenden Prozessbedingungen bei Biomassefeuerungsanlagen. Der größte Emissionsminderungsbedarf besteht während der An- und Abfahrphasen als auch im Teillastbetrieb, wobei in diesen Phasen die Temperaturen am geringsten sind. Eine brennraumnahe Positionierung der Katalysatoren zur Ausnutzung der vorhandenen Prozesswärme verursacht aber eine thermische Desaktivierung während des Volllastbetriebes. Weiterhin ist durch die Rohstoffpreise für die eingesetzten Edelmetalle ein gewisser Kostenfaktor gegeben, welcher bei nicht ausreichender Standzeit und Wirkung ein Hemmnis für den kommerziellen Einsatz bei Biomassefeuerungen ist. Dementsprechend besteht ein Bedarf, hochtemperaturstabile Katalysatoren wenn möglich auf Basis kostengünstigerer Metallverbindungen zur Marktreife zu entwickeln. Auch im Bereich der Beheizungsmethodik sowie Elektroabscheidung besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Für die Beheizung von Katalysatoren ist Entwicklungsarbeit bezüglich der Umsetzung bestehender Konzepte in kommerziell einsetzbare Produkte gegeben. Der Einsatz der elektrostatischen Abscheidung bei hohen Temperaturen würde die Möglichkeiten für den Einsatz in Feuerungsanlagen stark erweitern. Die Untersuchungen dazu sind bisher jedoch im Stadium der Grundlagenforschung angesiedelt. Durch die hohen Temperaturen kommt es zu einem hohen Stromfluss und damit einer hohen Leistungsaufnahme in Elektroabscheidern aufgrund des ungünstigeren Strom-/ Spannungsverhaltens. Zusätzlich wird die sehr effektive, selbständige Partikelreduzierung durch Koagulation der infolge der Verbrennung bipolar aufgeladenen Partikel durch die unipolare Aufladung im Elektroabscheider gehemmt. Das erhöht den Energieaufwand und reduziert den Abscheidegrad im Vergleich zu nachgeschalteten Elektroabscheidern, bei denen die Koagulation weitestgehend abgeschlossen ist und damit weniger aber dafür größere Partikel entfernt werden müssen. Für die bisher entwickelte Anlagentechnik ist eine noch detailliertere Charakterisierung und Dokumentation der Wirkungsweise wünschenswert. Ein möglicher Einfluss der Maßnahmen auf flüchtige organische Verbindungen als auch Stickoxide kann anhand der Ergebnisse nicht festgestellt werden. Untersuchungen mit weiteren Brennstoffen als auch unter abweichenden Prozessbedingungen bspw. bei Fehleinstellung der Regelungsparameter sollen weitere Erkenntnisse liefern.

In den abschließenden Untersuchungen der letzten Heizperiode wurden Prüfstanduntersuchungen zur Darstellung des Entwicklungsstandes sowie der Demonstrationsbetrieb zur Bewertung der praktischen Einsetzbarkeit durchgeführt. Die Notwendigkeit von Emissi-

onsminderungsmaßnahmen ist insbesondere bei anspruchsvollen Brennstoffen gegeben, bei denen aufgrund der Zusammensetzung eine emissionsarme Verbrennung allein durch eine entsprechende Verbrennungsregelung nicht möglich ist. Dementsprechend wurden bei den abschließenden Untersuchungen Getreideausputzpellets eingesetzt, um bisherige Möglichkeiten und Grenzen mit den Maßnahmen als auch weiteren Forschungsbedarf zu ermitteln.

Vor der Demonstrationsmessung wurde eine Wartung des Kessels, der Messgeräte sowie der Maßnahmen (Elektrofilter und Katalysator) durchgeführt. Ebenso wurde die Wärmedämmung des Elektroabscheiders verstärkt, eine automatische Vorrichtung zur Abreinigung der Abscheideelektroden integriert und die Neuaufgabe der Regelung eingebaut.

Als Brennstoff wurden an den Messtagen Getreideausputzpellets und im kontinuierlichen Betrieb Industriepellets eingesetzt. Eine Ausnahme bildete der letzte Messtag zum Abschluss der Heizperiode. Hier wurde der Betrieb nicht mit Getreideausputzpellets sondern mit den Industriepellets genauer charakterisiert. Bei den Getreideausputzpellets handelte es sich um dieselbe Charge, mit der auch die Prüfstanduntersuchungen am DBFZ durchgeführt wurden. Mit Einsatz der Getreideausputzpellets wurde eine Untersuchung der Maßnahmen mit einem anspruchsvollen Brennstoff mit einem hohem Ascheanteil von 6,5 % bezogen auf die Trockensubstanz durchgeführt. Insbesondere bei derartigen Brennstoffen ist eine deutliche Emissionsminderung notwendig. Bereits im Rahmen des ersten Messtages wurde der Wartungsaufwand beim Betrieb mit den Getreideausputzpellets deutlich. Aufgrund des hohen Ascheanteils und der Verschlackungsneigung ist eine Kesselreinigung in Abständen von ein bis zwei Tage bei kontinuierlichem Betrieb unumgänglich. Auch die Förderung über die Stoker-Schnecke war wesentlich kritischer aufgrund der Brennstoffeigenschaften. Ein Bruch der Stoker-Schnecke an der Verbindung zum Motor trat aufgrund von den bei der Förderung auftretenden Scherkräften auf. Die im Rahmen dieser Heizperiode eingesetzte Industriepelletcharge hatte dagegen gute Brennstoffeigenschaften. Der Heizwert von 19,2 MJ/kg Trockensubstanz als auch der aus der Elementaranalyse bestimmte Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt entsprachen den im Rahmen des Projektes eingesetzten ENplus-Holzpelletcharges. Lediglich der Ascheanteil und Wassergehalt waren mit 1 Ma.-% TS bzw. 8,7 Ma.-% etwas höher (Holzpellets: Asche ca. 0,3 Ma.-% TS und Wasser ca. 7,0 Ma.-%). Während des regulären Betriebs außerhalb der Messtage wurde der Kessel häufig langanhaltend in einem Teillastbetrieb bei 70 bis 80 % Leistung betrieben. Die CO-Konzentration im Abgas lag gemittelt über die gesamte Heizperiode durchschnittlich bei 300 – 400 mg/m³ und die NO_x-Konzentration bei etwa 100 mg/m³ (jeweils i.N., bezogen auf 13 Vol.-% O₂). Die Bestimmung der Wirksamkeit und Funktionsfähigkeit der Maßnahmen erfolgte anhand der an den drei Feldmesstagen generierten Daten unter definierten Bedingungen. Die Abgaszusammensetzung aus der Anlage wurde im Volllastbetrieb und im Teillastbetrieb (30 % Leistung) jeweils über ein Ascheschieberintervall gemessen. Zur Charakterisierung der elektrostatischen Staubabscheidung wurde mit und ohne anliegende Hochspannung gemessen. Am letzten Messtag fand zusätzlich eine Messung ohne Maßnahmen statt, um die Wirksamkeit des Katalysators zu bestimmen. Weiterhin konnte so der Einfluss des durch die Integration der Maßnahmen veränderten Aufbaus ermittelt werden. In Tabelle 3 sind die Messergebnisse für die verschiedenen Messtage und Konfigurationen aufgelistet.

Tabelle 3: Abgaskonzentrationen bei Betrieb der 120 kW Kompaktanlage am Feldmessstandort mit Getreideausputzpellets (GA: Messtag 1 und 2) sowie Industriepellets (IP4: Messtag 3) als Brennstoff

Last	Kat	HV	BS	O ₂	CO	NO _x	Staub
Messtag 1				Vol.-%	mg/m ³ i.N. bei 13 Vol.-% O ₂		
Volllast	Ja	An	GA	10,8	54	217	77
Volllast	Ja	Aus	GA	10,7	142	212	188
Teillast 30 %	Ja	An	GA	13,1	628	195	39
Teillast 30 %	Ja	Aus	GA	12,8	378	185	209
Messtag 2				Vol.-%	mg/m ³ i.N. bei 13 Vol.-% O ₂		
Volllast	Ja	An	GA	8,9	30	270	50
Volllast	Ja	Aus	GA	12,1	3	401	141
Teillast 30 %	Ja	An	GA	14,0	57	265	39
Teillast 30 %	Ja	Aus	GA	12,7	60	213	145
Messtag 3				Vol.-%	mg/m ³ i.N. bei 13 Vol.-% O ₂		
Volllast	Nein	Ohne ES	IP4	11,1	39	100	16
Volllast	Ja	An	IP4	12,4	21	104	6
Volllast	Ja	Aus	IP4	12,4	14	105	15
Teillast 30 %	Nein	Ohne ES	IP4	15,1	668	84	46
Teillast 30 %	Ja	An	IP4	15,9	300	88	21
Teillast 30 %	Ja	Aus	IP4	15,9	463	88	64

Während des ersten Messtages befand sich der Katalysator noch nach dem Elektroabscheider, damit eine möglichst geringe Staubbelastung gegeben ist. Da jedoch im Rahmen des Feldbetriebs als auch bei den Prüfstanduntersuchungen kein oder nur ein geringer Effekt aufgrund der geringen Temperaturen sichtbar war, wurde der Katalysator ab dem zweiten Messtag vor dem Elektroabscheider positioniert. Während nach dem Elektroabscheider Temperaturen von max. 250 – 300 °C auftraten, wurden im Volllastzustand vor dem Elektroabscheider am installierten Katalysator 350 bis 400 °C gemessen und bei 30 % Teillast immer noch 220 °C ermöglicht. Für die Stickoxidkonzentration ist kein Einfluss der Maßnahmen erkennbar.

Die Ergebnisse der elektrostatischen Staubabscheidung vom Prüfstand wurden an der Feldanlage bestätigt. Es wurden Abscheidegrade von etwa 60 bis 70 % bei Volllast und rund 70 bis 80 % bei Teillast ermittelt. Mit dem Einsatz des Katalysators vor dem Elektroabscheider konnten auch die Standzeit, Verblockungsneigung und Wirkung des Katalysators bei höherer Staubbelastung im Praxisbetrieb geprüft werden.

Prinzipiell wurde im Rahmen der Demonstrationsmessungen deutlich, dass eine Minderung der CO-Konzentration durch einen Katalysatoreinsatz und auch der Dauerbetrieb einer Anlage mit einem Katalysator möglich sind. Ein Katalysatoreinsatz bei höheren Temperaturen ist für eine entsprechende Wirksamkeit anzustreben. Dementsprechend sind auf diesem Gebiet weitere Entwicklungs- und Forschungsarbeiten notwendig. Die Einhaltung der in der 1. BImSchV und der TA Luft vorgegebenen Grenzwerte für Kohlenstoffmonoxid ist bei Betrieb im Volllast- oder hohen Teillastbereich in jedem Fall möglich. Im niedrigen Teillastbereich werden die Grenzwerte nur teilweise unterschritten.

Beitrag zur Nachhaltigkeit

Zur Klimaschutzwirkung tragen Biomasse-Kleinfeuerungen bei, da diese CO₂-neutrale regenerativ erzeugte Wärme dezentral bereitstellen. Insbesondere Einzelraumfeuerstätten wie auch der Altbestand an Zentralheizungskesseln können aber ohne zusätzliche Maßnahmen die Grenzwerte der novellierten 1. BImSchV nicht einhalten. Somit würden diese Anlagen nicht mehr zur Reduzierung von CO₂-Emissionen aus Verbrennungsprozessen beitragen können, wenn diese keine Betriebserlaubnis mehr erhalten.

Tabelle 4: Daten und Ergebnisse zur Ermittlung des THG-Minderungspotentials

Einzelraumfeuerstätten (ERF)	
Neuanlagen pro Jahr	350.000
Umrüstbarer Anteil	20 %
Altanlagen	12.000.000
Umrüstbarer Anteil	3 %
Anzahl	430.000
Jährliche Vollbenutzungszahl (h) (Haushalt)	580
Mittlere Leistung (kW)	7,0
Gesamtleistung (MW)	3.010
Aktivitätsniveau (MWh)	1.745.800
CO ₂ -Emissionsminderung (t CO ₂ /MWh) (Öl)	0,20
THG-Minderungspotenzial (t CO ₂ -Äq.) (Öl)	349.160
Kesselanlagen	
Anlagen	38.400
Umrüstbarer Anteil	10 %
Anzahl	3.840
Jährliche Vollbenutzungszahl (h) (Haushalt)	950
Mittlere Leistung (kW)	22,9
Gesamtleistung (MW)	88
Aktivitätsniveau (MWh)	83.619
CO ₂ -Emissionsminderung (t CO ₂ /MWh) (Öl)	0,30
THG-Minderungspotenzial (t CO ₂ -Äq.) (Öl)	25.086
Gesamtsumme THG-Minderungspotenzial (t CO ₂ -Äq.) (Öl)	374.246
THG-Minderung (t CO ₂ -Äq./€ Fördermittel) (Öl) (3,25 Jahre)	1,38

Das Treibhausgas-Minderungspotential des Vorhabens lässt sich berechnen, indem sowohl der Bestand der jährlich installierten Neuanlagen als auch ein geringerer Prozentsatz an Altanlagen der Einzelraumfeuerstätten sowie Zentralheizungskessel berücksichtigt werden. Es wird bei der Berechnung davon ausgegangen, dass nach erfolgreicher Entwicklung eines katalytischen Abgasreinigungsverfahrens 20 % der neu installierten Einzelraumfeuerungen sowie 3 % der Altanlagen mit diesen Maßnahmen ausgerüstet werden. Auch Zentralheizungskessel (Pelletkessel) für alternative Brennstoffe (Stroh, Heu, u.a. Halmgutartige) mit einem Anteil von 10 % können am Markt eingesetzt werden. Die auf die Energiemenge bezogene Masse an eingespartem CO₂ beim Einsatz CO₂-neutraler Energieträger in Zentralheizungen beträgt 0,30 t/MWh gegenüber Öl. Bei Einzelraumfeuerstätten ergibt sich aufgrund des geringeren Wirkungsgrades ein Wert von 0,20 t/MWh. Die genannten Feuerungen sind für den Einsatz im Haushaltsbereich interessant. Auch im gewerblichen Bereich, der jedoch in der Betrachtung zunächst nicht berücksichtigt wird, sind Anlagen mit der Technik nachrüstbar. In der Tabelle 4 sind unter Berücksichtigung von Bestandsdaten vom UBA (Struschka 2008) die Werte zur Berechnung des THG-Minderungspotenzials aufgeführt. Pro Euro Fördermitteleinsatz wird eine THG-Minderung von ca. 1,38 t CO₂ bei einer Projektlaufzeit von 3,25 Jahren erhalten. Das Gesamt-THG-Minderungspotenzial für die umgerüsteten Anlagen pro Jahr beträgt rund 0,37 Mio. t CO₂.

Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die entwickelten Anlagenkonzepte sind prinzipiell auch auf andere Anlagen übertragbar. Seitens der Verbrennungsluft-Regelung wurden ähnliche Konzepte eingesetzt, die sich auch schon beim Betrieb eines Stückholz-Heizkessels und eines Kachelofen-Einsatzes bewährt hatten. Eine Anpassung an gleiche Anlagentypen mit höherer Leistung ist durch eine entsprechend größere Dimensionierung möglich und wurde für den Multifuelkessel bereits demonstriert. Die auf dem Prüfstand entwickelten Maßnahmen des 49 kW-Kessels wurden für die Feldmessungen für eine 120 kW-Anlage angepasst. Bei anderen Anlagentypen ist die Umsetzung der entwickelten Konzepte für Elektrostatik und Katalysator im Allgemeinen auch möglich, jedoch werden aufgrund der abweichenden Konstruktion von Feuerungsanlagen Anpassungen für die Integration notwendig sein.

Insgesamt zeigte sich bei der elektrostatischen Staubabscheidung eine Limitierung durch die geringen Verweilzeiten, die durch eine etwas großzügigere Auslegung behoben werden könnten.

Die Einführung der wirksamen Maßnahmen als kommerzielle Anwendung, beispielsweise des Katalysators an der Einzelraumfeuerungsanlage, kann auch bei weiteren Anlagenherstellern zur Aufnahme eines vergleichbaren Produktes ins Verkaufsprogramm führen, um entsprechend konkurrenzfähig zu bleiben.

Literaturverzeichnis

- BUTSCHBACH P., HAMMER F., KOHLER H., POTREK A., TRAUTMANN T. (2009): Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensorics and catalytic treatment of the exhaust gas, *Sensors and Actuators B* Bd. 137, Nr. 1, S. 32-41.
- DÖHLING, F.; HARTMANN, I.; LENZ, V.; SCHRÖDER, T.; VON SONNTAG, J.; ULBRICHT, T. (2012): Wärme aus Holz - Feinstaubemissionen, Ergebnisse zur Emissionsminderung an Holzfeuerungen. Konferenz „Energetische Biomassenutzung - Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft“, Berlin, 5.11.2012.
- HARTMANN, I.; BINDIG, R.; MATTHES, M.; THIEL, C. (2012): Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse-Kleinfeuerungen. Konferenz „Energetische Biomassenutzung - Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft“ Berlin, 5.11.2012.
- HARTMANN, I.; LENZ, V.; SCHENKER M.; THIEL, C.; KRAUS, M.; MATTHES, M.; ROLAND, U.; BINDIG, R.; EINICKE, W.-D. (2011): Katalytisch unterstützte Minderung von Emissionen aus Biomasse-Kleinfeuerungsanlagen, DBFZ Report Nr. 6.
- KIENER, S.; TUROWSKI, P.; HARTMANN, H.; SCHMOECKEL, G. (2010): Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel. Berichte aus dem TFZ – 23.
- KOHLER, H., POTRECK, A., TRAUTMANN, T. (2013): Verfahren und Vorrichtung zur Verbrennung von Brennstoffen, Europäische Patentschrift EP 2066 972 B1.
- KOHLER H.; BRUNNER S.; BUTSCHBACH P.; GLESING D. (2012): Sensorik und Abgas-Katalyse zur Reduktion der Emissionen von Klein-Holzfeuerungsanlagen, Konferenz „Energetische Biomassenutzung - Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft“ Berlin, 5.11.2012.
- LENZ, V.; ULBRICHT, T.; BAUMBACH, G. (2013): Prüfung der Wirksamkeit von Abscheidern an kontinuierlich arbeitenden Holzfeuerungen mit einstellbaren Abgasparametern-Vorschlag für die Norm DIN 33999. Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft Bd. 6, S. 261-267.
- LENZ, V.; THRÄN, D.; HARTMANN, H.; TUROWSKI, P.; ELLNER-SCHUBERT, F.; GERTH, J. (2010): Bewertung und Minderung von Feinstaubemissionen aus häuslichen Kleinfeuerungsanlagen. DBFZ-Report Nr. 1.
- MATTHES, M.; HARTMANN, I. (2013): Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse-Kleinfeuerungen – Feuerungsanlage: Multifuelkessel. Konferenz „5 Jahre BMU-Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“: Wege zur effizienten Bioenergie“, Leipzig, 14.11.2013.
- RIEBEL, U.; LÜBBERT, C.; LEBEDYNSKY, S. (2012): Elektroabscheider - es gibt noch viel zu tun. CIT, Wiley-VCH: Weinheim
- STRUSCHKA, M.; KILGUS, D.; SPRINGMANN, M.; BAUMBACH, G. (2008): Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung, Dessau-Roßlau, Umweltbundesamt.
- THIEL, C.; HARTMANN, I.; KOHLER, H.; BRUNNER, S. (2013): Emissionsminderung durch integrierte und kombinierte Maßnahmen in Biomasse-Kleinfeuerungen – Feuerungsanlage: Einzelraumfeuerungsanlage. Konferenz „5 Jahre BMU-Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“: Wege zur effizienten Bioenergie“ Leipzig, 14.11.2013.



Optimierung regionaler Kreisläufe zur Bereitstellung biogener Brennstoffe für Energieerzeugungsanlagen am Beispiel des Biomassehofs Achental

Bernhard Schaubberger¹, Gerald Binder², Dr. Christian Epp¹, Josef Huber¹, Dr. Thomas Kienberger², Wolfgang Wimmer¹

Vorhaben: Optimierung regionaler Kreisläufe zur Bereitstellung biogener Brennstoffe für Energieerzeugungsanlagen am Beispiel Biomassehof Achental

FKZ-Nr.: O3KB053

Laufzeit: 01.12.2010 – 31.08.2013

Zuwendungssumme: 169.278,12 €

Koordination:

¹ Biomassehof Achental GmbH & Co. KG
Eichelreuth 20, 83224 Grassau
www.biomassehof-achental.de

Projektpartner:

² agnion energy GmbH
Löwenstraße 11, 85276 Pfaffenhofen

Kontakt:

Wolfgang Wimmer
Telefon: +49 (0)8641 6941 43-0
E-Mail: w.wimmer@biomassehof-achental.de



Wolfgang Wimmer
(Projektleiter):

Das Achental baut mit den optimierten Kreisläufen seine europaweite Vorbildrolle bei den erneuerbaren Energien noch weiter aus. Die dezentrale und effiziente Heatpipe-Technologie fügt sich ideal in unseren ländlichen Standort und die bestehenden Stoffströme ein.

Zusammenfassung

Das Kernstück in der "Optimierung regionaler Kreisläufe" in der Bioenergie-Region Achental war die Integration einer dezentralen Holzvergaseranlage in die regionalen Stoffkreisläufe. Sowohl die Stoffströme als auch der Vergaser sollen dabei ökologisch und wirtschaftlich optimiert werden. Dabei spielten der Biomassehof Achental (BAT) in Grassau und die Firma agnion in Pfaffenhofen a.d. Ilm sehr gut zusammen: während der Biomassehof seit mehreren Jahren mit der Hilfe neuer Technologien die selbstständige Versorgung der Region mit erneuerbaren Energien voranbringt, war agnion auf der Suche nach einem ersten Praxisstandort für ihre Pilotanlage. Eine Machbarkeitsstudie (FKZ-Nr. O3KB031) hat im Jahr 2010 das Potenzial für den Standort bescheinigt.

Neben der Untersuchung qualitativ verschiedener Brennstoffe, deren Aufbereitungswegen und dem Aufbau der Praxisanlage des Heatpipe-Reformers wurde vor allem auf die Replikation der Ergebnisse in anderen Regionen großer Wert gelegt.

In allen Punkten konnten wichtige Fortschritte gegenüber der bisherigen Praxis erzielt werden. Im Bereich der Brennstoffaufbereitung wurden Wege etabliert, um auch Rohstoffe mit sehr geringer Ausgangsqualität zu nutzbaren und standardisierten Brennstoffen aufzubereiten. Die Analyse der Trocknung von Holzhackschnitzeln mit unterschiedlich komplexen Anlagen lieferte klare Hinweise für die Verwendung einfacher Techniken (Trocknung in Hallen oder technisch einfachen Containern). Bei der Holzvergasung konnten mit Hilfe des Heatpipe-Reformers neue Wege zur Verwertung von minderwertigen Materialien beschritten werden: neben einem stabilen Betrieb mit Hackschnitzeln wurden insbesondere Mischpellets aus energetisch bisher wenig nutzbaren Stoffen (Grünschnitt, Streuwiesen gras, Kronenrestholz) als grundsätzlich für die Vergasung geeignet identifiziert. Die Übertragung der Ergebnisse aus dem Achental wäre in mehrere Regionen Deutschlands und Europas möglich, insbesondere zum Beispiel nach Ostachsen, wo ebenfalls Standortuntersuchungen erfolgten.

Summary

The core task of "Optimizing regional circuits" in the bioenergy region Achental was to integrate a decentralized wood gasification plant into existing material and energetic flows. Apart from improving the latter, the gasification plant required an optimization to manage the step from pilot plant to practice. The "Biomassehof Achental" (Biomass Trading Centre Achental) in Grassau and agnion in Pfaffenhofen a.d. Ilm formed a well-rehearsed team: while the Biomassehof has been pushing the energy independence of the Achental region with renewable technologies for several years, agnion was on the quest for a site for a first practice test of the new gasification technique established in a well-studied pilot plant. A feasibility study (funding ID O3KB031) confirmed the positive potential of the Achental in 2010, such that an immediate start was possible.

Besides analyzing of qualitatively different woody combustibles, their ecological and economic processing and the construction of the so-called "Heatpipe Reformer" (HPR) the transferability of the results into other regions also played an important role in the project. Important achievements over the status quo could be gained in all fields. The conditioning

of combustibles established new ways of converting material even with very low quality into standardized fuels (wood chips). The drying of wood chips was analyzed with different technologies and revealed clear preferences for simple, but robust solutions (drying in floor-aerated halls or simple containers). With the help of the HPR wood gasifier the exploitation of low-quality fuels comes closer: next to a stable operation with wood chips the possibility of using mixed-pellets from currently hardly usable resources (e.g. green waste, litter meadows or felling residues) was proven in the gasification laboratory. Transferring the results would be possible in several regions of Germany and Europe, e.g. to East Saxony, where parallel investigations were carried out.

Hintergrund und Zielstellung

Der Biomassehof Achenal ist ein modellhaftes Regionalunternehmen in Zusammenarbeit aus Kommunen und privaten Unternehmen. Er hat es sich zum Ziel gesetzt, die biogenen holzartigen Reststoffe der Region, die eine meist noch ungenutzte Ressource darstellen, energetisch nutzbar zu machen. Das regionale Potenzial ist dabei erheblich, liegt jedoch zu einem großen Teil in energetisch bisher nur schwer zu verwertenden Reststoffen wie Landschaftspflege- oder Waldrestholz. Zur Nutzung dieser Art von Brennstoffen ist eine Optimierung nötig, die sich von der Logistik über Lagerung, Trocknung und Konditionierung bis zur rigorosen Qualitätssicherung erstreckt. Als künftige Brennstoffe für verschiedene Systeme könnten diese in den Markt gebracht und damit das Potenzial der erneuerbaren Energien deutlich gesteigert werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurden daher diverse Aufbereitungswege und die Eignung zur Verwertung in bestimmten Anlagentypen getestet: das Spektrum reicht dabei von kleinen Biomasse-Feuerungsanlagen im Haushaltsbereich bis hin zu Biomasse-Kesseln im Megawatt-Bereich für die Fernwärmeerzeugung. Im Bereich des Biomassehofs Achenal sind auf engem Raum zahlreiche dieser Anlagen verfügbar.

Insbesondere war im Projekt auch die Errichtung einer thermochemischen Vergasungsstation (dem sog. Heatpipe-Reformer = HPR) durch die agnion Energy GmbH zur Produktion von Wärme und Strom geplant, um als weitere Technologie-Plattform zur Verfügung zu stehen. Der Betrieb des Heatpipe-Reformers (1,3 MW Feuerungsleistung zu 630 kW_{th}

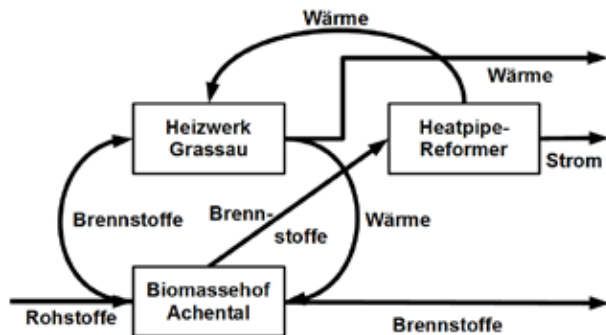


Abbildung 1: Schema der drei Anlagen am Standort des Biomassehofs Achenal in Grassau. Die „Optimierung“ bezieht sich auf die Stoffströme zwischen ihnen.



Abbildung 2: Heizwerk Grassau (links) und Heatpipe-Reformer (rechts) in Grassau. Die Hallen des Biomassehofs sind ganz links im Ausschnitt zu sehen.

und 400 kW_{el} am Ausgang) sollte mit verschiedenen Brennstoffen untersucht werden. Während der aus dem Synthesegas über ein BHKW produzierte Strom für die Einspeisung ins öffentliche Netz geplant wurde, sollte die Abwärme an das Heizwerk in Grassau bzw. den Biomassehof Achenal übergeben werden, um für die Fernwärmeversorgung und die Aufbereitung von Brennstoffen zur Verfügung zu stehen. Die HPR-Anlage sollte von agnion errichtet und in Grassau zur Praxisreife gebracht werden.

Für das Gelingen des Projekts gab es zum Zeitpunkt der Antragstellung sehr gute Voraussetzungen. Neben der mehrjährigen Erfahrung in der Brennstoffaufbereitung am Biomassehof Achenal wurde in einer ersten Stufe eine Machbarkeitsstudie für eine dezentrale Holzvergassungsanlage im Achenal durchgeführt. Die Studie kam zu einem positiven Ergebnis und entwickelte ein tragfähiges Konzept zur Installation der Holzvergassung mit Hilfe des HPR. Schließlich konnte die Firma agnion bereits mehrjährige Erfahrung mit dem fast reibungslosen Betrieb einer Pilot-Vergasungsanlage in Pfaffenhofen aufweisen. Die Praxisreife der Anlage war somit gegeben.

Ein Schema der Anlagen am Standort Grassau ist in Abbildung 1 dargestellt. Die „Optimierung regionaler Kreisläufe“ bedeutet dabei die wirtschaftlich und technisch optimierte Abstimmung der Stoffströme zwischen den einzelnen Anlagen. Der BAT liefert Brennstoffe unterschiedlicher Qualität an Heizwerk, HPR und private Kunden. Das Heizwerk und der Vergaser produzieren daraus Wärme für das öffentliche Fernwärmenetz, und die Restwärme wird für die Materialtrocknung am BAT verwendet. Der HPR erzeugt zudem Strom für das örtliche Verteilnetz. In Abbildung 2 ist eine Ansicht des Geländes mit Heizwerk Grassau (links) und Heatpipe-Reformer (rechts) zu sehen; im ganz linken Bildabschnitt sind Teile der Trocknungshallen des Biomassehofs erkennbar.

Methoden und Ergebnisse

Die Untersuchungen zur Optimierung der regionalen Kreisläufe bestanden aus drei Teilen:

- (i) Analyse der Brennstoffe auf Eignung und Mobilisierungspotenzial
- (ii) Aufbau und Inbetriebnahme des Heatpipe-Reformers in Grassau
- (iii) Einbindung aller Anlagen (Biomassehof, Heizwerk, HPR) in ein energetisches Gesamtkonzept

Der erste Teil wurde vor allem vom Biomassehof, der zweite Teil von agnion und der dritte gemeinsam durchgeführt.

Analyse der Brennstoffe

Die Analyse der Brennstoffe hatte zum Ziel eine Liste von wohldefinierten Brennstoffen, die in ausreichender Menge vorhanden sind, zu wirtschaftlich und ökologisch angemessenen Konditionen produziert werden können und prinzipiell für die Vergasung oder Verbrennung geeignet sind, zu erstellen. Diese Liste wurde in drei Schritten erarbeitet:

Chemische Voruntersuchung

Zur Eignungsprüfung für die spätere thermische Verwertung wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Brennstoffe (Hackschnitzel) ausgewählt. Dabei wurden ausschließlich Hackschnitzelklassen verwendet, die aktuell am Biomassehof Achentel gehandelt werden, da nur diese eine ausreichende Versorgungssicherheit garantieren. Der durchschnittliche Wassergehalt (W) und die Stückigkeit (G nach ÖNORM M7133) entsprechen der hauptsächlich vorhandenen Qualität.

Tabelle 1: Brennstoffe, die auf ihre Tauglichkeit für die Verwertung in verschiedenen Energieerzeugungsanlagen untersucht wurden (LPM = Landschaftspflegematerial, KUP = Kurzumtriebsplantagenholz)

Brennstoff	Waldrestholz	Sägerestholz (frisch)	Sägerestholz (trocken)	Industrierestholz (trocken)	Industrierestholz (frisch)	LPM	KUP (Pap-pel)
Feuchtigkeit	W50	W50	W20	W20	W50	W50	W50
Stückigkeit	G50	G30	G30	G30	G30	G50	G50

Repräsentative Proben dieser Brennstoffe wurden chemisch und mechanisch in einem Labor geprüft.

Eine ungünstige Korngrößenverteilung mit zu vielen großen Partikeln hat sowohl auf die Brennstoffförderung als auch die Vergasungseigenschaften negativen Einfluss (durch Verstopfungen und die verringerte Größe der freien Reaktionsoberfläche). Insbesondere bei KUP als auch bei WRH war der Anteil von grobem Material erhöht, weshalb sie entweder nur in einem robusten Ofen verwendet werden können oder vorher gesiebt werden müssen. Die Brennstoffe KUP-Holz, Waldrestholz und Holz aus der Landschaftspflege weisen zudem stark erhöhte Kaliumwerte auf (2.800, 3.300 und 2.300 mg/kg TS), die eine Vergasung aufgrund der möglichen Anbackungen und Agglomeration (Coating) erschweren. Aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen wäre aber der Betrieb des Reformers mit Stoffen möglichst minderwertiger Qualität gewünscht. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der chemischen Eigenschaften der drei genannten Hölzer ist die Mischung mit Material höherer Qualität, meist Holzhackschnitzel aus Rundholz (zum Vergleich: Kaliumgehalt ca. 640 mg/kg TS). Für die Verbrennung im Heizwerk Grassau sind die erhöhten Kaliumwerte kein Problem, da dieses grundsätzlich für Brennstoffe minderer Qualität ausgelegt ist.

Von den sieben definierten und getesteten Brennstoffen sind also zunächst vier Brennstoffe für die Vergasung geeignet (Sägerestholz und Industrierestholz, jeweils gepoltert (bis W30) oder trocken) und alle sieben für das Heizwerk.

Verbrennungs- und Vergasungsversuche

Die sieben oben definierten Brennstoffe wurden im Heizwerk Grassau sortenrein verbrannt und dabei deren Brennverhalten sowie die Eignung der Stoffe dafür analysiert.

Zusammengefasst sind alle definierten Brennstoffe ohne Einschränkung zur Verbrennung im Heizwerk geeignet.

Die Feststellung der Eignung ist insofern wichtig, als damit alle Materialchargen, die im Heatpipe-Reformer aufgrund von Überlängen, erhöhten Kaliumgehalten, zu hoher Feuchtigkeit oder weiteren Qualitätsmängeln nicht ohne Vorbehandlung vergast werden können, problemlos im Heizwerk verwertet werden können. Für die Gestaltung der Bringungsketten und der Materialaufbereitung am BAT ist diese Tatsache entscheidend.

Im Heatpipe-Reformer wurde zunächst ein sogenannter Referenzpunkt mit Hilfe von normierten NaWaRo-Holzpellets erstellt. Über sechs Monate wurde der Betrieb in der Anlage in Grassau durchgeführt und dokumentiert. Dabei konnte ein hoher Kohlenstoffumsatz und somit ein hoher Synthesegasmassenstrom von 343 kg/h erreicht werden. Für das BHKW wurde eine ideale Gaszusammensetzung gemessen, die einen hohen Wirkungsgrad für das verwendete Motorkonzept („Single Point Injection“) bedeutet. Die vorab simulierten Parameter wurden in der Praxis sehr präzise erreicht, was dem HPR die grundsätzliche Leistungsfähigkeit bescheinigt.

Anschließend wurde der Heatpipe-Reformer mit NaWaRo-Holzhackschnitzeln in der Partikelverteilung P16B (G30) gefahren. Anfängliche Schwierigkeiten in der Fördertechnik wurden durch eine Qualitätssicherung des Hackprozesses eingedämmt, in dem Überlängen > 120 mm vermieden und Partikel > 45 mm vermindert wurden. Dadurch konnten über 100 Betriebsstunden erzielt werden.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Qualität der Hackschnitzel (Stückigkeit, Wassergehalt, Störstoffe) gewährleistet werden muss, um eine problemlose Förderung in den Reformer zu erreichen. Hackschnitzel und Pellets führen zu einer annähernd gleichen Permanentgas-Zusammensetzung.

Signifikante Unterschiede weisen die Holzhackschnitzel beim Schwefelwasserstoffgehalt auf; dieser liegt zehnmal so hoch wie bei Holzpellets. Auch der Teergehalt ist bei Holzhackschnitzeln wesentlich höher als bei einem Betrieb mit Holzpellets. Als Ursache für beide Änderungen kann der höhere Rindenanteil der Holzhackschnitzel genannt werden. Der errechnete Koxmassenstrom sowie das H₂/CO-Verhältnis sind bei dem Versuch mit Holzhackschnitzeln ebenfalls leicht höher als bei dem Versuch mit Holzpellets. Für den Anlagenbetrieb sind die Unterschiede der beiden Brennstoffe nicht entscheidend. Somit kann der Heatpipe-Reformer sowohl mit Holzpellets als auch mit Holzhackschnitzeln betrieben werden.

Zusätzlich zu den Praxisversuchen in Grassau wurden im Labormaßstab auch sogenannte „Mischpellets“ vergast. Diese bestehen aus verschiedenen Materialien, die mit Hilfe einer speziellen Pelletiertechnik gepresst werden und somit als normierbarer Brennstoff dienen. Dabei kamen Pellets aus Grünschnitt, Kronenrestholz und Streuwiesengras, jeweils mit einem unterschiedlichen Anteil an Holzhackschnitzeln, mit und ohne Additiv (Kaolin) zum

Einsatz. Diese Pellets sind bis dahin unbekannt und in dieser Form noch nie getestete Brennstoffe. Grundsätzlich stellen diese wegen möglicher Agglomerationen ein hohes Risiko in der Vergasung dar, sind aber auf Grund ihrer abundanten Ausgangsstoffe und dem günstigen Preis trotzdem für eine energetische Verwertung interessant. Die Versuche im Labor haben ergeben, dass sich der zu niedrige Ascheschmelzpunkt (der für die Anbackungen mitverantwortlich ist) durch die Zugabe von Kaolin erhöhen lässt. Derzeit entstehen bei der Pelletierung unter Zugabe von Kaolin zwar teilweise Klumpen, doch lässt sich dieses Problem vermutlich verfahrenstechnisch lösen.

Insgesamt stehen also auch minderwertige grashaltige Brennstoff für die Verwendung zur Vergasung zur Verfügung, wenn sie entsprechend mit Additiven aufbereitet werden.

Eine weitere grundsätzliche Möglichkeit zur Herstellung von standardisierten Brennstoffen für den Vergaserbetrieb ist die Kompaktierung von Rohstoffen (z. B. Hackschnitzel) zu Briketts. Vorversuche dazu waren im kleinen Maßstab erfolgreich, mussten im realen Maßstab jedoch abgebrochen werden, da die extrem dichte Kompaktierung der Hackschnitzel das Stahlrohr massiv verstopfte. Der notwendige extrem starke Druck, stellt überdies auch die Effizienz dieses Aufbereitungsweges in Frage.

Für eine störungsarme Rohstoffaufbereitung ist das getestete Verfahren zur Herstellung von standardisierten Brennstoffen für den Vergaserbetrieb (Kompaktieren) daher nicht geeignet.

Analyse der Aufbereitungswege

Da die verschiedenen Brennstoffe sowohl für Heizwerk als auch den HPR grundsätzlich geeignet sind, ist entscheidend ob diese in ausreichender Quantität und Qualität am Biomassehof hergestellt werden können. Dazu wurden die einzelnen Schritte zur Aufbereitung auf deren ökologische und wirtschaftliche Tauglichkeit sowie deren Kapazitäten untersucht. Diese umfassen die Mobilisierung, Vorsortierung, Zerkleinerung, Trocknung und Lagerung. Beispielhaft dafür ist der Aufbereitungsweg von Sägereistholz oder Rundholz zu Premium-Hackschnitzeln in Abbildung 3 dargestellt. Nach dem Verkauf wird das Holz zum Biomassehof transportiert und kommt dort entweder als Ganzholz oder bereits als Hackschnitzel (HS) an. Ganzholz wird nach Möglichkeit gepoltert und luftgetrocknet, kann aber bei Bedarf auch gleich gehackt werden. Die Hackschnitzel werden je nach Wassergehalt entweder gelagert (WG < 20 %) oder zuerst getrocknet. Schließlich können die resultierenden Premium-Hackschnitzel an Privatkunden verkauft oder der Vergasung im HPR zugeführt werden.

Die kritischen Punkte innerhalb der Verarbeitungskette sind vor allem die Brennstofftrocknung und deren Lagerung. Während die Lagerung sachgerecht erfolgen muss, um Schimmelbildung zu vermeiden, und vor allem aber ausreichend Platz benötigt, ist die Trocknung ein technisch komplexer Vorgang. Es gibt zahlreiche Lösungen für die Hackschnitzeltrocknung auf dem Markt, die von einfachen Hallen mit Bodenbelüftung bis hin zu

ausgeklügelten Containerlösungen mit spezieller Luftführung und sensorisch kontrollierter Durchmischung des Materials reichen. Allen gemeinsam ist, dass das Material zuvor als Ganzholz idealerweise luftgetrocknet wird, da anschließend deutlich weniger Energie in die technische Trocknung gegeben werden muss. Im Rahmen dieses Optimierungsprojekts wurden drei Trocknungslösungen miteinander verglichen: die am Biomassehof Achenal bereits bestehende Hallentrocknung, eine Serie von technisch einfachen Trocknungscontainern und ein semi-kontinuierlicher automatisierte Hackschnitzeltrockner.

Hallentrocknung am Biomassehof Achenal: Auf dem Gelände des BAT gibt es vier Hallen, denen jeweils über Bodenkamine (siehe Abbildung 4) Warmluft zugeführt werden kann. Die Warmluft wird dabei vom nebenstehenden Heizwerk Grassau durch Rauchgaskondensation abgeschieden und besitzt eine Vorlauftemperatur von ca. 45 – 50 °C. Insgesamt können damit ca. 250 kW thermische Leistung transportiert werden, die eine Trocknung von ca. 500 SRM Hackschnitzeln von erntefrisch (ca. 50 % Wassergehalt) auf weniger als 20 % Wassergehalt innerhalb von 10 – 14 Tagen, je nach Witterung, ermöglichen. Die Trocknung erfolgt homogen, das heißt es bilden sich keine Feuchtigkeitsnester. Das System ist sehr einfach konstruiert, deswegen kaum stör anfällig, kostengünstig und hat sich seit dem Bau des Biomassehofs im Jahr 2007 zur Trocknung sehr bewährt. Die ökologische Wertigkeit der Trocknung ist hoch, da die Wärme aus technischen Gründen ohnehin vom Heizwerk abgeführt und somit nur der Strom für Wärmetransport und Ventilator aufgewendet werden muss.

Containertrocknung mit technisch einfachen Containern: Im Rahmen eines Unterauftrags wurden am Biomassehof Oberlausitz in Berthelsdorf Untersuchungen zur Effizienz von Trocknungscontainern mit verschiedenen Boden- und Deckeltypen durchgeführt. An einem

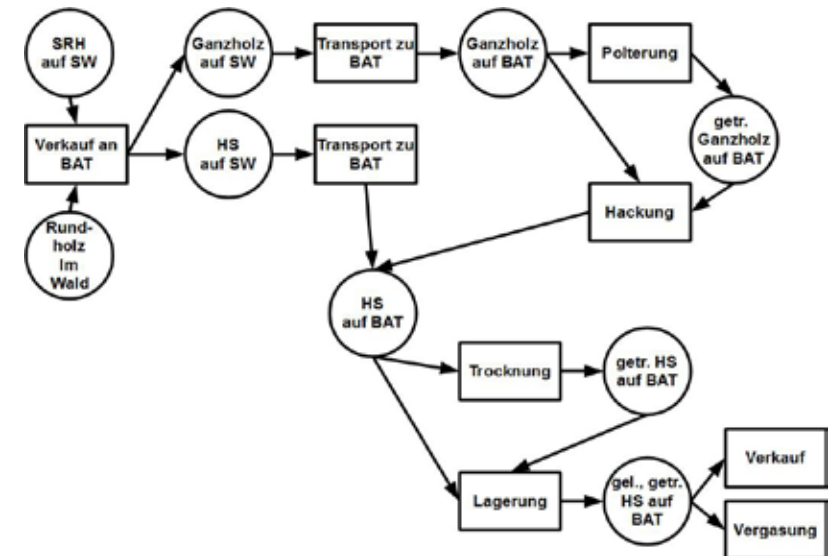


Abbildung 3: Bringungsketten am Biomassehof Achenal (BAT) für Sägereistholz (SRH) aus dem Sägewerk (SW) und Rundholz aus der Durchforstung (HS = Hackschnitzel, gel. = gelagert, getr. = getrocknet).

bestehenden Blockheizkraftwerk einer Biogasanlage mit 512 W thermischer Leistung wurden in neun Versuchsreihen jeweils gleichzeitig vier oder fünf unterschiedliche Container angeschlossen. Diese waren gefüllt mit je 30 Schüttraummeter nassen Premium-Holz-hackschnitzeln. Insgesamt neun Containervarianten mit zwei verschiedenen Bodentypen und fünf verschiedenen Deckeltypen wurden untersucht. Zur Dokumentation der Trocknungsleistung wurden mehrere Parameter gemessen, unter anderem der Wassergehalt der Hackschnitzel sowohl mit einem mobilen Lanzenmessgerät als auch mit einem Darrofen. Um die unterschiedlich zur Verfügung gestellte Luftvolumina – und damit Energiemengen – zu erfassen, wurde der zufließende Volumenstrom pro Container gemessen und die Trocknungsleistung entsprechend der tatsächlichen Energiemenge analysiert. Die Container wurden hinsichtlich ihrer Trocknungsleistung bewertet und miteinander verglichen. Es zeigte sich, dass alle Containertypen unter geeigneten Bedingungen (Wärme vorhanden, keine extreme Witterung) Hackschnitzel trocknen können. Dabei unterscheidet sich jedoch die Dauer der Trocknung teilweise erheblich. Am besten schneidet der Container mit Lochblechboden und Schrägdach-Aufbau ab, am schlechtesten die Container mit Abdeckung aus Plastikplane. Dies entspricht den Erwartungen, die von der Notwendigkeit einer guten Luftzirkulation und der effektiven Verhinderung von Kondensatbildung ausgehen. Mit den Erwartungen stimmt ebenfalls überein, dass die Luftfeuchte beim Austritt aus dem Container direkt mit dem Wassergehalt der Hackschnitzel korreliert und dieser leicht zu messende Parameter daher als Näherungswert für den Wassergehalt dienen kann.

Als konkrete Handlungsempfehlungen für die Trocknung von Hackschnitzeln mit Containern lassen sich die folgenden Punkte ableiten:

- Lochblechböden sind günstiger als Doppelgitterböden und haben eine mindestens gleiche Trocknungsleistung.
- Ein Schrägdach über den Containern begünstigt die Trocknung, da es Luft ungehindert zirkulieren lässt und die Rückkondensation des verdunsteten Wassers verhindert. Es kann auch ein Schrägdach über mehrere Container gleichzeitig gezogen werden, um den Aufwand zu verringern.
- Die Verwendung eines Lanzenmessgeräts wird wegen seiner großen Messschwankungen nicht empfohlen, wenn exakte Werte für den Wassergehalt von Hackschnitzeln benötigt werden.
- Die Verwendung von Unterdruckventilatoren auf Containern kann nicht empfohlen werden, da die nur leicht bessere Leistung den Aufwand (Aufbau und Strombedarf) nicht rechtfertigt.
- Ein Vlies als Abdeckung ist nur bei trockener Witterung möglich.
- Eine Plastikplane als Abdeckung ist nicht empfehlenswert, da diese die Trocknung negativ beeinflusst (durch Luftstauung und Kondensation).
- Wärmeausfälle, zum Beispiel durch BHKW-Ausfälle, sollten für einen reibungslosen Trocknungsablauf so gut wie möglich verhindert werden.
- Bei der Wärmezufuhr zu den Containern sollte auf möglichst kurze und wärmeisolierte Schläuche geachtet werden.

Trocknung mit einem semikontinuierlichen Trocknungscontainer: Bei einer zweiten Versuchsreihe am Biomassehof Achenal wurde ein neu entwickelter semi-kontinuierlicher Trocknungscontainer. Die Wärmeenergie für die Trocknung wurde vom Heizwerk Grassau aus der Rauchgaskondensation zur Verfügung gestellt und betrug im Durchschnitt ca. 41,5 °C. Insgesamt wurden sieben Versuche mit unterschiedlichen Holz hackschnitzel-Qualitäten (SRH, WRH, LPM, KUP) durchgeführt. Zur Beurteilung des Containers wurden vor allem die Trocknungsleistung pro Stunde, der tatsächlich erreichte Trocknungsgrad und der Betriebsaufwand gemessen.

Der Container kann alle verwendeten Hackschnitzel-Qualitäten robust verarbeiten und trocknet diese auch bei der verwendeten niedrigen Temperatur auf maximal den gewünschten Wassergehalt. Die einzusetzende Energiemenge (thermisch und elektrisch) pro Kilogramm getrockneter Hackschnitzel entspricht den Erfahrungen aus der Hackschnitzeltrocknung. Die Leistungsaufnahme des Containers selbst ist im Vergleich zum Warmluftventilator gering. Das Steuerungsprinzip des Containers – die Messung des Wassergehalts der Hackschnitzel über die Luftfeuchte – wird jedoch durch eine (innerhalb der Versuchsreihe) nicht feststellbare Korrelation der beiden Größen in Frage gestellt. Die Trocknungsleistung (kg/h) schwankt und besitzt einen Median von ca. 110 kg feuchte Hackschnitzel pro Stunde. Im Vergleich mit einer klassischen Hallentrocknung mit Bodenkaminen (wie am BAT praktiziert) schneidet der Container in der Trocknungsleistung und im Bedienungsaufwand schlechter ab. Gegenüber den technisch einfachen Trocknungscontainern (siehe parallele Versuchen in Ostsachsen) ist vermutlich die Homogenität der Hackschnitzel beim semikontinuierlichen Container höher.

Insgesamt wäre die Eingliederung des hier untersuchten Containers in die Aufbereitungswege für Hackschnitzel insbesondere für semi-kontinuierliche Abnehmer (wie zum Beispiel den Heatpipe-Reformer zur Holzvergasung) gut vorstellbar.



Abbildung 4: Bodenkamin für Warmluft zur Hackschnitzeltrocknung am Biomassehof Achenal

Ein abschließender Vergleich der drei Systeme lieferte für den Biomassehof Achenal das klare Ergebnis die bestehende Hallentrocknung weiterhin als Haupttrocknungsverfahren zu verwenden. Neben der bewährten Qualität der Trocknung ist dies auch den ansonsten notwendigen Investitionskosten geschuldet. In Verbindung mit einer Lufttrocknung des Ganzholzes ist die Effizienz der Hallentrocknung sehr gut.

Entscheidend ist neben einer effizienten Aufbereitung auch die Erschließung von Material aus minderwertigen Quellen wie zum Beispiel Landschaftspflege- oder Waldrestholz, da die ungenutzten Potenziale verstärkt in diesen Bereichen liegen.

Eine Skalierung der Logistikketten auf größere Mengen ist möglich, da sowohl auf der Rohstoffseite noch ausreichend ungenutztes Energieholz-Potenzial vorhanden ist, als auch die einzelnen Verarbeitungsschritte noch ausgebaut werden können.

Eine ökonomische wie ökologische Gesamtbewertung der verschiedenen möglichen Aufbereitungswege am Biomassehof Achenal findet sich in einem separat erstellten „Handbuch der Aufbereitung biogener Brennstoffe zur Energieerzeugung“ wider, das auf Anfrage gerne zur Verfügung gestellt wird oder unter folgenden Link zu finden ist:

<http://www.energetische-biomassenutzung.de/de/vorhaben/liste-aller-vorhaben/details/projects/162.html>

Aufbau und Inbetriebnahme des Heatpipe-Reformers

Nach dem erfolgreichen mehrjährigen Betrieb einer Pilotanlage des Heatpipe-Reformers konnte die Praxisreife des Verfahrens von externen Experten bestätigt werden. Daher wurde von Sommer 2011 bis Frühjahr 2012 die erste Praxisanlage des HPR in Grassau auf dem Gelände des Biomassehofs Achenal und des Heizwerks Grassau errichtet. Die Feuerleistung beträgt 1,3 MW, woraus ca. 400 kW elektrische und 630 kW thermische Leistung resultieren. Der Betrieb ist auf Hackschnitzel mit den Qualitäten G30 (Stückigkeit) und W20 (Wassergehalt) optimiert, soll aber bei Bedarf auch Brennstoffe minderer Qualität effizient verwerten können.

Beim Heatpipe-Reformer, wie ihn die Firma agnion Energy GmbH vertreibt, wird der Brennstoff in einer stationären Wirbelschicht verbrannt und in einer zweiten reformiert. Die beiden stationären Wirbelschichten werden unabhängig voneinander beschickt und sind übereinander positioniert (Abbildung 5).

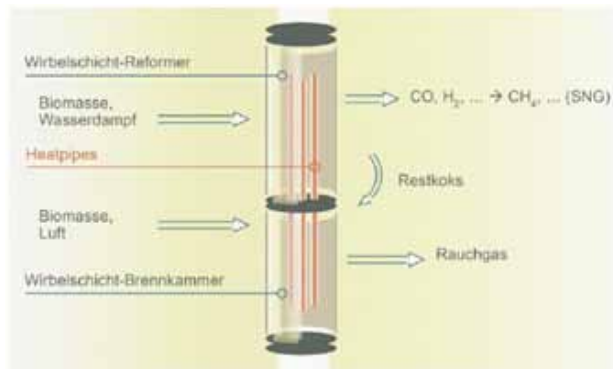


Abbildung 5: Aufbau eines agnion-Heatpipe-Reformers: Zwei getrennte Reaktionskammern sind durch Heatpipes verbunden (somit allotherm) und erzeugen Synthesegas aus Biomasse und Wasserdampf.

Die Besonderheit bei diesem Verfahren ist die Art des Wärmeeintrages in den allothermen Wasserdampfvergasungsreaktor. Hierfür werden Heatpipes (Wärmeüberträgerrohre) verwendet. Heatpipes sind geschlossene Rohre, die mit einem Arbeitsfluid gefüllt sind. In diesem Fall muss das Arbeitsfluid einen hohen Siedepunkt haben, wie Natrium oder Kalium, um Wärme auf dem erforderlichen Temperaturniveau (ca. 800 – 900 °C) transportieren zu können. Diese Rohre sind aufrecht innerhalb der beiden Wirbelschichten verbaut und verbinden die beiden Kammern. Das Arbeitsfluid verdampft im unteren Teil durch die Verbrennungswärme und steigt auf, um oben die Wärme durch Kondensation wieder abzugeben. Für diesen Vorgang ist keine Pumpe oder dergleichen notwendig.

Das Ziel der allothermen Vergasung ist möglichst reines Synthesegas aus biogenen Brennstoffen zu erzeugen. Die bisherigen Ansätze unterscheiden sich stark, so dass Erkenntnisse von früheren Verfahren (z. B. in Güssing oder dem Blauen Turm) nur bedingt auf die Heatpipe-Technologie übertragbar sind.

Nach Errichtung der Anlage wurde diese am 04. Mai 2012 feierlich mit über 100 geladenen Gästen eingeweiht. Das Interesse an der Technologie ist sehr groß, wie die zahlreichen Fachbesuchergruppen aus der ganzen Welt belegen (teilweise mehrere pro Woche am BAT). Der HPR fügt sich mit seiner relativ geringen Feuerungsleistung sehr gut in die dezentralen Strukturen im Achenal ein, da einerseits die erzeugte Arbeit (insbesondere die Wärme) vollständig von Heizwerk und Fernwärme Grassau abgenommen werden kann sowie andererseits die notwendige Brennstoffmenge und -qualität jederzeit bereitgestellt werden kann.

Einbindung aller Anlagen in ein energetisches Gesamtkonzept

Aus verschiedenen Eingangsstoffen (Waldrestholz, Landschaftspflegematerial, Sägerestholz, Industrierestholz, Kurzumtriebsplantagen-Holz) werden am Biomassehof Hackschnitzel in drei Qualitätssträngen aufbereitet: HS mit sehr guter, mittlerer und minderwertiger Qualität. Die verschiedenen Klassen kommen dabei je nach Verwertungsanlage zum Einsatz: Premium-Qualität für Endkunden, minderwertige Qualität für die Heizwerke Grassau und Grabenstätt, und Mischqualität für den Heatpipe-Reformer. Alle Brennstoffe können zu einem wirtschaftlich und ökologisch angemessenen Aufwand produziert werden.

Der HPR hat in Grassau bereits über 1.000 Betriebsstunden mit verschiedenen Brennstoffen (Hackschnitzel und Pellets) absolviert, die in einem Einsatzstoff-Tagebuch dokumentiert sind. Das Fraunhofer UMSICHT-Institut hat hierfür eine externe Bewertung der Anlageneffizienz (Pilotanlage und erste Schritte der Praxisanlage) vorgenommen und ist insgesamt zu einem positiven Ergebnis gekommen.

In Zukunft stellen sich sicher noch weitere Herausforderungen, um die Stoffströme weiterhin effizient und ökonomisch attraktiv halten zu können. Dazu gehören insbesondere die Verwertung von Material mit sehr niedriger Qualität (zum Beispiel aus der Landschaftspflege, die oben angesprochenen Mischpellets oder auch faserhaltige Gärreste aus Biogasanlagen) und die Sicherung eines störungsfreien Dauerbetriebs aller Anlagen am Standort des Biomassehofs Achenal. Das Projekt „Optimierung regionaler Kreisläufe“ hat hierzu einen sehr wichtigen Beitrag geleistet, und dessen Impuls soll im Achenal auch für die kommenden Jahre genutzt werden.

Beitrag zu den Nachhaltigkeitsaspekten

Die zwei entscheidenden Faktoren für einen wirtschaftlich erfolgreichen Betrieb des Heatpipe-Reformers sind eine Logistik und Brennstoffproduktion, die verschiedene Brennstoffe in ausreichender Qualität und Menge zur richtigen Zeit und einem günstigen Preis zur Verfügung stellt, sowie eine ausgereifte und erprobte Technik der Holzvergasung, die zuverlässig und effizient aus den Brennstoffen Strom und Wärme erzeugt. In beiden Bereichen konnten durch dieses Projekt erhebliche Fortschritte erzielt werden: sowohl der Aufbau und die Strukturen der regional verankerten und leistungsfähigen Aufbereitung von Rohstoffen zu Brennstoffen wurden untersucht und optimiert (u. a. die Trocknung von HHS und die Versorgung verschiedener Energieanlagen), als auch der Aufbau und die technische Reife der Holzvergasung mit Hilfe des Heatpipe-Reformers wurden im Wesentlichen nachgewiesen (u. a. der stabile Betrieb mit Pellets und HHS und die Entwicklung von Mischpellets). In beiden Bereichen konnten auch wichtige Erkenntnisse über den weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf gewonnen werden.

Für eine ökologisch vorbildliche Bioenergie-Bereitstellung sind die Effizienz der Aufbereitung und Verwertung entscheidend. Hier kann der Biomassehof Achental auf Grund seiner regionalen Struktur ebenfalls klare Erfolge vorweisen, die durch das Projekt nochmal verfeinert wurden. Auch bei Agnion sind die Voraussetzungen für einen ökologisch effizienten Betrieb des Heatpipe-Reformers grundsätzlich gegeben, wie die einzelnen Versuche gezeigt haben. In Tabelle 2 ist eine Übersicht über die möglichen Treibhausgas-Einsparungen pro Jahr am BAT mit Hilfe dieses Optimierungsprojekts gegeben.

Tabelle 2: Einsparungen von Treibhausgas am Biomassehof Achental durch das Projekt

Anlage	Energiemenge	Summe	CO ₂ -Faktor	CO ₂ -Einsparung
Biomassehof Achental (Verkauf Premium-HHS + Spartenware)	30.900 MWh	51.800 MWh	0,266 t/MWh (Heizöl)	13.779 t
Heizwerk Grassau (Fernwärme)	14.000 MWh			
Heizwerk Grabenstätt (Fernwärme)	2.200 MWh/a			
Heatpipe-Reformer (Fernwärme)	4.700 MWh	3.000 MWh	0,538 t/MWh (Strommix n. UBA)	1.614 t
Heatpipe-Reformer (Strom)	3.000 MWh			
Summe				15.393 t

Für die soziale Nachhaltigkeit bringt die Aufbereitung und Verwertung lokal erzeugter Bioenergie drei entscheidende Vorteile mit sich: die Verarbeitung erzeugt Arbeitsplätze in der Region, die Versorgung mit Biomasse ist günstiger als mit fossilen Brennstoffen (was vor allem Kommunen mit ihren großen Liegenschaften zu Gute kommt) und es entstehen Steuereinnahmen für die Kommunen durch neue Firmen in der Energiebereitstellung.

Übertragbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurde die Übertragbarkeit untersucht. Insbesondere in der Oberlausitz und in Dresden wurden umfangreiche Machbarkeitsstudien durchgeführt. Denn die ländliche Region ist holzreich, besteht aus kleinen Gemeinden und weist einen starken Bezug zu regionaler Versorgung auf. Zudem steht in Berthelsdorf, unweit von Zittau, mit dem Biomassehof Oberlausitz ebenfalls ein regionaler Holzdienstleister zur Verfügung, der ähnlich wie der Biomassehof Achental als Projektentwickler und Brennstofflieferant aktiv werden kann.

In der Studie für die Oberlausitz wurden zwei Teile untersucht: die Analyse der Potenziale für die Mobilisierung und Aufbereitung von Biomasse-Rohstoffen zu Brennstoffen, sowie die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Errichtung eines Heatpipe-Reformers. In der Analyse für Dresden wurden die Holzpotenziale der Oberlausitz vorausgesetzt und hauptsächlich die Errichtung des HPR untersucht.

Insbesondere in Dresden erscheint die Errichtung eines Heatpipe-Reformers auf dem Industriegelände Albertstadt wirtschaftlich und technisch möglich. Dieser Standort weist eine Reihe von günstigen Voraussetzungen aus:

- Direkte Nachbarschaft zu einem Biomasse-Logistikzentrum
- Gute Anbindung an die Autobahn A4
- Großer Wärmebedarf von gewerblichen und industriellen Kunden
- Großenteils veraltete Wärme-Infrastruktur (Heizkessel), die ausgetauscht werden muss
- Ausreichend Flächen und Hallen zur Brennstoff-Bevorratung.

Im Rahmen der Inbetriebnahme des HPR in Grassau wurden ein Bioenergetag (am 05.05.2012) sowie ein Fachsymposium (am 11.10.2012) abgehalten. Zu beiden Terminen kamen zahlreiche Besucher aus dem In- und Ausland (Bioenergetag: über 1.000, Fachsymposium: über 120 geladene Gäste). Das Interesse sowohl an der Technik des Heatpipe-Reformers als auch an der Struktur des Biomassehofs war dabei sehr groß – was das Potenzial zur Übertragbarkeit des Projekts deutlich aufzeigt.

Die zahlreichen Fachbesucher (Waldbesitzer, Förster, Brennstoffhändler, Heizkesselproduzenten, etc.) aus der ganzen Welt, die regelmäßig den Biomassehof Achental besuchen, beweist einmal mehr die Vorbildstellung des Achentals.

Insgesamt können die vorgestellten Bringungsketten von anderen Biomassehöfen oder Logistikdienstleistern sofort umgesetzt werden, wenn die regionalen Voraussetzungen dafür (reiches Holzangebot und vorhandene Lücke in der Wertschöpfungskette) gegeben sind. Aber auch bestehende Anbieter können von den Erfahrungen mit der Qualitätssicherung im Achental profitieren.



Foto: Claudia Hautumm, pixelio.de

Entwicklung von Kleinf Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe unter Einsatz der Strömungssimulation

Winfried Juschka¹, Michael Struschka¹, Frank Kienle²

Vorhaben: Entwicklung von emissionsarmen häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe

FKZ-Nr.: O3KB055AB

Laufzeit: 01.05.2011 – 30.04.2013

Zuwendungs summe: 250.086 €

Koordination:

² HKI - Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V.
Lyoner Str. 9, 60528 Frankfurt am Main
www.hki-online.de

Projektpartner:

¹ Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart
www.ifk.uni-stuttgart.de

Unterauftragnehmer:

Ulrich Brunner GmbH, Eggenfelden (Projektverantwortlicher: Hermann Bichlmaier)
Hase Kaminofenbau GmbH, Trier (Projektverantwortlicher: Michael Gorges)
Leda Werke GmbH, Leer (Projektverantwortlicher: Folkmar Ukena)

Kontakt:

HKI:
Dipl.-Ing. Frank Kienle
Telefon: +49 (0)69 6268 - 0
E-Mail: kienle@hki-online.de

IFK:
Dr.-Ing. Michael Struschka
Telefon: +49 (0)711 685 - 67776
E-Mail: michael.struschka@ifk.uni-stuttgart.de



Frank Kienle (Projektleiter):

Moderne Einzelfeuerstätten können einen wichtigen Beitrag zur Wärmeerzeugung im häuslichen Bereich leisten. Meist als ergänzende Systeme mit hohem Wirkungsgrad wird der Brennstoff Holz hocheffizient und nur zielgenau dort, wo Wärme gebraucht wird eingesetzt. Dazu müssen jedoch die Emissionen mittelfristig weiter gesenkt werden. Strategisches Ziel des Vorhabens „Entwicklung von emissionsarmen häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe“ ist es, genau dort anzusetzen und einen wichtigen Beitrag zu leisten, um ohne große Versuchsreihen die Optimierung der Geräte zu erreichen.

Zusammenfassung

Zur Reduzierung des Emissionsaufkommens von Produkten unvollständiger Verbrennung bei Einzelfeuerstätten sind weitere feuerungstechnische und regelungstechnische Optimierungen notwendig. Ein Einsatz der Strömungsvisualisierung und der Strömungssimulation kann wichtige Informationen für die Konstruktion von emissionsarmen Einzelfeuerstätten liefern. Um Aussagen über die Ausbrandqualität und die Effizienz von Nachverbrennungszonen treffen zu können, kann die Strömungssimulation mit einem Reaktionsmodell verwendet werden, was am Beispiel einer Feuerstättenmodifikation gezeigt wird.

Summary

Further technical improvements and automatic controls are necessary to reduce emissions of small wood-burning stoves. Flow simulations with reaction models allow one to make statements about the efficiency and the burnout quality of the gases in post combustions zones. For example, through a modified fireplace, it has been demonstrated that a CFD simulation can make a significant contribution towards prediction of carbon monoxide emissions.

Einleitung

Bei häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe, wie z. B. bei Kaminöfen, bestehen erhebliche Wissenslücken bezüglich der Entstehung und Minderung von Produkten unvollständiger Verbrennung (Kohlenmonoxid, organische Verbindungen, Ruß und Teere) bei den Chargenabbränden. Unklar ist vor allem, mit welchen Änderungen in der Verbrennungstechnik bzw. der Strömungsführung die Emissionen in den einzelnen Verbrennungsphasen positiv beeinflusst werden können. CFD-Simulationen (CFD - Computational Fluid Dynamics) sollen dazu beitragen, diese Wissenslücken zu schließen. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse sollen sich die richtigen Schlussfolgerungen für eine effiziente und wirtschaftlich umsetzbare Entwicklung von häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe mit stark reduzierten Emissionen ergeben. Die Anwendung der numerischen Strömungssimulation für Kleinf Feuerungsanlagen steht noch am Anfang des Einsatzes und kann deshalb für Entwicklungsaufgaben nur entsprechend dem derzeitigen Erfahrungsstand genutzt werden. Dieses Forschungsvorhaben wurde in einem Verbundvorhaben mit dem HKI Industrieverband Haus-, Heiz- und Küchentechnik e.V. und den beteiligten Industriepartnern Ulrich Brunner GmbH, Hase Kaminofenbau GmbH und LEDA Werke GmbH bearbeitet.

Stand der Gerätetechnik für Einzelfeuerstätten

Der prinzipielle Aufbau einer Einzelraumfeuerstätte mit Durchbrandprinzip für den Wohnraum ist in Abbildung 1 am Beispiel eines Kaminofens bzw. eines Kamineinsatzes dargestellt (Juschka et al. 2012). Die Befüllung der Feuerung findet überwiegend über eine Tür mit Sichtscheibe statt. Durch Zugabe von Primärluft über den Rost wird der Brennstoff umgesetzt. Um die Sichtscheibe frei zu halten wird Luft – in der Abbildung als frühere Sekundärluft bezeichnet – über die Sichtscheibe geleitet. Einige Konstruktionen von Einzelraumfeuerstätten besitzen keinen Rost und somit wird die Scheibenluft auch als Primärluft genutzt. Einige Feuerungen besitzen auch eine „spätere Sekundärluft“ an der Rückwand oder der Seitenwand des Brennraumes. Teilweise wird diese von den Herstellern als Tertiärluft bezeichnet. Über eine Umlenkplatte (Zugplatte) werden die Abgase in eine Nachverbrennungszone geleitet. Bei Kaminöfen ist dieser Bereich nicht wärmegeklämt und dient gleichzeitig als Wärmeübertrager, bevor das Abgas über das Abgasrohr (Verbindungsstück) in den Schornstein geleitet wird.

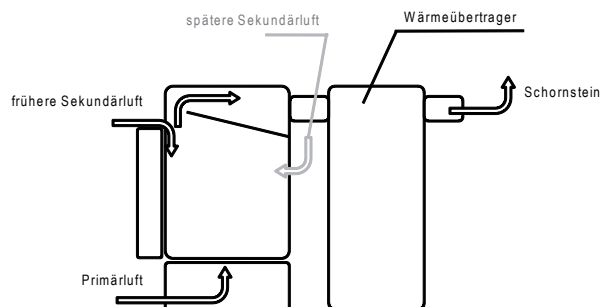


Abbildung 1: Prinzipbild für einen Kaminofen bzw. Heizeinsatz mit Durchbrandprinzip und Nachheizfläche

In Heizeinsätzen für Kamine oder Kachelöfen ist die Nachverbrennungszone meist mit Schamotte wärmegeklämt. Zur weiteren Wärmeabgabe werden die heißen Abgase in eine Nachheizfläche geführt, um diese dann über das Verbindungsrohr in den Schornstein zu leiten. Teilweise werden bei Kaminöfen und Heizeinsätzen auch wasserführende Bauteile im Wärmeübertragerbereich für die Bereitstellung von Heiz- oder Warmwasser eingebracht. Der Weg zu emissionsarmen Feuerungen kann durch primäre und sekundäre Maßnahmen beschriftet werden (Abbildung 2). Dabei sind die Primärmaßnahmen zu favorisieren. Die Optimierung der primären Entgasungszone hat bei Feuerstätten hauptsächlich Einfluss auf das Anbrandverhalten sowie die Abbrandgeschwindigkeit. Deshalb sollte die Einströmung der Primärluft so gestaltet werden, dass diese homogen verteilt (z. B. durch eine optimale Rostgeometrie) und in einem der Wärmeleistung der Feuerstätte angepassten Volumenstrom der Entgasungszone zugeführt wird. Um den Luftüberschuss der Feuerung gering zu halten, muss eine Optimierung der Scheibenluft vorgenommen werden. Diese muss, bei Verringerung der Luftmengen, die Wirkung der Scheibenspülung zumindest beibehalten und die Scheibe im üblichen Rahmen zuverlässig frei halten.

Gerade bei sehr großen Scheiben bestimmt die Scheibenluftmenge maßgeblich den Luftüberschuss bei der Verbrennung. Ist die Voraussetzung gegeben, dass die Scheibenluft ihre Funktion für eine freie Scheibe bewirkt, kann eine Optimierung der Verbrennungszone vorgenommen werden. Dabei muss die Strömung der Scheibenluft dahingehend optimiert werden, dass die richtige Menge an Sekundärluft in die (Nach-) Verbrennungszone geleitet wird und sich optimal mit den oxidierbaren Gasen vermischt. Dies sollte bei möglichst hohen Temperaturen erfolgen. Die Verweilzeit in der Verbrennungszone ist aufgrund von Marktvorgaben (z. B. Erwartung der Käufer, klassisches Flammenbild, Designströmungen) nur bedingt beeinflussbar und hängt maßgeblich von der Geometrie des Brennraumes ab. Um konstante Verbrennungsbedingungen über den gesamten Abbrand in jeder Verbrennungsphase zu gewährleisten, ist eine geregelte Zuführung der Verbrennungsluft nötig. Im einfachsten Fall wird dies durch Drosseln der Primär- und Sekundärluft durch den Betreiber erreicht. Um den Betreibereinfluss zu minimieren, sollte die Verbrennungslufteinstellung automatisch geschehen. Dies kann durch thermo- oder elektromechanische Stellklappen geschehen. Die Dosierung der Verbrennungsluft mit elektromechanischen Stellklappen erfolgt dann mittels einer Verbrennungssteuerung (zeitabhängig) oder in Kombination mit Sensoren (z. B. Temperatur oder Gasbestandteile) durch eine Verbrennungsregelung.

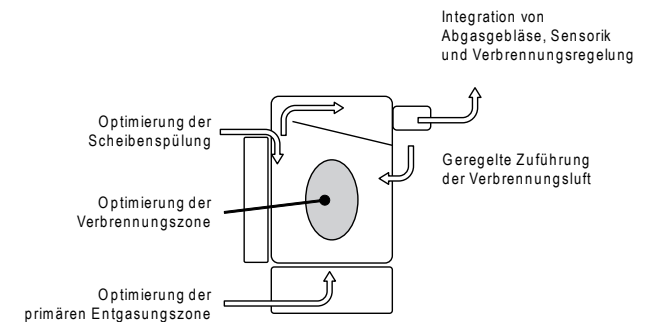


Abbildung 2: Mögliche Optimierungsmöglichkeiten an einer kleinen chargenweise betriebenen Feuerstätte

Optimierung der Strömungsführung mittels CFD und Reaktionsmodell

Im Rahmen des durchgeführten Projektes wurden für verschiedene Einzelfeuerstätten (Kaminofen, Kamineinsatz, Heizeinsatz) CFD-Modelle aufgebaut und zusätzlich Reaktionsmodelle implementiert, um nicht nur die Strömungsverhältnisse in den Reaktionszonen der Feuerstätten sondern auch die Temperatur-, Sauerstoff- und CO-Verteilung bewerten zu können. Kohlenmonoxid wird hierbei als Leitkomponente zur Bewertung der Vollständigkeit der Verbrennung herangezogen. Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt stark von den zugrundeliegenden Strömungs- und Reaktionsmodellen, dem mathematischen Rechengitter und den festzulegenden Randbedingungen für die Simulationsrechnungen ab. Für die Durchführung einer Simulationsrechnung bedarf es ein hohes Maß an Erfahrungen und Wissen, um plausible Rechenergebnisse zu generieren, denn die Simulationsrechnungen werden mit vereinfachten chemischen Modellen und globalen Reaktionsmechanismen durchgeführt. Als Reaktionsmodell wurde ein Zwei-Schritt-Reaktionsmodell aufgebaut und in die CFD-Modelle implementiert. Dabei reagiert Methan mit Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Wasserdampf. Das Kohlenmonoxid reagiert dann im zweiten Schritt mit Sauerstoff zu Kohlendioxid.

Am Beispiel des Kaminofens kann anhand einer Modifikation zur ursprünglichen Konstruktion gezeigt werden, wie sich diese auf die berechneten CO-Konzentrationen auswirkt. Für die Originalkonstruktion des Kaminofens sind in Abbildung 3 (links) die Isoflächen der CO-Konzentration, d. h. Flächen mit gleicher CO-Konzentration, dargestellt. Hier zeigt sich ein ausgeprägter Bereich mit hohen Konzentrationen von Kohlenmonoxid. Durch die Simulation lässt sich die Ursache für die hohen CO-Konzentrationen ermitteln, was bei einem Prototyp auf dem Prüfstand nur durch hohen messtechnischen Aufwand möglich ist. Im Fall des Kaminofens sind die ausgeprägten Bereiche mit hohen Konzentrationen an Kohlenmonoxid durch Luftmangelsituationen zu erklären (Abbildung 3, rechts).

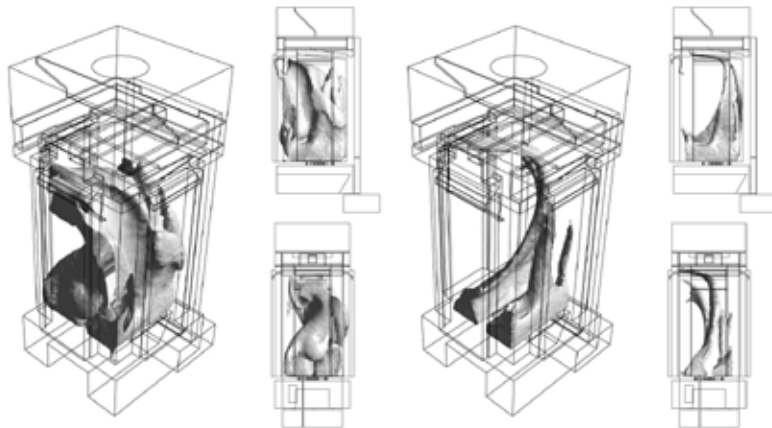


Abbildung 3: Isoflächen der Konzentration von Kohlenmonoxid (links) und des Sauerstoffes kleiner 6 Vol.-% (rechts) bei der Originalkonstruktion des Kaminofens

Entscheidend für eine vollständige Oxidation sind die Temperaturen mit Werten größer 650 °C im Brennraum (Abbildung 4, links). Bereiche mit hohen Temperaturen sind in der Originalkonstruktion hauptsächlich im Rückwandbereich zu finden. Die Reaktionen finden überwiegend in den heißen Bereichen im Brennraum statt, was durch die berechnete freigesetzte Reaktionsenergie verdeutlicht wird (Abbildung 4, rechts). Sobald die Gase durch die Umlenkplatte in die Haube gelangen, findet keine nennenswerte Reduktion von Kohlenmonoxid mehr statt. Im Umkehrschluss heißt dies, dass die Oxidation von Kohlenmonoxid im Brennraum knapp oberhalb des Holzes stattfinden muss.

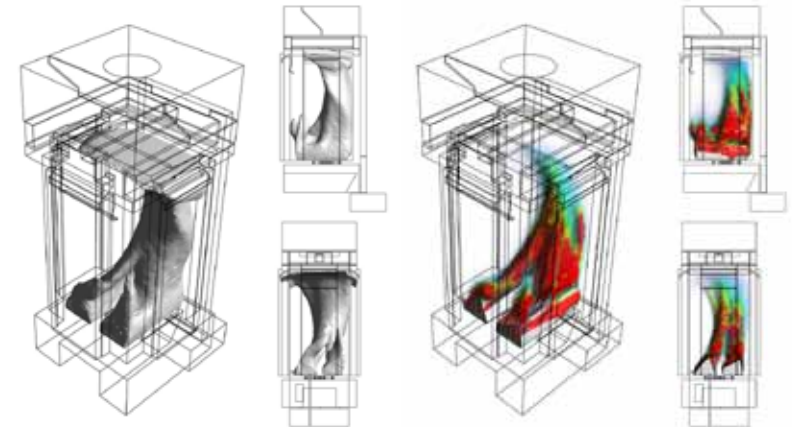


Abbildung 4: Isoflächen der Temperatur größer 650 °C (links) und freigesetzte Reaktionsenergie (rechts) bei der Originalkonstruktion des Kaminofens

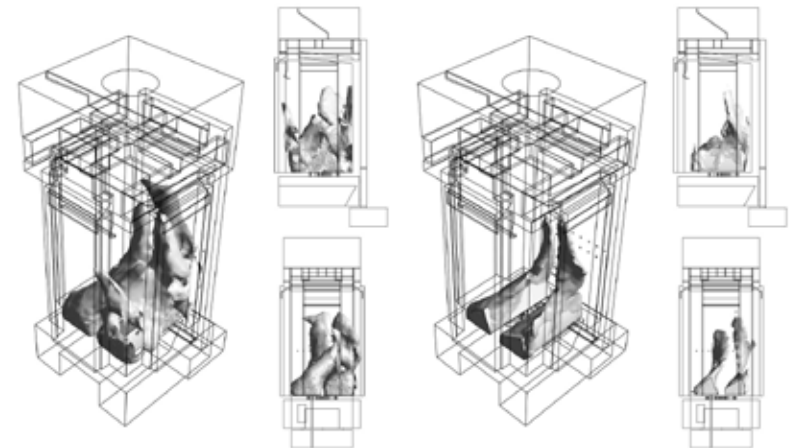


Abbildung 5: Isoflächen der Konzentrationen von Kohlenmonoxid (links) und des Sauerstoffes kleiner 6 Vol.-% (rechts) beim modifizierten Kaminofen

Das Vorhandensein des nur kleinen Bereichs hoher Temperatur im Rückwandbereich der Feuerstätte liegt sicherlich darin begründet, dass der Kaminofen drei Sichtscheiben aufweist. Hierdurch wird viel Wärme aus dem Feuerraum an die Umgebung abgegeben. Eine Verbesserung des Emissionsverhaltens des Kaminofens ist damit bei gleichzeitiger Wahrung des Designs nur äußerst schwer zu erreichen. Damit es trotzdem zu einer Verbesserung kommt, soll durch eine Änderung des Verbrennungsluftkanals eine bessere Vorwärmung der Sekundärluft erreicht werden. Zusätzlich wurden bei der Modifikation der Feuerstätte noch Luftlöcher in die Rückwand eingebracht, um die Sauerstoffkonzentration im hinteren Bereich des Brennraums zu erhöhen.

Die Simulationsergebnisse der modifizierten Feuerung zeigt Abbildung 5 als Isoflächen der Kohlenmonoxid- und Sauerstoffkonzentration. Die Bereiche hoher CO-Konzentrationen (links) und geringer Sauerstoffkonzentrationen (rechts) konnten gegenüber der Originalkonstruktion verkleinert werden.

Die Reaktionen finden nun nahezu im gesamten Feuerraum statt (Abbildung 6, rechts). Trotz der zusätzlichen Vorwärmung der Sekundärluft konnte der Bereich von Temperaturen größer 650 °C allerdings nicht vergrößert werden (vgl. Abbildung 6, links).

Die Simulationsrechnungen beim hier vorgestellten Kaminofen wurden für verschiedene Luftüberschusszahlen λ_n erstellt. Die Ergebnisse der Berechnungen für CO wurden auf einen definierten Anfangszustand nach Gleichung (1), in diesem Fall auf $\lambda_o = 2,0$, normiert. Damit ergibt sich ein Kurvenverlauf, wie er in Abbildung 7 zu sehen ist. Die ursprüngliche Konstruktion des Kamineinsatzes weist für CO ein Minimum bei einer Luftüberschusszahl von $\lambda = 1,3$ auf, was ca. 4 Vol.-% Restsauerstoffgehalt im Abgas entspricht.

Bei der Interpretation der Simulationsergebnisse ist allerdings zu beachten, dass bei der Simulation eine Methanverbrennung unter stationären Bedingungen berechnet wird. Im Gegensatz hierzu ist die tatsächliche Verbrennung in Kaminöfen ein nicht stationärer Prozess. Dies ist einer der Gründe, weshalb sich die CO-Minima bei vergleichsweise geringen Luftüberschusszahlen ergeben.

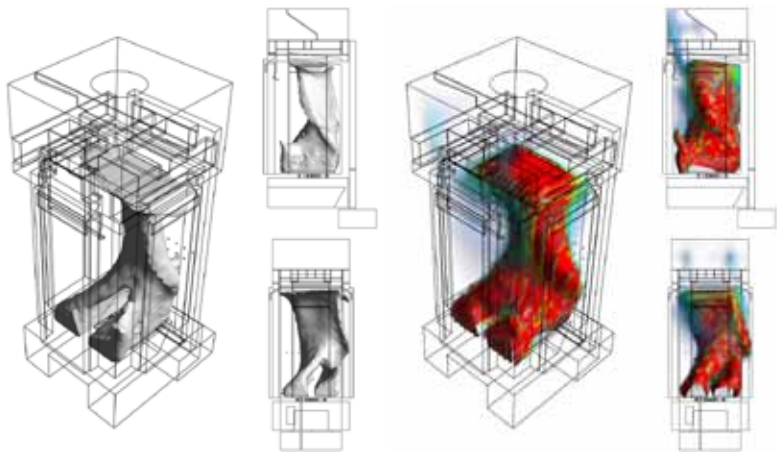


Abbildung 6: Isoflächen der Temperatur größer 650 °C (links) und freigesetzte Reaktionsenergie (rechts) beim Kaminofen mit Modifikation

$$CO_{norm} = \frac{\dot{m}_{CO \text{ bei } \lambda_n} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{CO \text{ bei } \lambda_o} \left[\frac{kg}{s} \right]} \quad (1)$$

Wird der Kaminofen im Luftmangelbereich (Luftüberschusszahl kleiner $\lambda = 1,15$) oder bei höherem Luftüberschuss (Luftüberschusszahl größer $\lambda = 2,0$) betrieben, so ist ein mehr oder weniger starker Anstieg der berechneten CO-Konzentration zu verzeichnen. Im Minimum der Kurvenverläufe, zwischen $\lambda = 1,25$ und $\lambda = 1,6$, kann keine merkliche Verbesserung bei den CO-Konzentrationen durch die Modifikationen des Kaminofens festgestellt werden. Allerdings ergibt sich bei der Modifikation die minimale CO-Konzentration über einen größeren λ Bereich und bei höheren λ Werten erfolgt bei der Modifikation der CO-Anstieg langsamer als bei der Originalkonstruktion.

Für eine Evaluierung der Simulationsergebnisse soll ein Vergleich mit der Modifikation und Originalkonstruktion stattfinden. Deshalb wurden vom Hersteller des Kaminofens die mit Simulationsrechnungen untersuchten Modifikationen an einem Versuchsofen vorgenommen. Mit diesem modifizierten Kaminofen wurden dann Abbrandversuche auf dem IFK-Prüfstand unter Typ Prüfbedingungen vorgenommen. Im Vergleich hierzu wurden auch mit der Originalkonstruktion unter vergleichbaren Randbedingungen jeweils 6 Abbrandversuche durchgeführt. Für den Vergleich von Messwerten und Simulationsergebnissen wurde die Hauptverbrennungsphase herangezogen, da sich in dieser Verbrennungsphase die Zustände am besten mit den in der Simulation angenommenen stationären Zuständen bei der Verbrennung vergleichen lassen. Die Hauptverbrennungsphase wurde derart definiert, dass eine Kohlenmonoxidkonzentration unter 1.200 mg/m³ (bezogen auf 13 Vol.-% O₂) im Abgas vorliegt und eine weitgehend konstante Abgastemperatur vorhanden ist. In der absoluten Höhe für die CO-Konzentration konnte keine Verbesserung mit der Modifikation gegenüber dem Originalzustand erreicht werden. Wird allerdings der Mittelwert der CO-Konzentration für die Hauptverbrennungsphase für einen Vergleich herangezogen, so kann im Mittel eine geringe Verbesserung von 80 mg/m³ (bei 13 Vol.-% O₂) für die Modifikation festgestellt werden. Dies rührt daher, dass die Phase mit niedrigen Konzentrationen von Kohlenmonoxid gegenüber dem Originalzustand des Kaminofens verlängert wurde.

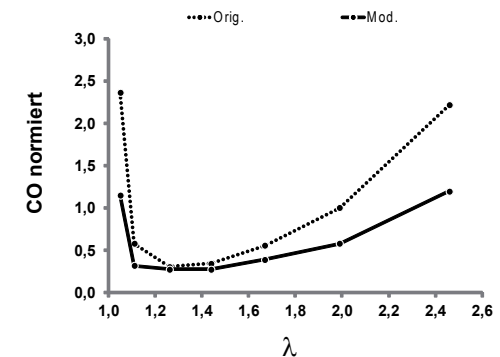


Abbildung 7: Normierte CO-Konzentration in Abhängigkeit der Luftüberschusszahl λ beim Kaminofen im Original und in der modifizierten Version

Abbildung 8 zeigt die Verläufe der Mittelwerte aus jeweils sechs Versuchen der normierten CO-Konzentrationen und der gemessenen Sauerstoffkonzentrationen über der Abbrandzeit für den Kaminofen im Original und in der Modifikation M3. Bei beiden Kaminöfen treten hohe CO-Konzentrationen bei einem Sauerstoffgehalt von ca. 8 Vol.-% auf. Die Originalkonstruktion hat im Mittel eine kürzere Anbrandphase, da der typische 2. Anstieg der CO-Konzentration in der 9. Minute des Abbrandes deutlich geringer ausfällt. Bei der modifizierten Feuerung ist in dieser Abbrandphase hingegen ein deutlicher Anstieg der CO-Konzentrationen vorhanden.

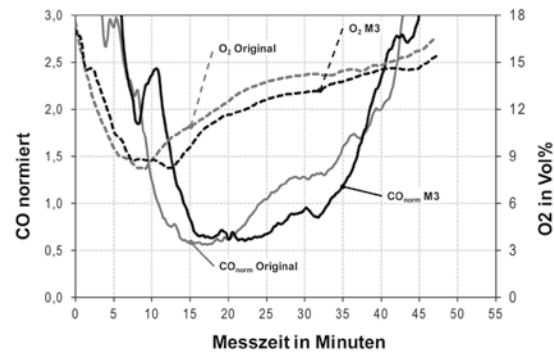


Abbildung 8: Verlauf der normierten CO- und der gemessenen O₂-Konzentration über der Abbrandzeit beim Kaminofen im Original und in der Modifikation M3 (gemittelte Verläufe aus sechs Abbränden)

In der 15. Minute des Abbrandes erreicht dann die Modifikation einen Bereich mit geringen CO-Konzentrationen, die über einen langen Messzeitraum weitgehend konstant niedrig bleiben. Erst ab der 32. Minute des Abbrandes steigen die CO-Konzentrationen dann wieder deutlich an. Bei der Originalkonstruktion wird der Bereich geringer CO-Konzentrationen im Mittel erst in der 14. Minute erreicht und auch nur für relativ kurze Zeit. Bereits in der 20. Minute des Abbrandes ist dann ein Anstieg der CO-Konzentration zu verzeichnen.

Anhand der CO-Mittelwerte des Gesamtabbrandes und der einzelnen Verbrennungsphasen lassen sich die Unterschiede der beiden Konstruktionen qualitativ vergleichen (siehe Tabelle 1). Die Berechnung des CO_{Anteil} für die Verbrennungsphasen Anbrand, Hauptverbrennung und Ausbrand wurde nach folgender Gleichung (2) durchgeführt:

$$CO_{Anteil} = CO_{Norm} \cdot \frac{t_{phase}}{t_{ges}} \quad (2)$$

CO _{norm}	Normierte CO-Konzentration nach Gleichung (1)	[-]
t _{ges}	Zeit des gesamten Abbrandes	[min]
t _{phase}	Zeit der einzelnen Verbrennungsphase	[min]

Tabelle 1: Ergebnisse der Evaluierungsmessungen beim Kaminofen - Mittelwerte für Abbrandzeit und CO für den Gesamtabbrand und die einzelnen Verbrennungsphasen

Verbrennungsphase	Zeit in min		CO _{norm} CO _{Anteil} (jeweils dimensionslos)	
	Original	Modifikation	Original	Modifikation
Gesamt	47	48	2,4	2,6
Anbrand	9	12	5,6 1,1	5,7 1,4
Hauptverbrennung	29	26	1,0 0,6	0,9 0,5
Ausbrand	9	10	3,0 0,6	2,8 0,6

Die Gesamtabbrandzeit ist bei beiden Konstruktionen im Mittel etwa gleich. Deutlich Unterschiede lassen sich in der Anbrand- und der Hauptverbrennungsphase ausmachen. Die Anbrandzeit der Modifikation erhöht sich um drei Minuten, dafür verkürzt sich die Hauptverbrennungsphase um drei Minuten.

Werden die mittleren normierten CO-Konzentrationen verglichen, weist die Modifikation höhere Werte gegenüber der Originalkonstruktion auf. Da bei diesen Feuerungsanlagen die Anbrandphase die Gesamthöhe der Emissionen maßgeblich bestimmt, kann durch eine Verbesserung in der Hauptverbrennung die erhöhte Emission und die längere Dauer des Anbrands nicht unbedingt kompensiert werden.

Zusätzlich muss noch erwähnt werden, dass die Feuerung in der Originalkonstruktion Abweichungen gegenüber den vom Hersteller gelieferten CAD-Daten und damit gegenüber dem CFD-Modell aufweist. In der Simulation wurde mit einer Austrittsöffnung der vorderen Scheibenluft von 8 mm gerechnet und in der Versuchsfeuerung wies der Spalt eine Breite von 5 mm auf. Eine der Modifikationen war, dass der Spalt der vorderen Scheibenluft von 8 mm auf 5 mm reduziert wird. Da am realen Kaminofen keine Möglichkeit bestand den Spalt der Austrittsöffnung einzustellen, konnte die Wirkung unterschiedlicher Spalte nicht evaluiert werden. Eine Änderung des Luftspaltes im CFD-Modell konnte im Projekt nicht mehr vorgenommen werden.

Wie dieses Beispiel der numerischen Simulation eines Kaminofens zeigt, sind für die Beurteilung des Emissionsverhalten einer Feuerung nicht nur die errechneten CO-Konzentrationen wichtig, sondern es müssen auch die Aspekte der Strömungsführung sowie der Temperatur- und O₂-Verteilung mit einbezogen werden. Für zukünftige Projekte sollte überprüft werden, ob die berechnete CO-λ-Charakteristik mit Messwerten übereinstimmt und ob diese Information für eine Beurteilung von Optimierungsmaßnahmen genutzt werden kann.

Ergebnisbewertung und -verbreitung durch HKI

Es war das Ziel dieses gemeinsamen Forschungsvorhabens die Feuerungstechnik für Kaminöfen, Kachelöfen und Kamineinsätze weiterzuentwickeln und praxistaugliche Minderungsmaßnahmen für Feinstaub und Produkte unvollständiger Verbrennung durch Primärmaßnahmen aufzuzeigen. Durch Verbesserungen der Verbrennungstechnik in modernen häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe (kleine, chargenweise beschickte Feuerstätten - Kaminofen, Kachelofen-Heizeinsatz, Kamineinsatz) konnte in den letzten Jahren be-

reits eine deutliche Reduzierung der Emissionen und eine Steigerung des Wirkungsgrades der Feuerstätten erreicht werden. Die Arbeiten an technischen Entwicklungen zur weiteren Reduzierung der Emissionen werden von den Herstellern stetig weitergeführt. Um effektiv an der weiteren Emissionsminderung durch Primärmaßnahmen arbeiten zu können, sind Informationen zu Prozessen der Feinstaubentstehung, -zusammensetzung und -fortpflanzung bei der Verwendung fester Brennstoffe notwendig.

In diesem Forschungsvorhaben sollte durch die Optimierung der Verbrennungstechnik Grundlagenforschung für häusliche Feuerstätten für feste Brennstoffe betrieben werden, um bestehende Wissenslücken zu schließen, die Möglichkeiten zur Minderung des Feinstaubausstoßes aufzuzeigen und diese einer breiten Anwendung zuzuführen.

Mit der CFD-Simulation wurden in dem Vorhaben an 3D-Modellen von Holzfeuerungen die Bereiche mit hohen Emissionen im Brennraum lokalisiert, die sich auf Grund von Luftmangelsituationen, zu niedrigen Temperaturen und schlechter Durchmischung von brennbaren Gasen und Verbrennungsluft ergeben. Mit Hilfe der Simulation konnten verschiedene Einströmungen und Umlenkungen an den Modellfeuerungen untersucht und Maßnahmen für die Optimierungen dieser Feuerungen zur Reduzierung der Emissionen abgeleitet werden. Anschließend wurden die Feuerungen entsprechend den abgeleiteten Maßnahmen umgebaut und auf dem Prüfstand nachgemessen. Bei den Prüfstands-Untersuchungen konnte eine Reduzierung der Kohlenstoffmonoxid-Emissionen festgestellt werden. Mit dem Forschungsvorhaben konnten Chancen und Grenzen der Simulationstechnik aufgezeigt und die Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf reale Emissionsverläufe dargestellt werden.

Die in diesem Forschungsvorhaben erzielten Informationen dienen als Grundstein für eine mögliche zukunftsorientierte Nutzung der Simulation bei Prototypberechnungen. Auch lassen sich weitere Aspekte für umwelttechnische Detailfragen mit der CFD-Simulation betrachten. Es besteht daher seitens der Industrie das Interesse an der Fortführung von Forschungsaktivitäten zur Simulationstechnik an häuslichen Feuerstätten für feste Brennstoffe.

Literatur

JUSCHKA A, W.; STRUSCHKA, M. (2012): Untersuchung zur Feinstaubentstehung und CO-Bildung beim Verbrennungsprozess in chargenweise betriebenen Hausbrandfeuerstätten und Entwicklung emissions- und partikelarmer Feuerungsanlagen.; Endbericht zum AiF/FDBI-Vorhaben Nr. 16207 N. Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart, Stuttgart. 2012.



LignoBioFuel - Verfahren zur Herstellung von Bioagglomeraten auf der Basis von Lignin

Satyanarayana Narra¹, Florian Logsch¹, Claudia Glaser¹, Peter Ay¹, Frank Döhling³, Diana Leistner³, Dieter Strube²

Vorhaben: LignoBioFuel - Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von stofflich und energetisch nutzbaren Bioagglomeraten auf der Basis von Lignin

FKZ-Nr.: 03KB058

Laufzeit: 01.07.2011 - 28.02.2014

Zuwendungssumme: 584.326 €

Koordination:

¹Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
Siemens-Halske-Ring 8, 03046 Cottbus
www.b-tu.de

Projektpartner:

²Maschinenbau Gebr. Lödige
Elsener Straße 7-9, 33102 Paderborn

³DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116, 04347 Leipzig

Kontakt:

PD Dr. rer. nat. habil. Satyanarayana Narra
Telefon: +49 (0)355 69 4325
E-Mail: narra@tu-cottbus.de

Satyanarayana Narra (Projektleiter):

Die innovative Agglomerationstechnologie gestattet einen effizienten Einsatz von Ligninen sowohl für die energetische als auch für die stoffliche Nutzung. Mit Anwendung des entwickelten Verfahrens werden die bekannten Probleme bezüglich der Handlungseigenschaften des Lignins bei Anwendung, Lagerung und Transport gelöst.

**Zusammenfassung**

Das im Holz natürlich vorkommende Lignin zählt zu den wichtigsten erneuerbaren Biomasseressourcen. Lignin kennzeichnet sich durch einen hohen Heizwert, der im wasser- und aschefreien Zustand mit dem von Steinkohle vergleichbar ist, einem niedrigen Aschegehalt und hydrophoben Eigenschaften aus. Technische Lignine (Ligninsulfonat aus dem Sulfitaufschluss und Kraftlignin aus dem Sulfataufschluss) sind Produkte des Zellstoffgewinnungsprozesses. Das im Holz natürlich vorkommende Lignin wird durch den Holzaufschluss vom Zellstoff durch die Zugabe verschiedener Aufschlusschemikalien getrennt. Die Aufschlusschemikalien modifizieren die Ligninstruktur, indem das wasserunlösliche Lignin durch chemische Modifikation und Abbau in eine wasserlösliche Struktur überführt wird. Nach derzeitigem Stand der Technik werden die in der Zellstoff- und Papierproduktion anfallenden Ablaugen einer energetischen Nutzung zugeführt. Dieser Prozess ist mit dem Rückgewinnungsprozess der eingesetzten Kochchemikalien verbunden. Die Verbrennung der eingedickten Ablaue mit einem Trockengehalt von etwa 30 – 70 Ma.-% findet in sogenannten Laugenkesseln statt. Dabei werden Prozesswärme und Energie gewonnen. Für die Eindampfung sind erhebliche Mengen an Energie notwendig, damit sinkt die Effizienz der Verbrennung. Der direkte Einsatz anfallender Ablaugen (stofflich oder energetisch) ist durch deren heterogene Zusammensetzung sowie die teilweise toxischen Eigenschaften (durch die verwendeten Kochchemikalien) begrenzt. Aktuelle Forschungen beschäftigen sich mit Verfahren der Lignin Aabtrennung aus den Schwarzlaugen. Durch gezielte Ansäuerung und anschließende Separation (und Agglomeration) gelingt es, Lignine mit einem Restfeuchtegehalt von ca. 30 Ma.-% zu gewinnen. Bedingt durch die geringen Partikelgrößen (im Bereich 20 – 80 µm) sind die angewandten Separationsverfahren ineffizient. Außerdem besitzt das staubförmige Lignin ein hohes Explosionsrisiko, was durch die Überführung in Pressagglomerate eliminiert werden kann (zusätzlicher Prozessschritt). Die so erzeugten Agglomerate werden einer energetischen Nutzung zugeführt.

Die Zielstellung des Projektes bestand darin, ein Verfahren zu entwickeln, durch welches das anfallende Lignin derart strukturiert und agglomeriert wird, dass ein problemlos handhabbares Handelsgut entsteht, wobei gleichzeitig die Anzahl der notwendigen Prozessschritte reduziert wird. Das innovative Verfahren integriert den Prozess der Aufbauagglomeration unter Verwendung eines Sprühgranulators oder eines Mischers zur Erzeugung von Granulaten, die anschließend dem Prozessschritt der Säurebehandlung zugeführt werden. Damit können sowohl die Anzahl der Prozessschritte reduziert als auch insbesondere notwendige Filtrationsverfahren effizienter durchgeführt werden.

Das Verfahren gliedert sich in die Prozessstufen:

- i) Granulation der Schwarzlaugen;
- ii) Säurebehandlung der Granulate bei variablen Temperaturen sowie
- iii) Waschprozess zur Entfernung überschüssiger Säure und entstandenen Reaktionsprodukten (Salze).

Die gewonnenen Ligningranulate zeichnen sich durch verbesserte Produkteigenschaften wie ein verbessertes Transport- und Lagerverhalten sowie ein stark reduziertes Explosionsrisiko aus. Die Partikelgrößen der Granulate vor und nach der Säurebehandlung liegen im Bereich 300 – 1000 µm, womit das Produkt als staubfrei einzustufen ist. Die Agglomerate sind außerdem hydrophob. Der Heizwert liegt im Bereich zwischen 25 MJ/kg bis 33 MJ/kg in Abhängigkeit von der erreichten Reinheit und dem Wassergehalt

Summary

Black liquors mainly containing lignin are obtained as a sludge residue from pulp and paper industries. Lignin is a renewable fuel with a high heating value equivalent to anthracite coal, low ash content and hydrophobic properties. The extracted black liquors in paper and pulp mills are usually burnt at the mill directly to cover the energy production costs of the mill. The efficient utilization of lignin can reduce the percentage of lignin sludge used for energy production in comparison to the present situation. Further the direct material application of black liquors and their handling are limited due to the presence of toxic cooking chemicals and heterogenic characteristics (hydrophilic / hygroscopic). Recent developments in the paper and pulp mills are to separate lignin using acidification processes and subsequently, agglomerate the obtained cake (30 wt. % moisture content) in the form of pellets. The separation process is tedious due to the particle size of lignin ranging between 20 µm to 80 µm (low filtration efficiency) and the dried particles create a risk of dust explosion. Press agglomeration is carried out to avoid the risk of dust explosion. The produced pellets are then incinerated.

This research project work integrates the innovative build-up agglomeration processing using a spray-granulation as well as a mixer process into the black liquor treatment. With that the number of process steps required is reduced. The innovative process consists of

- i) production of black liquor agglomerates (granules) by spray drying or with mixer,
- ii) acid treatment of the granules at different temperatures and
- iii) warm water washing.

The acid treatment of black liquor granules lead to remodification of the lignin structure (from soluble to insoluble) and change from a hydrophilic / hygroscopic state to a hydrophobic state. The acid treated granules are washed with warm water removing the adherent acids and salts resulting in a simultaneous increase in purity of lignin. The lignin granules are hydrophobic indicating the re-modification of their structure.

The particle size of the granules measured before and after the acid treatments are ranging between 300 µm and 1000 µm, which indicates that the granules can be easily handled without explosion risks. The hydrophobic granules produced within the innovative process improve the filtration efficiency, handling characteristics, reduce explosion risks and regains its original structure. Further the innovative process results in a better lignin yield compared to the conventional process. The heating values of the produced granules are ranging from 25 MJ/kg to 33 MJ/kg. The innovative agglomeration techniques would lead to an optimal utilization of lignin for energy and material applications.

Hintergrund und Zielstellung

Die in den derzeit kommerziell genutzten Aufschlussverfahren anfallenden Ablaugen (Schwarzlaugen, ca. 50 Mio. t/a weltweit) enthalten neben den Aufschlusschemikalien und anderen Holzinhaltsstoffen Lignin im Anteil von 30 Ma.-% bis 50 Ma.-% (bezogen auf den Feststoffanteil). In Deutschland betrug das Aufkommen an Schwarzlauge 2008 etwa 3,5 Mio. t/a (FNR 2010). Die dominierenden Verfahren zur Zellstoffgewinnung (chemische Holzaufschlussverfahren) sind das Sulfat- und das Sulfit-Verfahren. Diese Verfahren fokussieren auf die Gewinnung von qualitativ hochreiner Cellulose (Zellstoff). Die beim Kochprozess anfallende ligninhaltige Schwarzlauge wird weiteren Behandlungsschritten unterzogen. Hauptzielstellungen sind die Rückgewinnung der Kochchemikalien sowie die Reduzierung und Reinigung der anfallenden Abwasserströme. Eine Weiterentwicklung zur Aufarbeitung anfallender Schwarzlaugen aus dem Kraftaufschlussprozess (Sulfat-Verfahren) stellt der in Schweden entwickelte LignoBoost-Prozess dar. Die Grundlage dieses Prozesses ist die Fällung / Flockung der ligninhaltigen Schwarzlauge mit Säuren (Kohlensäure, Schwefelsäure, etc.) zur Erzeugung eines energetisch nutzbaren, ligninhaltigen Brennstoffes. Im Rahmen der Recherche wurde weiterhin das Patent zur Sprühgranulation von Ligninschlämmen (insbesondere Ligninsulfonate) in die Bewertung einbezogen (Patent-Nr: DE 9117284 U1). Ausgehend von der im Patent genannten Korngrößenverteilung entsteht durch Anwendung des Sprühgranulationsprozesses ein Produkt, welches nur geringe Staubentwicklung aufweist, aber nicht als staubfrei zu bezeichnen ist.

Alternative Holzaufschlussverfahren basieren auf dem Einsatz von umweltverträglichen Säuren, Basen oder organischen Lösungsmitteln mit dem Ziel der Gewinnung einer hochreinen Zellstofffraktion sowie der Nutzbarmachung der in den Ablaugen enthaltenen Ligninfraktionen. Innovative Bioraffineriekonzepte beschäftigen sich mit der nachhaltigen Bereitstellung und Nutzung der Holzbestandteile als Grundbausteine sowohl für stoffliche als auch energetische Anwendungen.

Stoffliche Nutzung

Die stoffliche Nutzung der schwefelhaltigen technischen Lignine (insbesondere der Ligninsulfonate) ist weltweit auf weniger als 2 Mio. t/a beschränkt, d. h. nicht einmal 4 % der anfallenden Menge. Mehr als die Hälfte entfällt dabei auf die Verwendung als Dispergiermittel in Beton und Zement sowie als Zusatz zu Bohrflüssigkeiten.

Weitere Anwendungen sind: Bindemittel für Pellets in Tiernahrung, Agrochemikalien und die Produktion von Vanillin. Außerdem werden sie als Papieradditiv, Dispergier- und Emulgiermittel in Lacken sowie als Zuschlagstoff in Gips und Gerbstoffen verwendet. Hinderungsgründe für eine weitergehende Nutzung von technischem Lignin sind insbesondere seine Heterogenität, der Geruch, die Staubbildung und das hohe Reaktionsvermögen (Lindmann & Smaragdis 2009).

Energetische Nutzung

Ein großer Teil der Ligninschwarzlaugen wird meist direkt im Zellstoffwerk eingedickt und zur Deckung des betriebseigenen Energiebedarfs genutzt. Beim Einsatz der eingedickten Laugen in Laugenkesseln sind, bedingt durch die Wassergehalte, hohe Verdampfungsenergien notwendig (Puls 2009). Dies führt zu einer deutlichen Reduzierung der Energieeffi-

zien aufgrund einer Minderung des Heizwertes. Die direkte Verbrennung der Schwarzlaugen zielt nicht nur auf die energetische Nutzung ab, sondern beinhaltet gleichzeitig eine Rückgewinnung verwendeter Aufschlusschemikalien. Für die Eindampfung sind erhebliche Mengen an Energie notwendig. Damit sinkt die Effizienz der Verbrennung. Etwa 66 % der Ablauge dienen zur Eigenenergiebedarfsabdeckung. Modernisierte Werke sind in der Lage, überschüssige Energie ins öffentliche Stromnetz einzuleiten (Papier + Technik 2012). Die Energieausbeute bei der Verbrennung von organischen Ligninbestandteilen ist im Vergleich zur energetischen Nutzung von Kohle nahezu identisch. Die Verbrennung von trockenem Lignin liefert einen Energiegewinn von 26 MJ/kg (Lindmann & Smaragdis 2009). Die Nutzung von Lignin zur Energiegewinnung bietet sich an, da dieser Prozess CO₂-neutral abläuft. Außerdem enthält Lignin weniger als 0,01 Ma.-% Chlor (trocken), womit die Risiken von Apparatekorrosionen, welche bei hohen Temperaturen einsetzen, auf ein Minimum beschränkt werden.

Probleme bei der Verarbeitung

Lignin in flüssiger Form mit 50 Ma.-% Feststoffgehalt birgt viele Risiken, denn die viskose und klebrige Substanz erschwert die Beförderung, zudem sind Ablagerungen an allen Apparateteilen vorzufinden. In Anlagen, in denen Ligninschlämme mit einem Feststoffanteil von 70 Ma.-% verarbeitet werden, wird die gesamte Anlage konstant bei einer Temperatur von 110 °C gehalten. Unter diesen Bedingungen wird ein durchgängiger Brennstofffluss garantiert sowie die Viskosität auf ein Minimum reduziert. Daraus schlussfolgert sich ein enormer Wärmeenergieaufwand (Seal specialists 2010).

Die Verwendung von trockenem Ligninpulver ist mit einem hohen Gefahrenpotential verbunden. Das stark riechende Material besitzt eine hohe Reaktivität, wodurch die Gefahr von Staubexplosionen besteht. Das staubförmige Material lagert sich außerdem auf allen Maschinen- und Apparateteilen ab, mit denen es in Berührung kommt und belastet die gesamte Anlage. Teilweise kann es auch zu Verstopfungen der Fördermaschinen kommen (Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2010).

Um diese Hindernisse (Handhabung der Flüssig- bzw. Trockensubstanz, Energieeffizienz, etc.) zu überwinden, wurde im Rahmen der Projektbearbeitung auf die Bildung von Agglomeraten aus Ligninablaugen der Zellstoffindustrie fokussiert und so ein marktfähiger, „neuer“ Biomassebrennstoff bereitgestellt.

Methoden und Ergebnisse

Um die Nachteile bei einer Verbrennung von flüssigem und pulverförmigem Lignin zu unterbinden, sollte es aus den flüssigen Sulfit- bzw. Sulfatablaugen agglomeriert werden, um einen transport- und lagerfähigen Biomassefestbrennstoff zu gewinnen. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurden als mögliche Lösungskonzepte die Prozesse der Fällung / Flockung und der Granulierung betrachtet sowie im Labormaßstab getestet. In den Versuchen konnte die Fällung von Ligninsulfonaten mit konzentrierter Schwefelsäure grundsätzlich nachgewiesen werden, jedoch traten die bekannten Probleme bezüglich Filtration und Ausbeute auf. Als weiterer Prozessschritt wurde die Säurebehandlung der Agglomerate untersucht und bewertet. Ziel war die Verbesserung des Filtrationsverhaltens bei anschließenden Wasch- und Reinigungsstufen sowie die Steigerung der Ligninausbeute.

Granulation der nativen Laugen

Der Granulationsprozess der ligninhaltigen Ablaugen lässt sich sowohl in Wirbelschichtagglomeratoren als auch in Mischagglomeratoren realisieren.

Die durchgeführten Untersuchungen mit der Wirbelschichtgranulation zeigten, dass aus den zu Verfügung stehenden Schwarzlaugen in einem Labor-Fließbett-Sprüh-Granulator Granulate mit definierten Eigenschaften erzeugt werden konnten. Die Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse der Korngrößenanalyse, der Schüttdichtebestimmung sowie energetischen Betrachtungen beeinflussten die Auswahl der optimalen Prozessparameter für den weiteren Versuchsablauf. Als optimale Verfahrensparameter wurden Granuliertemperaturen von 80 °C und 100 °C und eine Inputmaterialtemperatur von 20 °C gewählt. Der gewählte Temperaturbereich (80 °C...100 °C) geht konform mit den Betriebstemperaturen in einer Zellstoffgewinnungsanlage, sodass eine Einbindung des Fließbett-Sprüh-Granulationsprozesses über Wärmekopplung in den vorhanden Verfahrensprozess sinnvoll und möglich ist. Im Ergebnis der Sprühgranulation konnten Granulate mit engen Korngrößenverteilungen, einer großen Schüttdichte und hohe Granulatdruckfestigkeiten erzeugt werden. Die Granulate sind trocken, rieselfähig und transportfähig. Bezogen auf die erzeugten Korngrößen sind sie als nicht-explosiv einzustufen. In einem nachfolgenden Prozessschritt wurden die gebildeten Agglomerate einer Säurebehandlung und anschließend Wasch- und Filtrationsschritten, zur Entfernung gebildeter Salze und anhaftender Säure, unterzogen. Die Behandlung der Lignin-Sprühagglomerate (Ca-Ls, Na-Ls und KL) erfolgte sowohl mit Schwefel- als auch mit Essigsäure bei variablen Konzentrationen. Die nachfolgende Abbildung 1 (links) zeigt das Prozessschema (Narra et al. 2012).

Als eine alternative und energieeffizientere Verfahrensvariante wurde die Mischgranulation in einem Schnellmischer untersucht. Zunächst erfolgten Versuche zur Trocknungsgranulation. Dabei wurde das Kraftlignin im ersten Schritt gefällt und anschließend der erhaltene Schlamm im Mischer getrocknet und granuliert. Somit konnten Granulate mit einer gut handhabbaren, transport- und lagerfähigen Form mit hoher Festigkeit erzeugt werden. Eine weitere Verfahrensmöglichkeit stellte die Herstellung von Granulaten aus nativer Kraftlauge durch Aufbauagglomeration dar. Bei diesem Prinzip wird die flüssige Lauge auf ein Pulverbett gesprüht.

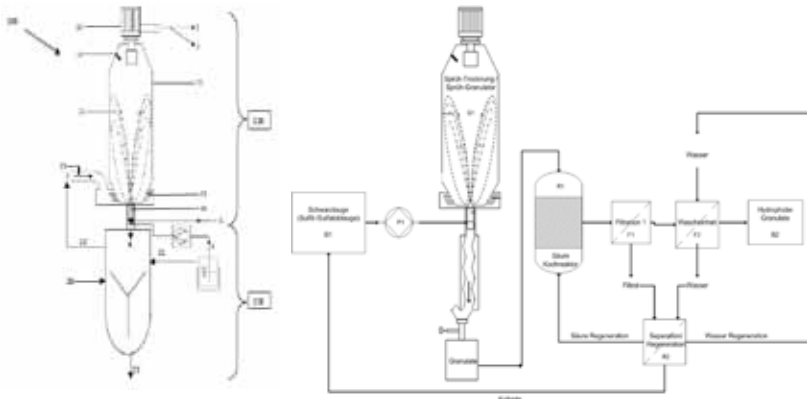


Abbildung 1: Verfahren zur Herstellung von wasserunlöslichen Lignin-Agglomeraten mittels Sprüh- oder Mischagglomerators (Patentierter Prozess DE 102012102327B3)

Es können feste Granulate gewonnen werden, wobei jedoch die Festigkeit aufgrund der erhaltenen Plättchenform schwankt, welche wiederum stark vom installierten Zudosierungssystem abhängt. Weitere detailliertere Untersuchungen zur Aufbaugranulation der Kraftlaugen, sowie Sulfitablaugen in einem Mischagglomerator wurden vom Projektpartner Firma Lödige Maschinenbau vorgenommen.

Als eine mögliche Verfahrensvariante ist auch eine Kombination aus Sprühgranulator und Mischagglomerator denkbar.

Das im Rahmen des Projektes angemeldete Patent (DE 102013112499.2.) beschreibt die Aufbauagglomeration ligninhaltiger Ablaugen in einem Mischer unter Pulvervorlage, welche über einen kombinierten Sprühgranulationsprozess hergestellt werden. Abbildung 1 (rechts) zeigt das Prozessschema für den kombinierten Granulationsprozess (Narra et al. 2013).

Kritisch stellen sich die hohen Aschegehalte und Schwefelanteile in den erzeugten Ligningranulaten dar. Als mögliche Verfahrensvariante werden die Granulate mit Säure versetzt und so gereinigt. Im Anschluss daran folgen Waschschritte zur Entfernung der gebildeten Salze sowie überschüssiger Säureanteile. In Abbildung 2 ist eine Gegenüberstellung der konventionellen Verfahrensweise zu der im Rahmen des Projektes patentierten Verfahrensweise dargestellt.



Abbildung 2: Vergleich der konventionellen Verfahrensweise (Stand der Technik) links mit den innovativen patentierten Prozessstufen rechts (Narra 2014)

Verfahren zur Herstellung von wasserunlöslichen Ligninagglomeraten

Im Ergebnis der vorausgehenden Laboruntersuchungen wurde das Verfahrenskonzept zur Gewinnung von festen Ligningranulaten modifiziert. Im Gegensatz zum LignoBoost-Prozess wird der Verfahrensschritt der Agglomeration (Granulation) an den Anfang gesetzt. Durch Bildung einer festen Granulatstruktur aus nativen Ablaugen und den Einsatz von Granulaten in den folgenden Aufreinigungsschritten können sowohl die Säurebehandlung als auch Wasch- und Filtrationsschritte effizienter gestaltet werden. Damit ist eine Erhöhung der Anlageneffizienz, verbunden mit einer Ausbeutesteigerung sowie einer Reduzierung der Anzahl der notwendigen Prozessschritte realisierbar. Ein weiterer Vorteil der Granulatbildung besteht darin, dass der herkömmlich durchgeführte Flockungs- und Fällungsprozess zur Agglomeratbildung entfällt. Für die Säurebehandlung wurden die Agglomerate sowohl als lose Schüttung als auch in einer geometrisch definierten Filtrationskapsel in das Säurebad gegeben. Durch die Kombination von Säurebehandlung und gleichzeitiger Einkapselung bildeten sich zwischen den Sprühgranulaten feste Brückenstrukturen (durch Löse- und Schmelzvorgänge) aus, was im Ergebnis zur Erzeugung eines geometrisch definierten, festen Briketts führte.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten weiterhin, dass durch die Säurebehandlung und den anschließenden Waschprozess der Sprühagglomerate eine signifikante Absenkung des Schwefel- und Aschegehaltes und damit eine deutliche Erhöhung des Heizwertes

erreicht wurde. Die aus den vorliegenden ligninhaltigen Schlämmen erzeugten Sprühgranulate besitzen einen Heizwert (wasser- und aschefrei, waf) zwischen 25 MJ/kg und 33 MJ/kg in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Einsatzprodukte.

Wesentliche Vorteile des neu entwickelten Behandlungsprozesses (Agglomerate/Briketts) gegenüber dem herkömmlichen Verfahren stellen die Kombination von Agglomeration (Erzeugung von Ligninbriketts) und der Reinigungsprozess in einer Verfahrensstufe dar.

Mit der Erzeugung von losen Granulaten bzw. geometrisch definierten Briketts kann das Verfahren zur Erzeugung eines Brennstoffes aus ligninhaltigen Schlämmen sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht gegenüber der Direktverbrennung von ligninhaltigen Schwarzlaugen wesentlich verbessert werden.

Dazu sind folgende Vorteile zu nennen

- (i) Verbesserung der Filtrationsprozesse,
- (ii) Reduzierung des Verbrauchs an Säure im Vergleich zum konventionellen Flockungs-Fällungsprozess,
- (iii) Rückführung der Ligninstrukturen in den (ursprünglichen) wasserunlöslichen Zustand,
- (iv) Erhöhung der Energiedichte sowie des Heizwertes (waf),
- (v) Reduzierung der an den Granulaten anhaftenden Verunreinigungen und
- (vi) Reduzierung der Anzahl der Verfahrensschritte, Reduzierung der Prozess- und Wartungskosten.

Energetische Betrachtungen

Hinsichtlich der energetischen Verwertung haben die durchgeführten Versuche gezeigt, dass die Herstellung und Entschwefelung der Granulate prinzipiell möglich ist. Die Energie- und Stoffbilanzierung des entwickelten Verfahrens lässt sich im Moment nicht mit herkömmlichen Verfahren vergleichen, da keine ausführliche Bilanzierung des neuen Verfahrens vorliegt. Das Verfahren wird zur Zeit nur im Technikumsmaßstab betrieben. Es lässt sich lediglich abschätzen, dass der energetische Aufwand und die Anlagen- und Energiekosten deutlich gesenkt werden können.

Energiebilanz für den Gesamtprozess

Das Erreichen einer positiven Energiebilanz für den Gesamtprozess ist hauptsächlich vom Heizwert des erzeugten Endproduktes abhängig. Für die aus den Sulfitablaugen (Ca-LS und Na-LS) sowie der Kraftlauge (KL) hergestellten Granulate konnten nach der Säurebehandlung Heizwerte im Bereich 26 MJ/kg, 25 MJ/kg und 33 MJ/kg bestimmt werden. Der Heizwert der erzeugten Briketts lag im Bereich 19 MJ/kg, 21 MJ/kg bzw. 23 MJ/kg. Die Berechnung der Heizwerte als Differenz zum Heizwert der Einsatzstoffe ist in der Abbildung 3 graphisch dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit zum Wassergehalt. Dieser Zusammenhang wurde bereits von NUSSBAUMER und KALTSCHMITT (2001: 239-247); FNR (2007) beschrieben. Der Energiebedarf der Aufbauagglomeration basiert auf der Kalkulation der notwendigen Verdampfungswärme bezogen auf die Einsatzstoffe (Menge, Feuchtegehalt) die notwendig sind, um Agglomerate zu erzeugen und dabei gleichzeitig die entsprechende Menge an Feuchtigkeit zu verdampfen. In der Literatur wird der notwendige Energieaufwand zur Verdampfung von 1 kg Wasser mit 2,44 MJ angegeben (Engineeringtoolbox 2012). Die Unterschiede der Ausgangswassergehalte der Einsatzlaugen (Ca-LS: 50 Ma.-%, Na-LS: 55 Ma.-%, KL: 75 Ma.-%) finden sich daher in den entsprechend notwendigen Energiemengen wieder, die zur Erzeugung stabiler Granulate mit einem Wassergehalt von 10 Ma.-% einzusetzen sind.

Der Energiebedarf zur Produktion von Granulaten aus einem Kilogramm eingesetzter Schwarzlauge berechnet sich für die Einsatzprodukte wie folgt: Ca-LS: 0,98 MJ, Na-LS: 1,10 MJ und KL: 1,59 MJ. Der Energiebedarf zur Produktion von einem Kilogramm Granulat wird entsprechend der Zulauftrate von Lauge in den Sprühgranulator bestimmt: Ca-LS: 3,8 MJ, Na-LS: 4,31 MJ und KL: 11,78 MJ. Der Gesamtenergiebedarf für den Granulationsprozess (inkl. der Grundenergie, der Verdampfungswärme und der für Pumpen notwendigen Energie) erhöht sich um jeweils 0,5 MJ/kg. In den nachfolgenden Abbildungen 4 (a-c) wird der Zusammenhang zwischen energetischen Aufwand, erzeugten Granulatmengen und Feuchtegehalten verdeutlicht. Daraus lassen sich Aussagen zur Energieeffizienz des durchgeführten Sprühagglomerationsprozesses ableiten.

Die Unterschiede zwischen den Energiegehalten der Granulate und dem Energiebedarf basiert auf der zur Agglomeraterzeugung notwendigen Verdampfungswärme des Wassers (Ca-LS: 21,66 MJ/kg, Na-LS: 20,19 MJ/kg, KL: 20,72 MJ/kg). Diesen Zusammenhang zeigt ebenfalls die Abbildung 3b. Die rot-gepunktete sowie die rot-gestrichelte Linie stellen die Grenzlösungen zur Erreichung einer positiven Energiebilanz dar. Anzumerken ist, dass diese nur erreichbar ist, wenn die Produktionsmengen sehr gering sind und im Bereich von 500...750 g/h liegen. Auch der Verlauf der roten Linien zeigt, dass bei Einhaltung von optimalen Prozessparametern der Sprühgranulationsprozess mit einer positiven Energiebilanz durchgeführt werden kann. Daraus ableitend lässt sich zusammenfassen, dass aus energetischer Sicht der Einsatz eines Sprühgranulators zur Erzeugung von Granulaten aus ligninhaltigen Abflaugen sinnvoll und die Energiebilanz bezogen auf den Gesamtprozess positiv zu bewerten ist.

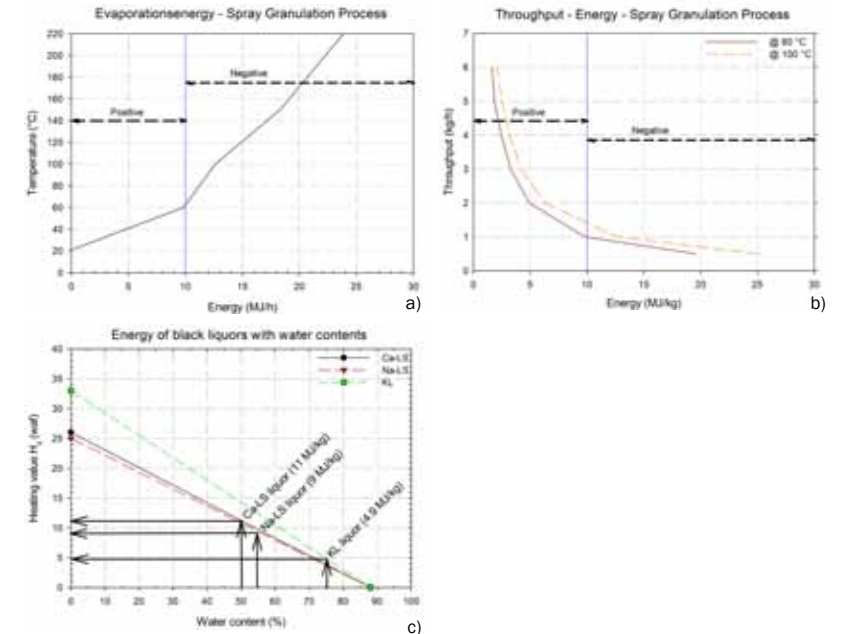


Abbildung 3: a) Verdampfungsenergie und b) Energieverbrauch pro Durchsatz des Sprühgranulationsprozesses (Erklärung siehe Text) und c) die grafisch ermittelten Heizwerte der Laugen in Abhängigkeit zum Wassergehalt (Narra 2014)

Energetische Nutzung von Lignin-Mischbrennstoffen

Brennstoffcharakterisierung, Pelletierung und Herstellung der Mischbrennstoffe

Die von der BTU Cottbus hergestellten Kraftlignin- und Ca-Ligninsulfonat-Chargen wurden vom DBFZ für Pelletierungs- und Verbrennungsversuche genutzt. Um jedoch alle Ausgangsstoffe miteinander vergleichen zu können, wurden die drei Ligninvarianten auf ihre chemische Zusammensetzung hin analysiert (Tabelle 1). Auffällig sind dabei für alle Chargen neben dem niedrigen Heizwert, der hohe Asche- und Schwefelgehalt. Besonders das Ca-Ligninsulfonat hat mit 8,6 MJ/kg einen sehr niedrigen Heizwert und mit 23,8 Ma.-% einen sehr hohen Schwefelgehalt. Beim Aschegehalt (550 °C) liegt das Kraftlignin mit 66,8 Ma.-% deutlich über den anderen Chargen.

Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse der Analyse der Ligninrohstoffe und Vergleich zu Holzbrennstoffen bzw. halmgutartigen Brennstoffen

	Einheit	Na-LS	Ca-LS	Kraft-L	RS	HSK	Holz ²
Wassergehalt	Ma.-%	21,4	47,1	7,3	8,8	9,3	7,14
Heizwert ¹	MJ/kg TS	16,1	8,6	15,8	16,6	16,8	17,38
Aschegehalt	Ma.-% TS	6,2	16,9	66,8	7,4	5,2	0,65
Flüchtige	Ma.-% TS	n.b.	58,2	46,7	75,4	78,1	n. b.
C	Ma.-%TS	48,8	37,8	41,2	45,0	46,7	49,8
H	Ma.-%TS	2,38	2,72	4,13	5,87	6,1	6,3
O	Ma.-%TS	36,3	35,3	46,5	47,5	46,3	43,5
N	Ma.-%TS	0,21	0,40	0,63	1,3	0,8	0,4
S	Ma.-%TS	6,30	23,8	2,3	0,32	0,1	0,01
Cl	Ma.-%TS	0,004	n.n.	0,054	0,480	0,061	<0,001
K	mg/kg TS	325	852	8.650	19.000	8.657	820

n.b. TS = nicht bestimmt Trockensubstanz

¹ H, N, S, korrigiert

² aus VERMA 2011, TOSCANO 2013

Na-LS = Na-Ligninsulfonat

Ca-LS = Ca-Ligninsulfonat

Kraft-L RS = Kraftlignin Roggenstroh

HSK = Haferschälkleie

n. n. = nicht nachweisbar

Da bei Vorversuchen zur Pelletierung festgestellt wurde, dass die Lignine bereits bei geringen Temperaturen der Matritze erste Erweichungserscheinungen zeigte, wurde von einer Reinchargenpelletierung abgesehen. Statt dessen wurde das Lignin als Zusatzstoff zur Verbesserung der Pelletierbarkeit als auch zur Minimierung nachteiliger Brennstoffeigenschaften eingesetzt. Als Brennstoffe wurden Rapsstroh (RS) und Haferschälkleie (HSK) ausgewählt (Tabelle 1). Es wurde eine Basismischung bestehend aus 80 Ma.-% Rapsstroh und 20 Ma.-% Haferschälkleie (RS/HSK) hergestellt, der die beiden Ligninvarianten Ca-LS und Kraftlignin in Anteilen von jeweils 1 Ma.-% und 2 Ma.-% beigemischt wurden.

Tabelle 2: Vergleich von ausgewählten Brennstoffeigenschaften der Mischbrennstoffe

Parameter	Einheit	DIN EN 14961-6	RS/ HSK	RS/HSK +1 % Kraft-L	RS/HSK +2 % Kraft-L	RS/HSK +1 % Ca-LS	RS/HSK +2 % Ca-LS
Feinanteil < 3,15 mm	Ma.-%	≤ 3	-	6,6	5,6	0,8	3,7
mech. Festigkeit	Ma.-% FM	≥ 96,0	-	92,2	89,4	91,4	93,9
Schüttdichte	kg/m ³ TS	≥ 600	-	505	445	476	531
Aschegehalt	% TS	≤ 10	7,0	7,6	7,4	10,1	8,2
Wassergehalt	Ma.-%	≤ 15	8,9	8,6	10,2	10,0	9,9
Heizwert	MJ/kg TS	≥ 13,2	16,67	17,10	17,31	16,40	16,79
Cl	Ma.-% TS	≤ 0,3	0,396	0,326	0,364	0,287	0,302
S	Ma.-% TS	≤ 0,2	0,28	0,405	0,458	0,444	0,657
N	Ma.-% TS	≤ 2,0	1,2	1,10	0,94	0,88	0,83
K	mg/kg TS		16.931	15.400	14.600	13.700	13.000
Brennstoffindizes							
Summe K, Na, Zn, Pb	mg/kg TS		18.607	18.339	18.249	15.672	14.597
(Si+P+K)/(Ca+Mg)	mol/mol		1,5	1,3	1,4	2,4	2,1
2S/Cl	mol/mol		2,7	4,2	3,7	4,3	4,7

RS/HSK

RS/HSK+1% Kraft-L bzw. RS/HSK+2% Kraft-L

RS/HSK+1% Ca-LS bzw. RS/HSK+2% Ca-LS

Mischung aus Rapsstroh und Haferschälkleie (berechnete Werte)

Mischung aus Rapsstroh und Haferschälkleie mit 1 Ma.-% bzw. 2 Ma.-% Kraftlignin

Mischung aus Rapsstroh und Haferschälkleie mit 1 Ma.-% bzw. 2 Ma.-% Ca-Ligninsulfonat

FM Frischmasse; TS Trockensubstanz; - nicht bestimmt; * halmgutartige Biomasse, Biomasse von Früchten, definierte und undefinierte Mischungen, Klasse B

Bedingt durch die Heterogenität der Ausgangsstoffe und durch Entmischungseffekte wurden die Veränderungen bei der Erhöhung der Ligninanteile nicht immer erwartungsgemäß abgebildet, wie z. B. der Aschegehalt zeigt (Tabelle 2). Im Vergleich zur RS/HSK-Mischung wurden der Asche- und Schwefelgehalt erhöht, während sich der Chlor-, Stickstoff- und Kaliumgehalt verringert. Dies sollte zu einer Minderung der damit verbundenen HCl- und Stickstoffoxidemissionen (NO_x) in der Verbrennung führen.

Auch die berechneten Brennstoffindizes bestätigen eine leichte Verbesserung der brennstofftechnischen Eigenschaften. So ist die Summe der Aerosolbildner (K, Na, Zn, Pb) vor allem durch die Beimischung von Ca-Ligninsulfonat deutlich geringer (Tabelle 2). Auch das Ascheschmelzverhalten scheint durch die Beimischung von Kraftlignin geringfügig verbessert, was anhand des (Si+P+K)/(Ca+Mg) – Indizes (Indikator für die Höhe der Ascheerweichungstemperatur) in Tabelle 2 erkennbar ist. Gleiches gilt auch für das Risiko bezüglich der Hochtemperatur-Chlor-Korrosion, angezeigt durch ein höheres molares 2S/Cl-Verhältnis (Sommersacher et al. 2012: 380ff). Des Weiteren wirken sich die Lignine, in ihrer Eignung als Bindemittel, positiv auf den Pelletierprozess aus. Hinsichtlich einer normativen Einordnung sind bei den physikalisch-mechanischen Eigenschaften (Schüttdichte, Feinanteil, Abrieb) deutliche Defizite erkennbar, die durch weitere gezielte Anpassungen der Prozessparameter der Presse behoben werden können. Die geforderten brennstofftechni-

schen Eigenschaften (Aschegehalt, Wassergehalt, Heizwert) konnten dagegen bis auf eine Ausnahme eingehalten werden. Die Chlorgehalte übersteigen beim Einsatz von Kraft-Lignin den Grenzwert und die Schwefelgehalte sind bei allen Chargen zu hoch.

Verbrennungsversuche

Die Verbrennungsversuche wurden an einer speziell für Getreide und Holzpellets geeigneten Kesselanlage durchgeführt, die dem Stand der Technik entspricht. Die Nennwärmeleistung des Kessels beträgt 30 kW, wobei die Versuche unter Vollastbedingungen durchgeführt wurden. Hinsichtlich des Abbrandverhaltens wies die reine Rapsstrohcharge den höchsten Verschlackungsgrad auf. Die gebildeten Ascheagglomerate waren jedoch klein genug, um aus dem Feuerraum in den Aschekasten transportiert werden zu können. Bei den anderen Brennstoffen wurden deutlich weniger und kleinere Asche-Schlacke-Agglomerate gebildet, wobei die Mischbrennstoffe mit Ca-Ligninsulfonat tendenziell eine höhere Verschlackungsneigung zeigten. Dies war anhand der Werte des $(Si+P+K)/(Ca+Mg)$ -Indexes, siehe Tabelle 2, zu erwarten. Ein kontinuierlicher Verbrennungsbetrieb konnte in allen Fällen gewährleistet werden.

Bei der Verbrennung wurden die in Abbildung 5 dargestellten Emissionen gebildet. Die CO- und Feinstaubemissionen sind in Bezug auf die bestehenden Grenzwerte der 1. BImSchV sehr kritisch einzuordnen. Der NO_x -Grenzwert kann von allen Brennstoffen eingehalten werden. Die Vorgaben der TA Luft bezüglich HCl werden von allen Brennstoffen überschritten, wohingegen die Grenzwerte für SO_2 und org.-C teilweise von den Kraftlignin-Mischbrennstoffen eingehalten werden.

Abschließende Beurteilung

Die Ligninkomponenten konnten einer energetischen Verwendung zugeführt werden, indem sie in Anteilen von 1 Ma.-% bzw. 2 Ma.-% einer Rapsstroh-Haferschälklei- und Hefemischbrennstoffmischung zugegeben wurden. Bei der Verbrennung verursachten die niedrigen Ligninanteile nur

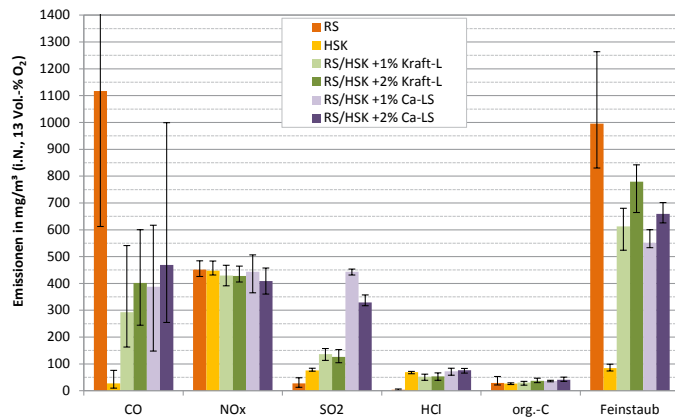


Abbildung 5: Emissionsverhalten der verwendeten Roh- und Mischbrennstoffe. Fehlerbalken geben minimale bzw. maximale Werte an, * Grenzwerte nach 1. BImSchV, ** Grenzwerte nach TA Luft (umgerechnet auf einen Bezugswert von 13 Vol.-%), Quelle: DBFZ

geringe Effekte, ausschlaggebend waren die verbrennungstechnischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe. Der Einfluss der Ligninkomponenten konnte daher nur unzureichend bewertet werden. Eine Erhöhung des Ligninanteils führt jedoch zu einer Minderung der Brennstoffqualität (Anstieg CO-Emissionen). Aktuell ist eine Nutzbarkeit der betrachteten Mischbrennstoffe in kleinen und mittleren Anlagen daher sehr schwierig. Allerdings sollte die Beimischung der Lignine mit anderen Brennstoffen betrachtet und der Einfluss als Bindemittel ausführlicher untersucht werden. Auch sollten künftige Entwicklungen zu anlagentechnischen Verbesserungen und im Bereich der primären und sekundären Emissionsminderung berücksichtigt werden. Im Bereich der genehmigungsbedürftigen Anlagen erscheint eine Nutzung durch die vorgegebene Ausrüstung mit entsprechender Abscheidetechnik möglich.

Beitrag zu den Nachhaltigkeitsaspekten und Übertragbarkeit der Ergebnisse

Durch das Projekt wurde ein wichtiger Beitrag geleistet, die breite industrielle Nutzung biogener Rohstoffe voranzutreiben. Es wurde eine Verfahrenstechnologie entwickelt, mit der eine effektive und innovative Aufbereitung von ligninhaltigen Ablaugen zu Granulaten, welche sowohl einer thermischen, als auch stofflichen Nutzung zugeführt werden können, entwickelt. Die Darstellung des Verfahrens erfolgte in einer Technikumsanlage. Mit dem neuen Verfahren können Ligninprodukte zur thermischen Verwertung zur Verfügung gestellt werden, durch deren Einsatz herkömmliche, fossile Brennstoffe substituiert und somit eine signifikante Reduzierung der CO_2 -Emission erreicht werden kann.

In Bezug auf die ermittelte mögliche CO_2 -Reduzierung von 2,3 Mio. t/a bei der Verwertung von 2,65 Mio. t/a Lignin (50 % der in Deutschland anfallenden Menge) betragen die Vermeidungskosten 29,85 €/t CO_2 -Äq..

Das LignoBioFuel-Verfahren stellt also somit die klimaeffizientere Lösung bei gleichzeitiger vielseitiger Nutzbarkeit der Produkte und geringeren Umweltbelastungen gegenüber den Stand der Technik (LignoBoost-Verfahren) dar.

Mit der innovativen Aufbereitungs- und Agglomerationstechnologie für Lignin kann eine neue Methode zur effizienten Erschließung und Nutzung eines biogenen Reststoffes („Best Practice“) für die breite, industrielle Anwendung vorbereitet werden.

Für das abgeschlossene Forschungsprojekt sowie die geplante Demonstrationsanlage können die Kriterien der Klimaschutzinitiative wie folgt dargestellt werden:

Modellcharakter/ Übertragbarkeit

Technologische, soziale und institutionelle Neuerungen (Innovationen)

- Hochwertige Nutzung biologisch basierter Reststoffe aus Produktionsprozessen
- Darstellung eines marktfähigen neuen Biomassefestbrennstoffes zur thermischen Anwendung
- problemlos handhabbares Handelsgut
- Nutzung für stoffliche Verwertung ist ebenfalls möglich
- Neuartige Technologiekette mit innovativen Lösungen

Modellcharakter/ Übertragbarkeit	
Potenzial für Breitenanwendung	<ul style="list-style-type: none"> - Weltweite Anwendung möglich, deshalb Prüfung und ggf. Patentierung - Internationale Vermarktung nach erfolgreicher Patentierung - Potenzial Inputmaterial: 50 Mio t/a weltweit
Anstoß für neuen Energiepfad	<ul style="list-style-type: none"> - Substitution von Primärenergieträgern (z. B. Braunkohle) durch biologisch basierte und CO₂-neutrale Reststoffe
Ökonomische Wirkungen	
Vermeidungskosten	- 29,85 €/t CO ₂ -Äqu., (ohne Berücksichtigung möglicher Standortsynergieeffekte oder Förderprogramme)

Literatur

- BLECHSCHMIDT, J. (2010): Taschenbuch der Papiertechnik. Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG. Engineering ToolBox. URL: engineeringtoolbox.com (Stand: 25.10.2012).
- BURKERT, H. (2010): Viel mehr als Zellstoff. In: Papier + Technik. URL: <http://www.papierundtechnik.de/pt/live/archiv/artikel/detail/32148548.html> (Stand: 06.02.2012).
- FNR (2007): Leitfaden Bioenergie – Planung, Betrieb und Wirtschaftlichkeit von Bioenergieanlagen. 4. unveränderte Aufl..
- FNR (2010): Nachwachsende Rohstoffe in der Industrie – Stoffliche Nutzung von Agrar- und Holzwerkstoffen. URL: <http://mediathek.fnr.de/broschuren/nachwachsende-rohstoffe/nr-allgemein/nachwachsende-rohstoffe-in-der-industrie.html> (Stand: 02.06.2014).

HESSESCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE: PM10 (Feinstaub). URL: <http://www.hlug.de/start/luft/faltblaetter.html> (Stand: 12.06.2014).

LINDMAN, E.-K.; SMARAGDIS, F. (2009): Co-firing lignin and coal in Värtan CHP plant. AB Fortum Värme samägt med Stockholms stad.

NARRA, S.; AY, P.; GLASER, C.; LOGSCH, F. (2012) Verfahren zur Herstellung von wasserunlöslichen Lignin-Aglomeraten. Patent-Nr. DE 10 2012 102 327.1, Patent-Nr. PCT/ EP 2013/ 053947, WO 2013/135485 A1.

NARRA, S.; GLASER, C.; AY, P. (2013): Vorrichtung und Verfahren zur Agglomeration der Ablauge eines Cellulosegewinnungsprozesses. Patent-Nr. DE 10 2013 112 499.2.

NARRA, S. (2014): Processing and refinement of biogenous residues from agricultural, industrial and biotechnological processes. Habilitation, Brandenburg University of Technology Cottbus - Senftenberg. Scientific Publications.

NUSSBAUMER, T. UND KALTSCHMITT, M. (2001): Grundlagen der Festbrennstoffnutzung – Begriffsdefinitionen. In: Kaltschmitt, M. und Hartmann, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken, Verfahren. Springer Verlag, Berlin, S. 239-247.

PULS, J. (2009): Lignin-Verfügbarkeit, Markt und Verwendung: Perspektiven für schwefelfreie Lignine; VtI-Institut für Holztechnologie.

SOMMERSACHER, P.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2012): Fuel indexes – A Novel Method for the Evaluation of Relevant Combustion Properties of New Biomass Fuels. In: Energy & Fuels, Vol. 26, No. 1, S. 380-390.

TOSCANO, G.; RIVA, G.; FOPPA PEDRETTI, E.; CORINALDESI, F.; MENGARELLI, C.; DUCA, D. (2013): Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements. In: Biomass and Bioenergy, Vol. 56, S. 317-322. DOI: 10.1016/j.biombioe.2013.05.012

VERMA, V.K.; BRAM, S.; GAUTHIER, G.; DE RUYCK, J. (2011): Performance of a domestic pellet boiler as a function of operational loads: Part-2. Biomass and Bioenergy. Vol. 35, 1, S. 272-279. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.08.043

WESSEL, R. A. (2008): Black Liquor Spraying. Paper presented at the TAPPI Kraft Recovery Course January 7-10, 2008, St. Petersburg, Florida, USA, URL: <http://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/4-3.pdf> (Stand: 02.06.2014).



Der Einfluss von Temperatur, Verweilzeit und Aufheizrate in der Pyrolyse auf die Bildung von Benzol und anderen Teerverbindungen (PyRO)

Reinhold Egeler, Franz Heigl, Dr. Tina Horstkotte, Tobias Engelfried, Nicolas Schafmann, Florian Brechleiter

Vorhaben: Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur, Verweilzeit und Aufheizrate in der Pyrolyse auf die Bildung von Benzol und anderen Teerverbindungen (PyRO)

FKZ-Nr.: O3KB046

Laufzeit: 01.09.2010 – 31.05.2013

Zuwendungssumme: 117.200 €

Koordination:

Stadtwerke Rosenheim GmbH & Co. KG
Bayerstraße 5, 83022 Rosenheim
www.swro.de

Kontakt:

Reinhold Egeler
Telefon: +49 (0)8031-365-22 30
E-Mail: Reinhold.Egeler@swro.de



Reinhold Egeler (Projektleiter):

Die Ergebnisse aus diesem Projekt liefern wertvolle Erkenntnisse über Pyrolysereaktionen während des Vergasungsprozesses. Durch umfangreiche und vergleichende Analytik wurden Zusammenhänge zwischen einzelnen Produktgasanteilen aufgezeigt, die eine einfachere Kontrolle der Gasqualität ermöglichen. Auch konnten auf diese Weise wesentliche Parameter für die Prozessführung von Vergasungsanlagen bestimmt und ein wichtiger Beitrag zur Weiterentwicklung der Technologie geleistet werden.

Zusammenfassung

Durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe kann die Vergasungstechnologie einen wichtigen Beitrag zur Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern leisten. Obwohl erste Hersteller bereits erfolgreich Vergasungsanlagen vermarkten, hat die Technologie immer noch großes Optimierungspotential. Einen wesentlichen Punkt stellt diesbezüglich die Kenntnis der genauen Reaktionen in den jeweiligen Prozessschritten sowie deren Auswirkungen auf die Vergasungsprodukte dar.

Dabei spielt die Pyrolyse eine wesentliche Rolle. Bei Temperaturen von 200 °C bis 500 °C werden die flüchtigen Bestandteile aus dem Holz ausgetrieben. Abhängig von den dabei herrschenden Bedingungen kommen die Produkte (Gas, Teer und Kohle) in unterschiedlichen Verhältnissen vor.

Mit dem Ziel maximale Produktgaserträge bei minimalen Teerkonzentrationen zu erzeugen, sollte in diesem Förderprojekt der Einfluss verschiedener Reaktionsparameter (Temperatur, Aufheizrate, Brennstoffeigenschaften) auf die Produktanteile untersucht werden. In einem ersten Schritt wurde dazu vorhandene Literatur gesammelt und die jeweiligen Inhalte im Rahmen einer umfassenden Literaturanalyse aufbereitet. Zur weiteren Bearbeitung und zugunsten einer übersichtlichen Darstellung wurden die wichtigsten Ergebnisse in einem Dreiecksdiagramm zusammengefasst.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurden Theorien abgeleitet, die im Rahmen von Versuchen an zwei eigens gebauten Pyrolyseversuchsständen überprüft wurden. Durch umfangreiche Messtechnik war es möglich, die Pyrolyseprodukte bei definierten Parametern zu erfassen. Hinsichtlich der Auswirkungen auf den gesamten Vergasungsprozess wurden zudem Versuche an der Vergasungsanlage der Stadtwerke Rosenheim durchgeführt. So konnte der Einfluss der Pyrolyse unter Berücksichtigung der Folgereaktionen Oxidation und Reduktion betrachtet werden.

Ein weiteres Ziel war zudem die Identifizierung einer einfachen und verlässlichen Analysetechnik zur Bestimmung von Teer als wesentlichen Bestandteil der Pyrolyse. Dabei wurden nasschemische Methoden, Adsorptionsverfahren sowie gaschromatographische Systeme getestet. Auf Basis der Ergebnisse konnte gezeigt bzw. bestätigt werden, dass Benzol als Leitsubstanz für die Teermessung verwendet werden kann. Diese Messaufgabe wurde am besten mittels Gaschromatographie gelöst.

Schließlich konnte durch dieses Förderprojekt das Wissen über die Prozesse der Vergasung wesentlich erweitert werden. Die Resultate haben nicht nur zur erfolgreichen Weiterentwicklung der Rosenheimer Vergasungsanlage beigetragen, sondern sind auch auf andere Verfahren anwendbar.

Summary

By using renewable resources, the gasification technology can make an important contribution in becoming independent of fossil fuels. Even though first manufacturers were able to sell gasification plants successfully, there is a huge potential for optimization left. An essential point in this regard is the knowledge of the reactions at various points of the process and their effects on the gasification products.

The pyrolysis is one of the key factors, as all volatile components evaporate out of the wood at temperatures from 200 °C to 500 °C. Depending on the prevailing conditions, all the products (gas, tar, carbon) are present in different ratios. With the aim of earning a maximum amount of product gas while having a minimum concentration of tar, this project considers the influences of various parameters like temperature, heating rate and fuel properties. In a first step existing literature was reviewed as part of a literature analysis. For further presentation and a better understanding the most important results were summarized in a triangular diagram.

Theories were derived according to the findings, which were tested on two specially manufactured pyrolysis assemblies. By using extensive measurement equipment it was possible to detect the pyrolysis products at defined parameters. To aim at the whole gasification process experiments were run at the gasification plant of the municipal utility of Rosenheim. That way it was also possible to show the influence of various pyrolysis settings on the following processes of oxidation and reduction.

Another aim was to identify simple and reliable measurement equipment for the determination of tar as an essential component of the pyrolysis reaction. Wet chemical methods, adsorption and gaschromatographic systems were tested. Based on the results benzene can be used as a lead compound for tar measurement. And gas chromatography was found to be most suitable to measure benzene.

In summary the results of this promotion project extended the knowledge on the processes of gasification. The results have not only contributed to the successful development of Rosenheim gasification plant, but are also applicable to other plant designs and technologies.

Projektziel und Aufgabenstellung

Zunächst sollte der Stand des Wissens über die Optimierungsmöglichkeiten der Pyrolyse im Sinne der Holzvergasung, das heißt möglichst geringe Teer- und möglichst hohe Gaserträge, zusammengetragen werden. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden anschließend eigene Untersuchungen durchgeführt, um die Auswirkungen verschiedener Betriebsparameter auch praktisch zu bestimmen.

Von besonderem Interesse waren dabei mögliche Zusammenhänge zwischen den Teergehalten und anderen Produktgasanteilen wie Benzol und Permanentgasen. Denn durch den Nachweis entsprechender Korrelationen könnte zur Beurteilung der Gasqualität auf die Messung von Teer verzichtet und stattdessen eine einfacher zu bestimmende Gaskomponente herangezogen werden.

Projektbegleitend war geplant, Messverfahren zur Analyse von Teer und Benzol hinsichtlich ihrer Eignung für die Entwicklung und Optimierung von Biomassevergasungsanlagen zu überprüfen und gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Zentrales Ziel des Projektes war es letztlich, die Grundlagen für ein Vergasungsverfahren zu schaffen, mit dem hochwertiges Produktgas ohne Teer und nur geringen Konzentrationen an Benzol erzeugt werden kann.

Begriffe, Methoden und Versuchsdurchführung

Vereinfacht werden bezüglich der Pyrolyseprodukte oft die Begriffe Kohle, Teer und Gas verwendet. Der Begriff Kohle steht dabei für den verbleibenden Feststoffanteil nach der Pyrolyse. Bei einer vollständigen Pyrolyse wäre es reiner Kohlenstoff. Der Begriff Teer steht für

alle kondensierbaren Pyrolyseprodukte, das heißt Öle, Kondensate und auch höhermolekulare Teere. Als Gase werden schließlich die entstehenden Permanentgase, wie beispielsweise Kohlenmonoxid und Wasserstoff oder auch Kohlenwasserstoffe wie Methan, Ethan oder Benzol bezeichnet. In dieser Fraktion ist auch der Wasserdampf enthalten.

Die experimentellen Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur, Verweilzeit und Aufheizrate auf die Bildung von Teerverbindungen und Benzol während der Pyrolyse wurden im Rahmen von mehreren Versuchsreihen an einem speziellen Pyrolyseversuchsstand sowie an einer Biomassevergasungsanlage der Stadtwerke Rosenheim (SWRO) durchgeführt. Durch Erfassung und Bilanzierung der dabei entstandenen Produkte konnte der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Produkterträge ermittelt werden. Darüber hinaus bildete die qualitative bzw. quantitative Analytik der entstandenen Produkte einen Schwerpunkt der Arbeiten. Besonders hervorzuheben ist die präzise quantitative Messung von Benzol als Teerindikator. Die so gesammelten Erfahrungen und Ergebnisse bildeten die Grundlage um prozessrelevante Zusammenhänge zu identifizieren.

Ergebnisse

Literaturrecherche (Stand des Wissens)

Die Auswertung einer Vielzahl von Literaturbeiträgen hat ergeben, dass sowohl die Pyrolyseendtemperatur als auch die Aufheizrate (Temperaturgradient) die wesentlichsten Einflussparameter hinsichtlich der Produktverteilung bei der Pyrolyse sind. Informationen zu den Auswirkungen weiterer Parameter, wie etwa Brennstofffeuchte, Verweilzeiten, Art der verwendeten Biomasse oder katalytischer Reaktionen können dem Projektabschlussbericht entnommen werden (Egeler 2014).

Einflussfaktor Pyrolyseendtemperatur

In vielen Literaturstellen wird über eine Erhöhung der Permanentgasbildung mit steigender Pyrolyseendtemperatur, zulasten der Mengen an Teer/Kondensat und Kohle berichtet. Dieses Phänomen wird sowohl bei Einsatz von unterschiedlichen Brennstoffen, Aufheizraten, Verweilzeiten als auch Drücken beobachtet und weist dabei lediglich unterschiedliche Intensitäten auf. Die maximale Pyrolysetemperatur ist offensichtlich der dominierende Parameter für die Beeinflussung der entstehenden Anteile von Gas, Teer und Kohle. Demnach führen höhere Pyrolyseendtemperaturen immer zu höheren Ausbeuten an gasförmigen Reaktionsprodukten.

Einflussfaktor Aufheizrate

Bezüglich der Aufheizgeschwindigkeit wird zwischen einer langsamen (slow) Pyrolyse und einer schnellen (flash) Pyrolyse unterschieden. Bei der Flash-Pyrolyse liegt die Aufheizrate je nach Verfahren und Brennstoffgröße (Durchheizungszeit) bei über 1000 K/s. Bei der Slow-Pyrolyse - wie sie auch bei der Biomassevergasung stattfindet - betragen die Aufheizraten hingegen zwischen 1 K/s und 10 K/s. Eine Sonderstellung nimmt die Herstellung von Holzkohle ein. Hier wird das Holz über einen Zeitraum von Tagen aufgeheizt. So unterschiedlich wie die Aufheizraten bei der Pyrolyse sind auch die Zielsetzungen. Bei der Flash-Pyrolyse steht die Pyrolyseölerzeugung im Vordergrund. Bei der Vergasung soll vorrangig ein

gasförmiger Energieträger entstehen. Bei der Holzkohleherstellung ist der Feststoff Holzkohle das Ziel. Diese Zusammenhänge zwischen Pyrolyseendtemperatur und Aufheizrate können sehr gut in einem Dreiecksdiagramm (Abbildung 1) dargestellt werden. Die drei Seiten des Diagramms bilden jeweils die prozentualen Anteile der Pyrolyseprodukte Kohle, Teer und Gas ab.

In das Diagramm sind die wichtigsten Werte aus der Literaturrecherche eingetragen, für die mindestens zwei Produkterträge (z. B. Kohle und Teere oder Teere und Gas) von den Autoren angegeben wurden. Während die Aufheizrate in der Legende angegeben wird, ist die entsprechende Pyrolyseendtemperatur an den jeweiligen Datenpunkten hinterlegt.

In dieser Darstellung sind die möglichen Extrema der Pyrolyse deutlich erkennbar. Bei niedrigen Pyrolysetemperaturen entsteht, unabhängig von der Aufheizrate, überwiegend Kohle. Bei sehr hohen Aufheizraten (1.000 K/s bis 10.000 K/s) kann der Ertrag an Teer durch die maximale Pyrolysetemperatur beeinflusst werden (Teergehalte von 40 % bis 65 %). Höhere Temperaturen führten immer zu höheren Gas- und geringeren Kohleerträgen.

Bei niedrigen Aufheizraten, wie sie bei der Biomassevergasung zum Einsatz kommen, bestehen ähnliche Möglichkeiten. Allerdings wird hier durch steigende Pyrolyseendtemperaturen der Teergehalt auf z. T. unter 10 % abgesenkt, während der erwünschte Gasanteil auf über 70 % gesteigert werden kann (Schneider 2003, Quizhuang 1997). Erkennbar ist auch, dass sich schon bei vergleichsweise niedrigen Aufheizraten um 16 K/s (Sadakata 1987) auch bei Pyrolyseendtemperaturen um 600 °C bereits mehr als dreimal so viel Teer entsteht, wie bei den Versuchen der SWRO mit 0,035 K/s (Engelfried 2012).

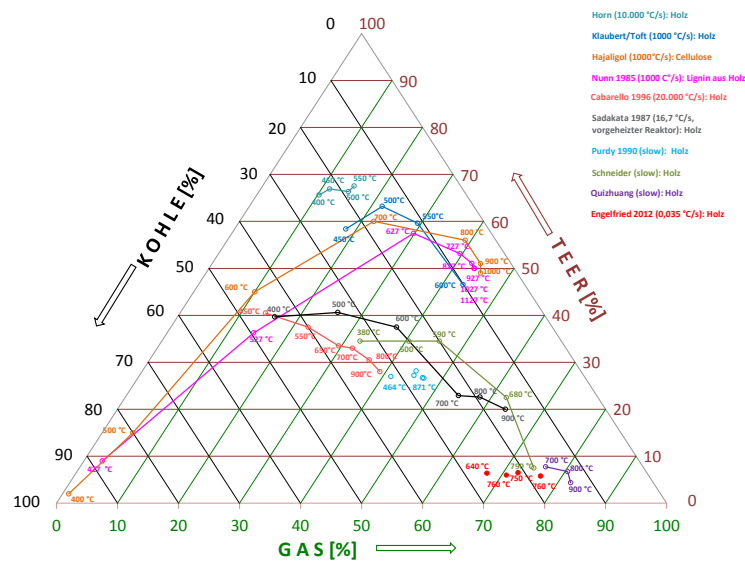


Abbildung 1: Dreiecksdiagramm (Egeler 2014)

Die Vermutung, dass eine niedrige Aufheizrate in Kombination mit einer hohen Pyrolyseendtemperatur zu hohen Gasmengen bei gleichzeitig geringen Mengen an Kohle und Teer führen, wurde durch Batchversuche im Rahmen einer Diplomarbeit (Engelfried 2012) bestätigt.

Teer- und Benzolmessverfahren

Teermessung nach DIN CEN/TS 15439

Die Erfahrungen aus etwa 80 Teerprobenahmen nach DIN CEN/TS 15439 bzw. vereinfachter DIN CEN/TS 15439 sowie aus zahlreichen Diskussionen mit Fachkollegen haben bezüglich der Teermessung zu folgender Einschätzung geführt:

- Teerprobenahme und -analytik sind sehr aufwändig und weisen infolge der vielen Prozessschritte eine relativ hohe Fehlerquote auf. Realistisch liegt die Gesamtmessunsicherheiten für Probenahme, Probenaufbereitung und Analyse bei mindestens $\pm 20\%$.
- Probenahme und Analyse von Teeren können aus wissenschaftlicher Sicht durchaus zu interessanten Ergebnissen führen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass
 - o neben den Teeren auch verschiedene Betriebsparameter wie z. B. Temperaturen und Gaskonzentrationen gemessen werden, so dass Zusammenhänge darstellbar sind und
 - o der Betrieb des Vergasers während des Probenahmezeitraums ausreichend konstant gehalten werden kann, so dass Korrelationen auch mit hinreichender Zuverlässigkeit abgeleitet werden können.
- Einzelne Teermessungen an Anlagen sind nur bedingt geeignet um den Vergasungsprozess bzw. die Gasqualität zu beurteilen, da sie jeweils nur einen Summenwert über einen sehr begrenzten Zeitraum von 30 bzw. 60 Minuten liefern.
- Teermessungen sind – unabhängig davon, ob nach DIN CEN/TS 15439 oder einem vereinfachten Verfahren durchgeführt – wegen des hohen zeitlichen und finanziellen Aufwands, der begrenzten Aussagekraft und der großen Messunsicherheit nicht für die Optimierung von Anlagen geeignet.

Benzolanalytik

Im Zuge des Projektes wurden folgende Verfahren auf ihre Eignung für die Benzolanalytik bei der Holzvergasung untersucht:

Chromatographische Verfahren

Hierfür wurden neben einem stationären Gaschromatographen (Clarus 580 - PerkinElmer) zwei mobil einsetzbare Gaschromatographen (MicroBox I / MicroBox II - Elster Instromet) getestet. Der Clarus 580 ist ein sehr robustes Messgerät, mit dem die Benzolkonzentration

sowohl im Produktgas der Anlage, als auch im Abgas des Motors mit reproduzierbar hoher Genauigkeit gemessen werden kann, da mit entsprechender Kalibrierung ein weiter Konzentrationsbereich abgedeckt wird. Zudem ist das Gerät unempfindlich gegenüber im Gas enthaltener Feuchte. Auch die dazugehörige Software weist eine hohe Benutzerfreundlichkeit auf. Aufgrund der Art der Probenaufgabe müssen die jeweiligen Druckbedingungen zum Probenahmezeitpunkt berücksichtigt werden, was eine nachträgliche Bearbeitung der Ergebnisse nötig macht.

Die mobilen Gaschromatographen sind mit ihrer kompakten Bauform besonders gut für schnelle, externe Messungen geeignet. Aufgrund der unterschiedlichen Säulensysteme empfiehlt sich die Festlegung auf einen definierten Konzentrationsbereich. So wurden die Geräte entweder für die Benzolmessung im Produktgas oder für die Messung sehr kleiner Benzolkonzentrationen – wie beispielsweise im Abgas von Motoren – verwendet. Bedingt durch die kompakte Bauform ist ein Großteil der internen Gaswege zudem sehr klein dimensioniert. Dies führt bei Proben mit hohen Feuchteanteilen zu Problemen durch Verlegung der Leitungen durch kondensierende Feuchte. Die Steuerung der Geräte sowie die Auswertung der Ergebnisse ist zum Teil umständlich.

Adsorptionsverfahren nach DIN EN 14662-2

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen, dass der Einsatz von Adsorptionsröhrchen in Anlehnung an DIN EN 14662-2 für die Benzolmessung denkbar ist. Die Versuche mit verschiedenen Kombinationen von Sorbens und Lösungsmittel haben allerdings gezeigt, dass dieses Verfahren sehr hohe Anforderungen an die Probenahme (insbesondere die Volumenbestimmung) sowie die Desorption (z. B. mit/ohne Ultraschallbad) stellt. Im Hinblick auf die Entwicklung eines einfachen Verfahrens wurden die nötigen Optimierungsmaßnahmen im Rahmen des Projektes nicht abschließend durchgeführt.

Nasschemisches Verfahren (in Anlehnung an DIN CEN/TS 15439)

Nach ausführlichen Testreihen wurde deutlich, dass dieses Verfahren nur bei bekannten und konstanten Betriebsbedingungen zu Messungen an Holzvergasungsanlagen eingesetzt werden könnte. Zudem müsste das Verfahren vor jeder Messung in Laborversuchen an die jeweiligen Versuchsparametern (Konzentration, Durchfluss, Temperatur) angepasst werden. Der damit verbundene Aufwand für eine Messung stand dem Vorhaben entgegen, ein einfach anwendbares Verfahren für die Bestimmung von Benzol zu entwickeln und wurde daher nicht weiter verfolgt.

Fazit aus der Benzolanalytik

Die Erfahrungen und Ergebnisse aus der Benzolanalytik führen zu der Erkenntnis, dass – vor allem aus Gründen der einfacheren Handhabung und der besseren Reproduzierbarkeit – die gaschromatographischen Verfahren zu bevorzugen sind.

Einflüsse auf die Gasqualität

Korrelationen zur Beurteilung der Gasqualität

Teer / Benzol

Bei Untersuchungen im Hinblick auf die Reduzierung der Teerverbindungen im erzeugten Produktgas wurde ein proportionaler Zusammenhang zwischen Benzol- und Teerwerten festgestellt. Des Weiteren deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine untere Benzolkonzentration existiert, bei der kein Teer mehr im Produktgas vorhanden ist. Auf Basis dieser Korrelation wurde bei weiteren Messungen auf die teure, komplexe und fehleranfällige Teermessung verzichtet und der Fokus vielmehr auf das einfachere und sicherere Messen von Benzol als Leitsubstanz für den Teergehalt im Produktgas gelegt.

Teer / Methan

Auch bei der Gegenüberstellung der Werte von Teer und Methan konnten ähnliche Korrelationen gefunden werden. Somit ist eine Beurteilung der Produktgasqualität hinsichtlich seines Gehaltes an Teerverbindungen auch auf Basis der gemessenen Methanwerte näherungsweise möglich.

Benzol / Temperatur

Die Temperatur kann vorerst nicht als Leitparameter für den Benzolgehalt im Gas verwendet werden. Hier zeigten sich immer wieder gegenläufige Abhängigkeiten. Die Betriebsparameter, die das jeweilige Ergebnis bestimmen, sind bisher nicht bekannt.

Einfluss der Brennstofffeuchte auf die Gasqualität

Die Brennstofffeuchte wird häufig als ein Parameter mit wesentlichem Einfluss auf die Holzgasqualität diskutiert. Grundsätzlich wird bei höherer Feuchte des Brennstoffes mehr Energie für die Trocknung des Holzes und für die Erwärmung des Wasserdampfes auf die Oxidationstemperaturen benötigt. Diese Energie entsteht durch die Oxidation zusätzlicher Anteile an Kohlenstoff (oder Wasserstoff). Die Folge ist eine Zunahme der CO₂-Konzentration im Holzgas mit der Feuchte. Dies konnte durch mehrere Versuche bestätigt werden. Auch wurde deutlich, dass die Benzolkonzentration von Schwankungen der Feuchte bei generell niedrigen Feuchtigkeitswerten nahezu nicht beeinflusst wird. Die Messungen haben schließlich gezeigt, dass Biomassen mit einer Feuchte von bis zu 20 % problemlos verwendet werden können. Bei noch höherer Feuchte wird der Prozess zunehmend instabil und der Heizwert des Gases sinkt ab. Aus diesem Grund erscheint es mit Blick auf die Gesamteffizienz des Prozesses sinnvoll, Biomassen mit mehr als 20 % Feuchte mit Nieder-temperaturwärme vorzutrocknen.

Einfluss von Verweilzeit und Aufheizrate auf die Gasqualität

Die Verweilzeit der Biomasse in der Pyrolyseschnecke und die Aufheizrate der Biomasse sind Parameter, die nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Sie sind von den geometrischen Verhältnissen der Pyrolyseeinheit und dem Biomassedurchsatz abhängig. Grundsätzlich hat eine niedrigere Vergaserleistung (Gasdurchfluss) einen geringeren Durchsatz an Biomasse und damit, durch die längere Verweilzeit in der Pyrolyseschnecke, eine niedrigere Aufheizrate zur Folge.

Die Untersuchungen haben aber gezeigt, dass sowohl eine Leistungssteigerung der Vergaseranlage (höherer Gasdurchfluss) als auch eine Verringerung der beheizten Länge der Pyrolyse um bis zu 40 % keinen nennenswerten Einfluss auf die Gaszusammensetzung und die Gasqualität im Hinblick auf Benzol bzw. Teer haben. Eine Erklärung für dieses durchaus überraschende Ergebnis ist, dass unter diesen verwendeten Bedingungen noch keine „kritischen“ Betriebszustände erreicht wurden.

Einfluss der Maximaltemperatur der Pyrolyse auf die Gasqualität

Die Maximaltemperatur ist die Temperatur, der die Biomasse am Ende der Pyrolyse ausgesetzt ist und wird daher oft auch als Pyrolyseendtemperatur bezeichnet. Untersuchungen haben gezeigt, dass auch die Maximaltemperatur keinen signifikanten Einfluss auf die Gaszusammensetzung hat. Lediglich für Benzol ergibt sich eine leichte Tendenz zu höheren Konzentrationen bei höheren Maximaltemperaturen.

Ein Ergebnis dieser Versuchsreihe ist die Erkenntnis, dass möglicherweise der Energieeintrag in die Biomasse nicht der entscheidende Aspekt ist, sondern die vollständige Pyrolyse vor dem Eintritt in die Oxidationszone. Um diese Theorie zu bestätigen, wären Versuche mit Hackschnitzeln definierter und einheitlicher Größe notwendig. Bei den bisherigen Versuchen sind in der Regel G30 Hackschnitzel, jedoch mit sehr hohem Feinkornanteil verwendet worden. Die Hackschnitzel sind daher wahrscheinlich auch bei kurzer Pyrolysestrecke und niedrigerer Pyrolyseendtemperatur immer noch vollständig pyrolysiert.

Einfluss der Temperaturen von Oxidation und Reduktion auf die Gasqualität

Ein signifikanter Zusammenhang zwischen den Oxidations- bzw. Reduktionstemperaturen und den Konzentrationen von Kohlenmonoxid und Kohlendioxid konnte nicht nachgewiesen werden. Die Wasserstoffkonzentrationen nehmen dagegen bei Temperaturen in der Reduktionszone von mehr als 950 °C leicht ab. Für Methankonzentrationen ist eine gegenläufige Tendenz erkennbar. Jedoch gelten diese Aussagen sowohl für Wasserstoff als auch für Methan nicht für alle Leistungsbereiche des Vergasers und Brennstoffeuchten.

Einfluss verschiedener Biomassen auf die Gasqualität

Im Zuge dieses Projektes wurden verschiedene Biomassen auf ihre Eignung als Brennstoff für die Vergasung untersucht. Während der Einsatz von Waldhackgut möglich ist, wurde deutlich, dass die Vergasung anderer Biomassen, wie Stroh oder Laub, in Anlagen, die für Holz optimiert sind, nicht ohne verfahrenstechnische Anpassungen möglich ist. Um dennoch derartige Brennstoffe zukünftig nutzen zu können, werden nötige Anpassungen in Anschlussprojekten bearbeitet (IbeKET – FKZ 03KB088; stR0hgas – FKZ 03KB085A).

Fazit

Sowohl die Ergebnisse aus der Literaturrecherche als auch die Überprüfung der daraus resultierenden Theorien mittels praktischer Versuche haben das Wissen über die Reaktionen und Zusammenhänge bei der Vergasung von Biomasse wesentlich erweitert. Dabei können die Erkenntnisse speziell auf das Rosenheimer Verfahren aber auch auf die Vergasungstechnologie im Allgemeinen angewendet werden. Neben der verfahrenstechnischen Optimierung konnten durch umfangreiche Tests zudem geeignete Messverfahren zur Bestimmung von Benzol identifiziert werden.

Nutzen und Verwertung

Die Stadtwerke Rosenheim konnten mit diesem Projekt umfangreiche Erfahrungen über die Messung von Teer und insbesondere Benzol sammeln, zusammenfassen und im Rahmen eines Messworkshops (am 05.07.2011 in Rosenheim) an Vertreter von Forschungseinrichtungen, Hochschulen und Entwicklern weitergeben. Die Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen tragen wesentlich zum Verständnis der Zusammenhänge der Benzol-, Methan- und Teerkonzentrationen im Produktgas von Biomassevergasungsanlagen bei. Mit der weitgehenden Übertragbarkeit auf andere Vergasungsverfahren bieten sie auch anderen Entwicklern die Möglichkeit, die Optimierung ihrer Anlagen auf der Grundlage von Benzol- und Methanmessungen voranzutreiben und auf aufwändige Teermessungen zu verzichten.

Die im Rahmen dieses Fördervorhabens gewonnenen Erkenntnisse haben aber vor allem zur erfolgreichen Entwicklung des Rosenheimer Vergasungsverfahrens beigetragen. Dabei erfolgt die Verwertung der Ergebnisse unmittelbar durch den Bau, den eigenen Betrieb, aber auch die Vermarktung von Vergasungsanlagen, die mit hoher Effizienz und minimalen Schadstoffemissionen Energie aus Biomasse erzeugen.

Des Weiteren sind insbesondere die Ergebnisse der Versuche an der Vergaseranlage PGW 300 in die Anmeldung des Gebrauchsmusters DE 20 2012 002 872 U1 und des sich in der Prüfungsphase befindlichen Europäischen Patentes EP 2 641 958 A1 eingeflossen.

Literatur

CABARELLO, J.A.; FONT, R.; MARCILLA, A. (1996): Study of the primary pyrolysis of Kraft lignin at high heating rates: yields and kinetics. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Bd. 36, S. 159-178.

EGELER, R.; HEIGL, F.; HORSTKOTTE, T.; ENGELFRIED, T.; SCHAFMANN, N.; BRECHLEITER, F. (2014): Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur, Verweilzeit und Aufheizrate in der Pyrolyse auf die Bildung von Benzol und Teerverbindungen, Endbericht, Rosenheim.

ENGELFRIED, T. (2012): Versuchsplanung und Durchführung von Erstversuchen an einem Holzpyrolyseversuchsstand mit anschließender Auswertung: Abschlussbericht des BMU-Förderprojektes „PyRO“, Hochschule Rosenheim, Rosenheim.

HAJALIGOL, M.R.; HOWARD, J.B.; LONGWELL, J.P.; PETERS, W. A. (1982): Product compositions and kinetics for rapid pyrolysis of cellulose. In: Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. Bd. 21, S. 457-465.

HORNE P. A.; WILLIAMS, P. T. (1996): Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. In: Fuel Bd. 75, S. 1051-1059.

KLAUBERT, H.; MEIER, D. (2002): Untersuchungen zur Wirbelschichtpyrolyse von Holzpartikeln. Bundesforschungsanstalt für Forst- u. Holzwirtschaft (247).

NUNN, T.R.; HOWARD, J.B.; LONGWELL, J.P.; PETERS, W.A. (1985): Product compositions and kinetics in the rapid pyrolysis of milled wood lignin. In: Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. Bd. 24, S. 844-852.

PURDY, K.R.; MARTIN, C.E.; CAMPBELL, S.J.; GARR, J.D.; GRAHAM, G.M.; KERR, C.P.; WYATT, M.L. (1990): Empirical model of slow pyrolysis of hardwood chips. In: Applied Biochemistry and Biotechnology Bd. 24/25, S. 49-65.

QUIZHUANG, Y.; BRAGE, C.; CHEN, G.; SJOSTROM, K. (1997): Temperature impact on the formation of tar from biomass pyrolysis in a free-fall reactor. In: Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Bd. 40-41, S. 481-489.

SADAKATA, M.; TAKAHASHI, K.; SAITO, M.; SAKAI, T. (1987): Production of fuel gas and char from wood, lignin and holocellulose by carbonization. In: Fuel Bd. 66, S. 1667-1671.

SCHNEIDER, M. (2003): Experimentelle und mathematische Modellierung der Festbettvergasung am Beispiel der Gleichstromvergasung von Holzhackschnitzeln – ein Beitrag zur Erhöhung der Prozesstransparenz: Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden.



Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsmodul bestehend aus schadstoffarmem Pelletbrenner und wartungsfreiem Freikolben-Stirlingmotor

Tania González Baquet¹, Datong Wu¹, Dietmar Steiner¹, Uwe Schnell², Heiko Jung²

Vorhaben: Mikro-Kraft-Wärme-Kopplungsmodul bestehend aus schadstoffarmem Pelletbrenner und wartungsfreiem Freikolben-Stirlingmotor für Haushaltsanwendungen (Pellet- μ KWK)

FKZ-Nr.: 03KB044

Laufzeit: 01.08.2010 – 31.12.2012

Zuwendungssumme: 519.737 €

Koordination:

¹ Robert Bosch GmbH

Zentralbereich Forschung und Vorausbildung zukünftige Systeme der Gebäudetechnik / Elektrochemische Systeme (CR/AEB1)
71701 Schwieberdingen

Unterauftragnehmer:

² Universität Stuttgart – Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

Kontakt:

Dr.-Ing. Tania González Baquet

Telefon: +49 (0)711 811 27721

E-Mail: Tania.GonzalezBaquet@de.bosch.com



Tania Gonzalez Baquet (Projektleiterin):

Wir haben mit diesem Projekt den Einsatz von Pelletbrennern für mittlere und kleinere KWK-Anlagen erforscht und ein sauberes Pellet-Stirling-System entwickelt, das ein hohes CO₂-Einsparpotenzial aufweist.

**Zusammenfassung**

Das Pellet- μ KWK-System mit einem wartungsfreien Freikolben-Stirlingmotor als ein Hausenergie-System ist eine Alternative für Endkunden, sobald Erdgas-Stirlingmotoren auf dem Markt kostengünstig verfügbar sind. Der Pellet-Stirling ist nahezu CO₂ neutral.

Der Pelletbrenner mit sauberer Verbrennung für den 1-kW-Freikolben-Stirlingmotor wurde im Rahmen des Projektes entwickelt. Die Emissionen (Staub: 6 – 9 mg/m³, Ziel: < 20 mg/m³, CO: < 120 mg/m³, Ziel: < 250 mg/m³, bei 13 % O₂) erfüllen die nach 1. BImSchV für die Stufe 2 ab 2015 festgelegten Anforderungen (CO < 400 mg/m³ und Staub < 20 mg/m³, bezogen auf 13 % O₂) für kleine und mittlere Feuerungsanlagen. Anhand des eingesetzten modellbasierten prädiktiven Luftzahlreglers werden die Verbrennungsluftzahl und die Pelletzufuhr konstant gehalten, damit die Emissionsspitzen effektiv unterdrückt werden. Der Druckverlust im Pelletbrennersystem wurde untersucht und minimiert.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Gas- und Pelletverbrennung ist die Ablagerung der im Biomasse-Verbrennungsprozess freigesetzten gasförmigen, anorganischen Mineralien (z.B. K₂O, CaO) aus der Holzasche. Mit einer neuartigen indirekten Beheizung des Stirling-Erhitzerkopfs wird die Verschlackung des Stirlingmotor-Wärmeübertragers durch organische und anorganische Partikel des Abgases der Pelletverbrennung vermieden. Dabei sorgt ein Strahler-Wärmeübertrager für die räumliche Trennung zwischen der Pelletflamme und dem Stirling-Erhitzerkopf. Der auf den eingesetzten Brennstoff bezogene Wirkungsgrad für die Stromerzeugung liegt bei Nennlastbetrieb mit 1 kW elektrischer Leistung bei etwa 10,3 %. Der elektrische Wirkungsgrad lässt sich mittels Luftvorwärmung (auf 500 °C) beim Pelletbrenner um etwa 2 %-Punkte steigern. Das Nutzen/Aufwand-Verhältnis der Luftvorwärmung ist zu berücksichtigen. Der temperaturbeständige SiC-Strahler ist für den Strahler-Wärmeübertrager geeignet (Emissionsgrad: 0,8 – 0,9, Wärmeleitfähigkeit um Faktor 2 – 3 besser als Stahl und gute Thermoschockbeständigkeit).

Das CFD-Verbrennungsmodell vom Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik an der Universität Stuttgart konnte durch den Vergleich mit experimentellen Daten validiert und seine Eignung zur realen Abbildung des Brennkammerverhaltens bei der Veränderung unterschiedlicher Betriebsparameter nachgewiesen werden. Anhand des Modells wurden die Einflüsse mehrerer betrieblicher wie geometrischer Einflussgrößen auf die Wärmeübertragung, auf den Strahlerschild sowie die zu erwartenden Emissionen untersucht. Dabei wurde gezeigt, dass diese Größen einen starken Einfluss auf die Ausprägung der Zirkulationsströmung und damit auf den Mischungszustand der Brennkammer haben. Dies wirkt sich direkt auf die CO-Emissionen des Pellet-Ofens aus.

Das Marktpotenzial und die CO₂-Einsparung des Pellet-Stirling-Systems wurden gegenüber anderer Hausenergiesysteme (Gasbrennwertkessel, Gas-Stirling, Pellet-Kessel) für Bestandshäuser und Neubauten mittels der Systemsoftware untersucht. Die Amortisationszeit für Bestandshäuser ist etwa 30 % kürzer als für Neubauten. Im Vergleich zu einem Gasbrennwertkessel beträgt die jährliche CO₂-Einsparung 12 – 13 t für ein Bestandshaus.

Abstract

The pellet micro combined heat and power plant (μ CoGen) system with a maintenance free piston Stirling engine as a home energy system is an alternative for consumers if the natural gas Stirling engines are at low costs available in the market. The pellet Stirling is almost CO₂ neutral.

The pellet burner with clean combustion for the 1 kW free piston Stirling engine was developed within the project. The emissions (dust < 6 – 9 mg/m³, target < 20 mg/m³, CO < 120 mg/m³, target < 250 mg/m³, both at 13 % O₂) meet the requirements of the 1st BImSchV, stage 2 valid after 2015 for small and medium-sized combustion plants Using the established model-based predictive controller, lambda (air to fuel ration control) and pellet feed are kept constant so that the emission peaks can be effectively suppressed. The pressure drop in the pellet burner system has been studied and minimized.

A significant difference between the combustion of natural gas and pellet is the deposition of the released inorganic minerals (such as K₂O, CaO), constituents of wood ashes. With a new indirect heating of the Stirling heater head the slagging of the Stirling engine heat exchanger by organic and inorganic particles of the exhaust gas of the pellet combustion is avoided. This is achieved by a radiator heat exchanger providing the spatial separation between the pellet flame and the Stirling heater head. The efficiency based on the fuel used for electricity generation is about 10.3 % with the engine at rated load (1 kW). The electrical efficiency can be increased by about 2 % with preheating the air (to 500 °C) at the pellet burner. The cost / benefit ratio of preheating the air has to be considered. SiC is a suitable material for the radiator heat exchanger (emissivity: 0.8 to 0.9, thermal conductivity by a factor of 2 – 3 better than steel and good thermal shock resistance). Furthermore, a cost-function analysis of components was carried out to illustrate the potential for the entire system costs.

The CFD combustion model from the Institute of Combustion and Power Plant Technology at the University of Stuttgart was validated by comparing with experimental data. Thus its suitability to predict the combustion behavior upon changing various operating parameters was demonstrated. Based on the model, the influences of several operating parameters on the heat transfer to the radiator heat exchanger and the expected emissions were investigated. It was shown that these parameters strongly affect the circulation characteristic and hence the mixing in the combustion chamber. This has a direct impact on the CO emissions. The market potential and the CO₂ reduction potential of the Pellet-Stirling system were examined against other home energy systems (gas condensing boilers, gas Stirling, pellet boiler) by a calculating tool, both for new and existing buildings. The amortization time for existing buildings is about 30 % shorter than in new buildings. Compared to a gas condensing boilers 12 – 13 t of CO₂ can be reduced in a new building.

Einleitung

Eine μ KWK-Anlage auf Pellet-Basis könnte allein 2020 in Deutschland zur jährlichen Einsparung von CO_2 -Emissionen in der Größenordnung von sechs Tonnen für Neubauten und 12 Tonnen für Bestandshäuser gegenüber einem Brennwertkessel beitragen (Systemfinder 2012, internes Berechnungstool). Bei nachhaltiger Verwertung des Restholzes, d. h. kein zusätzlicher Anbau von Energiepflanzen, weitere Primärnutzung des Holzes als Baustoff etc., stehen in EU25 3000 PJ p. a. aus Biomasse zur Verfügung. Das entspricht 10 % bis 15 % des Heizungs- und Warmwasser-Bedarfs in EU in 2007.

Bisher war die kombinierte Erzeugung von Wärme und Strom auf größere Anlagen beschränkt. μ KWK auf Basis der Gasverbrennung mit Stirling Freikolben- oder Kurbelwellenmotor werden zurzeit von führenden Heizgeräteherstellern in Europa erprobt. Die Pelletverbrennung wird bisher in Haushaltsanlagen lediglich als eine konventionelle Heizungsanlage, ähnlich der Gas- oder Ölheizung verwendet. Für die Haushaltsanwendungen eignet sich die Pelletverbrennung in Kombination mit einem Stirlingmotor. Bislang sind Biomasse- μ KWK-Systeme nicht als Serienprodukte auf dem Markt verfügbar. Die Pellet-Stirling-Aktivität kann von dem Gas-Stirlingsystem hinsichtlich Robustheit, Kosten und Systemintegration profitieren.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Gasverbrennung und Pelletverbrennung ist die Ablagerung der im Biomasse-Verbrennungsprozess freigesetzten gasförmigen, anorganischen Mineralien (z. B. K_2O , CaO) aus der Holzasche. Bei der Kombination eines Stirlingmotors mit einem Pelletbrenner stellten Korrosion, Asche-Ablagerungen und die Verschlackung die Hauptprobleme dar.

Die technischen Herausforderungen in der Entwicklung von μ KWK-Systemen für Haushaltsanwendungen bestehen darin, eine schadstoffarme Biomasseverbrennung bei hohem Systemwirkungsgrad in einer kompakten Bauform zu realisieren, und gleichzeitig den Stirling-Erhitzerkopf vor Ablagerungen und Verschlackungen zu schützen. Diese Anforderungen verbunden mit einem wartungs- und verschleißfreien Betrieb und hoher Verfügbarkeit des Freikolben-Stirlingmotors stellen die Hauptaufgabe der Entwicklung dar.

Projektbeschreibung

Ziele und Maßnahmen im Überblick

Die Entwicklung des Pellet-Stirlings beinhaltet folgende Ziele und Maßnahmen:

Saubere Verbrennung.

- Emissionsarme Pelletverbrennung bei hohen Flammentemperaturen (bis zu 1200°C) und niedriger Luftzahl (1,3 bis 1,4)

Hohe Lebensdauer des Strahlers.

- Schutz des Stirling-Erhitzerkopfes vor Verschmutzung, Ablagerungen und Verschlackung aus der Pelletverbrennung, mittels Verwendung eines Strahlungskörpers (SiC oder anderer Keramik).
- Effiziente Wärmeübertragung vom Strahler zum Stirling-Erhitzerkopf mittels Wärmestrahlung.
- Materialuntersuchung für den Strahlerwärmetauscher aufgrund der Wechselwirkung mit Alkalien, die während Verbrennung gasförmig freigesetzt werden.

Hoher elektrischer Wirkungsgrad.

- Der auf dem eingesetzten Brennstoff bezogene Wirkungsgrad für die Stromerzeugung soll über 10 % bei der erzeugten elektrischen Leistung von 1 kW liegen.
- Der elektrische Wirkungsgrad lässt sich durch Luftvorwärmung erhöhen. Die Ablagerung oder Verschlackung am Reku-Wärmetauscher erfordert regelmäßige Reinigung. Das Nutzen/Aufwand-Verhältnis wird dafür anhand einer Modellrechnung dargestellt.

Erhöhung Markt- und CO_2 -Einsparungspotenzial.

- Das Markt- und CO_2 -Einsparungspotenzial des Pellet-Stirling-Systems für Hausanwendungen werden mittels der Systemsoftware analysiert.

Vorgehen

Mit einer neuartigen indirekten Beheizung des Stirlingerhitzerkopfes wird die Verschlackung des Stirling-Wärmeübertrager durch organische und anorganische Partikel des Abgases der Pelletverbrennung vermieden. Die indirekte Beheizung des Stirling-Erhitzerkopfes ist die Grundidee des Pellet-Stirlings (Abbildung 1). Dabei sorgt ein Strahler für die räumliche Trennung zwischen der Pelletflamme und dem Stirling-Erhitzerkopf. Durch die Installation eines Strahlungskörpers zwischen Flamme und Erhitzerkopf erhöht sich die Oberflächentemperatur des Strahlers flammenseitig auf eine Betriebstemperatur von $900 - 950^\circ\text{C}$. Dadurch kann die Kondensation der mineralischen Aerosole am Stirling-Erhitzerkopf vermieden und

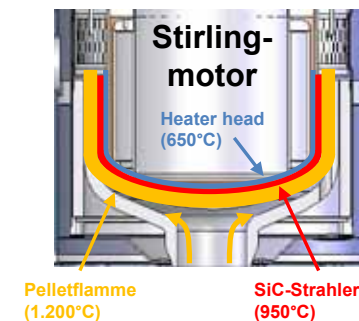


Abbildung 1: Konzept mit der indirekten Beheizung des Stirling-Erhitzerkopf über einen Strahler (z.B. über einen SiC-Strahler)

am Strahlungskörper minimiert werden. Die mineralische Ablagerung am Abgaswärmetauscher lässt sich über eine mechanische Vorrichtung wie bei einem Pelletkessel abreinigen. Die indirekte Beheizung des Stirling-Erhitzerkopfs ermöglicht eine Wärme- und Stromerzeugung mit einem breiten Spektrum unterschiedlicher biogener Brennstoffe.

Für den Pelletbrenner wird eine erhöhte Flammentemperatur (bis zu 1200 °C bei Luftzahl von 1,3 bis 1,4) angestrebt, um die erforderliche thermische Leistungseinkopplung am Stirling-Erhitzerkopf zu gewährleisten. Dies stellt eine besondere Herausforderung für die Entwicklung des Pelletbrenners dar, weil gängige Pelletkessel heute mit einer Luftzahl von ca. 1,8 – 2,5 betrieben werden.

Basierend auf der Entwicklung des Pelletbrenners wurde anschließend ein 1-kW-Freikolben-Stirlingmotor in den Pelletbrenner integriert und untersucht. Gegenüber dem Freikolbenprinzip sind die Kurbelwellen-Stirlingmotoren bedingt durch ihre spezifischen Maschinenkomponenten wartungsaufwändig. Durch das Konstruktionskonzept ermöglicht der Freikolben-Stirlingmotor einen wartungs- und verschleißfreien Betrieb über die gesamte Lebensdauer. In Abbildung 2 ist der Aufbau des Freikolben-Stirlingmotors mit dessen Hauptkomponenten dargestellt

Stirlingerhitzerkopf

Verdränger- und Arbeitskolben

Lineargenerator

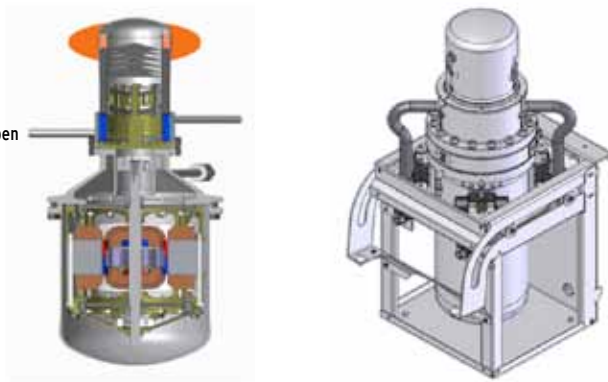


Abbildung 2: Links: Aufbau des Freikolben-Stirlingmotors, rechts: der Stirlingmotor Prototyp

Die von einigen Firmen verwendeten Kurbelwellen-Stirlingmotoren sind für die Stromerzeugung mit dem Pelletbrennstoff noch nicht ausgereift. Bei der Integration des Stirling-Erhitzerkopfes in die Pelletbrennkammer werden zwei Verfahren unterschieden: direkte Erwärmung und indirekte Erwärmung. Bei dem direkten Beheizen strömt das heiße Abgas direkt am Stirlingerhitzerkopf vorbei, wodurch es zur Wärmeübertragung kommt. Die Ascheablagerung und Verschlackung stellten sich bei verschiedenen Untersuchungen (Mayer 2008, IZES 2008, Groß 2010, Sunmaschine-Pellets 2009) als Problem dar.

Bei der hier favorisierten Lösung des indirekten Beheizens wird der Stirling-Erhitzerkopf ablagerungsfrei beheizt. Durch die hohe Strahler-Temperatur (bei 950 °C) lässt sich das Ablagerungsproblem am Strahler effektiv vermeiden. In dem Fall ist die Strahlungswärmeübertragung vom Strahler zum Stirling-Erhitzerkopf dominant gegenüber der konvektiven Wärmeübertragung.

Ergebnisse

Pelletbrenner

Die Pellet-Verbrennung wird in zwei Verbrennungsstufen aufgeteilt (Primärkammer: Vergaserstufe, Sekundärkammer: Verbrennung). Die primäre Vergaserzone und die sekundäre Verbrennungszone werden räumlich getrennt (Kaltschmitt et al. 2009). Für den Brenner werden zwei Gebläse eingesetzt. Die Sekundärluft wird mit einem Luftgebläse mit höherer Pressung über den Luftverteiler und die Düsen gefördert. Der Druckverlust bei den Düsen und bei dem Luftverteiler muss optimiert werden, um den Stromverbrauch des Gebläses zu minimieren. Ein saugendes Gebläse auf der Abgasseite versorgt die Primärluft. Aus Sicherheitsgründen wird ein Unterdrucksystem bevorzugt, um einen möglichen Abgasaustritt aus der Primärzone zu vermeiden.

Das Brennstoff- und Aschenhandling ist mit der Unterschubfeuerung besser gewährleistet (inkl. Asche-Abreinigungsmöglichkeit) als mit der Abwurfffeuerung. In Abbildung 8 wird der Aufbau des Pelletbrenners schematisch dargestellt. In der sekundären Brennkammer wird

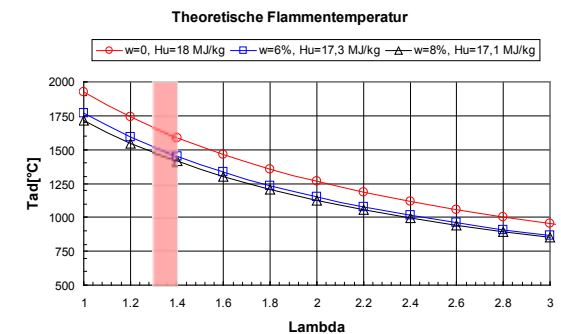


Abbildung 3: Adiabate Flammentemperatur in Abhängigkeit von Heizwert H_u und Wassergehalt w .

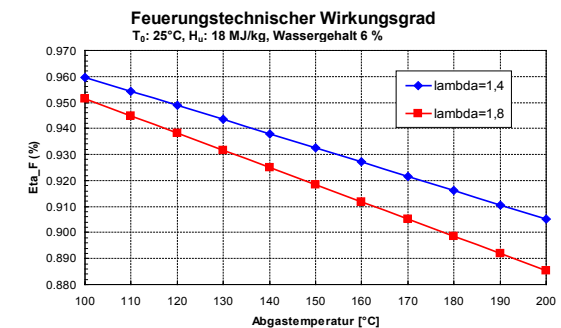


Abbildung 4: Der feuerungstechnische Wirkungsgrad in Abhängigkeit vom Abgasverlust für zwei verschiedene Verbrennungsluftzahlen

der Strahler integriert. Der enge Luftspalt zwischen der Brennkammerwand und dem Strahler beträgt einige Millimeter, um die dortige Strömungsgeschwindigkeit zu erhöhen und die Wärmeübertragung zu verstärken.

Eine tiefe Glutbett-Temperatur von 600 – 700 °C wird angestrebt, um die Freisetzung der in den Pellets enthaltenen Mineralien in Dampfform zu minimieren, da sie zur Ablagerung am Strahler und Wärmetauscher führen können. In die Sekundärbrennkammer wird ein Strahler mit dem Stirling-Erhitzerkopf integriert. Eine globale Luftzahl von 1,3 – 1,4 wird angestrebt. Dadurch soll die erforderliche Flammtemperatur von bis zu 1.200 °C für die Wärmeübertragung mit dem Strahler erreicht werden (Abbildung 3).

Ein weiterer Vorteil ist der höhere feuerungstechnische Wirkungsgrad bei der niedrigen Verbrennungsluftzahl (Abbildung 4). Im Vergleich liegt die Luftzahl eines konventionellen Pelletkessels typischerweise bei 1,8 – 2,5.

Die Sekundärluft wird über Luftdüsen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit eingebracht, wobei durch lokale Abgasrezirkulation die vollständige Durchmischung trotz niedriger Luftzahl erreicht wird. Im stationären Betrieb wird eine homogene Flammentemperaturverteilung in der Sekundär-Brennkammer durch Verwirbelung und Turbulenz der Strömung und durch lokale Abgasrezirkulation erzielt, wodurch die Schadstoffemissionen (CO, Ruß und thermische NO_x) verringert werden können. Das Feuerungsprinzip ist seit 15 Jahren in Gas- und Öl-Feueranlagen eingesetzt worden.

Der auf dem Injektionsprinzip beruhende Pelletbrenner weist niedrige Schadstoffemissionen auf. Die Staubemissionen des Pellet-Stirlingbrenners liegen im Leistungsbereich von 4 bis 10 kW deutlich niedriger als 10 mg/m³ (13 % O₂, Ziel: < 20 mg/m³). Die CO-Werte liegen im Bereich 20 bis 120 mg/m³ (13 % O₂, Ziel: < 250 mg/m³) bei einem stationären Betriebszustand. Die Untersuchungen zeigen, dass sich der Verbrennungsprozess durch die Düsenoptimierung verbessern lässt (Abbildung 5).

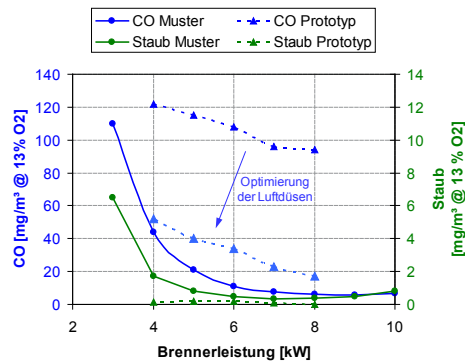


Abbildung 5: Die Emissionen in Abhängigkeit von der Brennerleistung bei zwei Brennern mit unterschiedlicher Brennkammerdämmung

Das Regelungskonzept (prädiktive Regelung) wird auf der Basis der Untersuchungen identifiziert und für diese Anwendung festgelegt. In der Start- und Stoppphase wird die Verbrennungsregelung ebenfalls untersucht und optimiert, um die Schadstoffemissionen auch im instationären Zustand effektiv zu reduzieren.

Indirekte Beheizung mit einem SiC-Strahler

Um den Stirling-Erhitzerkopf vor Ablagerung und Korrosion zu schützen, wird das Konzept der indirekten Beheizung mittels eines Siliziumcarbid (SiC)-Strahlers untersucht und dessen Eignung geprüft. Die Mineralienablagerung (z.B. K₂O, CaO) werden durch die im Verbrennungsprozess freigesetzten gasförmigen, anorganischen Komponenten im Brennstoff verursacht. Angestrebt ist die indirekte Beheizung des Stirling-Erhitzerkopfs anstelle der direkten Beheizung, wobei die Wärmeübertragung von der Pelletflamme zum Stirlingkopf für die Leistung und für den Wirkungsgrad des Stirlingmotors von großer Bedeutung ist. Die Kondensation der oxidierten Mineralien tritt überwiegend im Temperaturbereich unter 700 °C auf. Durch die Installation eines Strahlungskörpers zwischen Flamme und Erhitzerkopf erhöht sich die Oberflächentemperatur des Strahlers flammenseitig auf eine Betriebstemperatur von 900 – 950 °C. Dadurch kann die Kondensation der mineralischen Aerosole am Stirling-Erhitzerkopf vermieden und am Strahlungskörper minimiert werden. Eine gezielte Abscheidung der Aerosole im Abgasweg mit einer automatischen Abreinigungsvorrichtung lässt sich analog zum Pelletkessel umsetzen.

Das temperaturbeständige SiC-Material weist gute thermische Eigenschaften als Strahler-Wärmetauscher auf: gute Strahlungseigenschaft (Emissionsgrad 0,8 – 0,9), hohe Wärmeleitfähigkeit (um Faktor 2 – 3 besser als Stahl) sowie eine hohe Temperatur- und Thermochockbeständigkeit.

In Tabelle 1 werden die physikalischen Größen des SiC-Werkstoffs gegenüber dem Edelstahlwerkstoff aufgelistet. Bei 1.000 °C liegt die Emissivität des SiC-Werkstoffs bei 0,88. Das Langzeitverhalten des SiC-Werkstoffs (Alkali-Beständigkeit bei höherer Betriebstemperatur) wird über Dauerlauf ermittelt.

Tabelle 1: Vergleich physikalischer Eigenschaften zwischen Edelstahl und SiC (Bosch, 2011)

Physikalische Größe		Edelstahl	Siliziumcarbid (SiC)
Emissivität	–	0,28 (24 °C)	
Daten für Stahl:		0,57 (232 °C)	
Stahl Type 316, poliert		0,66 (949 °C)	0,88 (1.000 °C)
Wärmekapazität	J/kgK	460 – 480	700 – 800
Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C	W/mK	18	80 – 150
Wärmeleitfähigkeit bei 1000 °C	W/mK	10 – 15	20 – 50
Max. Anwendungstemperatur in Luft	°C	800	1.600
Wärmeausdehnungskoeffizient 20 °C – 1.000 °C	10 ⁻⁶ /K	17	4 – 5

3D-CFD-Verbrennungssimulation

Um das wärmetechnische Verhältnis zwischen Verbrennung, Strahler und Stirling-Erhitzerkopf zu verstehen, wurde die 3D-CFD-Simulation mit einer vereinfachten Strahlergeometrie am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) durchgeführt (IFK, 2012). Das CFD-

Modell konnte für den Vollastfall durch den Vergleich mit experimentellen Daten validiert und seine Eignung zur realen Abbildung des Brennkammerverhaltens bei der Veränderung unterschiedlicher Betriebsparameter nachgewiesen werden. Anhand des Modells wurden die Einflüsse mehrerer betrieblicher wie geometrischer Einflussgrößen auf die Wärmeübertragung und auf das Strahlerschild sowie die zu erwartenden Emissionen untersucht (siehe Abbildung 6 und 8).

Eine Erhöhung der Sekundärlufttemperatur wirkt sich, zusätzlich zur verbesserten Reaktionskinetik, positiv auf den Mischungsprozess in der Brennkammer aus. Es konnte durch eine Parametervariation gezeigt werden, dass die Brennkammerisolation eine große Rolle bei den CO-Emissionen spielt. Eine gute thermische Isolation der Brennkammer ist notwendig, um möglichst geringe CO-Emissionswerte erzielen zu können. Die Beeinflussung des Strömungszustandes ist ebenfalls ausschlaggebend für die Erhöhung der CO-Emissionen z. B. bei einer Vergrößerung des Sekundärluft-Düsendurchmessers. Die daraus resultierende geringere Einströmgeschwindigkeit der Sekundärluft führt zu einer Abschwächung der Zirkulationsströmung und damit einer schlechteren Durchmischung der reaktiven Gasspezies mit dem Luftsauerstoff. Durch eine Vergrößerung des Düsendurchmessers um 20 % wird vom Modell ein Anstieg der CO-Emissionen um fast 90 % vorhergesagt.

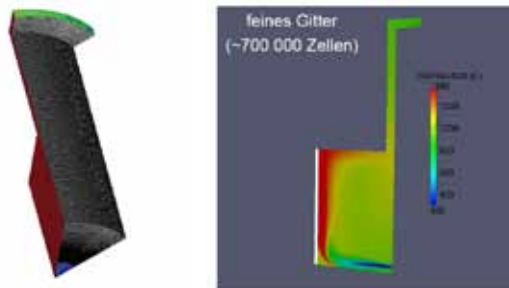


Abbildung 6: Rechengitter des Brennkammersegmentes und die simulierte Temperaturverteilung in der Brennkammer (IFK, 2012)

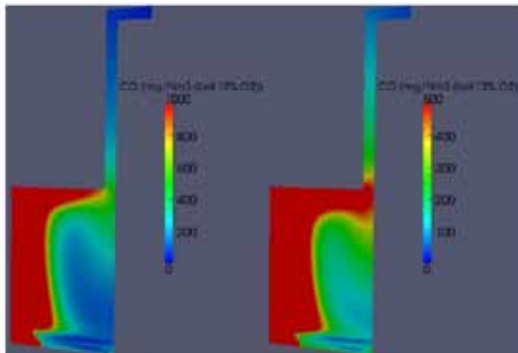


Abbildung 7: Rechenergebnis der CO-Verteilung in der Brennkammer (IFK, 2012)

Durch die Simulation wurden die Auslegungskriterien für den Pelletbrenner, um sowohl die saubere Pelletverbrennung in einer Kompaktbrennkammer als auch einen hohen Wirkungsgrad des Pellet-Stirlings zu erzielen, ermittelt.

Integration des Freikolben-Stirlingmotors in den Pelletbrenner

Der Pellet-Brenner wird in zwei Verbrennungszonen aufgeteilt (Primärkammer Vergaserstufe und Sekundärkammer Verbrennung). Die Luftzahl in der Primärkammer liegt bei 0,5. Die Sekundärluft wird über Luftdüsen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit einbracht, wobei durch lokale Abgasrezirkulation ein annähernder FLOX-Betrieb (flammenlose Oxidation) etabliert wird. Beim FLOX-Betrieb wird eine homogene Flammentemperaturverteilung in der Brennkammer durch starke Verwirbelung der Strömung und durch die lokale Abgasrezirkulation erzielt, wodurch die Schadstoffemissionen (CO, Partikel und thermische NO_x) verringert werden können.

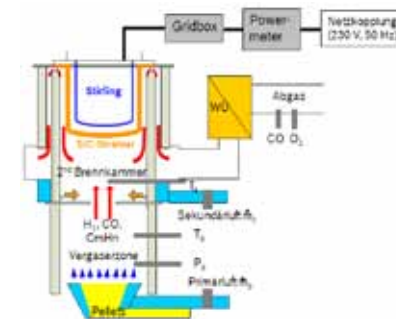


Abbildung 8: Aufbau des Teststandes



Abbildung 9: Der beheizte Strahler mit dem ausgefahrenen Stirlingmotor

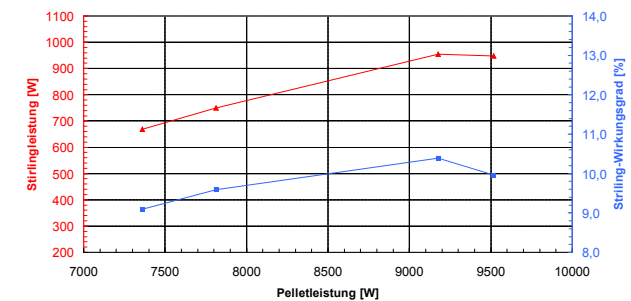


Abbildung 10: Die ins Netz eingespeiste elektrische Leistung (rot) und der Stirling-Wirkungsgrad (blau)

In Abbildung 8 wird der Aufbau des Pelletbrenners dargestellt. Die primäre Vergaserzone und die sekundäre Verbrennungszone werden durch eine Blende räumlich getrennt. In der sekundären Brennkammer wird der SiC-Strahler integriert. Der enge Luftspalt zwischen der Brennkammerwand und dem Strahler beträgt wenige Millimeter, um die Strömungsgeschwindigkeit zu erhöhen und die konvektive Wärmeübertragung dort zu verbessern. Die Sekundärluft wird mit einem Luftgebläse über Luftverteiler und Düsen gefördert. In der primären Vergaserzone herrscht ein leichter Unterdruck.

Die Flammentemperatur der Vergaserstufe liegt bei Nennleistung bei 1.000 °C. Die Luftversorgung verteilt sich momentan auf 40 % in der primären Vergaserstufe und 60 % in der sekundären Brennzona. Die Temperatur in der sekundären Brennkammer liegt bei etwa 1.200 °C (Abbildung 9).

In Abbildung 10 sind die ins Netz eingespeiste elektrische Leistung (rot) und der Stirling-Wirkungsgrad (blau) bezüglich des eingesetzten Pelletbrennstoffes dargestellt.

Bei der Brennerleistung von 9,2 kW beträgt die ins Netz eingespeiste Leistung 950 W. Der Wirkungsgrad liegt bei 10,3 %. Die Leistungsgrenze für den Stirlingmotor ist mit 1.000 W angegeben. Die im oberen Diagramm dargestellten Leistungen sind jedoch Nettoleistungen, von der die Verluste der Gridbox, schon abgezogen wurden. Der Stirlingmotor generiert bei 9,5 kW Brennerleistung leicht über 1.000 W.

Luftvorwärmung

Luftvorwärmung über einem Abgaswärmeübertrager wird bei KWK-Systemen eingesetzt, um den Brennstoffeinsatz zu reduzieren und somit den Wirkungsgrad für die Stromerzeugung zu erhöhen. Beim Pellet-Stirling-System lässt sich die Sekundärluft (50 % – 60 %) vorwärmen, da die Primärluft-Vorwärmung eine hohe Glutbett-Temperatur verursachen kann. Eine tiefe Glutbett-Temperatur von 600 – 700 °C vermindert die Freisetzung der in den Pellets enthaltenen Mineralien in Gasform, die zur Ablagerung am Strahler und Wärmetauscher führen können.

Um die Wirkungsgradsteigerung quantitativ ermitteln zu können, wurden Luft/Luft-Wärmetauscher-Modelle aufgestellt und die Abhängigkeit von den Wärmetauscherparametern (Volumen, Oberflächenvergrößerung, Druckverlust) analysiert. Abbildung 11 zeigt einen mehrschichtigen Luft/Luft-Wärmetauscher mit dreieckigen Kanälen.

Folgende Annahme wurde für die Berechnung getroffen: 8,4 kW Brennerleistung, Luftzahl = 1,3, 60 % Zuluft auf 500 °C zu erhitzen, heiße Abgastemperatur bei 850 °C, Stirling- η_{el} : 12 %.

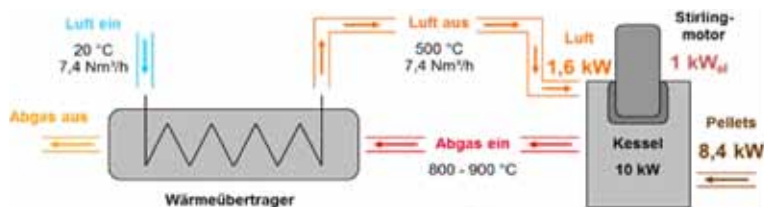


Abbildung 11: Das Konzept der Luftvorwärmung

In Abhängigkeit von der vorgewärmten Luftmenge beträgt die Wirkungsgradsteigerung maximal 4 %-Punkte. Bei Vorwärmung von 60 % Sekundärluft liegt der Gewinn bei etwa 2 %-Punkten.

Der Rohrbündel-Wärmeübertrager (RB-WÜ), dessen Auslegung nach dem NTU-Verfahren erfolgt, weist eine Länge von 350 mm, einen Durchmesser von 200 mm und eine Anzahl von 31 Innenrohren auf. Wegen der hohen Abgastemperatur von ca. 800 bis 900 °C und des korrosiven Abgases wird der RB-WÜ aus Edelstahl gefertigt. Die mit der DoE-Methode (Design of Experiments) durchgeführte Brennercharakterisierung liefert im Hinblick auf geringste Emissionen $\lambda_{ges} = 1,3$ und $\lambda_p = 0,3$ (Primärluft) als optimale Betriebsparameter für einen Brennstoffleistungsbereich von 2 bis 5 kW. Das entspricht einem Verhältnis von Primär- zu Sekundärluft von ungefähr 25 zu 75 %.

Die Untersuchung der CO- und Staub-Emissionen zeigt, dass sich mit dem Brenner eine schadstoffarme Verbrennung mit geringen Emissionswerten realisieren lässt und die Luftvorwärmung keinen erwähnenswerten Einfluss auf die Emissionen ausübt.

Bei einer Brennstoffleistung von z. B. 7,5 kW betragen die gemittelten CO-Emissionen etwa 10 mg/Nm³ und die gemittelten Staub-Emissionen etwa 7 mg/Nm³ (bei 13 Vol.-% O₂ im Abgas). Zum Vergleich: Die gesetzlichen Grenzwerte laut 1. BImSchV betragen ab 2015 für CO 400 mg/Nm³ und für Staub 20 mg/Nm³.

Der abgasseitige Druckverlust im RB-WÜ liegt bei einer Brennstoffleistung von 10 kW unter 5 Pa und ist als unkritisch anzusehen. Luftseitig liegt der Druckverlust im RB-WÜ bei einer Sekundärluftvorwärmung auf 500 °C unter 500 Pa.

Der RB-WÜ kann optimiert werden: Mit z. B. 10 zusätzlichen Innenrohren, also insgesamt 41, lässt sich der Wärmeübertragerwirkungsgrad auf ca. 80 % erhöhen (berechnet für eine verbesserte Wärmedämmung bei 10 kW).

Der Druckverlust des Wärmeübertragers ist abhängig von dem Wärmeübertrageraufbau. Der entstandene Druckverlust muss mit einem stärkeren Gebläse kompensiert werden. Ein weiterer kritischer Punkt ist die Abreinigung des Luft/Luft-Wärmetauschers (Wartung). Die ausgelegene Asche kann sich in dem Wärmeübertrager absetzen und die Kanäle zusetzen. Dadurch ist die Nutzung der Luftvorwärmung nur bedingt einsetzbar.

Systemintegration - CO₂-Einsparungspotenzial und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Durch Kraft-Wärme-Kopplung wird die klimaschutzeffiziente Erzeugung von Strom und Wärme erreicht. Pellets als erneuerbarer und nachwachsender Brennstoff werden für den Pellet-Stirling in den Hausanwendungen eingesetzt.

Vorraussetzungen

Das CO₂-Einsparungspotenzial des Pelletsystems wurde bezüglich der Investitionskosten gegenüber einem Gasbrennwertkessel (Referenz) über Systemsimulation für Einfamilienhäuser in Deutschland analysiert und berechnet. Für Neubau- und Bestandshäuser weist die CO₂-Einsparung aufgrund der jährlichen Betriebsdauer Unterschiede auf.

Für die Analyse der Systemeinbindungen wurden verschiedene Szenarien (Größe der Wärmespeicher für Heizung und Warmwasser, Energiepreisentwicklung, sowie Gebäudewärmebedarf) zu Grunde gelegt.

Das wärmegeführte System mit Stromeinspeisung ins öffentliche Netz wurde in der Systembetrachtung zu Grunde gelegt. Die Abbildung 12 zeigt die hydraulische Anbindung eines Gasbrennwertkessels in einem Einfamilienhaus als das Referenzsystem. Im Vergleich wurde der Pellet-Stirling als Wärmeerzeuger in das hydraulische System integriert. Die Jahressimulation wurde mit Hilfe eines Simulationswerkzeuges für zwei Integrationsvarianten (Abbildung 13, 14) durchgeführt. Grundlage hierfür waren die oben angegebenen Parameter.

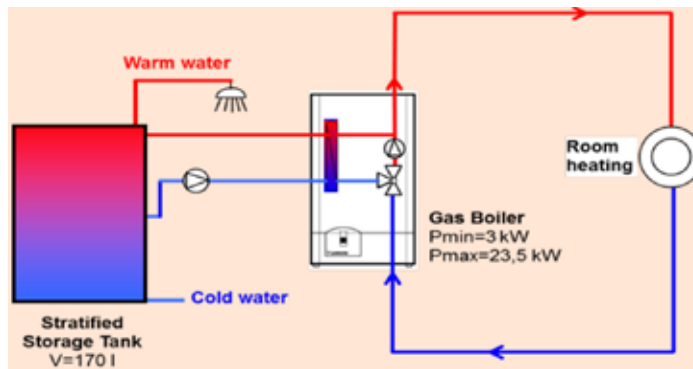


Abbildung 12: Referenzsystem mit einem Gasbrennwertkessel

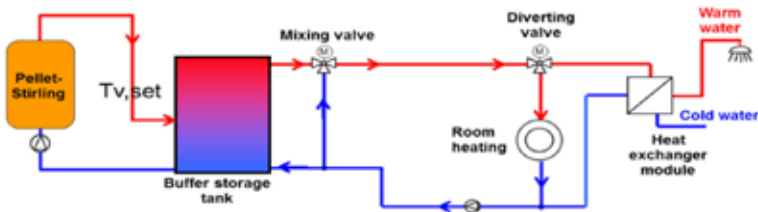


Abbildung 13: Integration des Pellet-Stirlings in ein Einfamilienhaus mit einem Wärmespeicher für Heizung und Trinkwassererwärmung (Variante 1)

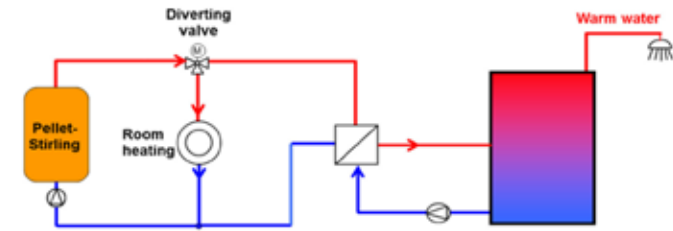


Abbildung 14: Integration des Pellet-Stirlings in ein Einfamilienhaus mit einem Trinkwasserspeicher (Variante 2)

Ergebnisse

In Abbildung 15 wurden die jährliche CO₂-Emissionen in Abhängigkeit von der Systemintegration für Neubauten und Bestandshäuser vergleichend dargestellt. Das Referenzsystem ist der Gasbrennwertkessel mit der gleichen Wärmeleistung.

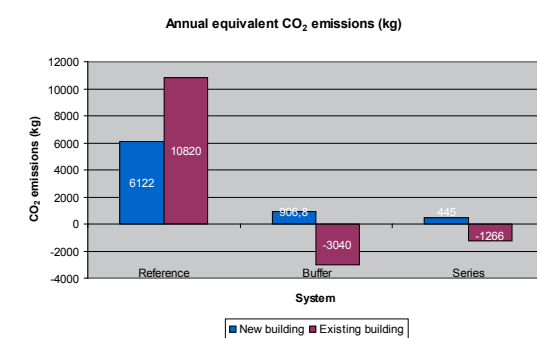


Abbildung 15: Vergleich des CO₂-Einsparpotenziales

Für Häuser des Bestandes sind Pelletheizungen vor allem dann interessant, wenn bereits die Möglichkeit der Pelletlagerung vorhanden ist. Dieser Fall ist in Häusern gegeben, die zurzeit eine Ölheizung und damit entsprechenden Platz für die Öltanks haben. Für Neubauten konkurriert die Pelletheizung vor allem mit Gas-Brennwertgeräten, zukünftig mit Gas betriebenen μ KWK und mit Wärmepumpen. Auf Grund der Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern und einer Reduzierung von 80 % der CO₂-Emissionen im Vergleich zur Wärmepumpe wird auch für Neubauten ein bestimmter Marktanteil erwartet.

Im Vergleich zu dem Gasbrennwertkessel wird beim Pellet-Stirling jährlich 5,2 – 5,6 t CO₂ für ein Neubauhaus eingespart, wobei die jährlichen Energiekosten vergleichbar sind. In Bestandshäusern weist der Pellet-Stirling hingegen eine längere Laufzeit für die Stromerzeugung aufgrund des deutlich höheren Heizwärmebedarfs der Bestandshäuser auf.

Im Vergleich zu einem Gasbrennwertkessel beträgt die jährliche CO₂-Einsparung 12 – 13 t für ein Bestandshaus. In Deutschland beträgt der Bestandshäuser-Anteil des gesamten privaten Haushaltsbereichs etwa 80 %.

Der Pellet-Stirling eignet sich wirtschaftlich besser für die Anwendung in Bestandshäusern durch seine lange Betriebszeit.

Für detaillierte Informationen ist auf den vollständigen Projektbericht zurückzugreifen: <https://www.energetische-biomassennutzung.de/de/vorhaben/liste-aller-vorhaben/details/projects/114.html>

Literatur

Systemfinder 2012, Bosch-internes Berechnungstool.

MAYER Cie. GmbH Co (2008): CO₂-neutrale Stromerzeugung mittels biogener Brennstoffe in kleinen dezentralen Anlagen, Förderprojekt 99NR001-F-S.

IZES (2008): Endbericht „Monitoring des ersten Feldtests zweier Scheitholzkessel mit Stirlingmotor“, Förderprojekt FKZ 220 176 05, Saarbrücken 2009.

GROSS, B. (2010): NANOSTIR – Wärme, Kälte, Strom aus einer Anlagentechnik, Deutscher Stirling Kongress in Stuttgart, 25.02.2010.

RENEXPO (2009): Die Sunmaschine-Pellets, Augsburg 24.09.2009.

KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.; HOFBAUER, H. (Hrsg.) (2009): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer

BOSCH-INTERNE DIPLOMARBEIT (2010) : Aufbau und Charakterisierung eines Holzpelletbrenners, CR/AEB1, 07.2010.

BOSCH-INTERNE DIPLOMARBEIT (2011) : Entwurf und Implementierung eines modellbasierten prädiktiven Reglers für die saubere Biomasseverbrennung, CR/AEB1, 08.2011.

BOSCH (2011): Interner Bericht.

IFK (2012): Dreidimensionale Numerische Simulation der Sekundär-Brennkammer einer Pellet-Feuerung zum Antrieb eines Freikolben-Stirlingmotors (Pellet- μ KWK), Bericht vom Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK), Universität Stuttgart.

BOSCH-INTERNE MASTERARBEIT (2011): Energetische Charakterisierung eines Holzpellet-Stirling-Systems mit 1 kW elektrischer Leistung, CR/AEB1, 07.2011.

BOSCH-INTERNE BACHELORARBEIT (2011): Untersuchung des Luftvorwärmungskonzepts für Pellet-Stirling, CR/AEB1.

Veröffentlichungen

Statusseminar des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassennutzung“, Berlin 11. - 12.10.2010.

Statuskolloquium des BMU-Förderprogramms „Energetische Biomassennutzung“, Potsdam 08. - 09.11.2011.

Patentanmeldungen

Schutzrecht DE 202010011591U (02.12.2010): Vorrichtung zum Beheizen eines Wärmetauschers einer Wärmekraftmaschine sowie Verbrennungsheizanlage mit Wärmekraftmaschine.

Schutzrecht DE 102011102811 (06.12.2012): Verfahren zur Reduzierung von Brennstoffablagerungen an einem Wärmetauscher.

Schutzrecht DE 102011108633 (06.12.2012): Vorrichtung und Verfahren zur Vermeidung von Ablagerungen an einem Wärmetauscher.

Schutzrecht DE 102012021799 (08.05.2014): Heizungsanordnung und Verfahren zur optimierten Verbrennung von Biomasse.

Die Schriftenreihe des Förderprogramms



- 01 Landschaftspflegematerial, 2011.
- 02 Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung, 2011.
- 03 Basisinformationen zur Entwicklung des Biokraftstoffsektors bis 2011, 2012.
- 04 Methodenhandbuch Stoffstromorientierte Bilanzierung der Klimagasemissionen, 2012.
- 05 Innovative Konzepte für die energetische Nutzung von biogenen Reststoffen, 2012.
- 06 Brückenschlag nach Osteuropa: Biomassepotenziale und -nutzungsoptionen in Russland, Weißrussland und der Ukraine, 2012.
- 07 Messmethodensammlung Biogas: Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich, 2012.
- 08 Messmethodensammlung Feinstaub: Methodenvorschlag zur Feinstaubmessung an Feuerungsanlagen für feste biogene Brennstoffe, 2014.
- 09 Konferenzband Energetische Biomassenutzung: Neue Technologien und Konzepte für die Bioenergie der Zukunft, 2013.
- 10 Grünlandenergie. Praxishinweise für die Entwicklung von Gras und Schilf basierten Nutzungskonzepten zur Energiegewinnung, 2013.
- 11 Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlagen Teil 1, 2014.
- 12 Effizient, umweltverträglich, dezentral. Neue Konzepte für die Nutzung von biogenen Festbrennstoffen Teil 1, 2013.
- 13 Alternative Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen aus Reststoffen, 2013.
- 14 Messen und Bilanzieren an Holzvergasungsanlagen (in Vorbereitung).
- 15 Festschrift - Konferenz 5 Jahre Förderprogramm „Energetische Biomassenutzung“: Wege zur effizienten Bioenergie, 2014.
- 16 Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlagen Teil 2, 2014.



www.energetische-biomassenutzung.de

ISSN: 2199-2762

Gefördert durch



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Projekträger



Programmbegleitung



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages